

上帝掷骰子吗——量子物理史话

作者：castor_v_pollux 整理：Lionel_Ho 原文出处：新浪论坛



| | |
|---------------------|----|
| 上帝掷骰子吗——量子物理史话..... | 1 |
| 序..... | 4 |
| 第一章 黄金时代..... | 4 |
| 1-1 | 4 |
| 1-2 | 6 |
| 1-3 | 8 |
| 1-4 | 10 |
| 1-5 | 12 |
| 第二章 乌云..... | 14 |
| 2-1 | 14 |
| 2-2 | 17 |
| 2-3 | 19 |
| 2-4 | 21 |
| 2-5 | 24 |
| 第三章 火流星..... | 26 |
| 3-1 | 26 |
| 3-2 | 27 |
| 3-3 | 30 |
| 3-4 | 32 |
| 3-5 | 34 |
| 第四章 白云深处..... | 37 |
| 4-1 | 37 |
| 4-2 | 40 |
| 4-3 | 41 |
| 4-4 | 44 |
| 第五章 曙光..... | 47 |
| 5-1 | 47 |
| 5-2 | 49 |
| 5-3 | 52 |
| 5-4 | 55 |
| 5-5 | 58 |
| 第六章 大一统..... | 60 |
| 6-1 | 60 |
| 6-2 | 61 |
| 6-3 | 64 |
| 6-4 | 67 |
| 6-5 | 70 |
| 第七章 不确定性..... | 73 |
| 7-1 | 73 |
| 7-2 | 76 |
| 7-3 | 79 |
| 7-4 | 82 |
| 7-5 | 85 |
| 第八章 论战..... | 87 |

| | |
|------------------|-----|
| 8-1 | 87 |
| 8-2 | 90 |
| 8-3 | 93 |
| 8-4 | 97 |
| 8-5 | 100 |
| 第九章 测量问题 | 104 |
| 9-1 | 104 |
| 9-2 | 106 |
| 9-3 | 109 |
| 9-4 | 113 |
| 9-5 | 116 |
| 第十章 不等式 | 119 |
| 10-1 | 119 |
| 10-2 | 123 |
| 10-3 | 126 |
| 10-4 | 129 |
| 10-5 | 132 |
| 第十一章 上帝的判决 | 136 |
| 11-1 | 136 |
| 11-2 | 139 |
| 11-3 | 141 |
| 11-4 | 144 |
| 11-5 | 146 |
| 第十二章 新探险 | 149 |
| 12-1 | 149 |
| 12-2 | 152 |
| 12-3 | 155 |
| 12-4 | 159 |
| 12-5 | 163 |
| 尾声 | 166 |
| 附录 | 167 |
| 关于双缝干涉 | 167 |
| 关于延迟实验 | 170 |
| 量子力学发展大事记 | 171 |
| 后记 | 173 |
| 主要参考资料: | 174 |

序

如果要评选物理学发展史上最伟大的那些年代，那么有两个时期是一定会入选的：17 世纪末和 20 世纪初。前者以牛顿《自然哲学之数学原理》的出版为标志，宣告了现代经典物理学的正式创立；而后者则为我们带来了相对论和量子论，并最彻底地推翻和重建了整个物理学体系。所不同的是，今天当我们再谈论起牛顿的时代，心中更多的已经只是对那段光辉岁月的怀旧和祭奠；而相对论和量子论却仍然深深地影响和困扰着我们至今，就像两颗青涩的橄榄，嚼得越久，反而更加回味无穷。

我在这里先要给大家讲的是量子论的故事。这个故事更像一个传奇，由一个不起眼的线索开始，曲径通幽，渐渐地落英缤纷，乱花迷眼。正在没个头绪处，突然间峰回路转，天地开阔，如河出伏流，一泄汪洋。然而还未来得及一览美景，转眼又大起大落，误入白云深处不知归路……量子力学的发展史是物理学上最激动人心的篇章之一，我们会看到物理大厦在狂风暴雨下轰然坍塌，却又在熊熊烈焰中得到了洗礼和重生。我们会看到最革命的思潮席卷大地，带来了让人惊骇的电闪雷鸣，同时却又展现出震撼人心的美丽。我们会看到科学如何在荆棘和沼泽中艰难地走来，却更加坚定了对胜利的信念。

量子理论是一个复杂而又难解的谜题。她像一个神秘的少女，我们天天与她相见，却始终无法猜透她的内心世界。今天，我们的现代文明，从电脑，电视，手机到核能，航天，生物技术，几乎没有哪个领域不依赖于量子论。但量子论究竟带给了我们什么？这个问题至今却依然难以回答。在自然哲学观上，量子论带给了我们前所未有的冲击和震动，甚至改变了整个物理世界的基本思想。它的观念是如此地革命，乃至最不保守的科学家都在潜意识里对它怀有深深的惧意。现代文明的繁盛是理性的胜利，而量子论无疑是理性的最高成就之一。但是它被赋予的力量太过强大，以致有史以来第一次，我们的理性在胜利中同时埋下了能够毁灭它自身的种子。以致量子论的奠基人之一玻尔（niels bohr）都要说：“如果谁不为量子论而感到困惑，那他就没有理解量子论。”

掐指算来，量子论创立至今已经超过 100 年，但它的一些基本思想却仍然不为普通的大众所熟知。那么，就让我们再次回到那个伟大的年代，再次回顾一下那场史诗般壮丽的革命，再次去穿行于那惊涛骇浪之间，领略一下晕眩的感觉吧。我们的快艇就要出发，当你感到恐惧或者震惊时，请务必抓紧舷边。但大家也要时刻记住，当年，物理史上最伟大的天才们也走过同样的航线，而他们的感觉，和我们是一模一样的。

第一章 黄金时代

1-1

我们的故事要从 1887 年的德国开始。位于莱茵河边的卡尔斯鲁厄是一座风景秀丽的城市，在它的城中心，矗立着著名的 18 世纪的宫殿。郁郁葱葱的森林和温暖的气候也使得这座小城成为了欧洲的一个旅游名胜。然而这些怡人的景色似乎没有分散海因里希·鲁道夫·赫兹（heinrich rudolf hertz）的注意力：现在他正在卡尔斯鲁厄大学的一间实验室里专心致志地摆弄他的仪器。那时候，赫兹刚刚 30 岁，也许不会想到他将在科学史上成为和他的老师赫耳姆霍兹（hermann von helmholtz）一样鼎鼎有名的人物，不会想到他将和卡尔·本茨（carl benz）一样成为这个小城的骄傲。现在他的心思，只是完完全全地倾注在他的那套装置上。

赫兹的装置在今天看来是很简单的：它的主要部分是一个电火花发生器，有两个相隔很近的小铜球作为电容。赫兹全神贯注地注视着这两个相对而视的铜球，然后合上了电路开关。顿时，电的魔力开始在这个简单的系统里展现出来：无形的电流穿过装置里的感应线圈，并开始对铜球电容进行充电。赫兹冷冷地注视着他的装置，在心里面想象着电容两段电压不断上升的情形。在电学的领域攻读了那么久，赫兹对自己的知识是有充分信心的，他知道，随着电压的上升，很快两个小球之间的空气就会被击穿，然后整个系统就会形成一个高频的振荡回路（lc 回路），但是，他现在想要观察的

不是这个。

果然，过了一会儿，随着细微的“啪”的一声，一束美丽的蓝色电花爆开在两个铜球之间，整个系统形成了一个完整的回路，细小的电流束在空气中不停地扭动，绽放出幽幽的荧光。

赫兹反而更加紧张了，他盯着那串电火花，还有电火花旁边的空气，心里面想象了一幅又一幅的图景。他不是要看这个装置如何产生火花短路，他这个实验的目的，是为了求证那虚无缥缈的“电磁波”的存在。那是一种什么样的东西啊，它看不见，摸不着，到那时为止谁也没有见过，验证过它的存在。可是，赫兹是坚信它的存在的，因为它是麦克斯韦（maxwell）理论的一个预言。而麦克斯韦理论……哦，它在数学上简直完美得像一个奇迹！仿佛是上帝的手写下的一首诗歌。这样的理论，很难想象它是错误的。赫兹吸了一口气，又笑了：不管理论怎样无懈可击，它毕竟还是要通过实验来验证的呀。他站在那里看了一会儿，在心里面又推想了几遍，终于确定自己的实验无误：如果麦克斯韦是对的话，那么在两个铜球之间就应该产生一个振荡的电场，同时引发一个向外传播的电磁波。赫兹转过头去，在实验室的另一边，放着一个开口的铜环，在开口处也各镶了一个小铜球。那是电磁波的接收器，如果麦克斯韦的电磁波真的存在的话，那么它就会穿越这个房间到达另外一端，在接收器那里感生一个振荡的电动势，从而在接收器的开口处也激发出电火花来。

实验室里面静悄悄的，赫兹一动不动地站在那里，仿佛他的眼睛已经看见那无形的电磁波在空间穿越。铜环接受器突然显得有点异样，赫兹简直忍不住要大叫一声，他把自己的鼻子凑到铜环的前面，明明白白地看见似乎有微弱的火花在两个铜球之间的空气里闪烁。赫兹飞快地跑到窗口，把所有的窗帘都拉上，现在更清楚了：淡蓝色的电花在铜环的缺口不断地绽开，而整个铜环却是一个隔离的系统，既没有连接电池也没有任何的能源来源。赫兹注视了足足有一分钟之久，在他眼里，那些蓝色的火花显得如此的美丽。终于他揉了揉眼睛，直起腰来：现在不用再怀疑了，电磁波真真实实地存在于空间之中，正是它激发了接收器上的电火花。他胜利了，成功地解决了这个 8 年前由柏林普鲁士科学院提出悬赏的问题；同时，麦克斯韦的理论也胜利了，物理学的一个新高峰——电磁理论终于被建立起来。伟大的法拉第（michael faraday）为它打下了地基，伟大的麦克斯韦建造了它的主体，而今天，他——伟大的赫兹——为这座大厦封了顶。

赫兹小心地把接受器移到不同的位置，电磁波的表现和理论预测的丝毫不爽。根据实验数据，赫兹得出了电磁波的波长，把它乘以电路的振荡频率，就可以计算出电磁波的前进速度。这个数值精确地等于 30 万公里/秒，也就是光速。麦克斯韦惊人的预言得到了证实：原来电磁波一点都不神秘，我们平时见到的光就是电磁波的一种，只不过它的频率限定在某一个范围内，而能够为我们所见到罢了。

无论从哪一个意义上来说，这都是一个了不起的发现。古老的光学终于可以被完全包容于新兴的电磁学里面，而“光是电磁波的一种”的论断，也终于为争论已久的光本性的问题下了一个似乎是不可推翻的定论（我们马上就要去看看这场旷日持久的精彩大战）。电磁波的反射、衍射和干涉实验很快就做出来了，这些实验进一步地证实了电磁波和光波的一致性，无疑是电磁理论的一个巨大成就。

赫兹的名字终于可以被闪光地镌刻在科学史的名人堂里，可是，作为一个纯粹的严肃的科学家，赫兹当时却没有想到他的发现里面所蕴藏的巨大的商业意义。在卡尔斯鲁厄大学的那间实验室里，他想的只是如何可以更加靠近大自然的终极奥秘，根本没有料到他的实验会带来一场怎么样的时代革命。赫兹英年早逝，还不到 37 岁就离开了这个他为之醉心的世界。然而，就在那一年，一位在伦巴底度假的 20 岁意大利青年读到了他的关于电磁波的论文；两年后，这个青年已经在公开场合进行了无线电的通讯表演，不久他的公司成立，并成功地拿到了专利证。到了 1901 年，赫兹死后的第 7 年，无线电报已经可以穿越大西洋，实现两地的实时通讯了。这个来自意大利的年轻人就是古格列尔莫·马可尼（guglielmo marconi），与此同时俄国的波波夫（aleksandr popov）也在无线通讯领域做了同样的贡献。他们掀起了一场革命的风暴，把整个人类带进了一个崭新的“信息时代”。不知赫兹如果身后有知，又会做何感想？

但仍然觉得赫兹只会对此置之一笑。他是那种纯粹的科学家，把对真理的追求当作人生最大的价值。恐怕就算他想到了电磁波的商业前景，也会不屑去把它付诸实践的吧？也许，在美丽的森林和湖泊间散步，思考自然的终极奥秘，在

秋天落叶的校园里，和学生探讨学术问题，这才是他真正的人生吧。今天，他的名字已经成为频率这个物理量的单位，被每个人不断地提起，可是，或许他还会嫌我们打扰他的安宁呢？

1-2

上次我们说到，1887年，赫兹的实验证实了电磁波的存在，也证实了光其实是电磁波的一种，两者具有共同的波的特性。这就为光的本性之争画上了一个似乎已经是不可更改的句号。

说到这里，我们的故事要先回一回头，穿越时空去回顾一下有关于光的这场大战。这也许是物理史上持续时间最长，程度最激烈的一场论战。它几乎贯穿于整个现代物理的发展过程中，在历史上烧灼下了永不磨灭的烙印。

光，是每个人见得最多的东西（“见得最多”在这里用得真是一点也不错）。自古以来，它就被理所当然地认为是这个宇宙最原始的事物之一。在远古的神话中，往往是“一道亮光”劈开了混沌和黑暗，于是世界开始了运转。光在人们的心目中，永远代表着生命，活力和希望。在《圣经》里，神要创造世界，首先要创造的就是光，可见它在这个宇宙中所占的独一无二的地位。

可是，光究竟是一种什么东西？或者，它究竟是不是一种“东西”呢？

远古时候的人们似乎是不把光作为一种实在的事物的，光亮与黑暗，在他们看来只是一种环境的不同罢了。只有到了古希腊，科学家们才开始好好地注意起光的问题来。有一样事情是肯定的：我们之所以能够看见东西，那是因为光在其中作用的结果。人们于是猜想，光是一种从我们的眼睛里发射出去的东西，当它到达某样事物的时候，这样事物就被我们所“看见”了。比如恩培多克勒（*empedocles*）就认为世界是由水、火、气、土四大元素组成的，而人的眼睛是女神阿芙罗狄忒（*aphrodite*）用火点燃的，当火元素（也就是光。古时候往往光、火不分）从人的眼睛里喷出到达物体时，我们就得以看见事物。

但显而易见，这种解释是不够的。它可以说明为什么我们睁着眼可以看见，而闭上眼睛就不行；但它解释不了为什么在暗的地方，我们即使睁着眼睛也看不见东西。为了解决这个困难，人们引进了复杂得多的假设。比如认为有三种不同的光，分别来源于眼睛，被看到的物体和光源，而视觉是三者综合作用的结果。

这种假设无疑是太复杂了。到了罗马时代，伟大的学者卢克莱修（*lucretius*）在其不朽著作《物性论》中提出，光是从光源直接到达人的眼睛的，但是他的观点却始终不为人们所接受。对光成像的正确认识直到公元1000年左右才被一个波斯的科学家阿尔·哈桑（*al-haytham*）所提出：原来我们之所以能够看到物体，只是由于光从物体上反射到我们眼睛里的结果。他提出了许多证据来证明这一点，其中最有力的就是小孔成像的实验，当我们亲眼看到光通过小孔后成了一个倒立的像，我们就无可怀疑这一说法的正确性了。

关于光的一些性质，人们也很早就开始研究了。基于光总是走直线的假定，欧几里德（*euclid*）在《反射光学》（*catoptrica*）一书里面就研究了光的反射问题。托勒密（*ptolemy*）、哈桑和开普勒（*johannes kepler*）都对光的折射作了研究，而荷兰物理学家斯涅耳（*w.snell*）则在他们的工作基础上于1621年总结出了光的折射定律。最后，光的种种性质终于被有“业余数学之王”之称的费尔马（*pierre de fermat*）所归结为一个简单的法则，那就是“光总是走最短的路线”。光学终于作为一门物理学科被正式确立起来。

但是，当人们已经对光的种种行为了如指掌的时候，却依然有一个最基本的问题没有得到解决，那就是：“光在本质上到底是一种什么东西？”这个问题看起来似乎并没有那么难回答，但人们大概不会想到，对于这个问题的探究居然会那样地旷日持久，而这一探索的过程，对物理学的影响竟然会是那么地深远和重大，其意义超过当时任何一个人的想象。

古希腊时代的人们总是倾向于把光看成是一种非常细小的粒子流，换句话说光是由一粒粒非常小的“光原子”所组成的。这种观点一方面十分符合当时流行的元素说，另外一方面，当时的人们除了粒子之外对别的物质形式也了解得不是太多。这种理论，我们把它称之为光的“微粒说”。微粒说从直观上看来是很有道理的，首先它就可以很好地解释为什么光总是沿着直线前进，为什么会严格而经典地反射，甚至折射现象也可以由粒子流在不同介质里的速度变化而得到解释。但是粒子说也有一些显而易见的困难：比如人们当时很难说清为什么两道光束相互碰撞的时候不会互相弹开，人们也无法得知，这些细小的光粒子在点上灯火之前是隐藏在何处的，它们的数量是不是可以无限多，等等。

当黑暗的中世纪过去之后，人们对自然世界有了进一步的认识。波动现象被深入地了解和研究，声音是一种波动的认识也逐渐为人们所接受。人们开始怀疑：既然声音是一种波，为什么光不能够也是波呢？十七世纪初，笛卡儿（des cartes）在他《方法论》的三个附录之一《折光学》中率先提出了这样的可能：光是一种压力，在媒质里传播。不久后，意大利的一位数学教授格里马第（francesco maria grimaldi）做了一个实验，他让一束光穿过两个小孔后照到暗室里的屏幕上，发现在投影的边缘有一种明暗条纹的图像。格里马第马上联想起了水波的衍射（这个大家在中学物理的插图上应该都见过），于是提出：光可能是一种类似水波的波动，这就是最早的光波动说。

波动说认为，光不是一种物质粒子，而是由于介质的振动而产生的一种波。我们想象一下水波，它不是一种实际的传递，而是沿途的水面上下振动的结果。光的波动说容易解释投影里的明暗条纹，也容易解释光束可以互相穿过互不干扰。关于直线传播和反射的问题，人们很快就认识到光的波长是很短的，在大多数情况下，光的行为就如同经典粒子一样。而衍射实验则更加证明了这一点。但是波动说有一个基本的难题，那就是任何波动都需要有介质才能够传递，比如声音，在真空中就无法传播。而光则不然，它似乎不需要任何媒介就可以任意地前进。举一个简单的例子，星光可以穿过几乎虚无一物的太空来到地球，这对波动说显然是非常不利的。但是波动说巧妙地摆脱了这个难题：它假设了一种看不见摸不着的介质来实现光的传播，这种介质有一个十分响亮而让人印象深刻的名字，叫做“以太”（aether）。

就在这样一种奇妙的气氛中，光的波动说登上了历史舞台。我们很快就会看到，这个新生力量似乎是微粒说的前世冤家，它命中注定要与后者开展一场长达数个世纪之久的战争。他们两个的命运始终互相纠缠在一起，如果没有了对方，谁也不能说自己还是完整的。到了后来，他们简直就是为了对手而存在着。这出精彩的戏剧从一开始的伏笔，经过两个起落，到达令人眼花缭乱的高潮。而最后绝妙的结局则更让我们相信，他们的对话几乎是一种可遇而不可求的缘分。17世纪中期，正是科学的黎明到来之前那最后的黑暗，谁也无法预见这两朵小火花即将要引发一场熊熊大火。

饭后闲话：说说“以太”（aether）

正如我们在上面所看到的，以太最初是作为光波媒介的假设而提出的。但“以太”一词的由来则早在古希腊：亚里士多德在《论天》一书里阐述了他对天体的认识。他认为日月星辰围绕着地球运转，但其组成却不同与地上的四大元素水火气土。天上的事物应该是完美无缺的，它们只能由一种更为纯洁的元素所构成，这就是亚里士多德所谓的“第五元素”——以太（希腊文的 $\alpha\eta\theta\eta\rho$ ）。而自从这个概念被借用到科学里来之后，以太在历史上的地位可以说是相当微妙的，一方面，它曾经扮演过如此重要的角色，以致成为整个物理学的基础；另一方面，当它荣耀不再时，也曾受尽嘲笑。虽然它不甘心地再三挣扎，改换头面，赋予自己新的意义，却仍然逃不了最终被抛弃的命运，甚至有段时间几乎成了伪科学的专用词。但无论怎样，以太的概念在科学史上还是占有它的地位的，它曾经代表的光媒以及绝对参考系，虽然已经退出了舞台，但直到今天，仍然能够唤起我们对那段黄金岁月的怀念。它就像是一张泛黄的照片，记载了一个贵族光荣的过去。今天，以太（ether）作为另外一种概念用来命名一种网络协议（ethernet），看到这个词的时候，是不是也每每生出几许慨叹？

向以太致敬。

1-3

上次说到，关于光究竟是什么的问题，在十七世纪中期有了两种可能的假设：微粒说和波动说。

然而在一开始的时候，双方的武装都是非常薄弱的。微粒说固然有着悠久的历史，但是它手中的力量是很有限的。光的直线传播问题和反射折射问题本来是它的传统领地，但波动方面军队在发展了自己的理论后，迅速就在这两个战场上与微粒平分秋色。而波动论作为一种新兴的理论，格里马第的光衍射实验是它发家的最大法宝，但它却拖着一个沉重的包袱，就是光以太的假设，这个凭空想象出来的媒介，将在很长一段时期成为波动军队的累赘。

两支力量起初并没有发生什么武装冲突。在笛卡儿的《方法论》那里，他们还依然心平气和地站在一起供大家检阅。导致“第一次微波战争”爆发的导火索是波义耳（robert boyle，中学里学过波马定律的朋友一定还记得这个讨厌的爱尔兰人？）在 1663 年提出的一个理论。他认为我们看到的各种颜色，其实并不是物体本身的属性，而是光照上去才产生的效果。这个论调本身并没有关系到微粒波动什么事，但是却引起了对颜色属性的激烈争论。

在格里马第的眼里，颜色的不同，是因为光波频率的不同而引起的。他的实验引起了胡克（robert hooke）的兴趣。胡克本来是波义耳的实验助手，当时是英国皇家学会的会员，同时也兼任实验管理员。他重复了格里马第的工作，并仔细观察了光在肥皂泡里映射出的色彩以及光通过薄云母片而产生的光辉。根据他的判断，光必定是某种快速的脉冲，于是他在 1665 年出版的《显微术》（micrographia）一书中明确地支持波动说。《显微术》这本著作很快为胡克赢得了世界性的学术声誉，波动说由于这位大将的加入，似乎也在一时占了上风。

然而不知是偶然，还是冥冥之中自有安排，一件似乎无关的事情改变了整个战局的发展。

1672 年，一位叫做艾萨克·牛顿的年轻人向皇家学会评议委员会递交了一篇论文，名字叫做《关于光与色的新理论》。牛顿当时才 30 岁，刚刚当选为皇家学会的会员。这是牛顿所发表的第一篇正式科学论文，其内容是关于他所做的光的色散实验的，这也是牛顿所做的最为有名的实验之一。实验的情景在一些科学书籍里被渲染得十分 impressive：炎热难忍的夏天，牛顿却戴着厚重的假发呆在一间小屋里。四面窗户全都被封死了，屋子里面又闷又热，一片漆黑，只有一束亮光从一个特意留出的小孔里面射进来。牛顿不顾身上汗如雨下，全神贯注地在屋里走来走去，并不时地把手里的一个三棱镜插进那个小孔里。每当三棱镜被插进去的时候，原来的那束白光就不见了，而在屋里的墙上，映射出了一条长长的彩色宽带：颜色从红一直到紫。牛顿凭借这个实验，得出了白色光是由七彩光混合而成的结论。

然而在这篇论文中，牛顿把光的复合和分解比喻成不同颜色微粒的混合和分开。胡克和波义耳正是当时评议会的成员，他们对此观点进行了激烈的抨击。胡克声称，牛顿论文中正确的部分（也就是色彩的复合）是窃取了他 1665 年的思想，而牛顿“原创”的微粒说则不值一提。牛顿大怒，马上撤回了论文，并赌气般地宣称不再发表任何研究成果。

其实在此之前，牛顿的观点还是在微粒和波动之间有所摇摆的，并没有完全否认波动说。1665 年，胡克发表他的观点时，牛顿还刚刚从剑桥三一学院毕业，也许还在苹果树前面思考他的万有引力问题呢。但在这件事之后，牛顿开始一面倒地支持微粒说。这究竟是因为报复心理，还是因为科学精神，今天已经无法得知了，想来两方面都有其因素吧。不过牛顿的性格是以小气和斤斤计较而闻名的，这从以后他和莱布尼兹关于微积分发明的争论中也可见一斑。

但是，一方面因为胡克的名气，另一方面也因为牛顿的注意力更多地转移到了运动学和力学方面，牛顿暂时仍然没有正式地全面论证微粒说（只是在几篇论文中反驳了胡克）。而这时候，波动方面军开始了他们的现代化进程——用理论来装备自己。荷兰物理学家惠更斯（christiaan huygens）成为了波动说的主将。

惠更斯在数学理论方面是具有十分高的天才的，他继承了胡克的思想，认为光是一种在以太里传播的纵波，并引入了“波前”的概念，成功地证明和推导了光的反射和折射定律。他的波动理论虽然还十分粗略，但是所取得的成功却是杰

出的。当时随着光学研究的不断深入，新的战场不断被开辟：1665年，牛顿在实验中发现如果让光通过一块大曲率凸透镜照射到光学平玻璃板上，会看见在透镜与玻璃平板接触处出现一组彩色的同心环条纹，也就是著名的“牛顿环”（对图象和摄影有兴趣的朋友一定知道）。到了1669年，丹麦的巴塞林那斯（e.bartholinus）发现当光在通过方解石晶体时，会出现双折射现象。惠更斯将他的理论应用于这些新发现上面，发现他的波动军队可以容易地占领这些新辟的阵地，只需要作小小的改制即可（比如引进椭圆波的概念）。1690年，惠更斯的著作《光论》（*traite de la lumiere*）出版，标志着波动说在这个阶段到达了一个兴盛的顶点。

不幸的是，波动方面暂时的得势看来注定要成为昙花一现的泡沫。因为在他们的对手那里站着一个光芒四射的伟大人物：艾萨克·牛顿先生（而且马上就要成为爵士）。这位科学巨人——不管他是出于什么理由——已经决定要给予波动说的军队以毫不留情的致命打击。为了避免再次引起和胡克之间的争执，导致不必要的误解，牛顿在战术上也进行了精心的安排。直到胡克去世后的第二年，也就是1704年，牛顿才出版了他的煌煌巨著《光学》（*opticks*）。在这本划时代的作品中，牛顿详尽地阐述了光的色彩叠合与分散，从粒子的角度解释了薄膜透光，牛顿环以及衍射实验中发现的种种现象。他驳斥了波动理论，质疑如果光如同声波一样，为什么无法绕开障碍物前进。他也对双折射现象进行了研究，提出了许多用波动理论无法解释的问题。而粒子方面的基本困难，牛顿则以他的天才加以解决。他从波动对手那里吸收了许多东西，比如将波的一些有用的概念如振动，周期等引入微粒论，从而很好地解答了牛顿环的难题。在另一方面，牛顿把粒子说和他的力学体系结合在了一起，于是使得这个理论顿时呈现出无与伦比的力量。

这完全是一次摧枯拉朽般的打击。那时的牛顿，已经再不是那个可以在评议会上被人质疑的青年。那时的牛顿，已经是出版了《数学原理》的牛顿，已经是发明了微积分的牛顿。那个时候，他已经是国会议员，皇家学会会长，已经成为科学史上神话般的人物。在世界各地，人们对他的力学体系顶礼膜拜，仿佛见到了上帝的启示。而波动说则群龙无首（惠更斯也早于1695年去世），这支失去了领袖的军队还没有来得及在领土上建造几座坚固一点的堡垒，就遭到了毁灭性的打击。他们惊恐万状，溃不成军，几乎在一夜之间丧失了所有的阵地。这一方面是因为波动自己的防御工事有不足之处，它的理论仍然不够完善，另一方面也实在是因为对手的实力过于强大：牛顿作为光学界的泰斗，他的才华和权威是不容置疑的。第一次微波战争就这样以波动的惨败而告终，战争的结果是微粒说牢牢占据了物理界的主流。波动被迫转入地下，在长达整整一个世纪的时间里都抬不起头来。然而，它却仍然没有被消灭，惠更斯等人所做的开创性工作使得它仍然具有顽强的生命力，默默潜伏着以待东山再起的那天。

饭后闲话：胡克与牛顿

胡克和牛顿在历史上也算是一对欢喜冤家。两个人都在力学，光学，仪器等方面有着伟大的贡献。两人互相启发，但是之间也存在着不少的争论。除了关于光本性的争论之外，他们之间还有一个争执，那就是万有引力的平方反比定律究竟是谁发现的问题。胡克在力学与行星运动方面花过许多心血，他深入研究了开普勒定律，于1664年提出了行星轨道因引力而弯曲成椭圆的观点。1674年他根据修正的惯性原理，提出了行星运动的理论。1679年，他在写给牛顿的信中，提出了引力大小与距离的平方成反比这个概念，但是说得比较模糊，并未加之量化（原文是：...my supposition is that the attraction always is in a duplicate proportion to the distance from the center reciprocal）。在牛顿的《原理》出版之后，胡克要求承认他对这个定律的优先发现，但牛顿最后的回答却是把所有涉及胡克的引用都从《原理》里面给删掉了。

应该说胡克也是一位伟大的科学家，他曾帮助波义耳发现波义耳定律，用自己的显微镜发现了植物的细胞，他在地质学方面的工作（尤其是对化石的观测）影响了这个学科整整30年，他发明和制造的仪器（如显微镜、空气唧筒、发条摆轮、轮形气压表等）在当时无与伦比。他所发现的弹性定律是力学最重要的定律之一。在那个时代，他在力学和光学方面是仅次于牛顿的伟大科学家，可是似乎他却永远生活在牛顿的阴影里。今天的牛顿名满天下，但今天的中学生只有从课本里的胡克定律（弹性定律）才知道胡克的名字，胡克死前已经变得愤世嫉俗，字里行间充满了挖苦。他死后连一张画像也没有留下来，据说是因为他“太丑了”。

1-4

上次说到，在微粒与波动的第一次交锋中，以牛顿为首的微粒说战胜了波动，取得了在物理上被普遍公认的地位。

转眼间，近一个世纪过去了。牛顿体系的地位已经是如此地崇高，令人不禁有一种目眩的感觉。而他所提倡的光是一种粒子的观念也已经是如此地深入人心，以致人们几乎都忘了当年它那对手的存在。

然而 1773 年的 6 月 13 日，英国米尔沃顿 (milverton) 的一个教徒的家庭里诞生了一个男孩，叫做托马斯·杨 (thomas young)。这个未来反叛派领袖的成长史是一个典型的天才历程，他两岁的时候就能够阅读各种经典，6 岁时开始学习拉丁文，14 岁就用拉丁文写过一篇自传，到了 16 岁时他已经能够说 10 种语言，并学习了牛顿的《数学原理》以及拉瓦锡的《化学纲要》等科学著作。

杨 19 岁的时候，受到他那当医生的叔父的影响，决定去伦敦学习医学。在以后的日子里，他先后去了爱丁堡和哥廷根大学攻读，最后还是回到剑桥的伊曼纽尔学院终结他的学业。在他还是学生的时候，杨研究了人体上眼睛的构造，开始接触到了光学上的一些基本问题，并最终形成了他的光是波动的想法。杨的这个认识，是来源于波动中所谓的“干涉”现象。

我们都知道，普通的物质是具有累加性的，一滴水加上一滴水一定是两滴水，而不会一起消失。但是波动就不同了，一列普通的波，它有着波的高峰和波的谷底，如果两列波相遇，当它们正好都处在高峰时，那么叠加起来的这个波就会达到两倍的峰值，如果都处在低谷时，叠加的结果就会是两倍深的谷底。但是，等等，如果正好一列波在它的高峰，另外一列波在它的谷底呢？

答案是它们会互相抵消。如果两列波在这样的情况下相遇（物理上叫做“反相”），那么在它们重叠的地方，将会波平如镜，既没有高峰，也没有谷底。这就像一个人把你往左边拉，另一个人用相同的力气把你往右边拉，结果是你会站在原地不动。

托马斯·杨在研究牛顿环的明暗条纹的时候，被这个关于波动的想法给深深打动了。为什么会形成一明一暗的条纹呢？一个思想渐渐地在杨的脑海里成型：用波来解释不是很简单吗？明亮的地方，那是因为两道光正好是“同相”的，它们的波峰和波谷正好相互增强，结果造成了两倍光亮的效果（就好像有两个人同时在左边或者右边拉你）；而黑暗的那些条纹，则一定是两道光处于“反相”，它们的波峰波谷相对，正好互相抵消了（就好像两个人同时在两边拉你）。这一大胆而富于想象的见解使杨激动不已，他马上着手进行了一系列的实验，并于 1801 年和 1803 年分别发表论文报告，阐述了如何用光波的干涉效应来解释牛顿环和衍射现象。甚至通过他的实验数据，计算出了光的波长应该在 $1/36000$ 至 $1/60000$ 英寸之间。

在 1807 年，杨总结出版了他的《自然哲学讲义》，里面综合整理了他在光学方面的工作，并在里面第一次描述了他那个名扬四海的实验：光的双缝干涉。后来的历史证明，这个实验完全可以跻身于物理学史上最经典的前五个实验之列，而在今天，它已经出现在每一本中学物理的教科书上。

杨的实验手段极其简单：把一支蜡烛放在一张开了一个小孔的纸前面，这样就形成了一个点光源（从一个点发出的光源）。现在在纸后面再放一张纸，不同的是第二张纸上开了两道平行的狭缝。从小孔中射出的光穿过两道狭缝投到屏幕上，就会形成一系列明、暗交替的条纹，这就是现在众人皆知的干涉条纹。

杨的著作点燃了革命的导火索，物理史上的“第二次微波战争”开始了。波动方面军在经过了百年的沉寂之后，终于又回到了历史舞台上。但是它当时的日子并不是好过的，在微粒大军仍然一统天下的年代，波动的士兵们衣衫褴褛，缺少后援，只能靠游击战来引起人们对它的注意。杨的论文开始受尽了权威们的嘲笑和讽刺，被攻击为“荒唐”和“不合逻辑”。

辑”，在近 20 年间竟然无人问津。杨为了反驳专门撰写了论文，但是却无处发表，只好印成小册子，但是据说发行后“只卖出了一本”。

不过，虽然高傲的微粒仍然沉醉在牛顿时代的光荣之中，一开始并不把起义的波动叛乱分子放在眼睛里。但他们很快就发现，这些反叛者虽然人数不怎么多，服装并不那么整齐，但是他们的武器却今非昔比。在受到了几次沉重的打击后，干涉条纹这门波动大炮的杀伤力终于惊动整个微粒军团。这个简单巧妙的实验所揭示出来的现象证据确凿，几乎无法反驳。无论微粒怎么样努力，也无法躲开对手的无情轰炸：它就是难以说明两道光叠加在一起怎么会反而造成黑暗。而波动的理由却是简单而直接的：两个小孔距离屏幕上某点的距离会有所不同。当这个距离是波长的整数值时，两列光波正好互相加强，就形成亮点。反之，当距离差刚好造成半个波长的相位差时，两列波就正好互相抵消，造成暗点。理论计算出的明亮条纹距离和实验值分毫不差。

在节节败退后，微粒终于发现自己无法抵挡对方的进攻。于是它采取了以攻代守的战略。许多对波动说不利的实验证据被提出来以证明波动说的矛盾。其中最为知名的就是马吕斯 (etienne louis malus) 在 1809 年发现的偏振现象，这一现象和已知的波动论有抵触的地方。两大对手开始相持不下，但是各自都没有放弃自己获胜的信心。杨在给马吕斯的信里说：“……您的实验只是证明了我的理论有不足之处，但没有证明它是虚假的。”

决定性的时刻在 1819 年到来了。最后的决战起源于 1818 年法国科学院的一个悬赏征文竞赛。竞赛的题目是利用精密的实验确定光的衍射效应以及推导光线通过物体附近时的运动情况。竞赛评委会由许多知名科学家组成，这其中包括比奥 (j.b.biot)、拉普拉斯 (pierre simon de laplace) 和泊松 (s.d.poisson)，都是积极的微粒说拥护者。组织这个竞赛的本意是希望通过微粒说的理论来解释光的衍射以及运动，以打击波动理论。

但是戏剧性的情况出现了。一个不知名的法国年轻工程师——菲涅耳 (augustin fresnel, 当时他才 31 岁) 向组委会提交了一篇论文《关于偏振光线的相互作用》。在这篇论文里，菲涅耳采用了光是一种波动的观点，但是革命性地认为光是一种横波（也就是类似水波那样，振子作相对传播方向垂直运动的波）而不像从胡克以来一直所认为的那样是一种纵波（类似弹簧波，振子作相对传播方向水平运动的波）。从这个观念出发，他以严密的数学推理，圆满地解释了光的衍射，并解决了一直以来困扰波动说的偏振问题。他的体系完整而无缺，以至委员会成员为之深深惊叹。泊松并不相信这一结论，对它进行了仔细的审查，结果发现当把这个理论应用于圆盘衍射的时候，在阴影中间将会出现一个亮斑。这在泊松看来是十分荒谬的，影子中间怎么会出现亮斑呢？这差点使得菲涅尔的论文中途夭折。但菲涅耳的同事阿拉果 (franois arago) 在关键时刻坚持要进行实验检测，结果发现真的有一个亮点如同奇迹一般地出现在圆盘阴影的正中心，位置亮度和理论符合得相当完美。

菲涅耳理论的这个胜利成了第二次微波战争的的决定性事件。他获得了那一届的科学奖 (grand prix)，同时一跃成为了可以和牛顿，惠更斯比肩的光学界的传奇人物。圆盘阴影正中的亮点（后来被相当有误导性地称作“泊松亮斑”）成了波动军手中威力不下于干涉条纹的重武器，给了微粒势力以致命的一击。起义者的烽火很快就燃遍了光学的所有领域，把微粒从统治的地位赶了下来，后者在严厉的打击下捉襟见肘，节节溃退，到了 19 世纪中期，微粒说挽回战局的唯一希望就是光速在水中的测定结果了。因为根据粒子论，这个速度应该比真空中的光速要快，而根据波动论，这个速度则应该比真空中要慢才对。

然而不幸的微粒军团终于在 1819 年的莫斯科严冬之后，又于 1850 年迎来了它的滑铁卢。这一年的 5 月 6 日，傅科 (foucault, 他后来以“傅科摆”实验而闻名) 向法国科学院提交了他关于光速测量实验的报告。在准确地得出光在真空中的速度之后，他也进行了水中光速的测量，发现这个值小于真空中的速度。这一结果彻底宣判了微粒说的死刑，波动论终于在 100 多年后革命成功，登上了物理学统治地位的宝座。在胜利者的一片欢呼声中，第二次微波战争随着微粒的战败而宣告结束。

但是波动内部还是有一个小小的困难，就是以太的问题。光是一种横波的事实已经十分清楚，它传播的速度也得到

了精确测量，这个数值达到了 30 万公里/秒，是一个惊人的高速。通过传统的波动论，我们必然可以得出它的传播媒介的性质：这种媒介必定是十分的坚硬，比最硬的物质金刚石还要硬上不知多少倍。然而事实是从来就没有任何人能够看到或者摸到这种“以太”，也没有实验测定到它的存在。星光穿越几亿亿公里的以太来到地球，然而这些坚硬无比的以太却不能阻挡任何一颗行星或者彗星的运动，哪怕是最微小的也不行！

波动对此的解释是以太是一种刚性的粒子，但是它却是如此稀薄，以致物质在穿过它们时几乎完全不受到任何阻力，“就像风穿过一小片丛林”（托马斯·杨语）。以太在真空中也是绝对静止的，只有在透明物体中，可以部分地被拖曳（菲涅耳的部分拖曳假说）。

这个观点其实是十分牵强的，但是波动说并没有为此困惑多久。因为更加激动人心的胜利很快就到来了。伟大的麦克斯韦于 1856，1861 和 1865 年发表了三篇关于电磁理论的论文，这是一个开天辟地的工作，它在牛顿力学的大厦上又完整地建立起了另一座巨构，而且其辉煌灿烂绝不亚于前者。麦克斯韦的理论预言，光其实只是电磁波的一种。这段文字是他在 1861 年的第二篇论文《论物理力线》里面特地用斜体字写下的。而我们在本章的一开始已经看到，这个预言是怎么样由赫兹在 1887 年用实验证实了的。波动说突然发现，它已经不仅仅是光领域的统治者，而是业已成为了整个电磁王国的最高司令官。波动的光辉到达了顶点，只要站在大地上，它的力量就像古希腊神话中的巨人那样，是无穷无尽而不可战胜的。而它所依靠的大地，就是麦克斯韦不朽的电磁理论。

饭后闲话：阿拉果（dominique fran? ois jean arago）的遗憾

阿拉果一向是光波动说的捍卫者，他和菲涅耳在光学上其实是长期合作的。菲涅耳关于光是横波的思想，最初还是来源于托马斯·杨写给阿拉果的一封信。而对于相互垂直的两束偏振光线的相干性的研究，是他和菲涅耳共同作出的，两人的工作明确了来自同一光源但偏振面相互垂直的两支光束，不能发生干涉。但在双折射和偏振现象上，菲涅耳显然更具有勇气和革命精神，在两人完成了《关于偏振光线的相互作用》这篇论文后，菲涅耳指出只有假设光是一种横波，才能完满地解释这些现象，并给出了推导。然而阿拉果对此抱有怀疑态度，认为菲涅耳走得太远了。他坦率地向菲涅耳表示，自己没有勇气发表这个观点，并拒绝在这部分论文后面署上自己的名字。于是最终菲涅耳以自己一个人的名义提交了这部分内容，引起了科学院的震动，而最终的实验却表明他是正确的。

这大概是阿拉果一生中最大的遗憾，他本有机会和菲涅耳一样成为在科学史上大名鼎鼎的人物。当时的菲涅耳还是无名小辈，而他在学界却已经声名显赫，被选入法兰西研究院时，得票甚至超过了著名的泊松。其实在光波动说方面，阿拉果做出了许多杰出的贡献，不在菲涅耳之下，许多还是两人互相启发而致的。在菲涅耳面临泊松的质问时，阿拉果仍然站在了菲涅耳一边，正是他的实验证实了泊松光斑的存在，使得波动说取得了最后的胜利。但关键时候的迟疑，却最终使得他失去了“物理光学之父”的称号。这一桂冠如今戴在菲涅耳的头上。

1-5

上次说到，随着麦克斯韦的理论为赫兹的实验所证实，光的波动说终于成为了一个板上钉钉的事实。

波动现在是如此的强大。凭借着麦氏理论的力量，它已经彻底地将微粒打倒，并且很快就拓土开疆，建立起一个空前的大帝国来。不久后，它的领土就横跨整个电磁波的频段，从微波到 x 射线，从紫外线到红外线，从 γ 射线到无线电波……普通光线只是它统治下的一个小小的国家罢了。波动君临天下，振长策而御宇内，四海之间莫非王土。而可怜的微粒早已销声匿迹，似乎永远也无法翻身了。

赫兹的实验也同时标志着经典物理的顶峰。物理学的大厦从来都没有这样地金壁辉煌，令人叹为观止。牛顿的力学体系已经是如此雄伟壮观，现在麦克斯韦在它之上又构建起了同等规模的另一幢建筑，它的光辉灿烂让人几乎不敢仰视。

电磁理论在数学上完美得难以置信，著名的麦氏方程组刚一问世，就被世人惊为天物。它所表现出的深刻、对称、优美使得每一个科学家都陶醉在其中，玻尔兹曼(ludwig boltzmann)情不自禁地引用歌德的诗句说：“难道是上帝写的这些吗？”一直到今天，麦氏方程组仍然被公认为科学美的典范，即使在还没有赫兹的实验证实之前，已经广泛地为人们所认同。许多伟大的科学家都为它的魅力折服，并受它深深的影响，有着对于科学美的坚定信仰，甚至认为：对于一个科学理论来说，简洁优美要比实验数据的准确来得更为重要。无论从哪个意义上来说，电磁论都是一种伟大的理论。罗杰·彭罗斯(roger penrose)在他的名著《皇帝新脑》(the emperor's new mind)一书里毫不犹豫地将它和牛顿力学，相对论和量子论并列，称之为“superb”的理论。

物理学征服了世界。在 19 世纪末，它的力量控制着一切人们所知的现象。古老的牛顿力学城堡历经岁月磨砺风雨吹打而始终屹立不倒，反而更加凸现出它的伟大和坚固来。从天上的行星到地上的石块，万物都必恭必敬地遵循着它制定的规则。1846 年海王星的发现，更是它所取得的最伟大的胜利之一。在光学的方面，波动已经统一了天下，新的电磁理论更把它的光荣扩大到了整个电磁世界。在热的方面，热力学三大定律已经基本建立（第三定律已经有了雏形），而在克劳修斯(rudolph clausius)、范德瓦尔斯(j.d. van der waals)、麦克斯韦、玻尔兹曼和吉布斯(josiah willard gibbs)等天才的努力下，分子运动论和统计热力学也被成功地建立起来了。更令人惊奇的是，这一切都彼此相符而互相包容，形成了一个经典物理的大同盟。经典力学、经典电动力学和经典热力学（加上统计力学）形成了物理世界的三大支柱。它们紧紧地结合在一块儿，构筑起了一座华丽而雄伟的殿堂。

这是一段伟大而光荣的日子，是经典物理的黄金时代。科学的力量似乎从来都没有这样的强大，这样地令人神往。人们也许终于可以相信，上帝造物的奥秘被他们所完全掌握了，再没有遗漏的地方。从当时来看，我们也许的确是资格这样骄傲的，因为所知道的一切物理现象，几乎都可以从现成的理论里得到解释。力、热、光、电、磁……一切的一切，都在控制之中，而且用的是同一种手法。物理学家们开始相信，这个世界所有的基本原理都已经被发现了，物理学已经尽善尽美，它走到了自己的极限和尽头，再也不可能有任何突破性的进展了。如果说还有什么要做的事情，那就是做一些细节上的修正和补充，更加精确地测量一些常数值罢了。人们开始倾向于认为：物理学已经终结，所有的问题都可以用这个集大成的体系来解决，而不会再有任何真正激动人心的发现了。一位著名的科学家（据说就是伟大的开尔文勋爵）说：“物理学的未来，将只有在小数点第六位后面去寻找”。普朗克的导师甚至劝他不要再浪费时间去研究这个已经高度成熟的体系。

19 世纪末的物理学天空中闪烁着金色的光芒，象征着经典物理帝国的全盛时代。这样的伟大时期在科学史上是空前的，或许也将是绝后的。然而，这个统一的强大帝国却注定了只能昙花一现。喧嚣一时的繁盛，终究要像泡沫那样破灭凋零。

今天回头来看，赫兹 1887 年的电磁波实验（准确地说，是他于 1887—1888 年进行的一系列的实验）的意义应该是复杂而深远的。它一方面彻底建立了电磁场论，为经典物理的繁荣添加了浓重的一笔；在另一方面，它却同时又埋藏下了促使经典物理自身毁灭的武器，孕育出了革命的种子。

我们还是回到我们故事的第一部分那里去：在卡尔斯鲁厄大学的那间实验室里，赫兹铜环接收器的缺口之间不停地爆发着电火花，明白无误地昭示着电磁波的存在。

但偶然间，赫兹又发现了一个奇怪的现象：当有光照射到这个缺口上的时候，似乎火花就出现得更容易一些。

赫兹把这个发现也写成了论文发表，但在当时并没有引起很多的人的注意。当时，学者们在为电磁场理论的成功而欢欣鼓舞，马可尼们在为了一个巨大的商机而激动不已，没有人想到这篇论文的真正意义。连赫兹自己也不知道，量子存在的证据原来就在他的眼前，几乎是触手可得。不过，也许量子的概念太过爆炸性，太过革命性，命运在冥冥中安排了它必须新的世纪中才可以出现，而把怀旧和经典留给了旧世纪吧。只是可惜赫兹走得太早，没能亲眼看到它的诞生，没能目睹它究竟将要给这个世界带来什么样的变化。

终于，在经典物理还没有来得及多多体味一下自己的盛世前，一连串意想不到的事情在 19 世纪的最后几年连续发生了，仿佛是一个不祥的预兆。

1895 年，伦琴（wilhelm konrad rontgen）发现了 x 射线。1896 年，贝克勒尔（antoine herni becquerel）发现了铀元素的放射现象。1897 年，居里夫人（marie curie）和她的丈夫皮埃尔·居里研究了放射性，并发现了更多的放射性元素：钷、钋、镭。1897 年，j.j.汤姆逊（joseph john thomson）在研究了阴极射线后认为它是一种带负电的粒子流。电子被发现了。1899 年，卢瑟福（ernest rutherford）发现了元素的嬗变现象。

如此多的新发现接连涌现，令人一时间眼花缭乱。每一个人都开始感觉到了一种不安，似乎有什么重大的事件即将发生。物理学这座大厦依然耸立，看上去依然那么雄伟，那么牢不可破，但气氛却突然变得异常凝重起来，一种山雨欲来的压抑感觉在人们心中扩散。新的世纪很快就要来到，人们不知道即将发生什么，历史将要何去何从。眺望天边，人们隐约可以看到两朵小小的乌云，小得那样不起眼。没人知道，它们即将带来一场狂风暴雨，将旧世界的一切从大地上彻底抹去。

但是，在暴风雨到来之前，还是让我们抬头再看一眼黄金时代的天空，作为最后的怀念。金色的光芒照耀在我们的脸上，把一切都染上了神圣的色彩。经典物理学的大厦在它的辉映下，是那样庄严雄伟，溢彩流光，令人不禁想起神话中宙斯和众神在奥林匹斯山上那亘古不变的宫殿。谁又会想到，这震撼人心的壮丽，却是斜阳投射在庞大帝国土地上最后的余辉。

第二章 乌云

2-1

1900 年的 4 月 27 日，伦敦的天气还是有一些阴冷。马路边的咖啡店里，人们兴致勃勃地谈论着当时正在巴黎举办的万国博览会。街上的报童在大声叫卖报纸，那上面正在讨论中国义和团运动最新的局势进展以及各国在北京使馆人员的状况。一位绅士彬彬有礼地扶着贵妇人上了马车，赶去听普契尼的歌剧《波希米亚人》。两位老太太羡慕地望着马车远去，对贵妇帽子的式样大为赞叹，但不久后，她们就找到了新的话题，开始对拉塞尔伯爵的离婚案评头论足起来。看来，即使是新世纪的到来，也不能改变这个城市古老而传统的生活方式。

相比之下，在阿尔伯马尔街皇家研究所（royal institution, albemarle street）举行的报告会就没有多少人注意了。伦敦的上流社会好像已经把他们对科学的热情在汉弗来·戴维爵士（sir humphry davy）那里倾注得一干二净，以致在其后几十年的时间里都表现得格外漠然。不过，对科学界来说，这可是一件大事。欧洲有名的科学家都赶来这里，聆听那位德高望重，然而却以顽固出名的老头子——开尔文男爵（lord kelvin）的发言。

开尔文的这篇演讲名为《在热和光动力理论上空的 19 世纪乌云》。当时已经 76 岁，白发苍苍的他用那特有的爱尔兰口音开始了发言，他的第一段话是这么说的：

“动力学理论断言，热和光都是运动的方式。但现在这一理论的优美性和明晰性却被两朵乌云遮蔽，显得黯然失色了……”（‘the beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds.’）

这个乌云的比喻后来变得如此出名，以致于在几乎每一本关于物理史的书籍中都被反复地引用，成了一种模式化的陈述。联系到当时人们对物理学大一统的乐观情绪，许多时候这个表述又变成了“在物理学阳光灿烂的天空中漂浮着两朵

小乌云”。这两朵著名的乌云，分别指的是经典物理在以太和麦克斯韦-玻尔兹曼能量均分学说上遇到的难题。再具体一些，指的就是人们在迈克尔逊-莫雷实验和黑体辐射研究中的困境。

迈克尔逊-莫雷实验的用意在于探测以太对于地球的漂移速度。在人们当时的观念里，以太代表了一个绝对静止的参考系，而地球穿过以太在空间中运动，就相当于一艘船在高速行驶，迎面会吹来强烈的“以太风”。迈克尔逊在 1881 年进行了一个实验，想测出这个相对速度，但结果并不十分令人满意。于是他和另外一位物理学家莫雷合作，在 1886 年安排了第二次实验。这可能是当时物理史上进行过的最精密的实验了：他们动用了最新的干涉仪，为了提高系统的灵敏度和稳定性，他们甚至多方筹措弄来了一块大石板，把它放在一个水银槽上，这样就把手干扰的因素降到了最低。

然而实验结果却让他们震惊和失望无比：两束光线根本就没有表现出任何的时间差。以太似乎对穿越于其中的光线毫无影响。迈克尔逊和莫雷不甘心地一连观测了四天，本来甚至想连续观测一年以确定地球绕太阳运行四季对以太风造成的差别，但因为这个否定的结果是如此清晰而不容置疑，这个计划也被无奈地取消了。

迈克尔逊-莫雷实验是物理史上最著名的“失败的实验”。它当时在物理界引起了轰动，因为以太这个概念作为绝对运动的代表，是经典物理学和经典时空观的基础。而这根支撑着经典物理学大厦的梁柱竟然被一个实验的结果而无情地否定，那马上就意味着整个物理世界的轰然崩塌。不过，那时候再悲观的人也不认为，刚刚取得了伟大胜利，到达光辉顶峰的经典物理学会莫名其妙地就这样倒台，所以人们还是提出了许多折衷的办法，爱尔兰物理学家费兹杰惹（george fitzgerald）和荷兰物理学家洛伦兹（hendrik antoon lorentz）分别独立地提出了一种假说，认为物体在运动的方向上会发生长度的收缩，从而使得以太的相对运动速度无法被测量到。这些假说虽然使得以太的概念得以继续保留，但业已经对它的意义提出了强烈的质问，因为很难想象，一个只具有理论意义的“假设物理量”究竟有多少存在的必要。开尔文所说的“第一朵乌云”就是在这个意义上提出来的，不过他认为长度收缩的假设无论如何已经使人们“摆脱了困境”，所要做的是修改现有理论以更好地使以太和物质的相互作用得以自洽罢了。

至于“第二朵乌云”，指的是黑体辐射实验和理论的不一致。它在我们的故事里将起到十分重要的作用，我们会在后面的章节里仔细地探讨这个问题。在开尔文发表演讲的时候，这个问题仍然没有任何能够得到解决的迹象。不过开尔文对此的态度倒是乐观的，因为他本人就并不相信玻尔兹曼的能量均分学说，他认为要驱散这朵乌云，最好的办法就是否定玻尔兹曼的学说（而且说老实话，玻尔兹曼的分子运动理论在当时的确还是有着巨大的争议，以致于这位罕见的天才苦闷不堪，精神出现了问题。当年玻尔兹曼就尝试自杀而未成，但他终于在 6 年后的一片小森林里亲手结束了自己的生命，留下了一个科学史上的大悲剧）。

年迈的开尔文站在讲台上，台下的听众对于他的发言给予热烈的鼓掌。然而当时，他们中间却没有一个人（包括开尔文自己）会了解，这两朵小乌云对于物理学来说究竟意味着什么。他们绝对无法想象，正是这两朵不起眼的乌云马上就要给这个世界带来一场前所未有的狂风暴雨，电闪雷鸣，并引发可怕的大火和洪水，彻底摧毁现在的繁华美丽。他们也无法知道，这两朵乌云很快就要把他们从豪华舒适的理论宫殿中驱赶出来，放逐到布满了荆棘和陷阱的原野里去过上二十年颠沛流离的生活。他们更无法预见，正是这两朵乌云，终究会给物理学带来伟大的新生，在烈火和暴雨中实现涅槃，并重新建造起两幢更加壮观美丽的城堡来。

第一朵乌云，最终导致了相对论革命的爆发。

第二朵乌云，最终导致了量子论革命的爆发。

今天看来，开尔文当年的演讲简直像一个神秘的谶言，似乎在冥冥中带有一种宿命的意味。科学在他的预言下打了一个大弯，不过方向却是完全出乎开尔文意料的。如果这位老爵士能够活到今天，读到物理学在新世纪里的发展历史，他是不是会为他当年的一语成谶而深深震惊，在心里面打一个寒噤呢？

饭后闲话：伟大的“意外”实验

我们今天来谈谈物理史上的那些著名的“意外”实验。用“意外”这个词，指的是实验未能取得预期的成果，可能在某种程度上，也可以称为“失败”实验吧。

我们在上面已经谈到了迈克尔逊—莫雷实验，这个实验的结果是如此的令人震惊，以致于它的实验者在相当的一段时期里都不敢相信自己结果的正确性。但正是这个否定的证据，最终使得“以太”的概念寿终正寝，使得相对论的诞生成为了可能。这个实验的失败在物理史上却应该说是一个伟大的胜利，科学从来都是只相信事实的。

近代科学的历史上，也曾经有过许多类似的具有重大意义的意外实验。也许我们可以从拉瓦锡（al laroisier）谈起。当时的人们普遍相信，物体燃烧是因为有“燃素”离开物体的结果。但是 1774 年的某一天，拉瓦锡决定测量一下这种“燃素”的具体重量是多少。他用他的天平称量了一块锡的重量，随即点燃它。等金属完完全全地烧成了灰烬之后，拉瓦锡小心翼翼地把每一粒灰烬都收集起来，再次称量了它的重量。

结果使得当时的所有人都瞠目结舌。按照燃素说，燃烧后的灰烬应该比燃烧前要轻。退一万步，就算燃素完全没有重量，也应该一样重。可是拉瓦锡的天平却说：灰烬要比燃烧前的金属重，测量燃素重量成了一个无稽之谈。然而拉瓦锡在吃惊之余，却没有怪罪于自己的天平，而是将怀疑的眼光投向了燃素说这个庞然大物。在他的推动下，近代化学终于在这个体系倒台的轰隆声中建立了起来。

到了 1882 年，实验上的困难同样开始困扰剑桥大学的化学教授瑞利（j.w.s rayleigh）。他为了一个课题，需要精确地测量各种气体的比重。然而在氮的问题上，瑞利却遇到了麻烦。事情是这样的：为了保证结果的准确，瑞利采用了两种不同的方法来分离气体。一种是通过化学家们熟知的办法，用氨气来制氮，另一种是从普通空气中，尽量地除去氧、氢、水蒸气等别的气体，这样剩下的就应该是纯氮气了。然而瑞利却苦恼地发现两者的重量并不一致，后者要比前者重了千分之二。

虽然是一个小差别，但对于瑞利这样的讲究精确的科学家来说是不能容忍的。为了消除这个差别，他想尽了办法，几乎检查了他所有的仪器，重复了几十次实验，但是这个千分之二的差别就是顽固地存在在那里，随着每一次测量反而更加精确起来。这个障碍使得瑞利几乎要发疯，在百般无奈下他写信给另一位化学家拉姆塞（william ramsay）求救。后者敏锐地指出，这个重量差可能是由于空气里混有了一种不易察觉的重气体而造成的。在两者的共同努力下，氩气（ar）终于被发现了，并最终导致了整个惰性气体族的发现，成为了元素周期表存在的一个主要证据。

另一个值得一谈的实验是 1896 年的贝克勒尔（antoine herni becquerel）做出的。当时 x 射线刚被发现不久，人们对它的来由还不是很清楚。有人提出太阳光照射荧光物质能够产生 x 射线，于是贝克勒尔对此展开了研究，他选了一种铀的氧化物作为荧光物质，把它放在太阳下暴晒，结果发现它的确使黑纸中的底片感光了，于是他得出初步结论：阳光照射荧光物质能产生 x 射线。

但是，正当他要进一步研究时，意外的事情发生了。天气转阴，乌云一连几天遮蔽了太阳。贝克勒尔只好把他的全套实验用具，包括底片和铀盐全部放进了保险箱里。然而到了第五天，天气仍然没有转晴的趋势，贝克勒尔忍不住了，决定把底片冲洗出来再说。铀盐曾受了一点微光的照射，不管如何在底片上应该留下一些模糊的痕迹吧？

然而，在拿到照片时，贝克勒尔经历了每个科学家都梦寐以求的那种又惊又喜的时刻。他的脑中一片晕眩：底片曝光得是如此彻底，上面的花纹是如此的清晰，甚至比强烈阳光下都要超出一百倍。这是一个历史性的时刻，元素的放射性第一次被人们发现了，虽然是在一个戏剧性的场合下。贝克勒尔的惊奇，终究打开了通向原子内部的大门，使得人们很快就看到了一个全新的世界。

在量子论的故事后面，我们会看见更多这样的意外。这些意外，为科学史添加了一份绚丽的传奇色彩，也使人们对神秘的自然更加兴致勃勃。那也是科学给我们带来的快乐之一啊。

2-2

上次说到，开尔文在世纪之初提到了物理学里的两朵“小乌云”。其中第一朵是指迈克尔逊-莫雷实验令人惊奇的结果，第二朵则是人们在黑体辐射的研究中所遇到的困境。

我们的故事终于就要进入正轨，而这一切的一切，都要从那令人困惑的“黑体”开始。

大家都知道，一个物体之所以看上去是白色的，那是因为它反射所有频率的光波；反之，如果看上去是黑色的，那是因为它吸收了所有频率的光波的缘故。物理上定义的“黑体”，指的是那些可以吸收全部外来辐射的物体，比如一个空心的球体，内壁涂上吸收辐射的涂料，外壁上开一个小孔。那么，因为从小孔射进球体的光线无法反射出来，这个小孔看上去就是绝对黑色的，即是我们定义的“黑体”。

19世纪末，人们开始对黑体模型的热辐射问题发生了兴趣。其实，很早的时候，人们就已经注意到对于不同的物体，热和辐射似乎有一定的对应关联。比如说金属，有过生活经验的人都知道，要是我们把一块铁放在火上加热，那么到了一定温度的时候，它会变得暗红起来（其实在这之前有不可见的红外线辐射），温度再高些，它会变得橙黄，到了极度高温的时候，如果能想办法不让它汽化了，我们可以看到铁块将呈现蓝白色。也就是说，物体的热辐射和温度有着一定的函数关系（在天文学里，有“红巨星”和“蓝巨星”，前者呈暗红色，温度较低，通常属于老年恒星；而后者的温度极高，是年轻恒星的典范）。

问题是，物体的辐射能量和温度究竟有着怎样的函数关系呢？

最初对于黑体辐射的研究是基于经典热力学的基础之上的，而许多著名的科学家在此之前也已经做了许多基础工作。美国人兰利（samuel pierpont langley）发明的热辐射计是一个最好的测量工具，配合罗兰凹面光栅，可以得到相当精确的热辐射能量分布曲线。“黑体辐射”这个概念则是由伟大的基尔霍夫（gustav robert kirchhoff）提出，并由斯特藩（josef stefan）加以总结和研究的。到了19世纪80年代，玻尔兹曼建立了他的热力学理论，种种迹象也表明，这是黑体辐射研究的一个强大理论武器。总而言之，这一切就是当威廉·维恩（wilhelm wien）准备从理论上推导黑体辐射公式的时候，物理界在这一课题上的一些基本背景。

维恩是东普鲁士一个地主的儿子，本来似乎命中注定也要成为一个农场主，但是当时的经济危机使他下定决心进入大学学习。在海德堡、哥廷根和柏林大学度过了他的学习生涯之后，维恩在1887年进入了德国帝国技术研究所（physikalisch technische reichsanstalt, ptr），成为了赫尔姆霍兹实验室的主要研究员。就是在柏林的这个实验室里，他准备一展他在理论和实验物理方面的天赋，彻底地解决黑体辐射这个问题。

维恩从经典热力学的思想出发，假设黑体辐射是由一些服从麦克斯韦速率分布的分子发射出来的，然后通过精密的演绎，他终于在1893年提出了他的辐射能量分布定律公式：

$u = b (\lambda^{-5}) (e^{-a/\lambda t})$ （其中 λ^{-5} 和 $e^{-a/\lambda t}$ 分别表示 λ 的-5次方以及 e 的 $-a/\lambda t$ 次方。 u 表示能量分布的函数， λ 是波长， t 是绝对温度， a ， b 是常数。当然，这里只是给大家看一看这个公式的样子，对数学和物理没有研究的朋友们大可以看过就算，不用理会它具体的意思）。

这就是著名的维恩分布公式。很快，另一位德国物理学家帕邢（f.paschen）在兰利的基础上对各种固体的热辐射进行

了测量，结果很好地符合了维恩的公式，这使得维恩取得了初步胜利。

然而，维恩却面临着一个基本的难题：他的出发点似乎和公认的现实格格不入，换句话说，他的分子假设使得经典物理学家们十分地不舒服。因为辐射是电磁波，而大家已经都知道，电磁波是一种波动，用经典粒子的方法去分析，似乎让人感到隐隐地有些不对劲，有一种南辕北辙的味道。

果然，维恩在帝国技术研究所（ptr）的同事很快就做出了另外一个实验。卢梅尔（otto richard lummer）和普林舍姆（ernst pringsheim）于 1899 年报告，当把黑体加热到 1000 多 k 的高温时，测到的短波长范围内的曲线和维恩公式符合得很好，但在长波方面，实验和理论出现了偏差。很快，ptr 的另两位成员鲁本斯（heinrich rubens）和库尔班（ferdinand kurlbaum）扩大了波长的测量范围，再次肯定了这个偏差，并得出结论，能量密度在长波范围内应该和绝对温度成正比，而不是维恩所预言的那样，当波长趋向无穷大时，能量密度和温度无关。在 19 世纪的最末几年，ptr 这个由西门子和赫尔姆霍兹所创办的机构似乎成为了热力学领域内最引人瞩目的地方，这里的这群理论与实验物理学家，似乎正在揭开一个物理内最大的秘密。

维恩定律在长波内的失效引起了英国物理学家瑞利（还记得上次我们闲话里的那位苦苦探究氮气重量，并最终发现了惰性气体的爵士吗？）的注意，他试图修改公式以适应 u 和 t 在高温长波下成正比这一实验结论，最终得出他自己的公式。不久后另一位物理学家金斯（j.h.jeans）计算出了公式里的常数，最后他们得到的公式形式如下：

$u = 8\pi (\nu^2) kt / c^3$ 这就是我们今天所说的瑞利-金斯公式（rayleigh-jeans），其中 ν 是频率， k 是玻尔兹曼常数， c 是光速。同样，没有兴趣的朋友可以不必理会它的具体涵义，这对于我们的故事没有什么影响。

这样一来，就从理论上证明了 u 和 t 在高温长波下成正比的实验结果。但是，也许就像俗语所说的那样，瑞利-金斯公式是一个拆东墙补西墙的典型。因为非常具有讽刺意义的是，它在长波方面虽然符合了实验数据，但在短波方面的失败却是显而易见的。当波长 λ 趋于 0，也就是频率 ν 趋向无穷大时，大家可以从上面的公式里看出我们的能量辐射也将不可避免地趋向无穷大。换句话说，我们的黑体将在波长短到一定程度时释放出几乎是无穷的能量来。

这个戏剧性的事件无疑是荒谬的，因为谁也没见过任何物体在任何温度下这样地释放能量辐射（如果真要这样的话，那么原子弹什么的就太简单了）。这个推论后来被加上了一个耸人听闻的，十分适合在科幻小说里出现的称呼，叫做“紫外灾变”。显然，瑞利-金斯公式也无法给出正确的黑体辐射分布。

我们在这里遇到的是一个相当微妙而尴尬的处境。我们的手里现在有两套公式，但不幸的是，它们分别只有在短波和长波的范围内才能起作用。这的确让人们非常的郁闷，就像你有两套衣服，其中的一套上装十分得体，但裤腿太长；另一套的裤子倒是合适了，但上装却小得无法穿上身。最要命的是，这两套衣服根本没办法合在一起穿。

总之，在黑体问题上，如果我们从经典粒子的角度出发去推导，就得到适用于短波的维恩公式。如果从类波的角度去推导，就得到适用于长波的瑞利-金斯公式。长波还是短波，那就是个问题。

这个难题就这样困扰着物理学家们，有一种黑色幽默的意味。当开尔文在台上描述这“第二朵乌云”的时候，人们并不知道这个问题最后将得到一种怎么样的解答。

然而，毕竟新世纪的钟声已经敲响，物理学的伟大革命就要到来。就在这个时候，我们故事里的第一个主角，一个留着小胡子，略微有些谢顶的德国人——马克斯·普朗克登上了舞台，物理学全新的一幕终于拉开了。

2-3

上次说到，在黑体问题的研究上，我们有了两套公式。可惜，一套只能对长波范围内有效，而另一套只对短波有效。正当人们为这个 dilemma 头痛不已的时候，马克斯·普朗克登上了历史舞台。命中注定，这个名字将要光照整个 20 世纪的物理史。

普朗克 (max carl ernst ludwig planck) 于 1858 年出生于德国基尔 (kiel) 的一个书香门第。他的祖父和曾祖父都是神学教授，他的父亲则是一位著名的法学教授，曾经参与过普鲁士民法的起草工作。1867 年，普朗克一家移居到慕尼黑，小普朗克便在那里上了中学和大学。在俾斯麦的帝国蒸蒸日上的时候，普朗克却保留着古典时期的优良风格，对文学和音乐非常感兴趣，也表现出了非凡的天才来。

不过，很快他的兴趣便转到了自然方面。在中学的课堂里，他的老师形象地给学生们讲述一位工人如何将砖头搬上房顶，而工人花的力气储存在高处的势能里，一旦砖头掉落下来，能量便又随之释放出来……。能量这种神奇的转换与守恒极大地吸引了好奇的普朗克，使得他把目光投向了神秘的自然规律中去，这也成为了他一生事业的起点。德意志失去了一位音乐家，但是失之东隅收之桑榆，她却因此得到了一位开天辟地的科学巨匠。

不过，正如我们在前一章里面所说的那样，当时的理论物理看起来可不是一个十分有前途的工作。普朗克在大学的导师祖利 (philipp von jolly) 劝他说，物理的体系已经建立得非常成熟和完整了，没有什么大的发现可以做出了，不必再花时间浪费在这个没有多大意义的工作上面。普朗克委婉地表示，他研究物理是出于对自然和理性的兴趣，只是想将现有的东西搞清楚罢了，并不奢望能够做出什么巨大的成就。讽刺地是，由今天看来，这个“很没出息”的表示却成就了物理界最大的突破之一，成就了普朗克一生的名望。我们实在应该为这一决定感到幸运。

1879 年，普朗克拿到了慕尼黑大学的博士学位，随后他便先后在基尔大学、慕尼黑大学和柏林大学任教，并接替了基尔霍夫的职业。普朗克的研究兴趣本来只是集中于经典热力学的领域，但是 1896 年，他读到了维恩关于黑体辐射的论文，并对此表现出了极大的兴趣。在普朗克看来，维恩公式体现出来的这种物体的内在规律——和物体本身性质无关的绝对规律——代表了某种客观的永恒不变的东西。它独立于人和物质世界而存在，不受外部世界的影响，是科学追求的最崇高的目标。普朗克的这种偏爱正是经典物理学的一种传统和风格，对绝对严格规律的一种崇尚。这种古典而保守的思想经过了牛顿、拉普拉斯和麦克斯韦，带着黄金时代的全部贵族气息，深深渗透在普朗克的骨子里面。然而，这位可敬的老派科学家却没有意识到，自己已经在不知不觉中走到了时代的最前沿，命运已经在冥冥之中，给他安排了一个离经叛道的角色。

让我们言归正传。在那个风云变幻的世纪之交，普朗克决定彻底解决黑体辐射这个困扰人们多时的问题。他的手上已经有了维恩公式，可惜这个公式只有在短波的范围内才能正确地预言实验结果。另一方面，虽然普朗克自己声称，他当时不清楚瑞利公式，但他无疑也知道，在长波范围内， u 和 t 成简单正比关系这一事实。这是由他的一个好朋友，实验物理学家鲁本斯 (heinrich rubens, 上一章提到过) 在 1900 年的 10 月 7 号的中午告诉他的。到那一天为止，普朗克在这个问题上已经花费了 6 年的时光 (1894 年，在他还没有了解到维恩的工作的时候，他就已经对这一领域开始了考察)，但是所有的努力都似乎徒劳无功。

现在，请大家肃静，让我们的普朗克先生好好地思考问题。摆在他面前的全部事实，就是我们有两个公式，分别只在一个有限的范围内起作用。但是，如果从根本上去追究那两个公式的推导，却无法发现任何问题。而我们的目的，在于找出一个普遍适用的公式来。

10 月的德国已经进入仲秋。天气越来越阴沉，厚厚的云彩堆积在天空中，黑夜一天比一天来得漫长。落叶缤纷，铺满了街道和田野，偶尔吹过凉爽的风，便沙沙作响起来。白天的柏林热闹而喧嚣，入夜的柏林静谧而庄重，但在这静谧和喧嚣中，却不曾有人想到，一个伟大的历史时刻即将到来。

在柏林大学那间堆满了草稿的办公室里，普朗克为了那两个无法调和的公式而苦思冥想。终于有一天，他决定，不再去做那些根本上的假定和推导，不管怎么样，我们先尝试着凑出一个可以满足所有波段的公式出来。其他的问题，之后再再说吧。

于是，利用数学上的内插法，普朗克开始玩弄起他手上的两个公式来。要做的事情，是让维恩公式的影响在长波的范围里尽量消失，而在短波里“独家”发挥出来。普朗克尝试了几天，终于遇上了一个 bingo moment，他凑出了一个公式，看上去似乎正符合要求。在长波的时候，它表现得就像正比关系一样。而在短波的时候，它则退化为维恩公式的原始形式。

10月19号，普朗克在柏林德国物理学会（deutschen physikalischen gesellschaft）的会议上，把这个新鲜出炉的公式公诸于众。当天晚上，鲁本斯就仔细比较了这个公式与实验的结果。结果，让他又惊又喜的是，普朗克的公式大获全胜，在每一个波段里，这个公式给出的数据都十分精确地与实验值相符合。第二天，鲁本斯便把这个结果通知了普朗克本人，在这个彻底的成功面前，普朗克自己都不由得一愣。他没有想到，这个完全是侥幸拼凑出来的经验公式居然有着这样强大的威力。

当然，他也想到，这说明公式的成功绝不仅仅是侥幸而已。这说明了，在那个神秘的公式背后，必定隐藏着一些不为人们所知的秘密。必定有某种普适的原则假定支持着这个公式，这才使得它展现出无比强大的力量来。

普朗克再一次地注视他的公式，它究竟代表了一个什么样的物理意义呢？他发现自己处在一个相当尴尬的地位，知其然，但不知其所以然。普朗克就像一个倒霉的考生，事先瞥了一眼参考书，但是答辩的时候却发现自己只记得那个结论，而完全不知道如何去证明和阐述它。实验的结果是确凿的，它毫不含糊地证明了理论的正确性，但是这个理论究竟为什么正确，它建立在什么样的基础上，它究竟说明了什么？却没有一个人可以回答。

然而，普朗克却知道，这里面隐藏的是一个至关重要的东西，它关系到整个热力学和电磁学的基础。普朗克已经模糊地意识到，似乎有一场风暴即将袭来，对于这个不起眼的公式的剖析，将改变物理学的一些面貌。一丝第六感告诉他，他生命中最重要的一段时期已经到来了。

多年以后，普朗克在给人的信中说：

“当时，我已经为辐射和物质的问题而奋斗了6年，但一无所获。但我知道，这个问题对于整个物理学至关重要，我也已经找到了确定能量分布的那个公式。所以，不论付出什么代价，我必须找到它在理论上的解释。而我非常清楚，经典物理学是无法解决这个问题的……”（letter to r. w. wood, 1931）

在人生的分水岭上，普朗克终于决定拿出他最大的决心和勇气，来打开面前的这个潘多拉盒子，无论那里面装的是什么。为了解开这个谜团，普朗克颇有一种破釜沉舟的气概。除了热力学的两个定律他认为不可动摇之外，甚至整个宇宙，他都做好了抛弃的准备。不过，饶是如此，当他终于理解了公式背后所包含的意义之后，他还是惊讶到不敢相信和接受所发现的一切。普朗克当时做梦也没有想到，他的工作绝不仅仅是改变物理学的一些面貌而已。事实上，整个物理学和化学都将被彻底摧毁和重建，一个新的时代即将到来。

1900年的最后几个月，黑体这朵飘在物理天空中的乌云，内部开始翻滚动荡起来。

饭后闲话：世界科学中心

在我们的史话里，我们已经看见了许许多多的科学伟人，从中我们也可以清晰地看见世界性科学中心的不断迁移。

现代科学创立之初，也就是 17, 18 世纪的时候，英国是毫无争议的世界科学中心（以前是意大利）。牛顿作为一代科学家的代表自不用说，波义耳、胡克、一直到后来的戴维、卡文迪许、道尔顿、法拉第、托马斯杨，都是世界首屈一指的大科学家。但是很快，这一中心转到了法国。法国的崛起由伯努利（daniel bernoulli）、达朗贝尔（j.r.d'alembert）、拉瓦锡、拉马克等开始，到了安培（andre marie ampere）、菲涅尔、卡诺（nicolas carnot）、拉普拉斯、傅科、泊松、拉格朗日的时代，已经在欧洲独领风骚。不过进入 19 世纪的后半，德国开始迎头赶上，涌现出了一大批天才，高斯、欧姆、洪堡、沃勒（friedrich wohler）、赫尔姆霍兹、克劳修斯、玻尔兹曼、赫兹……虽然英国连出了法拉第、麦克斯韦、达尔文这样的伟人，也不足以抢回它当初的地位。到了 20 世纪初，德国在科学方面的成就到达了最高峰，成为了世界各地科学家心目中的圣地，柏林、慕尼黑和哥廷根成为了当时自然科学当之无愧的世界性中心。我们在以后的史话里，将会看到越来越多德国人的名字。不幸的是，纳粹上台之后，德国的科技地位一落千丈，大批科学家出逃外国，直接造成了美国的崛起，直到今日。

只不知，下一个霸主又会是谁呢？

2-4

上次说到，普朗克在研究黑体的时候，偶尔发现了一个普适公式，但是，他却不知道这个公式背后的物理意义。

为了能够解释他的新公式，普朗克已经决定抛却他心中的一切传统成见。他反复地咀嚼新公式的含义，体会它和原来那两个公式的联系以及不同。我们已经看到了，如果从玻尔兹曼运动粒子的角度来推导辐射定律，就得到维恩的形式，要是从纯麦克斯韦电磁辐射的角度来推导，就得到瑞利-金斯的形式。那么，新的公式，它究竟是建立在粒子的角度上，还是建立在波的角度上呢？

作为一个传统的保守的物理学家，普朗克总是尽可能试图在理论内部解决问题，而不是颠覆这个理论以求得突破。更何况，他面对的还是有史以来最伟大的麦克斯韦电磁理论。但是，在种种尝试都失败了以后，普朗克发现，他必须接受他一直不喜欢的统计力学立场，从玻尔兹曼的角度来看问题，把熵和几率引入到这个系统里来。

那段日子，是普朗克一生中最忙碌，却又最光辉的日子。20 年后，1920 年，他在诺贝尔得奖演说中这样回忆道：

“……经过一生中最紧张的几个礼拜的工作，我终于看见了黎明的曙光。一个完全意想不到的景象在我面前呈现出来。”（...until after some weeks of the most intense work of my life clearness began to dawn upon me, and an unexpected view revealed itself in the distance）

什么是“完全意想不到的景象”呢？原来普朗克发现，仅仅引入分子运动理论还是不够的，在处理熵和几率的关系时，如果要使得我们的新方程成立，就必须做一个假定，假设能量在发射和吸收的时候，不是连续不断，而是分成一份一份的。

为了引起各位听众足够的注意力，我想我应该把上面这段话重复再写一遍。事实上我很想用初号的黑体字来写这段话，但可惜论坛不给我这个功能。

“必须假定，能量在发射和吸收的时候，不是连续不断，而是分成一份一份的。”

在了解它的具体意义之前，不妨先了解一个事实：正是这个假定，推翻了自牛顿以来 200 多年，曾经被认为是坚固不可摧毁的经典世界。这个假定以及它所衍生出的意义，彻底改变了自古以来人们对世界的最根本的认识。极盛一时的

帝国，在这句话面前轰然土崩瓦解，倒塌之快之彻底，就像爱伦·坡笔下厄舍家那间不祥的庄园。

好，回到我们的故事中来。能量不是连续不断的，这有什么了不起呢？

很了不起。因为它和有史以来一切物理学家的观念截然相反（可能某些伪科学家除外，呵呵）。自从伽利略和牛顿用数学规则驯服了大自然之后，一切自然的过程就都被当成是连续不间断的。如果你的中学物理老师告诉你，一辆小车沿直线从 a 点行驶到 b 点，却不经过两点中间的 c 点，你一定会觉得不可思议，甚至开始怀疑该教师是不是和校长有什么裙带关系。自然的连续性是如此地不容置疑，以致几乎很少有人会去怀疑这一点。当预报说气温将从 20 度上升到 30 度，你会毫不犹豫地判定，在这个过程中气温将在某个时刻到达 25 度，到达 28 度，到达 29 又 1/2 度，到达 29 又 3/4 度，到达 29 又 9/10 度……总之，一切在 20 度到 30 度之间的值，无论有理的还是无理的，只要它在那段区间内，气温肯定会在某个时刻，精确地等于那个值。

对于能量来说，也是这样。当我们说，这个化学反应总共释放出了 100 焦耳的能量时，我们每个人都会潜意识地推断出，在反应期间，曾经有某个时刻，总体系释放的能量等于 50 焦耳，等于 32.233 焦耳，等于 3.14159……焦耳。总之，能量的释放是连续的，它总可以在某个时刻达到范围内的任何可能的值。这个观念是如此直接地植入我们的内心深处，显得天经地义一般。

这种连续性，平滑性的假设，是微积分的根本基础。牛顿、麦克斯韦那庞大的体系，便建筑在这个地基之上，度过了百年的风雨。当物理遇到困难的时候，人们纵有怀疑的目光，也最多盯着那巍巍大厦，追问它是不是在建筑结构上有问题，却从未有丝毫怀疑它脚下的土地是否坚实。而现在，普朗克的假设引发了一场大地震，物理学所赖以建立的根本基础开始动摇了。

普朗克的方程倔强地要求，能量必须只有有限个可能态，它不能是无限连续的。在发射的时候，它必须分成有限的一份份，必须有个最小的单位。这就像一个吝啬鬼无比心痛地付帐，虽然他尽可能地试图一次少付点钱，但无论如何，他每次最少也得付上 1 个 penny，因为没有比这个更加小的单位了。这个付钱的过程，就是一个不连续的过程。我们无法找到任何时刻，使得付帐者正好处于付了 1.00001 元这个状态，因为最小的单位就是 0.01 元，付的帐只能这样“一份一份”地发出。我们可以找到他付了 1 元的时候，也可以找到他付了 1.01 元的时候，但在这两个状态中间，不存在别的状态，虽然从理论上说，1 元和 1.01 元之间，还存在着无限多个数字。

普朗克发现，能量的传输也必须遵照这种货币式的方法，一次至少要传输一个确定的量，而不可以无限地细分下去。能量的传输，也必须有一个最小的基本单位。能量只能以这个单位为基础一份份地发出，而不能出现半个单位或者四分之一单位这种情况。在两个单位之间，是能量的禁区，我们永远也不会发现，能量的计量会出现小数点以后的数字。

1900 年 12 月 14 日，人们还在忙活着准备欢度圣诞节。这一天，普朗克在德国物理学会上发表了的大胆假设。他宣读了那篇名留青史的《黑体光谱中的能量分布》的论文，其中改变历史的是这段话：

为了找出 n 个振子具有总能量 u_n 的可能性，我们必须假设 u_n 是不可连续分割的，它只能是一些相同部件的有限总和……（die wahrscheinlichkeit zu finden, dass die n resonatoren insgesamt schwingungsenergie u_n besitzen, u_n nicht als eine unbeschränkt teilbare, sondern als seine ganzen zahl von endlichen gleichen teilen aufzufassen...）

这个基本部件，普朗克把它称作“能量子”（energieelement），但随后很快，在另一篇论文里，他就改称为“量子”（elementarquantum），英语就是 quantum。这个字来自拉丁文 quantus，本来的意思就是“多少”，“量”。量子就是能量的最小单位，就是能量里的一美分。一切能量的传输，都只能以这个量为单位来进行，它可以传输一个量子，两个量子，任意整数个量子，但却不能传输 1 又 1/2 个量子，那个状态是不允许的，就像你不能用现钱支付 1 又 1/2 美分一样。

那么，这个最小单位究竟是多少呢？从普朗克的方程里可以容易地推算出这个常数的大小，它约等于 6.55×10^{-27} 尔格*秒，换算成焦耳，就是 6.626×10^{-34} 焦耳*秒。这个单位相当的小，也就是说量子非常的小，非常精细。因此由它们组成的能量自然也十分“细密”，以至于我们通常看起来，它就好像是连续的一样。这个值，现在已经成为了自然科学中最为重要的常数之一，以它的发现者命名，称为“普朗克常数”，用 h 来表示。

请记住 1900 年 12 月 14 日这个日子，这一天就是量子力学的诞辰。量子的幽灵从普朗克的方程中脱胎出来，开始在欧洲上空游荡。几年以后，它将爆发出令人咋舌的力量，把一切旧的体系彻底打破，并与联合起来的保守派们进行一场惊天动地的决斗。我们将在以后的章节里看到，这个幽灵是如此地具有革命性和破坏性，以致于它所过之处，最富丽堂皇的宫殿都在瞬间变成了断瓦残垣。物理学构筑起来的精密体系被毫不留情地砸成废铁，千百年来亘古不变的公理被扔进垃圾箱中不得翻身。它所带来的震撼力和冲击力是如此地大，以致于后来它的那些伟大的开创者们都惊吓不已，纷纷站到了它的对立面。当然，它也决不仅仅是一个破坏者，它更是一个前所未有的建设者，科学史上最杰出的天才们参与了它成长中的每一步，赋予了它华丽的性格和无可比拟的力量。人类理性最伟大的构建终将在它的手中诞生。

一场前所未有的革命已经到来，一场最为反叛和彻底的革命，也是最具有传奇和史诗色彩的革命。暴风雨的种子已经在乌云的中心酿成，只等适合的时候，便要催动起史无前例的雷电和风暴，向世人昭示它的存在。而这一切，都是从一个叫做马克斯·普朗克的男人那里开始的。

饭后闲话：连续性和悖论

古希腊有个学派叫做爱利亚派，其创建人名叫巴门尼德（parmenides）。这位哲人对运动充满了好奇，但在他看来，运动是一种自相矛盾的行为，它不可能是真实的，而一定是一个假相。为什么呢？因为巴门尼德认为世界上只有一个唯一的“存在”，既然是唯一的存在，它就不可能有运动。因为除了“存在”就是“非存在”，“存在”怎么可能移动到“非存在”里面去呢？所以他认为“存在”是绝对静止的，而运动是荒谬的，我们所理解的运动只是假相而已。

巴门尼德有个学生，就是大名鼎鼎的芝诺（zeno）。他为了为他的老师辩护，证明运动是不可能的，编了好几个著名的悖论来说明运动的荒谬性。我们在这里谈谈最有名的一个，也就是“阿喀琉斯追龟辩”，这里面便牵涉到时间和空间的连续性问题。

阿喀琉斯是史诗《伊利亚特》里的希腊大英雄。有一天他碰到一只乌龟，乌龟嘲笑他说：“别人都说你厉害，但我看你如果跟我赛跑，还追不上我。”

阿喀琉斯大笑说：“这怎么可能。我就算跑得再慢，速度也有你的 10 倍，哪会追不上你？”

乌龟说：“好，那我们假设一下。你离我有 100 米，你的速度是我的 10 倍。现在你来追我了，但当你跑到我现在这个位置，也就是跑了 100 米的时候，我也已经又向前跑了 10 米。当你再追到这个位置的时候，我又向前跑了 1 米，你再追 1 米，我又跑了 1/10 米……总之，你只能无限地接近我，但你永远也不能追上我。”

阿喀琉斯怎么听怎么有道理，一时丈二和尚摸不着头脑。

这个故事便是有着世界性声名的“芝诺悖论”（之一），哲学家们曾经从各种角度多方面地阐述过这个命题。这个命题令人困扰的地方，就在于它采用了一种无限分割空间的办法，使得我们无法跳过这个无限去谈问题。虽然从数学上，我们可以知道无限次相加可以限制在有限的值里面，但是数学从本质上只能告诉我们怎么做，而不能告诉我们能不能做到。

但是，自从量子革命以来，学者们越来越多地认识到，空间不一定能够这样无限分割下去。量子效应使得空间和时间的连续性丧失了，芝诺所连续无限次分割的假设并不能够成立。这样一来，芝诺悖论便不攻自破了。量子论告诉我们，“无限分割”的概念是一种数学上的理想，而不可能在现实中实现。一切都是不连续的，连续性的美好蓝图，其实不过是我们的一种想象。

2-5

我们的故事说到这里，如果给大家留下这么一个印象，就是量子论天生有着救世主的气质，它一出世就像闪电划破夜空，引起众人的惊叹及欢呼，并摧枯拉朽般地打破旧世界的体系。如果是这样的话，那么笔者表示抱歉，因为事实远远并非如此。

我们再回过头来看看物理史上的伟大理论：牛顿的体系闪耀着神圣不可侵犯的光辉，从诞生的那一刻起便有着一种天上下地唯我独尊的气魄。麦克斯韦的方程组简洁深刻，倾倒众生，被誉为上帝谱写的诗歌。爱因斯坦的相对论虽然是平民出身，但骨子却继承着经典体系的贵族优雅气质，它的光芒稍经发掘后便立即照亮了整个时代。这些理论，它们的成功都是近乎压倒性的，天命所归，不可抗拒。而伟人们的个人天才和魅力，则更加为其抹上了高贵而骄傲的色彩。但量子论却不同，量子论的成长史，更像是一部艰难的探索史，其中的每一步，都充满了陷阱、荆棘和迷雾。量子的诞生伴随着巨大的阵痛，它的命运注定了将要起伏而多舛。量子论的思想是如此反叛和躁动，以至于它与生俱来地有着一种对抗权贵的平民风格；而它显示出来的潜在力量又是如此地巨大而近乎无法控制，这一切都使得所有的人都对它怀有深深的惧意。

而在这些怀有戒心的人们中间，最有讽刺意味的就要算量子的创始人：普朗克自己了。作为一个老派的传统物理学家，普朗克的思想是保守的。虽然在那个决定命运的1900年，他鼓起了最大的勇气做出了量子的革命性假设，但随后他便为这个离经叛道的思想而深深困扰。在黑体问题上，普朗克孤注一掷想要得到一个积极的结果，但最后导出的能量不连续性的图象却使得他大为吃惊和犹豫，变得畏缩不前起来。

如果能量是量子化的，那么麦克斯韦的理论便首当其冲站在应当受置疑的地位，这在普朗克看来是不可思议，不可想象的。事实上，普朗克从来不把这当做一个问题，在他看来，量子的假设并不是一个物理真实，而纯粹是一个为了方便而引入的假设而已。普朗克压根也没有想到，自己的理论在历史上将会有着多么大的意义，当后来的一系列事件把这个意义逐渐揭露给他看时，他简直都不敢相信自己的眼睛，并为此惶恐不安。有人戏称，普朗克就像是童话里的那个渔夫，他亲手把魔鬼从封印的瓶子里放了出来，自己却反而被这个魔鬼吓了个半死。

有十几年的时间，量子被自己的创造者所抛弃，不得不流浪四方。普朗克不断地告诫人们，在引用普朗克常数 h 的时候，要尽量小心谨慎，不到万不得已千万不要胡思乱想。这个思想，一直要到1915年，当玻尔模型取得了空前的成功后，才在普朗克的脑海中扭转过来。量子论就像神话中的英雄海格力斯（hercules），一出生就被抛弃在荒野里，命运更为他安排了重重枷锁。他的所有荣耀，都要靠自己那非凡的力量和一系列艰难的斗争来争取。作为普朗克本人来说，他从一个革命的创始者而最终走到了时代的反面，没能在这段振奋人心的历史中起到更多的积极作用，这无疑是十分遗憾的。在他去世前出版的《科学自传》中，普朗克曾回忆过他那企图调和量子与经典理论的徒劳努力，并承认量子的意义要比那时他所能想象的重要得多。

不过，我们并不能因此而否认普朗克在量子论所做出的伟大而决定性的贡献。有一些观点可能会认为普朗克只是凭借了一个巧合般的猜测，一种胡乱的拼凑，一个纯粹的运气才发现了他的黑体方程，进而假设了量子的理论。他只是个幸运儿，碰巧猜到了那个正确的答案而已。而这个答案究竟意味着什么，这个答案的内在价值却不是他能够回答和挖掘的。但是，几乎所有的关于普朗克的传记和研究都会告诉我们，虽然普朗克的公式在很大程度上是经验主义的，但是一切证据都表明，他已经充分地对这个答案做好了准备。1900年，普朗克在黑体研究方面已经浸淫了6年，做好了理论上突破的一切准备工作。其实在当时，他自己已经很清楚，经典的电磁理论已经无法解释实验结果，必须引入热力学解

释。而这样一来，辐射能量的不连续性已经是一个不可避免的结果。这个概念其实早已在他的脑海中成形，虽然可能普朗克本人没有清楚地意识到这一点，或者不肯承认这一点，但这个思想在他的潜意识中其实已经相当成熟，呼之欲出了。正因为如此，他才能在导出方程后的短短时间里，以最敏锐的直觉指出蕴含在其中的那个无价的假设。普朗克以一种那个时代非常难得的开创性态度来对待黑体的难题，他为后来的人打开了一扇通往全新未知世界的大门。无论从哪个角度来看，这样的伟大工作，其意义都是不能低估的。

而普朗克的保守态度也并不是偶然的。实在是量子的思想太惊人，太过于革命。从量子论的成长历史来看，有着这样一个怪圈：科学巨人们参与了推动它的工作，却终于因为不能接受它惊世骇俗的解释而纷纷站到了保守的一方去。在这个名单上，除了普朗克，更有闪闪发光的瑞利、汤姆逊、爱因斯坦、德布罗意，乃至薛定谔。这些不仅是物理史上最伟大的名字，好多更是量子论本身的开创者和关键人物。量子就在同它自身创建者的斗争中成长起来，每一步都迈得艰难而痛苦不堪。我们会在以后的章节中，详细地去观察这些激烈的思想冲击和观念碰撞。不过，正是这样的磨砺，才使得一部量子史话显得如此波澜壮阔，激动人心，也使得量子论本身更加显出它的不朽光辉来。量子论不像牛顿力学或者爱因斯坦相对论，它的身上没有天才的个人标签，相反，整整一代精英共同促成了它的光荣。

作为老派科学家的代表，普朗克的科学精神和人格力量无疑是可敬的。在纳粹统治期间，正是普朗克的努力，才使得许多犹太裔的科学家得到保护，得以继续工作。但是，量子论这个精灵蹦跳在时代的最前缘，它需要最有锐气的头脑和最富有创见的思想来激活它的灵气。20世纪初，物理的天空中已是黑云压城，每一升空气似乎都在激烈地对流和振荡。一个伟大的时代需要伟大的人物，有史以来最出色和最富激情的一代物理学家便在这乱世的前夕成长起来。

1900年12月14日，普朗克在柏林宣读了他关于黑体辐射的论文，宣告了量子的诞生。那一年他42岁。

就在那一年，一个名叫阿尔伯特·爱因斯坦（albert einstein）的青年从苏黎世联邦工业大学（eth）毕业，正在为将来的生活发愁。他在大学里旷了无穷多的课，以致他的教授闵可夫斯基（minkowski）愤愤地骂他是“懒狗”。没有一个人肯留他在校做理论或者实验方面的工作，一个失业的黯淡前途正等待着这位不修边幅的年轻人。

在丹麦，15岁的尼尔斯·玻尔（niels bohr）正在哥本哈根的中学里读书。玻尔有着好动的性格，每次打架或争论，总是少不了他。学习方面，他在数学和科学方面显示出了非凡的天才，但是他的笨拙的口齿和惨不忍睹的作文却是全校有名的笑柄。特别是作文最后的总结（conclusion），往往使得玻尔头痛半天，在他看来，这种总结是无意义的重复而已。有一次他写一篇关于金属的论文，最后总结道：in conclusion, i would like to mention uranium（总而言之，我想说的是铀）。

埃尔文·薛定谔（erwin schrodinger）比玻尔小两岁，当时在维也纳的一间著名的高级中学 akademisches gymnasium 上学。这间中学也是物理前辈玻尔兹曼，著名剧作家施尼茨勒（arthur schnitzler）和齐威格（stefanie zweig）的母校。对于刚入校的学生来说，拉丁文是最重要的功课，每周要占8个小时，而数学和物理只用3个小时。不过对薛定谔来说一切都是小菜一碟，他热爱古文、戏剧和历史，每次在班上都是第一。小埃尔文长得非常帅气，穿上礼服和紧身裤，俨然一个翩翩小公子，这也使得他非常受到欢迎。

马克斯·波恩（max born）和薛定谔有着相似的教育背景，经过了家庭教育，高级中学的过程进入了布雷斯劳大学（这也是当时德国和奥地利中上层家庭的普遍做法）。不过相比薛定谔来说，波恩并不怎么喜欢拉丁文，甚至不怎么喜欢代数，尽管他对数学的看法后来在大学里得到了改变。他那时疯狂地喜欢上了天文，梦想着将来成为一个天文学家。

路易斯·德布罗意（louis de broglie）当时8岁，正在他那显赫的贵族家庭里接受良好的幼年教育。他对历史表现出浓厚的兴趣，并乐意把自己的时间花在这上面。

沃尔夫冈·恩斯特·泡利（wolfgang ernst pauli）才出生8个月，可怜的小家伙似乎一出世就和科学结缘。他的 middle name, ernst, 就是因为他父亲崇拜著名的科学家恩斯特·马赫（ernst mach）才给他取的。

而再过 12 个月，维尔兹堡(wurzberg)的一位著名希腊文献教授就要喜滋滋地看着他的宝贝儿子小海森堡(werner karl heisenberg)呱呱坠地。稍早前，罗马的一位公务员把他的孩子命名为恩里科·费米(enrico fermi)。20 个月后，保罗·狄拉克(paul dirac)也将出生在英国的布里斯托尔港。

好，演员到齐。那么，好戏也该上演了。

第三章 火流星

3-1

在量子初生的那些日子里，物理学的境遇并没有得到明显的改善。这个叛逆的小精灵被他 的主人所抛弃，不得不在荒野中颠沛流离，积蓄力量以等待让世界震惊的那一天。在这段长达四年多的惨淡岁月里，人们带着一种鸵鸟心态来使用普朗克的公式，却掩耳盗铃般地去不去追究那公式背后的意义。然而在他们的头上，浓厚的乌云仍然驱之不散，反而有越来越逼人的气势，一场荡涤世界的暴雨终究无可避免。

预示这种巨变到来的，如同往常一样，是一道劈开天地的闪电。在混沌中，电火花擦出了耀眼的亮光，代表了永恒不变的希望。光和电这两种令神祇也敬畏的力量纠缠在一起，便在瞬间开辟出一整个新时代来。说到这里，我们还是要不厌其烦地回到第一章的开头，再去看一眼赫兹那个意义非凡的实验。正如我们已经提到过的那样，赫兹接收器上电火花的爆跃，证实了电磁波的存在，但他同时也发现，一旦有光照射到那个缺口上，那么电火花便出现得容易一些。

赫兹在论文里对这个现象进行了描述，但没有深究其中的原因。在那个激动人心的伟大时代，要做的事情太多了，而且以赫兹的英年早逝，他也没有闲暇来追究每一个遇到的问题。但是别人随即在这个方面进行了深入的研究，不久事实就很清楚了，原来是这样的：当光照射到金属上的时候，会从它的表面打出电子来。原本束缚在金属表面原子中的电子，不知是什么原因，当暴露在一定光线之下的时候，便如同惊弓之鸟纷纷往外逃窜，就像见不得光线的吸血鬼家族。对于光与电之间存在的这种饶有趣味的现象，人们给它取了一个名字，叫做“光电效应”(the photoelectric effect)。

很快，关于光电效应的一系列实验就在各个实验室被作出。虽然在当时来说，这些实验都是非常粗糙和原始的，但种种结果依然都表明了光和电之间这种现象的一些基本性质。人们不久便知道了两个基本的事实：首先，对于某种特定的金属来说，光是否能够从它的表面打击出电子来，这和光的频率有关。频率高的光线（比如紫外线）便能够打出能量较高的电子，而频率低的光（比如红光、黄光）则一个电子也打不出来。其次，能否打击出电子，这和光的强度无关。再弱的紫外线也能够打击出金属表面的电子，而再强的红光也无法做到这一点。增加光线的强度，能够做到的只是增加打击出电子的数量。比如强烈的紫光相对微弱的紫光来说，可以从金属表面打击出更多的电子来。

总而言之，对于特定的金属，能不能打出电子，由光的频率说了算。而打出多少电子，则由光的强度说了算。

但科学家们很快就发现，他们陷入了一个巨大的困惑中。因为.....这个现象没有道理，它似乎不应该是这样的啊。

我们都已经知道，光是一种波动。对于波动来说，波的强度便代表了它的能量。我们都很容易理解，电子是被某种能量束缚在金属内部的，如果外部给予的能量不够，便不足以将电子打击出来。但是，照道理说，如果我们增加光波的强度，那便是增加它的能量啊，为什么对于红光来说，再强烈的光线都无法打击出哪怕是一个电子来呢？而频率，频率是什么东西呢？无非是波振动的频繁程度而已。如果频率高的话，便是说波振动得频繁一点，那么照理说频繁振动的光波应该打击出更多数量的电子才对啊。然而所有的实验都指向相反的方向：光的强度决定电子数目，光的频率决定能否打出电子。这不是开玩笑吗？

想象一个猎人去打兔子，兔子都躲在地下的洞里，轻易不肯出来。猎人知道，对于狡猾的兔子来说，可能单单敲锣打鼓不足以把它吓出来，而一定要采用比如说水淹的手法才行。就是说，采用何种手法决定了能不能把兔子赶出来的问题。再假设本地有一千个兔子洞，那么猎人有多少助手，可以同时向多少洞穴行动这个因素便决定了能够吓出多少只兔子的数量。但是，在实际打猎中，这个猎人突然发现，兔子不出来不在于采用什么手法，而是有多少助手同时下手。如果只对一个兔子洞行动，哪怕天打五雷轰都没有兔子出来。而相反，有多少兔子被赶出来，这和我们的人数没关系，而是和采用的手法有关系。哪怕我有一千个人同时对一千个兔子洞敲锣打鼓，最多只有一个兔子跳出来。而只要我对一个兔子洞灌水，便会有一千只兔子四处乱窜。要是画漫画的话，这个猎人的头上一定会冒出一颗很大的汗珠。

科学家们发现，在光电效应问题上，他们面临着和猎人一样的尴尬处境。麦克斯韦的电磁理论在光电上显得一头雾水，不知怎么办才好。实验揭露出来的事实是简单而明了的，多次的重复只有更加证实了这个基本事实而已，但这个事实却和理论恰好相反。那么，问题出在哪里了呢？是理论错了，还是我们的眼睛在和我们开玩笑？

问题绝不仅仅是这些而已。种种迹象都表明，光的频率和打出电子的能量之间有着密切的关系。每一种特定频率的光线，它打出的电子的能量有一个对应的上限。打个比方说，如果紫外光可以激发出能量达到 20 电子伏的电子来，换了紫光可能就最多只有 10 电子伏。这在波动看来，是非常不可思议的。而且，根据麦克斯韦理论，一个电子的被击出，如果是建立在能量吸收上的话，它应该是一个连续的过程，这能量可以累积。也就是说，如果用很弱的光线照射金属的话，电子必须花一定的时间来吸收，才能达到足够的能量从而跳出表面。这样的话，在光照和电子飞出这两者之间就应该存在着一个时间差。但是，实验表明，电子的跃出是瞬时的，光一照到金属上，立即就会有电子飞出，哪怕再微弱的光线，也是一样，区别只是在于飞出电子的数量多少而已。

咄咄怪事。

对于可怜的物理学家们来说，万事总是不遂他们的愿。好不容易有了一个基本上完美的理论，实验总是要搞出一些怪事来搅乱人们的好梦。这个该死的光电效应正是一个令人丧气和扫兴的东西。高雅而尊贵的麦克斯韦理论在这个小泥塘前面大大地犯难，如何跨越过去而不弄脏自己那华丽的衣裳，着实是一桩伤脑筋的事情。

然而，更加不幸的是，人们总是小看眼前的困难。有着洁癖的物理学家们还在苦思冥想怎样可以把光电现象融入麦克斯韦理论之中去而不损害它的完美，他们却不知道这件事情比他们想象得要严重得多。很快人们就会发现，这根本不是孢子干不干净的问题，这是一个牵涉到整个物理体系基础的根本性困难。不过在当时，对于这一点，没有最天才、最大胆和最富有锐气的眼光，是无法看出来的。

不过话又说回来，科学上有史以来最天才、最大胆和最富有锐气的人物，恰恰生活在那个时代。

1905 年，在瑞士的伯尔尼专利局，一位 26 岁的小公务员，三等技师职称，留着一头乱蓬蓬头发的年轻人把他的眼光在光电效应的这个问题上停留了一下。这个人的名字叫做阿尔伯特·爱因斯坦。

于是在一瞬间，闪电划破了夜空。

暴风雨终于就要到来了。

3-2

位于伯尔尼的瑞士专利局如今是一个高效和现代化的机构，为人们提供专利、商标的申请和查询服务。漂亮的建筑和完善网络体系使得它也和别的一些大公司一样，呈现出一种典型的现代风格。作为纯粹的科学家来说，一般很少会

和专利局打交道，因为科学无国界，也没有专利可以申请。科学的大门，终究是向全世界开放的。

不过对于科学界来说，伯尔尼的专利局却意味着许多。它在现代科学史上的意义，不啻于伊斯兰文化中的麦加城，有一种颇为神圣的光辉在里边。这都是因为在 100 年前，这个专利局“很有眼光”地雇佣了一位小职员，他的名字就叫做阿尔伯特·爱因斯坦。这个故事再一次告诉我们，小庙里面有时也会出大和尚。

1905 年，对于爱因斯坦来讲，坏日子总算都已经过去得差不多了。那个为了工作和生计到处奔波彷徨的年代已经结束，不用再为自己的一无所成而自怨自艾不已。专利局提供给了他一个稳定的职位和收入，虽然只是三等技师——而他申请的是二等——好歹也是个正式的公务员了。三年前父亲的去世给爱因斯坦不小的打击，但他很快从妻子那里得到了安慰和补偿。塞尔维亚姑娘米列娃·玛利奇（mileva maric）在第二年（1903）答应嫁给这个常常显得心不在焉的冒失鬼，两人不久便有了一个儿子，取名叫做汉斯。

现在，爱因斯坦每天在他的办公室里工作 8 个小时，摆弄那堆形形色色的专利图纸，然后他赶回家，推着婴儿车到伯尔尼的马路上散步。空下来的时候，他和朋友们聚会，大家兴致勃勃地讨论休谟，斯宾诺莎和莱辛。心血来潮的时候，爱因斯坦便拿出他的那把小提琴，给大家表演或是伴奏。当然，更多的时候，他还是钻研最感兴趣的物理问题，陷入沉思的时候，往往废寝忘食。

1905 年是一个相当神秘的年份。在这一年，人类的天才喷薄而出，像江河那般奔涌不息，卷起最震撼人心的美丽浪花。以致于今天我们回过头去看，都不禁要惊叹激动，为那样的奇迹咋舌不已。这一年，对于人类的智慧来说，实在要算是一个极致的高峰，在那段日子里谱写出来的美妙的科学旋律，直到今天都让我们心醉神摇，不知肉味。而这一切大师作品的创作者，这个攀上天才顶峰的人物，便是我们这位伯尔尼专利局里的小公务员。

还是让我们言归正传，1905 年 3 月 18 日，爱因斯坦在《物理学纪事》（annalen derphysik）杂志上发表了一篇论文，题目叫做《关于光的产生和转化的一个启发性观点》（a heuristic interpretation of the radiation and transformation of light），作为 1905 年一系列奇迹的一个开始。这篇文章是爱因斯坦有生以来发表的第六篇正式论文（第一篇是 1901 年发表的关于毛细现象的东东，用他自己的话来说，“毫无价值”），而这篇论文将给他带来一个诺贝尔奖，也开创了属于量子论的一个新时代。

爱因斯坦是从普朗克的量子假设那里出发的。大家都还记得，普朗克假设，黑体在吸收和发射能量的时候，不是连续的，而是要分成“一份一份”，有一个基本的能量单位在那里。这个单位，他就称作“量子”，其大小则由普朗克常数 h 来描述。如果我们从普朗克的方程出发，我们很容易推导一个特定辐射频率的“量子”究竟包含了多少能量，最后的公式是简单明了的：

$$e = hv$$

其中 e 是能量， h 是普朗克常数， v 是频率。哪怕小学生也可以利用这个简单的公式来做一些计算。比如对于频率为 10^{15} 的辐射，对应的量子能量是多少呢？那么就简单地把 10^{15} 乘以 $h=6.6 \times 10^{-34}$ ，算出结果等于 6.6×10^{-19} 焦耳。这个数值很小，所以我们平时都不会觉察到非连续性的存在。

爱因斯坦阅读了普朗克的那些早已被大部分权威和他本人冷落到角落里去的论文，量子化的思想深深地打动了。凭着一种深刻的直觉，他感到，对于光来说，量子化也是一种必然的选择。虽然有天神一般的麦克斯韦理论高高在上，但爱因斯坦叛逆一切，并没有为之而止步不前。相反，他倒是认为麦氏的理论只能对于一种平均情况有效，而对于瞬间能量的发射、吸收等等问题，麦克斯韦是和实验相矛盾的。从光电效应中已经可以看出端倪来。

让我们再重温一下光电效应和电磁理论的不协调之处：

电磁理论认为，光作为一种波动，它的强度代表了它的能量，增强光的强度应该能够打击出更高能量的电子。但实

验表明，增加光的强度只能打击出更多数量的电子，而不能增加电子的能量。要打击出更高能量的电子，则必须提高照射光线的频率。

提高频率，提高频率。爱因斯坦突然灵光一闪， $e = h\nu$ ，提高频率，不正是提高单个量子的能量吗？更高能量的量子能够打击出更高能量的电子，而提高光的强度，只是增加量子的数量罢了，所以相应的结果是打击出更多数量的电子。一切在突然之间，显得顺理成章起来。

爱因斯坦写道：“.....根据这种假设，从一点所发出的光线在不断扩大的空间中的传播时，它的能量不是连续分布的，而是由一些数目有限的，局限于空间中某个地点的“能量子”（energy quanta）所组成的。这些能量子是不可分割的，它们只能整份地被吸收或发射。”

组成光的能量的这种最小的基本单位，爱因斯坦后来把它们叫做“光量子”（light quanta）。一直到了1926年，美国物理学家刘易斯（g.n.lewis）才把它换成了今天常用的名词，叫做“光子”（photon）。

从光量子的角度出发，一切变得非常简明易懂了。频率更高的光线，比如紫外光，它的单个量子要比频率低的光线含有更高的能量（ $e = h\nu$ ），因此当它的量子作用到金属表面的时候，就能够激发出拥有更多动能的电子来。而量子的能量和光线的强度没有关系，强光只不过包含了更多数量的光量子而已，所以能够激发出更多数量的电子来。但是对于低频光来说，它的每一个量子都不足以激发出电子，那么，含有再多的光量子也无济于事。我们把光电效应想象成一场有着高昂入场费的拍卖。每个量子是一个顾客，它所携带的能量相当于一个人拥有的资金。要进入拍卖现场，每个人必须先缴纳一定数量的入场费，而在会场内，一个人只能买一件物品。

一个光量子打击到金属表面的时候，如果它带的钱足够（能量足够高），它便有资格进入拍卖现场（能够打击出电子来）。至于它能够买到多好的物品（激发出多高能量的电子），那要取决于它付了入场费后还剩下多少钱（剩余多少能量）。频率越高，代表了一个人的钱越多，像紫外线这样的大款，可以在轻易付清入场费后还买的起非常贵的货物，而频率低一点的光线就没那么阔绰了。

但是，一个人有多少资金，这和一个“代表团”能够买到多少物品是没有关系的。能够买到多少数量的东西，这都和“代表团”的人数有关系（光的强度），而和每一个人有多少钱（光的频率）没关系。如果我有一个500人的代表团，每个人都有足够的钱入场，那么我就能买到500样货品回来，而你一个人再有再多钱，你也只能买一样东西（因为一个人只能买一样物品，规矩就是这样的）。至于买到的东西有多好，那是另一回事情。话又说回来，假如你一个代表团里每个人的钱太少，以致付不起入场费，那哪怕你人数再多，也是一样东西都买不到的，因为规矩是你只能以个人的身份入场，没有连续性和积累性，大家的钱不能凑在一起用。

爱因斯坦推导出的方程和我们的拍卖是一个意思：

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - p$$

$\frac{1}{2}mv^2$ 是激发出电子的最大动能，也就是我们说的，能买到“多好”的货物。 $h\nu$ 是单个量子的能量，也就是你总共有多少钱。 p 是激发出电子所需要的最小能量，也就是“入场费”。所以这个方程告诉我们的其实很简单：你能买到多好的货物取决于你的总资金减掉入场费用。

这里面关键的假设就是：光以量子的形式吸收能量，没有连续性，不能累积。一个量子激发出一个对应的电子。于是实验揭示出来的效应的瞬时性难题也迎刃而解：量子作用本来就是瞬时作用，没有积累的说法。但是，大家从这里面嗅到了些什么没有？光量子，光子，光究竟是一种什么东西呢？难道我们不是已经清楚地下了结论，光是一种波动吗？光量子是一个什么概念呢？

仿佛宿命一般，历史在转了一个大圈之后，又回到起点。关于光的本性问题，干戈再起，“第三次微波战争”一触即

发。而这次，导致的后果是全面的世界大战，天翻地覆，一切在毁灭后才得到重生。

饭后闲话：奇迹年

如果站在一个比较高的角度来看历史，一切事物都是遵循特定的轨迹的，没有无缘无故的事情，也没有不合常理的发展。在时代浪尖里弄潮的英雄人物，其实都只是适合了那个时代的基本要求，这才得到了属于他们的无上荣耀。但是，如果站在庐山之中，把我们的目光投射到具体的那个情景中去，我们也能够理解一个伟大人物为时代所带来的光荣和进步。虽然不能说，失去了这些伟大人物，人类的发展就会走向歧途，但是也不能否认英雄和天才们为这个世界所作出的巨大贡献。

在科学史上，就更是这样。整个科学史可以说就是以天才的名字来点缀的灿烂银河，而有几颗特别明亮的星辰，它们所发射出的光芒穿越了整个宇宙，一直到达时空的尽头。他们的智慧在某一个时期散发出如此绚烂的辉煌，令人叹为观止。一直到今天，我们都无法找出更加适合的词句来加以形容，而只能冠以“奇迹”的名字。科学史上有两个年份，便符合“奇迹”的称谓，而它们又是和两个天才的名字紧紧相连的。这两年分别是 1666 年和 1905 年，那两个天才便是牛顿和爱因斯坦。

1666 年，23 岁的牛顿为了躲避瘟疫，回到乡下的老家度假。在那段日子里，他一个人独立完成了几项开天辟地的工作，包括发明了微积分（流数），完成了光分解的实验分析，以及万有引力的开创性工作。在那一年，他为数学、力学和光学三大学科分别打下了基础，而其中的任何一项工作，都足以让他名列有史以来最伟大的科学家之列。很难想象，一个人的思维何以能够在如此短的时间内涌动出如此多的灵感，人们只能用一个拉丁文 *annus mirabilis* 来表示这一年，也就是“奇迹年”（当然，有人会争论说 1667 年其实也是奇迹年）。

1905 年的爱因斯坦也是这样。在专利局里蜗居的他在这一年发表了 6 篇论文，3 月 18 日，是我们上面提到过的关于光电效应的文章，这成为了量子论的奠基石之一。4 月 30 日，发表了关于测量分子大小的论文，这为他赢得了博士学位。5 月 11 日和后来的 12 月 19 日，两篇关于布朗运动的论文，成了分子论的里程碑。6 月 30 日，发表题为《论运动物体的电动力学》的论文，这个不起眼的题目后来被加上了一个如雷贯耳的名称，叫做“狭义相对论”，它的意义就不用我多说了。9 月 27 日，关于物体惯性和能量的关系，这是狭义相对论的进一步说明，并且在其中提出了著名的质能方程 $E=mc^2$ 。

单单这一年的工作，便至少配得上 3 个诺贝尔奖。相对论的意义是否是诺贝尔奖所能评价的，还难说得很。而这一切也不过是在专利局的办公室里，一个人用纸和笔完成的而已。的确很难想象，这样的奇迹还会不会再次发生，因为实在是太过于不可思议了。在科学高度细化的今天，已经无法想象，一个人能够在如此短时间内作出如此巨大的贡献。100 年前的庞加莱已经被称为数学界的“最后一位全才”，而爱因斯坦的相对论，也可能是最后一个富有个人英雄主义传奇色彩的理论了吧？这是我们的幸运，还是不幸呢？

3-3

上次说到，爱因斯坦提出了光量子的假说，用来解释光电效应中无法用电磁理论说通的现象。然而，光量子的概念却让别的科学家们感到非常地不理解。光的问题不是已经被定性了吗？难道光不是已经被包括在麦克斯韦理论之内，作为电磁波的一种被清楚地描述了吗？这个光子又是怎么一回事呢？

事实上，光子是一个非常大胆的假设，它是在直接地向经典物理体系挑战。爱因斯坦本人也意识到这一点，在他看来，这可是他最有叛逆性的一篇论文了。在写给好友哈比希特（c.habicht）的信中，爱因斯坦描述了他划时代的四篇论文，只有在光量子上，他才用了“非常革命”的字眼，而甚至相对论都没有这样的描述。光量子和传统的电磁波动图象显得格格不入，它其实就是昔日微粒说的一种翻版，假设光是离散的，由一个个小的基本单位所组成的。自托马斯·杨的时

代又已经过去了一百年，冥冥中天道循环，当年被打倒在地的霸主以反叛的姿态再次登上舞台，向已经占据了王位的波动说展开挑战。这两个命中注定的对手终于要进行一场最后的决战，从而领悟到各自存在的终极意义：如果没有了你，我独自站在这里，又是为了什么。

不过，光量子的处境和当年起义的波动一样，是非常困难和不为人所接受的。波动如今所占据的地位，甚至要远远超过 100 年前笼罩在牛顿光环下的微粒王朝。波动的王位，是由麦克斯韦钦点，而又有整个电磁王国作为同盟的。这场决战，从一开始就不再局限于光的领地之内，而是整个电磁谱的性质问题。而我们很快将要看到，十几年以后，战争将被扩大，整个物理世界都将被卷入进去，从而形成一场名副其实的世界大战。

当时，对于光量子的态度，连爱因斯坦本人都是非常谨慎的，更不用说那些可敬的老派科学绅士们了。一方面，这和经典的电磁图象不相容；另一方面，当时关于光电效应的实验没有一个能够非常明确地证实光量子的正确性。微粒的这次绝地反击，一直要到 1915 年才真正引起人们的注意，而起因也是非常讽刺的：美国人密立根（r.a.millikan）想用实验来证实光量子图象是错误的，但是多次反复实验之后，他却啼笑皆非地发现，自己已经在很大的程度上证实了爱因斯坦方程的正确性。实验数据相当有说服力地展示，在所有的情况下，光电现象都表现出量子化特征，而不是相反。

如果说密立根的实验只是微粒革命军的一次反围剿成功，其意义还不足以说服所有的物理学家的话，那么 1923 年，康普顿（a.h.compton）则带领这支军队取得了一场决定性的胜利，把他们所潜藏着的惊人力量展现得一览无余。经此一役后，再也没有人怀疑，起来对抗经典波动帝国的，原来是一支实力不相上下的正规军。这次战役的战场是 x 射线的地域。康普顿在研究 x 射线被自由电子散射的时候，发现一个奇怪的现象：散射出来的 x 射线分成两个部分，一部分和原来的入射射线波长相同，而另一部分却比原来的射线波长要长，具体的大小和散射角存在着函数关系。

如果运用通常的波动理论，散射应该不会改变入射光的波长才对。但是怎么解释多出来的那一部分波长变长的射线呢？康普顿苦苦思索，试图从经典理论中寻找答案，却撞得头破血流。终于有一天，他作了一个破釜沉舟的决定，引入光量子的假设，把 x 射线看作能量为 $h\nu$ 的光子束的集合。这个假定马上让他看到了曙光，眼前豁然开朗：那一部分波长变长的射线是因为光子和电子碰撞所引起的。光子像普通的小球那样，不仅带有能量，还具有冲量，当它和电子相撞，便将自己的能量交换一部分给电子。这样一来光子的能量下降，根据公式 $e = h\nu$ ， e 下降导致 ν 下降，频率变小，便是波长变大，over。

在粒子的基础上推导出波长变化和散射角的关系式，和实验符合得一丝不苟。这是一场极为漂亮的歼灭战，波动的力量根本没有任何反击的机会便被缴了械。康普顿总结道：“现在，几乎不用再怀疑伦琴射线（注：即 x 射线）是一种量子现象了……实验令人信服地表明，辐射量子不仅具有能量，而且具有一定方向的冲量。”

上帝造了光，爱因斯坦指出了什么是光，而康普顿，则第一个在真正意义上“看到”了这光。

“第三次微波战争”全面爆发了。卷土重来的微粒军团装备了最先进的武器：光电效应和康普顿效应。这两门大炮威力无穷，令波动守军难以抵挡，节节败退。但是，波动方面军近百年苦心经营的阵地毕竟不是那么容易突破的，麦克斯韦理论和整个经典物理体系的强大后援使得他们仍然立于不败之地。波动的拥护者们很快便清楚地意识到，不能再后退了，因为身后就是莫斯科！波动理论的全面失守将意味着麦克斯韦电磁体系的崩溃，但至少现在，微粒这一雄心勃勃的计划还难以实现。

波动在稳住了阵脚之后，迅速地重新评估了自己的力量。虽然在光电问题上它无能为力，但当初它赖以建国的那些王牌武器却依然没有生锈和失效，仍然有着强大的杀伤力。微粒的复兴虽然来得迅猛，但终究缺乏深度，它甚至不得不依靠从波动那里缴获来的军火来作战。比如我们已经看到的光电效应，对于光量子理论的验证牵涉到频率和波长的测定，而这却仍然要靠光的干涉现象来实现。波动的立国之父托马斯·杨，他的精神是如此伟大，以至在身后百年仍然光耀着波动的战旗，震慑一切反对力量。在每一间中学的实验室里，通过两道狭缝的光依然不依不饶地显示出明暗相间的干涉条

纹来，不容置疑地向世人表明他的波动性。菲涅尔的论文虽然已经在图书馆里蒙上了灰尘，但任何人只要有兴趣，仍然可以重复他的实验，来确认泊松亮斑的存在。麦克斯韦芳华绝代的方程组仍然在每天给出预言，而电磁波也仍然温顺地按照他的预言以 30 万公里每秒的速度行动，既没有快一点，也没有慢一点。

战局很快就陷入僵持，双方都屯兵于自己得心应手的阵地之内，谁也无心去占领对方的地盘。光子一陷入干涉的沼泽，便显得笨拙而无法自拔；光波一进入光电的丛林，也变得迷茫而不知所措。粒子还是波？在人类文明达到高峰的 20 世纪，却对宇宙中最古老的现象束手无策。

不过在这里，我们得话分两头。先让微粒和波动这两支军队对垒一阵子，我们跳出光和电磁波的世界，回过头去看看量子论是怎样影响了实实在在的物质——原子核和电子的。来自丹麦的王子粉墨登场，在他的头上，一颗大大的火流星划过这乌云密布的天空，虽然只是一闪即逝，但却在地上点燃了燎原大火，照亮了无边的黑暗。

3-4

1911 年 9 月，26 岁的尼尔斯·玻尔渡过英吉利海峡，踏上了不列颠岛的土地。年轻的玻尔不会想到，32 年后，他还要再一次来到这个岛上，但却是藏在一架蚊式轰炸机的弹仓里，冒着高空缺氧的考验和随时被丢进大海里的风险，九死一生后才到达了目的地。那一次，是邱吉尔首相亲自签署命令，从纳粹的手中转移了这位原子物理界的泰山北斗，使得盟军在原子弹的竞争方面成功地削弱了德国的优势。这也成了玻尔一生中最富有传奇色彩，为人所津津乐道的一段故事。

当然在 1911 年，玻尔还只是一个有着远大志向和梦想，却是默默无闻的青年。他走在剑桥的校园里，想象当年牛顿和麦克斯韦在这里走过的样子，欢欣鼓舞地像一个孩子。在草草地安定下来之后，玻尔做的第一件事情就是去拜访大名鼎鼎的 j.j.汤姆逊（joseph john thomson），后者是当时富有盛名的物理学家，卡文迪许实验室的头头，电子的发现者，诺贝尔奖得主。j.j.十分热情地接待了玻尔，虽然玻尔的英语烂得可以，两人还是谈了好长一阵子。j.j.收下了玻尔的论文，并把它放在自己的办公桌上。

一切看来都十分顺利，但可怜的尼尔斯并不知道，在漠视学生的论文这一点上，汤姆逊是“恶名昭著”的。事实上，玻尔的论文一直被闲置在桌子上，j.j.根本没有看过一个字。剑桥对于玻尔来说，实在不是一个让人激动的地方，他的 project 也进行得不是十分顺利。总而言之，在剑桥的日子里，除了在一个足球队里大显身手之外，似乎没有什么能让玻尔觉得值得一提的。失望之下，玻尔决定寻求一些改变，他把眼光投向了曼彻斯特。相比剑桥，曼彻斯特那污染的天空似乎没有什么吸引力，但对一个物理系的学生来说，那里却有一个闪着金光的名字：恩内斯特·卢瑟福（ernest rutherford）。

说起来，卢瑟福也是 j.j.汤姆逊的学生。这位出身于新西兰农场的科学家身上保持着农民那勤俭朴实的作风，对他的助手和学生们永远是那样热情和关心，提供所有力所能及的帮助。再说，玻尔选择的时机真是再恰当也不过了，1912 年，那正是一个黎明的曙光就要来临，科学新的一页就要被书写的年份。人们已经站在了通向原子神秘内部世界的门槛上，只等玻尔来迈出这决定性的一步了。

这个故事还要从前一个世纪说起。1897 年，j.j.汤姆逊在研究阴极射线的时候，发现了原子中电子的存在。这打破了从古希腊人那里流传下来的“原子不可分割”的理念，明确地向人们展示：原子是可以继续分割的，它有着自己的内部结构。那么，这个结构是怎么样的呢？汤姆逊那时完全缺乏实验证据，他于是展开自己的想象，勾勒出这样的图景：原子呈球状，带正电荷。而带负电荷的电子则一粒粒地“镶嵌”在这个圆球上。这样的一幅画面，也就是史称的“葡萄干布丁”模型，电子就像布丁上的葡萄干一样。但是，1910 年，卢瑟福和学生们的实验室里进行了一次名留青史的实验。他们用 α 粒子（带正电的氦核）来轰击一张极薄的金箔，想通过散射来确认那个“葡萄干布丁”的大小和性质。但是，极为不可思议的情况出现了：有少数 α 粒子的散射角度是如此之大，以致超过 90 度。对于这个情况，卢瑟福自己描述得非常形象：“这就像你用十五英寸的炮弹向一张纸轰击，结果这炮弹却被反弹了回来，反而击中了你自己一样”。

卢瑟福发扬了亚里士多德前辈“吾爱吾师，但吾更爱真理”的优良品格，决定修改汤姆逊的葡萄干布丁模型。他认识到， α 粒子被反弹回来，必定是因为它们和金箔原子中某种极为坚硬密实的核心发生了碰撞。这个核心应该是带正电，而且集中了原子的大部分质量。但是，从 α 粒子只有很少一部分出现大角度散射这一情况来看，那核心占据的地方是很小的，不到原子半径的万分之一。于是，卢瑟福在次年（1911）发表了她的这个新模型。在他描述的原子图象中，有一个占据了绝大部分质量的“原子核”在原子的中心。而在这原子核的四周，带负电的电子则沿着特定的轨道绕着它运行。这很像一个行星系统（比如太阳系），所以这个模型被理所当然地称为“行星系统”模型。在这里，原子核就像是我们的太阳，而电子则是围绕太阳运行的行星们。

但是，这个看来完美的模型却有着自身难以克服的严重困难。因为物理学家们很快就指出，带负电的电子绕着带正电的原子核运转，这个体系是不稳定的。两者之间会放射出强烈的电磁辐射，从而导致电子一点点地失去自己的能量。作为代价，它便不得不逐渐缩小运行半径，直到最终“坠毁”在原子核上为止，整个过程用时不过一眨眼的工夫。换句话说，就算世界如同卢瑟福描述的那样，也会在转瞬之间因为原子自身的坍缩而毁于一旦。原子核和电子将不可避免地放出辐射并互相中和，然后把卢瑟福和他的实验室，乃至整个英格兰，整个地球，整个宇宙都变成一团混沌。

不过，当然了，虽然理论家们发出如此阴森恐怖的预言，太阳仍然每天按时升起，大家都活得好好的。电子依然快乐地围绕原子打转，没有一点失去能量的预兆。而丹麦的年轻人尼尔斯·玻尔照样安安全全地抵达了曼彻斯特，并开始谱写物理史上属于他的华彩篇章。

玻尔没有因为卢瑟福模型的困难而放弃这一理论，毕竟它有着 α 粒子散射实验的强力支持。相反，玻尔对电磁理论能否作用于原子这一人们从未涉足过的层面，倒是抱有相当的怀疑成分。曼彻斯特的生活显然要比剑桥令玻尔舒心许多，虽然他和卢瑟福两个人的性格是如此不同，后者是个急性子，永远精力旺盛，而他玻尔则像个害羞的大男孩，说一句话都显得口齿不清。但他们显然是绝妙的一个团队，玻尔的天才在卢瑟福这个老板的领导下被充分地激发出来，很快就在历史上激起壮观的波澜。

1912年7月，玻尔完成了他在原子结构方面的第一篇论文，历史学家们后来常常把它称作“曼彻斯特备忘录”。玻尔在其中已经开始试图把量子的概念结合到卢瑟福模型中去，以解决经典电磁学所无法解释的难题。但是，一切都只不过是刚刚开始而已，在那片还没有前人涉足的处女地上，玻尔只能一步步地摸索前进。没有人告诉他方向应该在哪里，而他的动力也不过是对于卢瑟福模型的坚信和年轻人特有的巨大热情。玻尔当时对原子光谱的问题一无所知，当然也看不到它后来对于原子研究的决定性意义，不过，革命的方向已经确定，已经没有什么能够改变量子论即将崭露头角这个事实了。

在浓云密布的天空中，出现了一线微光。虽然后来证明，那只是一颗流星，但是这光芒无疑给已经僵硬而老化的物理世界注入了一种新的生机，一种有着新鲜气息和希望的活力。这光芒点燃了人们手中的火炬，引导他们去寻找真正的永恒的光明。

终于，7月24日，玻尔完成了他在英国的学习，动身返回祖国丹麦。在那里，他可爱的未婚妻玛格丽特正在焦急地等待着他，而物理学的未来也即将要向他敞开心扉。在临走前，玻尔把他的论文交给卢瑟福过目，并得到了热切的鼓励。只是，卢瑟福有没有想到，这个青年将在怎样的一个程度上，改变人们对世界的终极看法呢？

是的，是的，时机已到。伟大的三部曲即将问世，而真正属于量子的时代，也终于到来。

饭后闲话：诺贝尔奖得主的幼儿园

卢瑟福本人是一位伟大的物理学家，这是无需置疑的。但他同时更是一位伟大的物理导师，他以敏锐的眼光去发现

人们的天才，又以伟大的人格去关怀他们，把他们的潜力挖掘出来。在卢瑟福身边的那些助手和学生，后来绝大多数都出落得非常出色，其中更包括了为数众多的科学大师们。

我们熟悉的尼尔斯·玻尔，20 世纪最伟大的物理学家之一，1922 年诺贝尔物理奖得主，量子论的奠基人和象征。在曼彻斯特跟随过卢瑟福。 保罗·狄拉克 (paul dirac)，量子论的创始人之一，同样伟大的科学家，1933 年诺贝尔物理奖得主。他的主要成就都是在剑桥卡文迪许实验室做出的（那时卢瑟福接替了 j.j.汤姆逊成为这个实验室的主任）。狄拉克获奖的时候才 31 岁，他对卢瑟福说他不领这个奖，因为他讨厌在公众中的名声。卢瑟福劝道，如果不领奖的话，那么这个名声可就更响了。中子的发现者，詹姆斯·查德威克 (james chadwick) 在曼彻斯特花了两年时间在卢瑟福的实验室里。他于 1935 年获得诺贝尔物理奖。布莱克特 (patrick m. s. blackett) 在一次大战后辞去了海军上尉的职务，进入剑桥跟随卢瑟福学习物理。他后来改进了威尔逊云室，并在宇宙线和核物理方面作出了巨大的贡献，为此获得了 1948 年的诺贝尔物理奖。1932 年，沃尔顿 (e.t.s walton) 和考克劳夫特 (john cockcroft) 在卢瑟福的卡文迪许实验室里建造了强大的加速器，并以此来研究原子核的内部结构。这两位卢瑟福的弟子在 1951 年分享了诺贝尔物理奖金。这个名单可以继续开下去，一直到长得令人无法忍受为止：英国人索迪 (frederick soddy)，1921 年诺贝尔化学奖。瑞典人赫维西 (georg von hevesy)，1943 年诺贝尔化学奖。德国人哈恩 (otto habn)，1944 年诺贝尔化学奖。英国人鲍威尔 (cecil frank powell)，1950 年诺贝尔物理奖。美国人贝特 (hans bethe)，1967 年诺贝尔物理奖。苏联人卡皮查 (p.l.kapitsa)，1978 年诺贝尔化学奖。

除去一些稍微疏远一点的 case，卢瑟福一生至少培养了 10 位诺贝尔奖得主（还不算他自己本人）。当然，在他的学生中还有一些没有得到诺奖，但同样出色的名字，比如汉斯 R 26;盖革 (hans geiger, 他后来以发明了盖革计数器而著名)、亨利·莫斯里 (henry mosely, 一个被誉为有着无限天才的年轻人，可惜死在了一战的战场上)、恩内斯特·马斯登 (ernest marsden, 他和盖革一起做了 α 粒子散射实验，后来被封为爵士)等等，等等。

卢瑟福的实验室被后人称为“诺贝尔奖得主的幼儿园”。他的头像出现在新西兰货币的最大面值——100 元上面，作为国家对他最崇高的敬意和纪念。

3-5

1912 年 8 月 1 日，玻尔和玛格丽特在离哥本哈根不远的一个小镇上结婚，随后他们前往英国展开蜜月。当然，有一个人是万万不能忘记拜访的，那就是玻尔家最好的朋友之一，卢瑟福教授。

虽然是在蜜月期，原子和量子的图景仍然没有从玻尔的脑海中消失。他和卢瑟福就此再一次认真地交换了看法，并加深了自己的信念。回到丹麦后，他便以百分之二百的热情投入到这一工作中去。揭开原子内部的奥秘，这一梦想具有太大的诱惑力，令玻尔完全无法抗拒。

为了能使大家跟得上我们史话的步伐，我们还是再次描述一下当时玻尔面临的处境。卢瑟福的实验展示了一个全新的原子面貌：有一个致密的核心处在原子的中央，而电子则绕着这个中心运行，像是围绕着太阳的行星。然而，这个模型面临着严重的理论困难，因为经典电磁理论预言，这样的体系将会无可避免地释放出辐射能量，并最终导致体系的崩溃。换句话说，卢瑟福的原子是不可能稳定存在超过 1 秒钟的。

玻尔面临着选择，要么放弃卢瑟福模型，要么放弃麦克斯韦和他的伟大理论。玻尔勇气十足地选择了放弃后者。他以一种深刻的洞察力预见到，在原子这样小的层次上，经典理论将不再成立，新的革命性思想必须被引入，这个思想就是普朗克的量子以及他的 h 常数。

应当说这是一个相当困难的任务。如何推翻麦氏理论还在其次，关键是新理论要能够完美地解释原子的一切行为。玻尔在哥本哈根埋头苦干的那个年头，门捷列夫的元素周期律已经被发现了很久，化学键理论也已经被牢固地建立。种种迹象都表明在原子内部，有一种潜在的规律支配着它们的行为，并形成某种特定的模式。原子世界像一座蕴藏了无穷

财宝的金字塔，但如何找到进入其内部的通道，却是一个让人挠头不已的难题。

然而，像当年的贝尔佐尼一样，玻尔也有着一个探险家所具备的最宝贵的素质：洞察力和直觉，这使得他能够抓住那个不起眼，但却是唯一的，稍纵即逝的线索，从而打开那扇通往全新世界的大门。1913年初，年轻的丹麦人汉森（hans marius hansen）请教玻尔，在他那量子化的原子模型里如何解释原子的光谱线问题。对于这个问题，玻尔之前并没有太多地考虑过，原子光谱对他来说是陌生和复杂的，成千条谱线和种种奇怪的效应在他看来太杂乱无章，似乎不能从中得出什么有用的信息。然而汉森告诉玻尔，这里面其实是有规律的，比如巴尔末公式就是。他敦促玻尔关心一下巴尔末的工作。

突然间，就像伊翁（ion）发现了藏在箱子里的绘着戈耳工的麻布，一切都豁然开朗。山重水复疑无路，柳暗花明又一村。在谁也没有想到的地方，量子得到了决定性的突破。1954年，玻尔回忆道：当我一看见巴尔末的公式，一切就都清楚不过了。

要从头回顾光谱学的发展，又得从伟大的本生和基尔霍夫说起，而那势必又是一篇规模宏大的文字。鉴于篇幅，我们只需要简单地了解一下这方面的背景知识，因为本史话原来也没有打算把方方面面都事无巨细地描述完全。概括来说，当时的人们已经知道，任何元素在被加热时都会释放出含有特定波长的光线，比如我们从中学的焰色实验中知道，钠盐放射出明亮的黄光，钾盐则呈紫色，锂是红色，铜是绿色……等等。将这些光线通过分光镜投射到屏幕上，便得到光谱线。各种元素在光谱里一览无余：钠总是表现为一对黄线，锂产生一条明亮的红线和一条较暗的橙线，钾则是一条紫线。总而言之，任何元素都产生特定的唯一谱线。

但是，这些谱线呈现什么规律以及为什么会有这些规律，却是一个大难题。拿氢原子的谱线来说吧，这是最简单的原子谱线了。它就呈现为一组线段，每一条线都代表了一个特定的波长。比如在可见光区间内，氢原子的光谱线依次为：656, 484, 434, 410, 397, 388, 383, 380……纳米。这些数据无疑不是杂乱无章的，1885年，瑞士的一位数学教师巴尔末（johann balmer）发现了其中的规律，并总结了一个公式来表示这些波长之间的关系，这就是著名的巴尔末公式。将它的原始形式稍微变换一下，用波长的倒数来表示，则显得更加简单明了：

$$\nu = r (1/2^2 - 1/n^2)$$

其中的 r 是一个常数，称为里德伯（rydberg）常数， n 是大于 2 的正整数（3, 4, 5……等等）。

在很长一段时间里，这是一个十分有用的经验公式。但没有人可以说明，这个公式背后的意义是什么，以及如何从基本理论将它推导出来。但是在玻尔眼里，这无疑是一个晴天霹雳，它像一个火花，瞬间点燃了玻尔的灵感，所有的疑惑在那一刻变得顺理成章了，玻尔知道，隐藏在原子内部的秘密，终于向他嫣然展开笑颜。

我们来看一下巴尔末公式，这里面用到了一个变量 n ，那是大于 2 的任何正整数。 n 可以等于 3，可以等于 4，但不能等于 3.5，这无疑是一种量子化的表述。玻尔深呼吸了一口气，他的大脑在急速地运转，原子只能放射出波长符合某种量子规律的辐射，这说明了什么呢？我们回忆一下从普朗克引出的那个经典量子公式： $e = h\nu$ 。频率（波长）是能量的量度，原子只释放特定波长的辐射，说明在原子内部，它只能以特定的量吸收或发射能量。而原子怎么会吸收或者释放能量的呢？这在当时已经有了一定的认识，比如斯塔克（j.stark）就提出，光谱的谱线是由电子在不同势能的位置之间移动而放射出来的，英国人尼科尔森（j.w.nicholson）也有着类似的想法。玻尔对这些工作无疑都是了解的。

一个大胆的想法在玻尔的脑中浮现出来：原子内部只能释放特定量的能量，说明电子只能在特定的“势能位置”之间转换。也就是说，电子只能按照某些“确定的”轨道运行，这些轨道，必须符合一定的势能条件，从而使得电子在这些轨道间跃迁时，只能释放出符合巴尔末公式的能量来。

我们可以这样来打比方。如果你在中学里好好地听讲过物理课，你应该知道势能的转化。一个体重 100 公斤的人从 1 米高的台阶上跳下来，他/她会获得 1000 焦耳的能量，当然，这些能量会转化为落下时的动能。但如果情况是这样的，我们通过某种方法得知，一个体重 100 公斤的人跳下了若干级高度相同的台阶后，总共释放出了 1000 焦耳的能量，那么我们关于每一级台阶的高度可以说些什么呢？

明显而直接的计算就是，这个人总共下落了 1 米，这就为我们台阶的高度加上了一个严格的限制。如果在平时，我们会承认，一个台阶可以有任意的高度，完全看建造者的兴趣而已。但如果加上了我们的这个条件，每一级台阶的高度就不再是任意的了。我们可以假设，总共只有一级台阶，那么它的高度就是 1 米。或者这个人总共跳了两级台阶，那么每级台阶的高度是 0.5 米。如果跳了 3 次，那么每级就是 $1/3$ 米。如果你是间谍片的爱好者，那么大概你会推测每级台阶高 $1/39$ 米。但是无论如何，我们不可能得到这样的结论，即每级台阶高 0.6 米。道理是明显的：高 0.6 米的台阶不符合我们的观测（总共释放了 1000 焦耳能量）。如果只有一级这样的台阶，那么它带来的能量就不够，如果有两级，那么总高度就达到了 1.2 米，导致释放的能量超过了观测值。如果要符合我们的观测，那么必须假定总共有一又三分之二级台阶，而这无疑是荒谬的，因为小孩子都知道，台阶只能有整数级。

在这里，台阶数“必须”是整数，就是我们的量子化条件。这个条件就限制了每级台阶的高度只能是 1 米，或者 $1/2$ 米，而不能是这其间的任何一个数字。

原子和电子的故事在道理上基本和这个差不多。我们还记得，在卢瑟福模型里，电子像行星一样绕着原子核打转。当电子离核最近的时候，它的能量最低，可以看成是在“平地”上的状态。但是，一旦电子获得了特定的能量，它就获得了动力，向上“攀登”一个或几个台阶，到达一个新的轨道。当然，如果没有了能量的补充，它又将从那个高处的轨道上掉落下来，一直回到“平地”状态为止，同时把当初的能量再次以辐射的形式释放出来。

关键是，我们现在知道，在这一过程中，电子只能释放或吸收特定的能量（由光谱的巴尔末公式给出），而不是连续不断的。玻尔做出了合理的推断：这说明电子所攀登的“台阶”，它们必须符合一定的高度条件，而不能像经典理论所假设的那样，是连续而任意的。连续性被破坏，量子化条件必须成为原子理论的主宰。

我们不得不再一次用到量子公式 $e = hv$ ，还请各位多多包涵。史蒂芬·霍金在他那畅销书《时间简史》的 acknowledgements 里面说，插入任何一个数学公式都会使作品的销量减半，所以他考虑再三，只用了一个公式 $e = mc^2$ 。我们的史话本是戏作，也不考虑那么多，但就算列出公式，也不强求各位看客理解其数学意义。唯有这个 $e = hv$ ，笔者觉得还是有必要清楚它的含义，这对于整部史话的理解也是有好处的，从科学意义上来说，它也决不亚于爱因斯坦的那个 $e = mc^2$ 。所以还是不厌其烦地重复一下这个方程的描述： e 代表能量， h 是普朗克常数， v 是频率。

回到正题，玻尔现在清楚了，氢原子的光谱线代表了电子从一个特定的台阶跳跃到另外一个台阶所释放的能量。因为观测到的光谱线是量子化的，所以电子的“台阶”（或者轨道）必定也是量子化的，它不能连续而取任意值，而必须分成“底楼”，“一楼”，“二楼”等，在两层“楼”之间，是电子的禁区，它不可能出现在那里。正如一个人不能悬在两级台阶之间漂浮一样。如果现在电子在“三楼”，它的能量用 w_3 表示，那么当这个电子突发奇想，决定跳到“一楼”（能量 w_1 ）的期间，它便释放出了 $w_3 - w_1$ 的能量。我们要求大家记住的那个公式再一次发挥作用， $w_3 - w_1 = hv$ 。所以这一举动的直接结果就是，一条频率为 v 的谱线出现在该原子的光谱上。

玻尔所有的这些思想，转化成理论推导和数学表达，并以三篇论文的形式最终发表。这三篇论文（或者也可以说，一篇大论文的三个部分），分别题名为《论原子和分子的构造》（on the constitution of atoms and molecules），《单原子核体系》（systems containing only a single nucleus）和《多原子核体系》（systems containing several nuclei），于 1913 年 3 月到 9 月陆续寄给了远在曼彻斯特的卢瑟福，并由后者推荐发表在《哲学杂志》（philosophical magazine）上。这就是在量子物理历史上划时代的文献，亦即伟大的“三部曲”。

这确实是一个新时代的到来。如果把量子力学的发展史分为三部分，1900年的普朗克宣告了量子的诞生，那么1913年的玻尔则宣告了它进入了青年时代。一个完整的关于量子的理论体系第一次被建造起来，虽然我们将会看到，这个体系还留有浓重的旧世界的痕迹，但它的意义却是无论如何不能低估的。量子第一次使全世界震惊于它的力量，虽然它的意识还有一半仍在沉睡中，虽然它自己仍然置身于旧的物理大厦之内，但它的怒吼已经无疑地使整个旧世界摇摇欲坠，并动摇了延绵几百年的经典物理根基。神话中的巨人已经开始苏醒，那些藏在古老城堡里的贵族们，颤抖吧！

第四章 白云深处

4-1

应该说，玻尔关于原子结构的新理论出台后，是并不怎么受到物理学家们的欢迎的。这个理论，在某些人的眼中，居然怀有推翻麦克斯韦体系的狂妄意图，本身就是大逆不道的。瑞利爵士（我们前面提到过的瑞利-金斯线的发现者之一）对此表现得完全不感兴趣，j.j.汤姆逊，玻尔在剑桥的导师，拒绝对此发表评论。另一些不那么德高望重的人就直白多了，比如一位物理学家在课堂上宣布：“如果这些要用量子力学才能解释的话，那么我情愿不予解释。”另一些人则声称，要是量子模型居然是真实的话，他们从此退出物理学界。即使是思想开放的人，比如爱因斯坦和波恩，最初也觉得完全接受这一理论太勉强了一些。

但是量子的力量超乎任何人的想象。胜利来得如此之快之迅猛，令玻尔本人都几乎茫然而不知所措。首先，玻尔的推导完全符合巴耳末公式所描述的氢原子谱线，而从 $w_2 - w_1 = h\nu$ 这个公式，我们可以倒过来推算 ν 的表述，从而和巴耳末的原始公式 $\nu = r(1/2^2 - 1/n^2)$ 对比，计算出里德伯常数 r 的理论值来。而事实上，玻尔理论的预言和实验值仅相差千分之一，这无疑使得他的理论顿时具有了坚实的基础。

不仅如此，玻尔模型更预测了一些新的谱线的存在，这些预言都很快为实验物理学家们所证实。而在所谓“皮克林线系”（pickering line series）的争论中，玻尔更是以强有力的证据取得了决定性的胜利。他的原子体系异常精确地说明了一些氦离子的光谱，准确性相比旧的方程，达到了令人惊叹的地步。而亨利·莫斯里（我们前面提到过的年轻天才，可惜死在战场上的那位）关于 x 射线的工作，则进一步证实了原子有核模型的正确。人们现在已经知道，原子的化学性质，取决于它的核电荷数，而不是传统认为的原子量。基于玻尔理论，电子壳层模型，也一步一步发展起来。只有几个小困难需要解决，比如人们发现，氢原子的光谱并非一根线，而是可以分裂成许多谱线。这些效应在电磁场的参予下又变得更为古怪和明显（关于这些现象，人们用所谓的“斯塔克效应”和“塞曼效应”来描述）。但是玻尔体系很快就予以了强有力的回击，在争取得到爱因斯坦相对论的同盟军以及假设电子具有更多的自由度（量子数）的条件下，玻尔和别的一些科学家如索末菲（a.sommerfeld）证明，所有的这些现象，都可以顺利地包容在玻尔的量子体系之内。虽然残酷的世界大战已经爆发，但是这丝毫也没有阻挡科学在那个时期前进的伟大步伐。

每一天，新的报告和实验证据都如同雪花一样飞到玻尔的办公桌上。而几乎每一份报告，都在进一步地证实玻尔那量子模型的正确性。当然，伴随着这些报告，铺天盖地而来的还有来自社会各界的祝贺，社交邀请以及各种大学的聘书。玻尔俨然已经成为原子物理方面的带头人。出于对祖国的责任感，他拒绝了卢瑟福为他介绍的在曼彻斯特的职位，虽然无论从财政还是学术上说，那无疑是一个更好的选择。玻尔现在是哥本哈根大学的教授，并决定建造一所专门的研究所用作理论物理方面的进一步研究。这个研究所，正如我们以后将要看到的那样，将会成为欧洲一颗令人瞩目的明珠，它的光芒将吸引全欧洲最出色的年轻人到此聚集，并发射出更加璀璨的思想光辉。

在这里，我们不妨还是回顾一下玻尔模型的一些基本特点。它基本上是卢瑟福行星模型的一个延续，但是在玻尔模型中，一系列的量子化条件被引入，从而使这个体系有着鲜明的量子化特点。

首先，玻尔假设，电子在围绕原子核运转时，只能处于一些“特定的”能量状态中。这些能量状态是不连续的，称为

定态。你可以有 e_1 ，可以有 e_2 ，但是不能取 e_1 和 e_2 之间的任何数值。正如我们已经描述过的那样，电子只能处于一个定态中，两个定态之间没有缓冲地带，那里是电子的禁区，电子无法出现在那里。

但是，玻尔允许电子在不同的能量态之间转换，或者说，跃迁。电子从能量高的 e_2 状态跃迁到 e_1 状态，就放射出 $e_2 - e_1$ 的能量来，这些能量以辐射的方式释放，根据我们的基本公式，我们知道这辐射的频率为 ν ，从而使得 $e_2 - e_1 = h\nu$ 。反过来，当电子吸收了能量，它也可以从能量低的状态攀升到一个能量较高的状态，其关系还是符合我们的公式。我们必须注意，这种能量的跃迁是一个量子化的行为，如果电子从 e_2 跃迁到 e_1 ，这并不表示，电子在这一过程中经历了 e_2 和 e_1 两个能量之间的任何状态。如果你还是觉得困惑，那表示连续性的幽灵还在你的脑海中盘旋。事实上，量子像一个高超的魔术师，它在舞台的一端微笑着挥舞着帽子登场，转眼间便出现在舞台的另一边。而在任何时候，它也没有经过舞台的中央部分！

每一个可能的能级，都代表了一个电子的运行轨道，这就好比离地面 500 公里的卫星和离地面 800 公里的卫星代表了不同的势能一样。当电子既不放射也不吸收能量的时候，它就稳定地在一条轨道上运动。当它吸收了一定的能量，它就从原先的那个轨道消失，神秘地出现在离核较远的一条能量更高的轨道上。反过来，当它绝望地向着核坠落，就放射出它在高能轨道上所搜刮的能量来。

人们很快就发现，一个原子的化学性质，主要取决于它最外层的电子数量，并由此表现出有规律的周期性来。但是人们也曾经十分疑惑，那就是对于拥有众多电子的重元素来说，为什么它的一些电子能够长期地占据外层的电子轨道，而不会失去能量落到靠近原子核的低层轨道上去。这个疑问由年轻的泡利在 1925 年做出了解答：他发现，没有两个电子能够享有同样的状态，而一层轨道所能够包容的不同状态，其数目是有限的，也就是说，一个轨道有着一定的容量。当电子填满了一个轨道后，其他电子便无法再加入到这个轨道中来。

一个原子就像一幢宿舍，每间房间都有一个四位数的门牌号码。底楼只有两间房间，分别是 1001 和 1002。而二楼则有 8 间房间，门牌分别是 2001, 2002, 2101, 2102, 2111, 2112, 2121 和 2122。越是高层的楼，它的房间数量就越多。脾气暴躁的管理员泡利在大门口张贴了一张布告，宣布没有两个电子房客可以入住同一间房屋。于是电子们争先恐后地涌入这幢大厦，先到的两位占据了底楼那两个价廉物美的房间，后来者因为底楼已经住满，便不得不退而求其次，开始填充二楼的房间。二楼住满后，又轮到三楼、四楼……一直到租金离谱的六楼、七楼、八楼。不幸住在高处的电子虽然入不敷出，却没有办法，因为楼下都住满了人，没法搬走。叫苦不迭的他们把泡利那蛮横的规定称作“不相容原理”。

但是，这一措施的确能够更好地帮助人们理解“化学社会”的一些基本行为准则。比如说，喜欢合群的电子们总是试图让一层楼的每个房间都住满房客。我们设想一座“钠大厦”，在它的三楼，只有一位孤零零的房客住在 3001 房。而在相邻的“氯大厦”的三楼，则正好只有一间空房没人入主（3122）。出于电子对热闹的向往，钠大厦的那位孤独者顺理成章地决定搬迁到氯大厦中去填满那个空白的房间，而他也受到了那里房客们的热烈欢迎。这一举动也促成了两座大厦的联谊，形成了一个“食盐社区”。而在某些高层大厦里，由于空房间太多，没法找到足够的孤独者来填满一层楼，那么，即使仅仅填满一个侧翼（wing），电子们也表示满意。

所有的这一切，当然都是形象化和笼统的说法。实际情况要复杂得多，比如每一层楼的房间还因为设施的不同分成好几个等级。越高越贵也不是一个普遍原则，比如六楼的一间总统套房就很可能比七楼的普通间贵上许多。但这都不是问题，关键在于，玻尔的电子轨道模型非常有说服力地解释了原子的性质和行为，它的预言和实验结果基本上吻合得丝丝入扣。在不到两年的时间里，玻尔理论便取得了辉煌的胜利，全世界的物理学家们都开始接受玻尔模型。甚至我们的那位顽固派——拒绝承认量子实际意义的普朗克——也开始重新审视自己当初那伟大的发现。

玻尔理论的成就是巨大的，而且非常地深入人心，他本人为此在 1922 年获得了诺贝尔奖金。但是，这仍然不能解决它和旧体系之间的深刻矛盾。麦克斯韦的方程可不管玻尔轨道的成功与否，它仍然还是要说，一个电子围绕着原子核运动，必定释放出电磁辐射来。对此玻尔也感到深深的无奈，他还没有这个能力去推翻整个经典电磁体系，用一句流行的

话来说，“封建残余力量还很强大哪”。作为妥协，玻尔转头试图将他的原子体系和麦氏理论调和起来，建立一种两种理论之间的联系。他力图向世人证明，两种体系都是正确的，但都只在各自适用的范围内才能成立。当我们的眼光从原子范围逐渐扩大到平常的世界时，量子效应便逐渐消失，经典的电磁论得以再次取代 h 常数成为世界的主宰。在这个过程中，无论何时，两种体系都存在着一个确定的对应状态。这就是他在 1918 年发表的所谓“对应原理”。

对应原理本身具有着丰富的含义，直到今天还对我们有着借鉴意义。但是也无可否认，这种与经典体系“暧昧不清”的关系是玻尔理论的一个致命的先天不足。他引导的是一场不彻底的革命，虽然以革命者的面貌出现，却最终还要依赖于传统势力的支持。玻尔的量子还只能靠着经典体系的力量行动，它的自我意识仍在深深沉睡之中而没有苏醒。当然，尽管如此，它的成就已经令世人惊叹不已，可这并不能避免它即将在不久的未来，拖着长长的尾光坠落到地平线的另一边去，成为一颗一闪而逝的流星。

当然了，这样一个具有伟大意义的理论居然享寿如此之短，这只能说明一件事：科学在那段日子以来的前进步伐不是我们所能想象的。那是一段可遇不可求的岁月，理论物理的黄金年代。如今回首，只有皓月清风，伴随大江东去。

饭后闲话：原子和星系

卢瑟福的模型一出世，便被称为“行星模型”或者“太阳系模型”。这当然是一种形象化的叫法，但不可否认，原子这个极小的体系和太阳系这个极大的体系之间居然的确存在着许多相似之处。两者都有一个核心，这个核心占据着微不足道的体积（相对整个体系来说），却集中了 99% 以上的质量和角动量。人们不禁要联想，难道原子本身是一个“小宇宙”？或者，我们的宇宙，是由千千万万个“小宇宙”所组成的，而它反过来又和千千万万个别的宇宙组成更大的“宇宙”？这令人想起威廉·布莱克（william blake）那首著名的小诗：

to see a world in a grain of sand. *从一粒沙看见世界
and a heaven in a wild flower *从一朵花知道天宸
hold infinity in the palm of your hand *用一只手把握无限
and eternity in an hour *用一刹那留住永恒

我们是不是可以“从一粒沙看见世界”呢？原子和太阳系的类比不能给我们太多的启迪，因为行星之间的实际距离相对电子来说，可要远的多了（当然是从比例上讲）。但是，最近有科学家提出，宇宙的确在不同的尺度上，有着惊人的重复性结构。比如原子和银河系的类比，原子和中子星的类比，它们都在各个方面——比如半径、周期、振动等——展现出了十分相似的地方。如果你把一个原子放大 10^{17} 倍，它所表现出来的性质就和一个白矮星差不多。如果放大 10^{30} 倍，据信，那就相当于一个银河系。当然，相当于并不是说完全等于，我的意思是，如果原子体系放大 10^{30} 倍，它的各种力学和结构常数就非常接近于我们观测到的银河系。还有人提出，原子应该在高能情况下类比于同样在高能情况下的太阳系。也就是说，原子必须处在非常高的激发态下（大约主量子数达到几百），那时，它的各种结构就相当接近我们的太阳系。

这种观点，即宇宙在各个层次上展现出相似的结构，被称为“分形宇宙”（fractal universe）模型。在它看来，哪怕是一个原子，也包含了整个宇宙的某些信息，是一个宇宙的“全息胚”。所谓的“分形”，是混沌动力学里研究的一个饶有兴味的课题，它给我们展现了复杂结构是如何在不同的层面上一再重复。宇宙的演化，是否也遵从某种混沌动力学原则，如今还不得而知，所谓的“分形宇宙”也只是一家之言罢了。这里当作趣味故事，博大家一笑而已。

4-2

曾几何时，玻尔理论的兴起为整个阴暗的物理天空带来了绚丽的光辉，让人们以为看见了极乐世界的美景。不幸的是，这一虚假的泡沫式繁荣没能持续太多的时候。旧的物理世界固然已经在种种冲击下变得疮痍满目，玻尔原子模型那宏伟的宫殿也没能抵挡住更猛烈的革命冲击，在混乱中被付之一炬，只留下些断瓦残垣，到今日供我们凭吊。最初的暴雨已经过去，大地一片苍凉，天空中仍然浓云密布。残阳似血，在天际投射出余辉，把这废墟染成金红一片，衬托出一种更为沉重的气氛，预示着更大的一场风暴的来临。

玻尔王朝的衰败似乎在它诞生的那一天就注定了。这个理论，虽然借用了新生量子的无穷力量，它的基础却仍然建立在脆弱的旧地基上。量子化的思想，在玻尔理论里只是一支雇佣军，它更像是被强迫附加上去的，而不是整个理论的出发点和基础。比如，玻尔假设，电子只能具有量子化的能级和轨道，但为什么呢？为什么电子必须是量子化的？它的理论基础是什么呢？玻尔在这上面语焉不详，顾左右而言他。当然，苛刻的经验主义者会争辩说，电子之所以是量子化的，因为实验观测到它们就是量子化的，不需要任何其他的理由。但无论如何，如果一个理论的基本公设令人觉得不太安稳，这个理论的前景也就不那么乐观了。在对待玻尔量子假设的态度上，科学家无疑地联想起了欧几里德的第五公设（这个公理说，过线外一点只能有一条直线与已知直线平行。人们后来证明这个公理并不是十分可靠的）。无疑，它最好能够从一些更为基本的公理所导出，这些更基本的公理，应该成为整个理论的奠基石，而不仅仅是华丽的装饰。

后来的历史学家们在评论玻尔的理论时，总是会用到“半经典半量子”，或者“旧瓶装新酒”之类的词语。它就像一位变脸大师，当电子围绕着单一轨道运转时，它表现出经典力学的面孔，一旦发生轨道变化，立即又转为量子化的样子。虽然有着技巧高超的对应原理的支持，这种两面派做法也还是为人所质疑。不过，这些问题还都不是关键，关键是，玻尔大军在取得一连串重大胜利后，终于发现自己已经到了强弩之末，有一些坚固的堡垒，无论如何是攻不下来的了。

比如我们都已经知道的原子谱线分裂的问题，虽然在索末菲等人的努力下，玻尔模型解释了磁场下的塞曼效应和电场下的斯塔克效应。但是，大自然总是有无穷的变化令人头痛。科学家们不久就发现了谱线在弱磁场下的一种复杂分裂，称作“反常塞曼效应”。这种现象要求引进值为 $1/2$ 的量子数，玻尔的理论对之无可奈何，一声叹息。这个难题困扰着许多的科学家，简直令他们寝食难安。据说，泡利在访问玻尔家时，就曾经对玻尔夫人的问好回以暴躁的抱怨：“我当然不好！我不能理解反常塞曼效应！”这个问题，一直要到泡利提出他的不相容原理后，才算最终解决。

另外玻尔理论沮丧地发现，自己的力量仅限于只有一个电子的原子模型。对于氢原子，氦原子，或者电离的氦原子来说，它给出的说法是令人信服的。但对于哪怕只有两个核外电子的普通氦原子，它就表现得无能为力。甚至对于一个电子的原子来说，玻尔能够说清的，也只不过是谱线的频率罢了，至于谱线的强度、宽度或者偏振问题，玻尔还是只能耸耸肩，以他那大舌头的口音说声抱歉。

在氢分子的战场上，玻尔理论同样战败。

为了解决所有的这些困难，玻尔、兰德（Landé）、泡利、克莱默（Kramers）等人做了大量的努力，引进了一个又一个新的假定，建立了一个又一个新的模型，有些甚至违反了玻尔和索末菲的理论本身。到了1923年，惨淡经营的玻尔理论虽然勉强还算能解决问题，并获得了人们的普遍认同，它已经像一件打满了补丁的袍子，需要从根本上予以一次彻底变革了。哥廷根的那帮充满朝气的年轻人开始拒绝这个补丁累累的系统，希望重新寻求一个更强大、完美的理论，从而把量子的思想从本质上植根到物理学里面去，以结束像现在这样苟且的寄居生活。

玻尔体系的衰落和它的兴盛一样迅猛。越来越多的人开始关注原子世界，并做出了更多的实验观测。每一天，人们都可以拿到新的资料，刺激他们的热情，去揭开这个神秘王国的面貌。在哥本哈根和哥廷根，物理天才们兴致勃勃地谈论着原子核、电子和量子，一页页写满了公式和字母的手稿承载着灵感和创意，交织成一个大时代到来的序幕。青山遮

不住，毕竟东流去。时代的步伐迈得如此之快，使得脚步蹒跚的玻尔原子终于力不从心，从历史舞台中退出，消失在漫漫黄尘中，只留下一个名字让我们时时回味。

如果把 1925 年—1926 年间海森堡（werner heisenberg）和薛定谔（erwin schrodinger）的开创性工作视为玻尔体系的寿终正寝的话，这个理论总共大约兴盛了 13 年。它让人们看到了量子在物理世界里的伟大意义，并第一次利用它的力量去揭开原子内部的神秘面纱。然而，正如我们已经看到的那样，玻尔的革命是一次不彻底的革命，量子的假设没有在他的体系里得到根本的地位，而似乎只是一个调和经典理论和现实矛盾的附庸。玻尔理论没法解释，为什么电子有着离散的能级和量子化的行为，它只知其然，而不知其所以然。玻尔在量子论和经典理论之间采取了折衷主义的路线，这使得他的原子总是带着一种半新不旧的色彩，最终因为无法克服的困难而崩溃。玻尔的有轨原子像一颗耀眼的火流星，放射出那样强烈的光芒，却在转眼间划过夜空，复又坠落到黑暗和混沌中去。它是那样地来去匆匆，以致人们都还来不及在衣带上打一个结，许一些美丽的愿望。

但是，它的伟大意义却不因为其短暂的生命而有任何的褪色。是它挖掘出了量子的力量，为未来的开拓者铺平了道路。是它承前启后，有力地推动了整个物理学的脚步。玻尔模型至今仍然是相当好的近似，它的一些思想仍然为今人所借鉴和学习。它描绘的原子图景虽然过时，但却是如此形象而生动，直到今天仍然是大众心中的标准样式，甚至代表了科学的形象。比如我们应该能够回忆，直到 80 年代末，在中国的大街上还是随处可见那个代表了“科学”的图形：三个电子沿着椭圆轨道围绕着原子核运行。这个图案到了 90 年代终于消失了，想来总算有人意识到了问题。

在玻尔体系内部，也已经蕴藏了随机性和确定性的矛盾。就玻尔理论而言，如何判断一个电子在何时何地发生自动跃迁是不可能的，它更像是一个随机的过程。1919 年，应普朗克的邀请，玻尔访问了战后的柏林。在那里，普朗克和爱因斯坦热情地接待了他，量子力学的三大巨头就几个物理问题展开了讨论。玻尔认为，电子在轨道间的跃迁似乎是不可预测的，是一个自发的随机过程，至少从理论上说没办法算出一个电子具体的跃迁条件。爱因斯坦大摇其头，认为任何物理过程都是确定和可预测的。这已经埋下了两人日后那场旷日持久争论的种子。

当然，我们可敬的尼尔斯·玻尔先生也不会因为旧量子论的垮台而退出物理舞台。正相反，关于他的精彩故事才刚刚开始。他还要在物理的第一线战斗很长时间，直到逝世为止。1921 年 9 月，玻尔在哥本哈根的研究所终于落成，36 岁的玻尔成为了这个所的所长。他的人格魅力很快就像磁场一样吸引了各地的才华横溢的年轻人，并很快把这里变成了全欧洲的一个学术中心。赫维西（georg von hevesy）、弗里西（otto frisch）、泡利、海森堡、莫特（neville mott）、朗道（lev d. landau）、盖莫夫（george gamov）……人们向这里涌来，充分地感受这里的自由气氛和玻尔的关怀，并形成一种富有激情、活力、乐观态度和进取心的学术精神，也就是后人所称道的“哥本哈根精神”。在弹丸小国丹麦，出现了一个物理学界眼中的圣地，这个地方将深远地影响量子力学的未来，还有我们根本的世界观和思维方式。

4-3

当玻尔的原子还在泥潭中深陷苦于无法自拔的时候，新的革命已经在酝酿之中。这一次，革命者并非来自穷苦的无产阶级大众，而是出自一个显赫的贵族家庭。路易斯·维克托·皮雷·雷蒙·德·布罗意王子（prince louis victor pierre raymond de broglie）将为他那荣耀的家族历史增添一份新的光辉。

“王子”（prince，也有翻译为“公子”的）这个爵位并非我们通常所理解的，是国王的儿子。事实上在爵位表里，它的排名并不算高，而且似乎不见于英语世界。大致说来，它的地位要比“子爵”（viscount）略低，而比“男爵”（baron）略高。不过这只是因为路易斯在家中并非老大而已，德布罗意家族的历史悠久，他的祖先中出了许许多多的将军、元帅、部长，曾经忠诚地在路易十四、路易十五、路易十六的麾下效劳。他们参加过波兰王位继承战争（1733—1735）、奥地利王位继承战争（1740—1748）、七年战争（1756—1763）、美国独立战争（1775—1782）、法国大革命（1789）、二月革命（1848），接受过法兰西斯二世（francis ii，神圣罗马帝国皇帝，后来退位成为奥地利皇帝法兰西斯一世）以及路易·腓力（louis philippe，法国国王，史称奥尔良公爵）的册封，家族继承着最高世袭身份的头衔：公爵（法文 duc，相当于英

语的 duke)。路易斯·德布罗意的哥哥，莫里斯·德布罗意 (maurice de broglie) 便是第六代德布罗意公爵。1960 年，当莫里斯去世以后，路易斯终于从他哥哥那里继承了这个光荣称号，成为第七位 duc de broglie。

当然，在那之前，路易斯还是顶着王子的爵号。小路易斯对历史学表现出浓厚的兴趣，他的祖父，jacques victor albert, duc de broglie，不但是一位政治家，曾于 1873—1874 年间当过法国总理，同时也是一位出色的历史学家，尤其精于晚罗马史，写出过著作《罗马教廷史》(histoire de l'église et de l'empire romain)。小路易斯在祖父的熏陶下，决定进入巴黎大学攻读历史。18 岁那年 (1910)，他从大学毕业，然而却没有在历史学领域进行更多的研究，因为他的兴趣已经强烈地转向物理方面。他的哥哥，莫里斯·德布罗意 (第六代德布罗意公爵) 是一位著名的射线物理学家，路易斯跟随哥哥参加了 1911 年的布鲁塞尔物理会议，他对科学的热情被完全地激发出来，并立志把一生奉献给这一令人激动事业。

转投物理后不久，第一次世界大战爆发了。德布罗意应征入伍，被分派了一个无线电技术人员的工作。他比可怜的亨利·莫斯里要幸运许多，能够在大战之后毫发无伤，继续进入大学学他的物理。他的博士导师是著名的保罗·朗之万 (paul langevin)。

写到这里笔者需要稍停一下做一点声明。我们的史话讲述到现在，虽然已经回顾了一些令人激动的革命和让人大开眼界的新思想 (至少笔者希望如此)，但总的来说，仍然是在经典世界的领域里徘徊。而且根据本人的印象，至今为止，我们的话题大体还没有超出中学物理课本和高考的范围。对于普通的读者来说，唯一稍感陌生的，可能只是量子的跳跃思想。而接受这一思想，也并不是一件十分困难和不情愿的事情。

然而在这之后，我们将进入一个完完全全的奇幻世界。这个世界光怪陆离，和我们平常所感知认同的那个迥然不同。在这个新世界里，所有的图象和概念都显得疯狂而不理性，显得更像是爱丽丝梦中的奇境，而不是踏踏实实的土地。许多名词是如此古怪，以致只有借助数学工具才能把握它们的真实意义。当然，笔者将一如既往地试图用最浅白的语言将它们表述出来，但是仍然有必要提醒各位做好心理准备。为了表述的方便，我将尽量地把一件事情陈述完全，然后再转换话题。虽然在历史上，所有的这一切都是铺天盖地而来，它们混杂在一起，澎湃汹涌，让人分不出个头绪。在后面的叙述中，我们可能时时要在各个年份间跳来跳去，那些希望把握时间感的读者们应该注意确切的年代。

我们已经站在一个伟大时刻的前沿。新的量子力学很快就要被创建出来，这一次，它的力量完完全全地被施展开来，以致把一切旧事物，包括玻尔那个半新不旧的体系，都摧枯拉朽般地毁灭殆尽。它很快就要为我们揭开一个新世界的大幕，这个新世界，哪怕是稍微往里面瞥上一眼，也足够让人头晕目眩，心驰神摇。但是，既然我们已经站在这里，那就只有义无反顾地前进了。所以跟着我来吧，无数激动人心的事物正在前面等着我们。

我们的话题回到德布罗意身上。他一直在思考一个问题，就是如何能够在玻尔的原子模型里面自然地引进一个周期的概念，以符合观测到的现实。原本，这个条件是强加在电子上面的量子化模式，电子在玻尔的硬性规定下，虽然乖乖听话，总有点不那么心甘情愿的感觉。德布罗意想，是时候把电子解放出来，让它们自己做主了。

如何赋予电子一个基本的性质，让它们自觉地表现出种种周期和量子化现象呢？德布罗意想到了爱因斯坦和他的相对论。他开始这样地推论：根据爱因斯坦那著名的方程，如果电子有质量 m ，那么它一定有一个内禀的能量 $e = mc^2$ 。好，让我们再次回忆那个我说过很有用的量子基本方程， $e = hv$ ，也就是说，对应这个能量，电子一定会具有一个内禀的频率。这个频率的计算很简单，因为 $mc^2 = e = hv$ ，所以 $v = mc^2/h$ 。

好。电子有一个内在频率。那么频率是什么呢？它是某种振动的周期。那么我们又得出结论，电子内部有某些东西在振动。是什么东西在振动呢？德布罗意借助相对论，开始了他的运算，结果发现……当电子以速度 v_0 前进时，必定伴随着一个速度为 c^2/v_0 的波……

噢，你没有听错。电子在前进时，总是伴随着一个波。细心的读者可能要发出疑问，因为他们发现这个波的速度 c^2/v_0

将比光速还快上许多，但是这不是一个问题。德布罗意证明，这种波不能携带实际的能量和信息，因此并不违反相对论。爱因斯坦只是说，没有一种能量信号的传递能超过光速，对德布罗意的波，他是睁一只眼闭一只眼的。

德布罗意把这种波称为“相波”（phase wave），后人为了纪念他，也称其为“德布罗意波”。计算这个波的波长是容易的，就简单地把上面得出的速度除以它的频率，那么我们就得到： $\lambda = (c^2/v_0) / (mc^2/h) = h/mv_0$ 。这个叫做德布罗意波长公式。

但是，等等，我们似乎还没有回过神来。我们在谈论一个“波”！可是我们头先明明在讨论电子的问题，怎么突然从电子里冒出了一个波呢？它是从哪里出来的？我希望大家还没有忘记我们可怜的波动和微粒两支军队，在玻尔原子兴盛又衰败的时候，它们一直在苦苦对抗，僵持不下。1923年，德布罗意在求出他的相波之前，正好是康普顿用光子说解释了康普顿效应，从而带领微粒大举反攻后不久。倒霉的微粒不得不因此放弃了全面进攻，因为它们突然发现，在电子这个大后方，居然出现了波动的奸细！而且怎么赶都赶不走。

电子居然是一个波！这未免让人感到太不可思议。可敬的普朗克绅士在这些前卫而反叛的年轻人面前，只能摇头叹气，连话都说不出来了。假如说当时全世界只有一个人支持德布罗意的话，他就是爱因斯坦。德布罗意的导师朗之万对自己弟子的大胆见解无可奈何，出于挽救失足青年的良好愿望，他把论文交给爱因斯坦点评。谁料爱因斯坦马上予以了高度评价，称德布罗意“揭开了大幕的一角”。整个物理学界在听到爱因斯坦的评论后大吃一惊，这才开始全面关注德布罗意的工作。

证据，我们需要证据。所有的人都在异口同声地说。如果电子是一个波，那么就让我们看到它是一个波的样子。把它的衍射实验做出来给我们看，把干涉图纹放在我们的眼前。德布罗意有礼貌地回敬道：是的，先生们，我会给你们看到证据的。我预言，电子在通过一个小孔的时候，会像光波那样，产生一个可观测的衍射现象。

1925年4月，在美国纽约的贝尔电话实验室，戴维逊（c.j.davisson）和革末（l.h.germer）在做有关电子的实验。这个实验的目的是什么我们不得而知，但它牵涉到用一束电子流轰击一块金属镍（nickel）。实验要求金属的表面绝对纯净，所以戴维逊和革末把金属放在一个真空的容器中，以确保没有杂质混入其中。

不幸的是，发生了一件意外。这个真空容器因为某种原因发生了爆炸，空气一拥而入，迅速地氧化了镍的表面。戴维逊和革末非常懊丧，不过他们并不因此放弃实验，他们决定，重新净化金属表面，把实验从头来过。当时，去除氧化层的好办法就是对金属进行高热加温，这正是戴维逊所做的。

两人并不知道，正如雅典娜暗中助推着阿尔戈英雄们的船只，幸运女神正在这个时候站在他俩的身后。容器里的金属，在高温下发生了不知不觉的变化：原本它是由许许多多块小晶体组成的，而在加热之后，整块镍融合成了一块大晶体。虽然在表面看来，两者并没有太大的不同，但是内部的剧变已经足够改变物理学历史。

当电子通过镍块后，戴维逊和革末瞠目结舌，久久说不出话来。他们看到了再熟悉不过的景象：x射线衍射图案！可是并没有x射线，只有电子，人们终于发现，在某种情况下，电子表现出如x射线般的纯粹波动性质来。电子，无疑是一种波。

更多的证据接踵而来。1927年，g.p.汤姆逊，著名的j.j.汤姆逊的儿子，在剑桥通过实验进一步证明了电子的波动性。他利用实验数据算出的电子行为，和德布罗意所预言的吻合得天衣无缝。

命中注定，戴维逊和汤姆逊将分享1937年的诺贝尔奖金，而德布罗意将先于他们8年获得这一荣誉。有意思的是，g.p.汤姆逊的父亲，j.j.汤姆逊因为发现了电子这一粒子而获得诺贝尔奖，他却因为证明电子是波而获得同样的荣誉。历史有时候，实在富有太多的趣味性。

饭后闲话：父子诺贝尔

俗话说，将门无犬子，大科学家的后代往往也会取得不亚于前辈的骄人成绩。jj 汤姆逊的儿子 gp 汤姆逊推翻了老爸电子是粒子的观点，证明电子的波动性，同样获得诺贝尔奖。这样的世袭科学豪门，似乎还不是绝无仅有。

居里夫人和她的丈夫皮埃尔·居里于 1903 年分享诺贝尔奖（居里夫人在 1911 年又得了一个化学奖）。他们的女儿约里奥·居里（irene joliot-curie）也在 1935 年和她丈夫一起分享了诺贝尔化学奖。居里夫人的另一个女婿，美国外交家 henry r. labouisse，在 1965 年代表联合国儿童基金会（unicef）获得了诺贝尔和平奖。

1915 年，william henry bragg 和 william lawrence bragg 父子因为利用 x 射线对晶体结构做出了突出贡献，分享了诺贝尔物理奖金。

我们大名鼎鼎的尼尔斯·玻尔获得了 1922 年的诺贝尔物理奖。他的小儿子，埃格·玻尔（aage bohr）于 1975 年在同样的领域获奖。

卡尔·塞班（karl siegbahn）和凯伊·塞班（kai siegbahn）父子分别于 1924 和 1981 年获得诺贝尔物理奖。

假如俺的老爸是大科学家，俺又会怎样呢？不过恐怕还是如现在这般浪荡江湖，寻求无拘无束的生活吧，呵呵。

4-4

“电子居然是个波！”这个爆炸性新闻很快就传遍了波动和微粒双方各自的阵营。刚刚还在康普顿战役中焦头烂额的波动一方这下扬眉吐气，终于可以狠狠地嘲笑一下死对头微粒。《波动日报》发表社论，宣称自己取得了决定性的胜利。“微粒的反叛势力终将遭遇到他们应有的可耻结局——电子的下场就是明证。”光子的反击，在波动的眼中突然变得不值一提了，连电子这个老大哥都搞定了，还怕小小的光子？

不过这次，波动的乐观态度未免太一厢情愿，它高兴得过早了。微粒方面的宣传舆论工具也没闲着，《微粒新闻》的记者采访了德布罗意，结果德布罗意说，当今的辐射物理被分成粒子和波两种观点，这两种观点应当以某种方式统一，而不是始终地尖锐对立——这不利于理论的发展前景。对于微粒来说，讲和的提议自然是无法接受的，但至少让它高兴的是，德布罗意没有明确地偏向波动一方。微粒的技术人员也随即展开反击，光究竟是粒子还是波都还没说清，谁敢那样大胆地断言电子是个波？让我们看看电子在威尔逊云室里的表现吧。

威尔逊云室是英国科学家威尔逊（c.t.r.wilson）在 1911 年发明的一种仪器。水蒸气在尘埃或者离子通过的时候，会以它们为中心凝结成一串水珠，从而在粒子通过之处形成一条清晰可辨的轨迹，就像天空中喷气式飞机身后留下的白雾。利用威尔逊云室，我们可以研究电子和其他粒子碰撞的情况，结果它们的表现完全符合经典粒子的规律。在过去，这或许是理所当然的事情，但现在对于粒子军来说，这个证据是宝贵的。威尔逊因为发明云室在 1927 年和康普顿分享了诺贝尔奖金。如果说 1937 年戴维逊和汤姆逊的获奖标志着波动的狂欢，那 10 年的这次诺贝尔颁奖礼无疑是微粒方面的一次盛典。不过那个时候，战局已经出乎人们的意料，有了微妙的变化。当然这都是后话了。

捕捉电子位置的仪器也早就有了，电子在感应屏上，总是激发出一个小亮点。hey，微粒的将军们说，波动怎么解释这个呢？哪怕是电子组成衍射图案，它还一个一个亮点这样堆积起来的。如果电子是波的话，那么理论上单个电子就能构成整个图案，只不过非常黯淡而已。可是情况显然不是这样，单个电子只能构成单个亮点，只有大量电子的出现，

才逐渐显示出衍射图案来。

微粒的还击且不去说他，更糟糕的是，无论微粒还是波动，都没能在“德布罗意事变”中捞到实质性的好处。波动的嘲笑再尖刻，它还是对光电效应、康普顿效应等等现象束手无策，而微粒也还是无法解释双缝干涉。双方很快就发现，战线还是那条战线，谁都没能前进一步，只不过战场被扩大了而已。电子现在也被拉进有关光本性的这场战争，这使得战争全面地被升级。现在的问题，已经不再仅仅是光到底是粒子还是波，现在的问题，是电子到底是粒子还是波，你和我到底是粒子还是波，这整个物质世界到底是粒子还是波。

事实上，波动这次对电子的攻击只有更加激发了粒子们的同仇敌忾之心。现在，光子、电子、 α 粒子、还有更多的基本粒子，他们都决定联合起来，为了“大粒子王国”的神圣保卫战而并肩奋斗。这场波粒战争，已经远远超出了光的范围，整个物理体系如今都陷于这个争论中，从而形成了一次名副其实的世界大战。玻尔在 1924 年曾试图给这两支军队调停，他和克莱默（kramers）还有斯雷特（slater）发表了一个理论（称作 bsk 理论），尝试同时从波和粒子的角度去解释能量转换，但双方正打得眼红，这次调停成了外交上的彻底失败，不久就被实验所否决。战火熊熊，燃遍物理学的每一寸土地，同时也把它的未来炙烤得焦糊不清。

物理学已经走到了一个十字路口。它迷茫而又困惑，不知道前途何去何从。昔日的经典辉煌已经变成断瓦残垣，一切回头路都被断绝。如今的天空浓云密布，不见阳光，在大地上投下一片阴影。人们在量子这个精灵的带领下一路走来，沿途如行山阴道上，精彩目不暇接，但现在却突然发现自己已经身在白云深处，彷徨而不知归路。放眼望去，到处是雾茫茫一片，不辨东南西北，叫人心中没底。玻尔建立的大厦虽然看起来还是顶天立地，但稍微了解一点内情的工程师们都知道它已经几经裱糊，伤筋动骨，摇摇欲坠，只是仍然在苦苦支撑而已。更何况，这个大厦还凭借着对应原理的天桥，依附在麦克斯韦的旧楼上，这就教人更不敢对它的前途抱有任何希望。在另一边，微粒和波动打得烽火连天，谁也奈何不了谁，长期的战争已经使物理学的基础处在崩溃边缘，它甚至不知道自己是建立在什么东西之上。

不过，我们也不必过多地为一种悲观情绪所困扰。在大时代的黎明到来之前，总是要经历这样的深深的黑暗，那是一个伟大理论诞生前的阵痛。当大风扬起，吹散一切岚雾的时候，人们会惊喜地发现，原来他们已经站在高高的山峰之上，极目望去，满眼风光。

那个带领我们穿越迷雾的人，后来回忆说：“1924 到 1925 年，我们在原子物理方面虽然进入了一个浓云密布的领域，但是已经可以从看见微光，并展望出一个令人激动的远景。”

说这话的是一个来自德国的年轻人，他就是维尔纳·海森堡（werner heisenberg）。

在本史话第二章的最后，我们已经知道，海森堡于 1901 年出生于维尔兹堡（würzburg），他的父亲后来成为了一位有名的希腊文教授。小海森堡 9 岁那年，他们全家搬到了慕尼黑，他的祖父在那里的一间学校（叫做 maximilians gymnasium 的）当校长，而海森堡也自然进了这间学校学习。虽然属于“高干子弟”，但小海森堡显然不用凭借这种关系来取得成绩，他的天才很快就开始让人吃惊，特别是数学和物理方面的，但是他同时也对宗教、文学和哲学表现出强烈兴趣。这样的多才多艺预示着他以后不仅仅将成为一个划时代的物理学家，同时也将成为一为重要的哲学家。

1919 年，海森堡参与了镇压巴伐利亚苏维埃共和国的军事行动，当然那时候他还只是个大男孩，把这当成一件好玩的事情而已。对他来说，更严肃的是在大学里选择一条怎样的道路。当他进入慕尼黑大学后，这种选择便很现实地摆在他面前：是跟着林德曼（ferdinand von lindemann），一位著名的数学家学习数论呢，还是跟着索末非学习物理？海森堡终于选择了后者，从而迈出了一个科学巨人的第一步。

1922 年，玻尔应邀到哥廷根进行学术访问，引起轰动，甚至后来被称为哥廷根的“玻尔节”。海森堡也赶到哥廷根去听玻尔的演讲，才三年级的他竟然向玻尔提出一些学术观点上的异议，使得玻尔对他刮目相看。事实上，玻尔此行最大

的收获可能就是遇到了海森堡和泡利，两个天才无限的年轻人。而这两人之后都会远赴哥本哈根，在玻尔的研究室和他一起工作一段日子。

到了 1925 年，海森堡——他现在是博士了——已经充分成长为一个既朝气蓬勃又不乏成熟的物理学家。他在慕尼黑、哥廷根和哥本哈根的经历使得他得以师从当时最好的几位物理大师。而按他自己的说法，他从索末非那里学到了乐观态度，在哥廷根从波恩，弗兰克还有希尔伯特那里学到了数学，而从玻尔那里，他学到了物理（索末非似乎很没有面子，呵呵）。

现在，该轮到海森堡自己上场了。物理学的天空终将云开雾散，露出璀璨的星光让我们目眩神迷。在那其中有几颗特别明亮的星星，它们的光辉照亮了整个夜空，组成了最华丽的星座。不用费力分辨，你应该能认出其中的一颗，它就叫维尔纳·海森堡。作为量子力学的奠基人之一，这个名字将永远镌刻在时空和历史中。

饭后闲话：被误解的名言

这个闲话和今天的正文无关，不过既然这几日讨论牛顿，不妨多披露一些关于牛顿的历史事实。

牛顿最为人熟知的一句名言是这样说的：“如果我看得更远的话，那是因为我站在巨人的肩膀上”（if i have seen further it is by standing on ye shoulders of giants）。这句话通常被用来赞叹牛顿的谦逊，但是从历史上来看，这句话本身似乎没有任何可以理解为谦逊的理由。

首先这句话不是原创。早在 12 世纪，伯纳德（bernard of chartres，他是中世纪的哲学家，著名的法国沙特尔学校的校长）就说过：“nos esse quasi nanos gigantium humeris insidentes”。这句拉丁文的意思就是说，我们都像坐在巨人肩膀上的矮子。这句话，如今还能在沙特尔市那著名的哥特式大教堂的窗户上找到。从伯纳德以来，至少有二三十个人在牛顿之前说过类似的话。

牛顿说这话是在 1676 年给胡克的一封信中。当时他已经和胡克在光的问题上吵得昏天黑地，争论已经持续多年（可以参见我们的史话）。在这封信里，牛顿认为胡克把他（牛顿自己）的能力看得太高了，然后就是这句著名的话：“如果我看得更远的话，那是因为我站在巨人的肩膀上”。

这里面的意思无非两种：牛顿说的巨人如果指胡克的话，那是一次很明显的妥协：我没有抄袭你的观念，我只不过在你工作的基础上继续发展——这才比你看得高那么一点点。牛顿想通过这种方式委婉地平息胡克的怒火，大家就此罢手。但如果要说大度或者谦逊，似乎很难谈得上。牛顿为此一生记恨胡克，哪怕几十年后，胡克早就墓木已拱，他还是不能平心静气地提到这个名字，这句话最多是试图息事宁人的外交词令而已。另一种可能，巨人不指胡克，那就更明显了：我的工作就算不完全是自己的，也是站在前辈巨人们的肩上——没你胡克的事。

更多的历史学家认为，这句话是一次恶意的揶揄和讽刺——胡克身材矮小，用“巨人”似乎暗含不怀好意。持这种观点的甚至还包括著名的史蒂芬·霍金，正是他如今坐在当年牛顿卢卡萨教授的位子上。

牛顿还有一句有名的话，大意说他是海边的一个小孩子，捡起贝壳玩玩，但还没有发现真理的大海。这句话也不是他的原创，最早可以追溯到 joseph spence。但牛顿最可能是从约翰·米尔顿的《复乐园》中引用（牛顿有一本米尔顿的作品集）。这显然也是精心准备的说辞，牛顿本人从未见过大海，更别提在海滩行走了。他一生中见过的最大的河也就是泰晤士河，很难想象大海的意象如何能自然地在他的头脑中跳出来。

我谈这些，完全没有诋毁谁的意思。我只想说，历史有时候被赋予了太多的光圈和晕轮，但还历史的真相，是每一个人的责任，不论那真相究竟是什么。同时，这也丝毫不影响牛顿科学上的成就——他是有史以来最伟大的科学家。

第五章 曙光

5-1

属于海森堡的篇章要从 1924 年 7 月开始讲起。那个月份对于海森堡可算是喜讯不断，他的关于反常塞曼效应的论文通过审核，从而使他晋升为讲师，获得在德国大学的任意级别中讲学的资格。而玻尔——他对这位出色的年轻人显然有着明显的好感——也来信告诉他，他已经获得了由洛克菲勒（Rockefeller）财团资助的国际教育基金会（IEB）的奖金，为数 1000 美元，从而让他有机会远赴哥本哈根，与玻尔本人和他的同事们共同工作一年。也是无巧不成书，海森堡原来在哥廷根的导师波恩正好要到美国讲学，于是同意海森堡到哥本哈根去，只要在明年 5 月夏季学期开始前回来就可以了。从后来的情况看，海森堡对哥本哈根的这次访问无疑对于量子力学的发展有着积极的意义。

玻尔在哥本哈根的研究所当时已经具有了世界性的声名，和哥廷根，慕尼黑一起，成为了量子力学发展史上的“黄金三角”。世界各地的学者纷纷前来访问学习，1924 年的秋天有近 10 位访问学者，其中 6 位是 IEB 资助的，而这一数字很快就开始激增，使得这幢三层楼的建筑不久就开始显得拥挤，从而不得不展开扩建。海森堡在结束了他的暑假旅行之后，于 1924 年 9 月 17 日抵达哥本哈根，他和另一位来自美国的金（King）博士住在一位刚去世的教授家里，并由孀居的夫人照顾他们的饮食起居。对于海森堡来说，这地方更像是一所语言学校——他那糟糕的英语和丹麦语水平都在逗留期间有了突飞猛涨的进步。

言归正传。我们在前面讲到，1924，1925 年之交，物理学正处在一个非常艰难和迷茫的境地中。玻尔那精巧的原子结构已经在内部出现了细小的裂纹，而辐射问题的本质究竟是粒子还是波动，双方仍然在白热化地交战。康普顿的实验已经使得最持怀疑态度的物理学家都不得不承认，粒子性是无可否认的，但是这就势必要推翻电磁体系这个已经扎根于物理学百余年的庞然大物。而后者所依赖的地基——麦克斯韦理论看上去又是如此牢不可破，无法动摇。

我们也已经提到，在海森堡来到哥本哈根前不久，玻尔和他的助手克莱默（Kramers）还有斯雷特（Slater）发表了一个称作 BKS 的理论以试图解决波和粒子的两难。在 BKS 理论看来，在每一个稳定的原子附近，都存在着某些“虚拟的振动”（virtual oscillator），这些神秘的虚拟振动通过对应原理——与经典振动相对应，从而使得量子化之后仍然保留有经典波动理论的全部优点（实际上，它是想把粒子在不同的层次上进一步考虑成波）。然而这个看似皆大欢喜的理论实在有着难言的苦衷，它为了调解波动和微粒之间的宿怨，甚至不惜抛弃物理学的基石之一：能量守恒和动量守恒定律，认为它们只不过是一种统计下的平均情况。这个代价太大，遭到爱因斯坦强烈反对，在他影响下泡利也很快转换态度，他不止一次写信给海森堡抱怨“虚拟的振动”还有“虚拟的物理学”。

BKS 的一些思想倒也不是毫无意义。克莱默利用虚拟振子的思想研究了色散现象，并得出了积极的结果。海森堡在哥本哈根学习的时候对这方面产生了兴趣，并与克莱默联名发表了论文在物理期刊上，这些思路对于后来量子力学的创立无疑也有着重要的作用。但 BKS 理论终于还是中途夭折，1925 年 4 月的实验否定了守恒只在统计意义上成立的说法，光子确实是实实在在的东西，不是什么虚拟波。BKS 的崩溃标志着物理学陷入彻底的混乱，粒子和波的问题是如此令人迷惑而头痛，以致玻尔都说这实在是一种“折磨”（torture）。对于曾经信奉 BKS 的海森堡来说，这当然是一个坏消息，但是就像一盆冷水，也能让他清醒一下，认真地考虑未来的出路何在。

哥本哈根的日子是紧张而又有意义的。海森堡无疑地感到了一种竞争的气氛，并以他那好胜的性格加倍努力着。当然，竞争是一回事，哥本哈根的自由精神和学术气氛在全欧洲都几乎无与伦比，而这一切又都和尼尔斯·玻尔这位量子论的“教父”密切相关。毫无疑问在哥本哈根的每一个人都是天才，但他们却都更好地衬托出玻尔本人的伟大来。这位和蔼

的丹麦人对于每个人都报以善意的微笑，并引导人们畅所欲言，探讨一切类型的问题。人们像众星拱月一般围绕在他身边，个个都为他的学识和人格所折服，海森堡也不例外，而且他更将成为玻尔最亲密的学生和朋友之一。玻尔常常邀请海森堡到他家（就在研究所的二楼）去分享家藏的陈年好酒，或者到研究所后面的树林里去散步并讨论学术问题。玻尔是一个极富哲学气质的人，他对于许多物理问题的看法都带有深深的哲学色彩，这令海森堡相当震撼，并在很大程度上影响了他本人的思维方式。从某种角度说，在哥本哈根那“量子气氛”里的熏陶以及和玻尔的交流，可能会比海森堡在那段时间里所做的实际研究更有价值。

那时候，有一种思潮在哥本哈根流行开来。这个思想当时不知是谁引发的，但历史上大约可以回溯到马赫。这种思潮说，物理学的研究对象只应该是能够被观察到被实践到的事物，物理学只能够从这些东西出发，而不是建立在观察不到或者纯粹是推论的事物上。这个观点对海森堡以及不久后也来哥本哈根访问的泡利都有很大影响，海森堡开始隐隐感觉到，玻尔旧原子模型里的有些东西似乎不太对头，似乎它们不都是直接能够为实验所探测的。最明显的例子就是电子的“轨道”以及它绕着轨道运转的“频率”。我们马上就要来认真地看一看这个问题。

1925年4月27日，海森堡结束哥本哈根的访问回到哥廷根，并开始重新着手研究氢原子的谱线问题——从中应该能找出量子体系的基本原理吧？海森堡的打算是仍然采取虚振子的方法，虽然BKS倒台了，但这在色散理论中已被证明是有成效的方法。海森堡相信，这个思路应该可以解决玻尔体系所解决不了的一些问题，譬如谱线的强度。但是当他兴致勃勃地展开计算后，他的乐观态度很快就无影无踪了：事实上，如果把电子辐射按照虚振子的代数方法展开，他所遇到的数学困难几乎是不可克服的，这使得海森堡不得不放弃了原先的计划。泡利在同样的问题上也被难住了，障碍实在太太大，几乎无法前进，这位脾气急躁的物理学家是如此暴跳如雷，几乎准备放弃物理学。“物理学出了大问题”，他叫嚷道，“对我来说什么都太难了，我宁愿自己是一个电影喜剧演员，从来也没听说过物理是什么东西！”（插一句，泡利说宁愿自己是喜剧演员，这是因为他是卓别林的fans之一）

无奈之下，海森堡决定换一种办法，暂时不考虑谱线强度，而从电子在原子中的运动出发，先建立起基本的运动模型来。事实证明他这条路走对了，新的量子力学很快就要被建立起来，但那却是一种人们闻所未闻，之前连想都不敢想象的形式——Matrix。

Matrix无疑是一个本身便带有几分神秘色彩，像一个Enigma的词语。不论是从它在数学上的意义，还是电影里的意义（甚至包括电影续集）来说，它都那样扑朔迷离，叫人难以把握，望而生畏。事实上直到今天，还有很多人几乎不敢相信，我们的宇宙就是建立在这些怪物之上。不过不情愿也好，不相信也罢，Matrix已经成为我们生活中不可缺少的概念。理科的大学生逃不了线性代数的课，工程师离不开MatLab软件，漂亮MM也会常常挂念基诺·里维斯，没有法子。

从数学的意义上翻译，Matrix在中文里译作“矩阵”，它本质上是一种二维的表格。比如像下面这个2*2的矩阵，其实就是一种2*2的方块表格：

```
┌   ┐
 1 2 │
 3 4 │
   └─┘
```

也可以是长方形的，比如这个2*3的矩阵：

```
┌   ┐
1 2 3
   4 5 6 │
   └─┘
```

读者可能已经在犯糊涂了，大家都早已习惯了普通的以字母和符号代表的物理公式，这种古怪的表格形式又能表示

什么物理意义呢？更让人不能理解的是，这种“表格”，难道也能像普通的物理变量一样，能够进行运算吗？你怎么把两个表格加起来，或乘起来呢？海森堡准是发疯了。

但是，我已经提醒过大家，我们即将进入的是一个不可思议的光怪陆离的量子世界。在这个世界里，一切都看起来是那样地古怪不合常理，甚至有一些疯狂的意味。我们日常的经验在这里完全失效，甚至常常是靠不住的。物理世界沿用了千百年的概念和习惯在量子世界里轰然崩塌，曾经被认为是天经地义的事情必须被无情地抛弃，而代之以一些奇形怪状的，但却更接近真理的原则。是的，世界就是这些表格构筑的。它们不但能加能乘，而且还有着令人瞠目结舌的运算规则，从而导致一些更为惊世骇俗的结论。而且，这一切都不是臆想，是从事实——而且是唯一能被观测和检验到的事实——推论出来的。海森堡说，现在已经到了物理学该发生改变的时候了。

我们这就出发开始这趟奇幻之旅。

5-2

物理学，海森堡坚定地想，应当有一个坚固的基础。它只能从一些直接可以被实验观察和检验的东西出发，一个物理学家应当始终坚持严格的经验主义，而不是想象一些图像来作为理论的基础。玻尔理论的毛病，就出在这上面。

我们再回顾一下玻尔理论说了些什么。它说，原子中的电子绕着某些特定的轨道以一定的频率运行，并时不时地从一个轨道跃迁到另一个轨道上去。每个电子轨道都代表一个特定的能级，因此当这种跃迁发生的时候，电子就按照量子化的方式吸收或者发射能量，其大小等于两个轨道之间的能量差。

嗯，听起来不错，而且这个模型在许多情况下的确管用。但是，海森堡开始问自己。一个电子的“轨道”，它究竟是什么东西？有任何实验能够让我们看到电子的确绕着某个轨道运转吗？有任何实验可以确实地测出一个轨道离开原子的实际距离吗？诚然轨道的图景是人们所熟悉的，可以类比于行星的运行轨道，但是和行星不同，有没有任何法子让人们真正地看到电子的这么一个“轨道”，并实际测量一个轨道所代表的“能量”呢？没有法子，电子的轨道，还有它绕着轨道的运转频率，都不是能够实际观察到的，那么人们怎么得出这些概念并在此之上建立起原子模型的呢？

我们回想一下前面史话的有关部分，玻尔模型的建立有着氢原子光谱的支持。每一条光谱线都有一种特定的频率，而由量子公式 $E_1 - E_2 = h\nu$ ，我们知道这是电子在两个能级之间跃迁的结果。但是，海森堡争辩道，你这还是没有解决我的疑问。没有实际的观测可以证明某一个轨道所代表的“能级”是什么，每一条光谱线，只代表两个“能级”之间的“能量差”。所以，只有“能级差”或者“轨道差”是可以被直接观察到的，而“能级”和“轨道”却不是。

为了说明问题，我们还是来打个比方。小时候的乐趣之一是收集各种各样的电车票以扮作售票员，那时候上海的车票通常都很便宜，最多也就是一毛几分钱。但规矩是这样的：不管你从哪个站上车，坐得越远车票就相对越贵。比如我从徐家汇上车，那么坐到淮海路可能只要 3 分钱，而到人民广场大概就要 5 分，到外滩就要 7 分，如果一直坐到虹口体育场，也许就得花上 1 毛钱。当然，近两年回去，公交早就换成了无人售票和统一计费——不管多远都是一个价，车费也早就今非昔比了。

让我们假设有一班巴士从 A 站出发，经过 BCD 三站到达 E 这个终点站。这个车的收费沿用了我们怀旧时代的老传统，不是上车一律给 2 块钱，而是根据起点和终点来单独计费。我们不妨订一个收费标准：A 站和 B 站之间是 1 块钱，B 和 C 靠得比较近，0.5 元。C 和 D 之间还是 1 块钱，而 D 和 E 离得远，2 块钱。这样一来车费就容易计算了，比如我从 B 站上车到 E 站，那么我就应该给 $0.5 + 1 + 2 = 3.5$ 元作为车费。反过来，如果我从 D 站上车到 A 站，那么道理是一样的： $1 + 0.5 + 1 = 2.5$ 块钱。

现在玻尔和海森堡分别被叫来写一个关于车费的说明贴在车子里让人参考。玻尔欣然同意了，他说：这个问题很简

单，车费问题实际上就是两个站之间的距离问题，我们只要把每一个站的位置状况写出来，那么乘客们就能够一目了然了。于是他就假设，A站的坐标是0，从而推出：B站的坐标是1，C站的坐标是1.5，D站的坐标是2.5，而E站的坐标是4.5。这就行了，玻尔说，车费就是起点站的坐标减掉终点站的坐标的绝对值，我们的“坐标”，实际上可以看成一种“车费能级”，所有的情况都完全可以包含在下面这个表格里：

| 站点 | 坐标（车费能级） |
|----|----------|
| A | 0 |
| B | 1 |
| C | 1.5 |
| D | 2.5 |
| E | 4.5 |

这便是一种经典的解法，每一个车站都被假设具有某种绝对的“车费能级”，就像原子中电子的每个轨道都被假设具有某种特定的能级一样。所有的车费，不管是从哪个站到哪个站，都可以用这个单一的变量来解决，这是一个一维的传统表格，完全可以表达为一个普通的公式。这也是所有物理问题的传统解法。

现在，海森堡说话了。不对，海森堡争辩说，这个思路有一个根本性的错误，那就是，作为一个乘客来说，他完全无法意识，也根本不可能观察到某个车站的“绝对坐标”是什么。比如我从C站乘车到D站，无论怎么样我也无法观察到“C站的坐标是1.5”，或者“D站的坐标是2.5”这个结论。作为我——乘客来说，我所能唯一观察和体会到的，就是“从C站到达D站要花1块钱”，这才是最确凿，最坚实的东西。我们的车费规则，只能以这样的事实为基础，而不是不可观察的所谓“坐标”，或者“能级”。

那么，怎样才能仅仅从这些可以观察的事实上去建立我们的车费规则呢？海森堡说，传统的那个一维表格已经不适用了，我们需要一种新类型的表格，像下面这样的：

| | A | B | C | D | E |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|
| A | 0 | 1 | 1.5 | 2.5 | 4.5 |
| B | 1 | 0 | 0.5 | 1.5 | 3.5 |
| C | 1.5 | 0.5 | 0 | 1 | 3 |
| D | 2.5 | 1.5 | 1 | 0 | 2 |
| E | 4.5 | 3.5 | 3 | 2 | 0 |

这里面，竖的是起点站，横的是终点站。现在这张表格里的每一个数字都是实实在在可以观测和检验的了。比如第一行第三列的那个1.5，它的横坐标是A，表明从A站出发。它的纵坐标是C，表明到C站下车。那么，只要某个乘客真正从A站坐到了C站，他就可以证实这个数字是正确的：这个旅途的确需要1.5块车费。

好吧，某些读者可能已经不耐烦了，它们的确是两种不同类型的东西，可是，这种区别的意义有那么大吗？毕竟，它们表达的，不是同一种收费规则吗？但事情要比我们想象的复杂多了，比如玻尔的表格之所以那么简洁，其实是有这样一个假设，那就是“从A到B”和“从B到A”，所需的钱是一样的。事实也许并非如此，从A到B要1块钱，从B回到A却很可能要1.5元。这样玻尔的传统方式要大大头痛了，而海森堡的表格却是简洁明了的：只要修改B为横坐标A为纵坐标的那个数字就可以了，只不过表格不再按照对角线对称了而已。

更关键的是，海森堡争辩说，所有的物理规则，也要按照这种表格的方式来改写。我们已经有了经典的动力学方程，现在，我们必须全部把它们按照量子的方式改写成某种表格方程。许多传统的物理变量，现在都要看成是一些独立的矩阵来处理。

在经典力学中，一个周期性的振动可以用数学方法分解成为一系列简谐振动的叠加，这个方法叫做傅里叶展开。想象一下我们的耳朵，它可以灵敏地分辨出各种不同的声音，即使这些声音同时响起，混成一片嘈杂也无关紧要，一个发烧友甚至可以分辨出 CD 音乐中乐手翻动乐谱的细微沙沙声。人耳自然是很神奇的，但是从本质上说，数学家也可以做到这一切，方法就是通过傅立叶分析把一个混合的音波分解成一系列的简谐波。大家可能要感叹，人耳竟然能够在瞬间完成这样复杂的数学分析，不过这其实是自然的进化而已。譬如守门员抱住飞来的足球，从数学上说相当于解析了一大堆重力和空气动力学的微分方程并求出了球的轨迹，再比如人本能的趋利避害的反应，从基因的角度说也相当于进行了无数风险概率和未来获利的计算。但这都只是因为进化的力量使得生物体趋于具有这样的能力而已，这能力有利于自然选择，倒不是什么特殊的数学能力所导致。

回到正题，在玻尔和索末菲的旧原子模型里，我们已经有了电子运动方程和量子化条件。这个运动同样可以利用傅立叶分析的手法，化作一系列简谐运动的叠加。在这个展开式里的每一项，都代表了一个特定频率。现在，海森堡准备对这个旧方程进行手术，把它彻底地改造成最新的矩阵版本。但是困难来了，我们现在有一个变量 p ，代表电子的动量，还有一个变量 q ，代表电子的位置。本来，在老方程里这两个变量应当乘起来，现在海森堡把 p 和 q 都变成了矩阵，那么，现在 p 和 q 应当如何再乘起来呢？

这个问题问得好：你如何把两个“表格”乘起来呢？

或者我们不妨先问自己这样一个问题：把两个表格乘起来，这代表了什么意义呢？

为了容易理解，我们还是回到我们那个巴士车费的比喻。现在假设我们手里有两张海森堡制定的车费表：矩阵 I 和矩阵 II，分别代表了巴士 I 号线和巴士 II 号线在某地的收费情况。为了简单起见，我们假设每条线都只有两个站，A 和 B。这两个表如下：

I 号线（矩阵 I）：

| | A | B |
|---|---|---|
| A | 1 | 2 |
| B | 3 | 1 |

II 号线（矩阵 II）：

| | A | B |
|---|---|---|
| A | 1 | 3 |
| B | 4 | 1 |

好，我们再来回顾一下这两张表到底代表了什么意思。根据海森堡的规则，数字的横坐标代表了起点站，纵坐标代表了终点站。那么矩阵 I 第一行第一列的那个 1 就是说，你坐巴士 I 号线，从 A 地出发，在 A 地原地下车，车费要 1 块钱（啊？为什么原地不动也要付 1 块钱呢？这个……一方面是比喻而已，再说你可以把 1 块钱看成某种起步费。何况在大部分城市的地铁里，你进去又马上出来，的确是要在电子卡里扣掉一点钱的）。同样，矩阵 I 第一行第二列的那个 2 是说，你坐 I 号线从 A 地到 B 地，需要 2 块钱。但是，如果从 B 地回到 A 地，那么就要看横坐标是 B 而纵坐标是 A 的那个数字，也就是第二行第一列的那个 3。矩阵 II 的情况同样如此。

好，现在我们来做个小学生水平的数学练习：乘法运算。只不过这次乘的不是普通的数字，而是两张表格：I 和 II。I×II 等于几？

让我们把习题完整地写出来。现在，boys and girls，这道题目的答案是什么呢？

$$\begin{array}{r} 12 \\ 31 \end{array} \times \begin{array}{r} 13 \\ 41 \end{array} = ?$$

饭后闲话：男孩物理学

1925年，当海森堡做出他那突破性的贡献的时候，他刚刚24岁。尽管在物理上有着极为惊人的天才，但海森堡在别的方面无疑还只是一个稚气未脱的大孩子。他兴致勃勃地跟着青年团去各地旅行，在哥本哈根逗留期间，他抽空去巴伐利亚滑雪，结果摔伤了膝盖，躺了好几个礼拜。在山谷田野间畅游的时候，他高兴得不能自己，甚至说“我连一秒种的物理都不愿想了”。

量子论的发展几乎就是年轻人的天下。爱因斯坦1905年提出光量子假说的时候，也才26岁。玻尔1913年提出他的原子结构的时候，28岁。德布罗意1923年提出相波的时候，31岁。而1925年，当量子力学在海森堡的手里得到突破的时候，后来在历史上闪闪发光的那些主要人物也几乎都和海森堡一样年轻：泡利25岁，狄拉克23岁，乌仑贝克25岁，古德施密特23岁，约尔当23岁。和他们比起来，36岁的薛定谔和43岁的波恩简直算是老爷爷了。量子力学被人们戏称为“男孩物理学”，波恩在哥廷根的理论班，也被人叫做“波恩幼儿园”。

不过，这只能说明量子论的锐气和朝气。在那个神话般的年代，象征了科学永远不知畏惧的前进步伐，开创出一个前所未有的大时代来。“男孩物理学”这个带有传奇色彩的名词，也将在物理史上镌刻出永恒的光芒。

5-3

上次我们布置了一道练习题，现在我们一起把它的答案求出来。

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 12 & 13 \\ \hline 31 & 41 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline 13 \\ \hline 41 \\ \hline \end{array} = ?$$

如果你还记得我们那个公共巴士的比喻，那么乘号左边的矩阵I代表了我们的巴士I号线的收费表，乘号右边的矩阵II代表了II号线的收费表。I是一个2x2的表格，II也是一个2x2的表格，我们有理由相信，它们的乘积也应该是类似的形式，也是一个2x2的表格。

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 12 & 13 \\ \hline 31 & 41 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline 13 \\ \hline 41 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline c & d \\ \hline \end{array}$$

但是，那答案到底是什么？我们该怎么求出abcd这四个未知数？更重要的是，IxII的意义是什么呢？

海森堡说，IxII，表示你先乘搭巴士I号线，然后转乘了II号线。答案中的a是什么呢？a处在第一行第一列，它也

必定表示从 A 地出发到 A 地下车的某种收费情况。海森堡说，a，其实就是说，你搭乘 I 号线从 A 地出发，期间转乘 II 号线，最后又回到 A 地下车。因为是乘法，所以它表示“I 号线收费”和“II 号线收费”的乘积。但是，情况还不是那么简单，因为我们的路线可能不止有一种，a 实际代表的是所有收费情况的“总和”。

如果这不好理解，那么我们干脆把题目做出来。答案中的 a，正如我们已经说明了的，表示我搭 I 号线从 A 地出发，然后转乘 II 号线，又回到 A 地下车的收费情况的总和。那么，我们如何具体地做到这一点呢？有两种方法：第一种，我们可以乘搭 I 号线从 A 地到 B 地，然后在 B 地转乘 II 号线，再从 B 地回到 A 地。此外，还有一种办法，就是我们在 A 地上了 I 号线，随即在原地下车。然后还是在 A 地再上 II 号线，同样在原地下车。这虽然听起来很不明智，但无疑也是一种途径。那么，我们答案中的 a，其实就是这两种方法的收费情况的总和。

现在我们看看具体数字应该是多少：第一种方法，我们先乘 I 号线从 A 地到 B 地，车费应该是多少呢？我们还记得海森堡的车费规则，那就看矩阵 I 横坐标为 A 纵坐标为 B 的那个数字，也就是第一行第二列的那个 2，2 块钱。好，随后我们又从 B 地转乘 II 号线回到了 A 地，这里的车费对应于矩阵 II 第二行第一列的那个 4。所以第一种方法的“收费乘积”是 $2 \times 4 = 8$ 。但是，我们提到，还有另一种可能，就是我们在 A 地原地不动地上了 I 号线再下来，又上 II 号线再下来，这同样符合我们 A 地出发 A 地结束的条件。这对应于两个矩阵第一行第一列的两个数字的乘积， $1 \times 1 = 1$ 。那么，我们的最终答案，a，就等于这两种可能的叠加，也就是说， $a = 2 \times 4 + 1 \times 1 = 9$ 。因为没有第三种可能性了。

同样道理我们来求 b。b 代表先乘 I 号线然后转乘 II 号线，从 A 地出发最终抵达 B 地的收费情况总和。这同样有两种办法可以做到：先在 A 地上 I 号线随即下车，然后从 A 地坐 II 号线去 B 地。收费分别是 1 块（矩阵 I 第一行第一列）和 3 块（矩阵 II 第一行第二列），所以 $1 \times 3 = 3$ 。还有一种办法就是先乘 I 号线从 A 地到 B 地，收费 2 块（矩阵 I 第一行第二列），然后在 B 地转 II 号线原地上下，收费 1 块（矩阵 II 第二行第二列），所以 $2 \times 1 = 1$ 。所以最终答案： $b = 1 \times 3 + 2 \times 1 = 5$ 。

大家可以先别偷看答案，自己试着求 c 和 d。最后应该是这样的： $c = 3 \times 1 + 1 \times 4 = 7$ ， $d = 3 \times 3 + 1 \times 1 = 10$ 。所以：

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 3 & 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 3 \\ \hline 4 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline 9 & 5 \\ \hline 7 & 10 \\ \hline \end{array}$$

很抱歉让大家如此痛苦不堪，不过我们的确在学习新的事物。如果你觉得这种乘法十分陌生的话，那么我们很快就要给你更大的惊奇，但首先我们还是熟悉这种新的运算规则才是。圣人说，温故而知新，我们不必为了自己新学到的东西而沾沾自喜，还是巩固巩固我们的基础吧，让我们把上面这道题目验算一遍。哦，不要昏倒，不要昏倒，其实没有那么乏味，我们可以把乘法的次序倒一倒，现在验算一遍 II×I：

$$\begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 3 \\ \hline 4 & 1 \\ \hline \end{array} \times \begin{array}{|c|c|} \hline 1 & 2 \\ \hline 3 & 1 \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|c|} \hline a & b \\ \hline c & d \\ \hline \end{array}$$

我知道大家都在唉声叹气，不过我还是坚持，复习功课是有益无害的。我们来看看 a 是什么，现在我们是先乘搭 II 号线，然后转 I 号线了，所以我们可以从 A 地上 II 号线，然后下来。再上 I 号线，然后又下来。对应的是 1×1 。另外，我们可以坐 II 号线去 B 地，在 B 地转 I 号线回到 A 地，所以是 $3 \times 3 = 9$ 。所以 $a = 1 \times 1 + 3 \times 3 = 10$ 。

喂，打瞌睡的各位，快醒醒，我们遇到问题了。在我们的验算里， $a = 10$ ，不过我还记得，刚才我们的答案说 $a = 9$ 。

各位把笔记本往回翻几页，看看我有没有记错？嗯，虽然大家都没有记笔记，但我还是没有记错，刚才我们的 $a=2\times 4+1\times 1=9$ 。看来是我算错了，我们再算一遍，这次可要打起精神了： a 代表 A 地上车 A 地下车。所以可能的情况是：我搭 II 号线在 A 地上车 A 地下车（矩阵 II 第一行第一列），1 块。然后转 I 号线同样在 A 地上车 A 地下车（矩阵 I 第一行第一列），也是 1 块。 $1\times 1=1$ 。还有一种可能是，我搭 II 号线在 A 地上车 B 地下车（矩阵 II 第一行第二列），3 块。然后在 B 地转 I 号线从 B 地回到 A 地（矩阵 II 第二行第一列），3 块。 $3\times 3=9$ 。所以 $a=1+9=10$ 。

嗯，奇怪，没错啊。那么难道前面算错了？我们再算一遍，好像也没错，前面 $a=1+8=9$ 。那么，那么……谁错了？哈哈，海森堡错了，他这次可丢脸了，他发明了一种什么样的表格乘法啊，居然导致如此荒唐的结果： $I\times II \neq II\times I$ 。

我们不妨把结果整个算出来：

$$\begin{array}{l}
 I \times II = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline 9 & 5 \\ \hline 7 & 10 \\ \hline & \\ \hline \end{array} \\
 \\
 II \times I = \begin{array}{|c|c|} \hline & \\ \hline 10 & 5 \\ \hline 7 & 9 \\ \hline & \\ \hline \end{array}
 \end{array}$$

的确， $I\times II \neq II\times I$ 。这可真让人惋惜，原来我们还以为这种表格式的运算至少有点创意的，现在看来浪费了大家不少时间，只好说声抱歉。但是，慢着，海森堡还有话要说，先别为我们死去的脑细胞默哀，它们的死也许不是完全没有意义的。

大家冷静点，大家冷静点，海森堡摇晃着他那漂亮的头发说，我们必须学会面对现实。我们已经说过了，物理学，必须从唯一可以被实践的数据出发，而不是靠想象和常识习惯。我们要学会依赖于数学，而不是日常语言，因为只有数学才具有唯一的意义，才能告诉我们唯一的真实。我们必须认识到这一点：数学怎么说，我们就得接受什么。如果数学说 $I\times II \neq II\times I$ ，那么我们就得这么认为，哪怕世人用再嘲讽的口气来讥笑我们，我们也不能改变这一立场。何况，如果仔细审查这里面的意义，也并没有太大的荒谬：先搭乘 I 号线，再转 II 号线，这和先搭乘 II 号线，再转 I 号线，导致的结果可能是不同的，有什么问题吗？

好吧，有人讽刺地说，那么牛顿第二定律究竟是 $F=ma$ ，还是 $F=am$ 呢？

海森堡冷冷地说，牛顿力学是经典体系，我们讨论的是量子体系。永远不要对量子世界的任何奇特性质过分大惊小怪，那会让你发疯的。量子的规则，并不一定要受到乘法交换率的束缚。

他无法做更多的口舌之争了，1925 年夏天，他被一场热病所感染，不得不离开哥廷根，到北海的一个小岛赫尔格兰（Helgoland）去休养。但是他的大脑没有停滞，在远离喧嚣的小岛上，海森堡坚定地沿着这条奇特的表格式道路去探索物理学的未来。而且，他很快就获得了成功：事实上，只要把矩阵的规则运用到经典的动力学公式里去，把玻尔和索末菲旧的量子条件改造成新的由坚实的矩阵砖块构造起来的方程，海森堡可以自然而然地推导出量子化的原子能级和辐射频率。而且这一切都可以顺理成章从方程本身解出，不再需要像玻尔的旧模型那样，强行附加一个不自然的量子条件。海森堡的表格的确管用！数学解释一切，我们的想象是靠不住的。

虽然，这种古怪的不遵守交换率的矩阵乘法到底意味着什么，无论对于海森堡，还是当时的所有人来说，都还仍然

是一个谜题，但量子力学的基本形式却已经得到了突破进展。从这时候起，量子论将以一种气势磅礴的姿态向前迈进，每一步都那样雄伟壮丽，激起滔天的巨浪和美丽的浪花。接下来的3年是梦幻般的3年，是物理史上难以想象的3年，理论物理的黄金年代，终于要放射出它最耀眼的光辉，把整个20世纪都装点得神圣起来。

海森堡后来在写给好友范德沃登的信中回忆道，当他在那个石头小岛上的时候，有一晚忽然想到体系的总能量应该是一个常数。于是他试着用他那规则来解这个方程以求得振子能量。求解并不容易，他做了一个通宵，但求出来的结果和实验符合得非常好。于是他爬上一个山崖去看日出，同时感到自己非常幸运。

是的，曙光已经出现，太阳正从海平线上冉冉升起，万道霞光染红了海面和空中的云彩，在天地间流动着奇幻的辉光。在高高的石崖顶上，海森堡面对着壮观的日出景象，他脚下碧海潮生，一直延伸到无穷无尽的远方。是的，他知道，**this is the moment**，他已经作出生命中最重要的突破，而物理学的黎明也终于到来。

饭后闲话：矩阵

我们已经看到，海森堡发明了这种奇特的表格， $I \times II \neq II \times I$ ，连他自己都没把握确定这是个什么怪物。当他结束养病，回到哥廷根后，就把论文草稿送给老师波恩，让他评论评论。波恩看到这种表格运算大吃一惊，原来这不是什么新鲜东西，正是线性代数里学到的“矩阵”！回溯历史，这种工具早在1858年就已经由一位剑桥的数学家 Arthur Cayley 所发明，不过当时不叫“矩阵”而叫做“行列式”（**determinant**，这个字后来变成了另外一个意思，虽然还是和矩阵关系很紧密）。发明矩阵最初的目的，是简洁地来求解某些微分方程组（事实上直到今天，大学线性代数课还是主要解决这个问题）。但海森堡对此毫不知情，他实际上不知不觉地“重新发明”了矩阵的概念。波恩和他那精通矩阵运算的助教约尔当随即在严格的数学基础上发展了海森堡的理论，进一步完善了量子力学，我们很快就要谈到。

数学在某种意义上来说总是领先的。Cayley 创立矩阵的时候，自然想不到它后来会在量子论的发展中起到关键作用。同样，黎曼创立黎曼几何的时候，又怎会料到他已经给爱因斯坦和他伟大的相对论提供了最好的工具。

乔治·盖莫夫在那本受欢迎的老科普书《从一到无穷大》（**One, Two, Three...Infinity**）里说，目前数学还有一个大分支没有派上用场（除了智力体操的用处之外），那就是数论。古老的数论领域里已经有许多难题被解开，比如四色问题，费马大定理。也有比如著名的哥德巴赫猜想，至今悬而未决。天知道，这些理论和思路是不是在将来会给某个物理或者化学理论开道，打造出一片全新的天地来。

5-4

从赫尔格兰回来后，海森堡找到波恩，请求允许他离开哥廷根一阵，去剑桥讲课。同时，他也把自己的论文给了波恩过目，问他有没有发表的价值。波恩显然被海森堡的想法给迷住了，正如他后来回忆的那样：“我对此着了迷……海森堡的思想给我留下了深刻的印象，对于我们一直追求的那个体系来说，这是一次伟大的突破。”于是当海森堡去到英国讲学的时候，波恩就把他的这篇论文寄给了《物理学杂志》（**Zeitschrift für Physik**），并于7月29日发表。这无疑标志着新生的量子力学在公众面前的首次亮相。

但海森堡古怪的表格乘法无疑也让波恩困扰，他在7月15日写给爱因斯坦的信中说：“海森堡新的工作看起来有点神秘莫测，不过无疑是很深刻的，而且是正确的。”但是，有一天，波恩突然灵光一闪：他终于想起来这是什么了。海森堡的表格，正是他从前所听说过的那个“矩阵”！

但是对于当时的欧洲物理学家来说，矩阵几乎是一个完全陌生的名字。甚至连海森堡自己，也不见得对它的性质有着完全的了解。波恩决定为海森堡的理论打一个坚实的数学基础，他找到泡利，希望与之合作，可是泡利对此持有强烈

的怀疑态度，他以他标志性的尖刻语气对波恩说：“是的，我就知道你那种冗长和复杂的形式主义，但你那无用的数学只会损害海森堡的物理思想。”波恩在泡利那里碰了一鼻子灰，不得不转向他那熟悉矩阵运算的年轻助教约尔当(Pascual Jordan, 再过一个礼拜，就是他 101 年诞辰)，两人于是欣然合作，很快写出了著名的论文《论量子力学》(Zur Quantenmechanik)，发表在《物理学杂志》上。在这篇论文中，两人用了很大的篇幅来阐明矩阵运算的基本规则，并把经典力学的哈密顿变换统统改造成为矩阵的形式。传统的动量 p 和位置 q 这两个物理变量，现在成为了两个含有无限数据的庞大表格，而且，正如我们已经看到的那样，它们并不遵守传统的乘法交换率， $p \times q \neq q \times p$ 。

波恩和约尔当甚至把 $p \times q$ 和 $q \times p$ 之间的差值也算了出来，结果是这样的：

$$pq - qp = (\hbar/2\pi i) I$$

\hbar 是我们已经熟悉的普朗克常数， i 是虚数的单位，代表-1 的平方根，而 I 叫做单位矩阵，相当于矩阵运算中的 1。波恩和约尔当奠定了一种新的力学——矩阵力学的基础。在这种新力学体系的魔法下，普朗克常数和量子化从我们的基本力学方程中自然而然地跳了出来，成为自然界的内在禀性。如果认真地对这种力学形式做一下探讨，人们会惊奇地发现，牛顿体系里的种种结论，比如能量守恒，从新理论中也可以得到。这就是说，新力学其实是牛顿理论的一个扩展，老的经典力学其实被“包含”在我们的新力学中，成为一种特殊情况下的表现形式。

这种新的力学很快就得到进一步完善。从剑桥返回哥廷根后，海森堡本人也加入了这个伟大的开创性工作中。11 月 26 日，《论量子力学 II》在《物理学杂志》上发表，作者是波恩，海森堡和约尔当。这篇论文把原来只讨论一个自由度的体系扩展到任意个自由度，从而彻底建立了新力学的主体。现在，他们可以自豪地宣称，长期以来人们所苦苦追寻的那个目标终于达到了，多年以来如此困扰着物理学家的原子光谱问题，现在终于可以在新力学内部完美地解决。《论量子力学 II》这篇文章，被海森堡本人亲切地称呼为“三人论文”(Dreimannarbeit) 的，也终于注定要在物理史上流芳百世。

新体系显然在理论上获得了巨大的成功。泡利很快就改变了他的态度，在写给克罗尼格(Ralph Laer Kronig)的信里，他说：“海森堡的力学让我有了新的热情和希望。”随后他很快就给出了极其有说服力的证明，展示新理论的结果和氢分子的光谱符合得非常完美，从量子规则中，巴尔末公式可以被自然而然地推导出来。非常好笑的是，虽然他不久前还对波恩咆哮说“冗长和复杂的形式主义”，但他自己的证明无疑动用了最最复杂的数学。

不过，对于当时其他的物理学家来说，海森堡的新体系无疑是一个怪物。矩阵这种冷冰冰的东西实在太不讲情面，不给人以任何想象的空间。人们一再追问，这里面的物理意义是什么？矩阵究竟是个什么东西？海森堡却始终护定他那人沮丧的立场：所谓“意义”是不存在的，如果有的话，那数学就是一切“意义”所在。物理学是什么？就是从实验观测量出发，并以庞大复杂的数学关系将它们联系起来的一门科学，如果说有什么图像能够让人们容易理解和记忆的话，那也是靠不住的。但是，不管怎么样，毕竟矩阵力学对于大部分人来说都太陌生太遥远了，而隐藏在它背后的深刻含义，当时还远远没有被发掘出来。特别是， $p \times q \neq q \times p$ ，这究竟代表了什么，令人头痛不已。

一年后，当薛定谔以人们所喜闻乐见的传统方式发布他的波动方程后，几乎全世界的物理学家都松了一口气：他们终于解脱了，不必再费劲地学习海森堡那异常复杂和繁难的矩阵力学。当然，人人都必须承认，矩阵力学本身的伟大含义是不容怀疑的。

但是，如果说在 1925 年，欧洲大部分物理学家都还对海森堡，波恩和约尔当的力学一知半解的话，那我们也不得不说，其中有一个非常显著的例外，他就是保罗·狄拉克。在量子力学大发展的年代，哥本哈根，哥廷根以及慕尼黑三地抢尽了风头，狄拉克的崛起总算也为老牌的剑桥挽回了一点颜面。

保罗·埃德里安·莫里斯·狄拉克(Paul Adrien Maurice Dirac) 于 1902 年 8 月 8 日出生于英国布里斯托尔港。他的父亲是瑞士人，当时是一位法语教师，狄拉克是家里的第二个孩子。许多大物理学家的童年教育都是多姿多彩的，比如玻尔，

海森堡，还有薛定谔。但狄拉克的童年显然要悲惨许多，他父亲是一位非常严肃而刻板的人，给保罗制定了众多的严格规矩。比如他规定保罗只能和他讲法语（他认为这样才能学好这种语言），于是当保罗无法表达自己的时候，只好选择沉默。在小狄拉克的童年里，音乐、文学、艺术显然都和他无缘，社交活动也几乎没有。这一切把狄拉克塑造成了一个沉默寡言，喜好孤独，淡泊名利，在许多人眼里显得 *geeky* 的人。有一个流传很广的关于狄拉克的笑话是这样说的：有一次狄拉克在某大学演讲，讲完后一个观众起来说：“狄拉克教授，我不明白你那个公式是如何推导出来的。”狄拉克看着他久久地不说话，主持人不得不提醒他，他还没有回答问题。

“回答什么问题？”狄拉克奇怪地说，“他刚刚说的是一个陈述句，不是一个疑问句。”

1921 年，狄拉克从布里斯托尔大学电机工程系毕业，恰逢经济大萧条，结果没法找到工作。事实上，很难说他是否会成为一个出色的工程师，狄拉克显然长于理论而拙于实验。不过幸运的是，布里斯托尔大学数学系又给了他一个免费进修数学的机会，2 年后，狄拉克转到剑桥，开始了人生的新篇章。

我们在上面说到，1925 年秋天，当海森堡在赫尔格兰岛作出了他的突破后，他获得波恩的批准来到剑桥讲学。当时海森堡对自己的发现心中还没有底，所以没有在公开场合提到自己这方面的工作，不过 7 月 28 号，他参加了所谓“卡皮察俱乐部”的一次活动。卡皮察（P.L.Kapitsa）是一位年轻的苏联学生，当时在剑桥跟随卢瑟福工作。他感到英国的学术活动太刻板，便自己组织了一个俱乐部，在晚上聚会，报告和讨论有关物理学的最新进展。我们在前面讨论卢瑟福的时候提到过卡皮察的名字，他后来也获得了诺贝尔奖。

狄拉克也是卡皮察俱乐部的成员之一，他当时不在剑桥，所以没有参加这个聚会。不过他的导师福勒（William Alfred Fowler）参加了，而且大概在和海森堡的课后讨论中，得知他已经发明了一种全新的理论来解释原子光谱问题。后来海森堡把他的证明寄给了福勒，而福勒给了狄拉克一个复印本。这一开始没有引起狄拉克的重视，不过大概一个礼拜后，他重新审视海森堡的论文，这下他把握住了其中的精髓：别的都是细枝末节，只有一件事是重要的，那就是我们那奇怪的矩阵乘法规则： $p \times q \neq q \times p$ 。

饭后闲话：约尔当

恩斯特·帕斯库尔·约尔当（Ernst Pascual Jordan）出生于汉诺威。在我们的史话里已经提到，他是物理史上两篇重要的论文《论量子力学》I 和 II 的作者之一，可以说也是量子力学的主要创立者。但是，他的名声显然及不上波恩或者海森堡。

这里面的原因显然也是多方面的，1925 年，约尔当才 22 岁，无论从资格还是名声来说，都远远及不上元老级的波恩和少年成名的海森堡。当时和他一起做出贡献的那些人，后来都变得如此著名：波恩，海森堡，泡利，他们的光辉耀眼，把约尔当完全给盖住了。

从约尔当本人来说，他是一个害羞和内向的人，说话有口吃的毛病，总是结结巴巴的，所以他很少授课或发表演讲。更严重的是，约尔当在二战期间站到了希特勒的一边，成为一个纳粹的同情者，被指责曾经告密。这大大损害了他的声名。

约尔当是一个作出了许多伟大成就的科学家。除了创立了基本的矩阵力学形式，为量子论打下基础之外，他同样在量子场论，电子自旋，量子电动力学中作出了巨大的贡献。他是最先证明海森堡和薛定谔体系同等性的人之一，他发明了约尔当代数，后来又广泛涉足生物学、心理学和运动学。他曾被提名为诺贝尔奖得主，却没有成功。约尔当后来显然也对自己的成就被低估有些恼火，1964 年，他声称《论量子力学》一文其实几乎都是他一个人的贡献——波恩那时候病了。这引起了广泛的争议，不过许多人显然同意，约尔当的贡献应当得到更多的承认。

5-5

$p \times q \neq q \times p$ 。如果说狄拉克比别人天才在什么地方，那就是他可以一眼就看出这才是海森堡体系的精髓。那个时候，波恩和约尔当还在苦苦地钻研讨厌的矩阵，为了建立起新的物理大厦而努力地搬运着这种庞大而又沉重的表格式方砖，而他们的文章尚未发表。但狄拉克是不想做这种苦力的，他轻易地透过海森堡的表格，把握住了这种代数的实质。不遵守交换率，这让我想起了什么？狄拉克的脑海里闪过一个名词，他以前在上某一门动力学课的时候，似乎听说过一种运算，同样不符合乘法交换率。但他还不是十分确定，他甚至连那种运算的定义都给忘了。那天是星期天，所有的图书馆都关门了，这让狄拉克急得像热锅上的蚂蚁。第二天一早，图书馆刚刚开门，他就冲了进去，果然，那正是他所要的东西：它的名字叫做“泊松括号”。

我们还在第一章讨论光和菲涅尔的时候，就谈到过泊松，还有著名的泊松光斑。泊松括号也是这位法国科学家的杰出贡献，不过我们在这里没有必要深入它的数学意义。总之，狄拉克发现，我们不必花九牛二虎之力去搬弄一个晦涩的矩阵，以此来显示和经典体系的决裂。我们完全可以从经典的泊松括号出发，建立一种新的代数。这种代数同样不符合乘法交换率，狄拉克把它称作“q 数”（q 表示“奇异”或者“量子”）。我们的动量、位置、能量、时间等等概念，现在都要改造成这种 q 数。而原来那些老体系里的符合交换率的变量，狄拉克把它们称作“c 数”（c 代表“普通”）。

“看。”狄拉克说，“海森堡的最后方程当然是对的，但我们不用他那种大惊小怪，牵强附会的方式，也能够得出同样的结果。用我的方式，同样能得出 $xy - yx$ 的差值，只不过把那个让人看了生厌的矩阵换成我们的经典泊松括号 $[x, y]$ 罢了。然后把它用于经典力学的哈密顿函数，我们可以顺理成章地导出能量守恒条件和玻尔的频率条件。重要的是，这清楚地表明了，我们的新力学和经典力学是一脉相承的，是旧体系的一个扩展。c 数和 q 数，可以以清楚的方式建立起联系起来。”

狄拉克把论文寄给海森堡，海森堡热情地赞扬了他的成就，不过带给狄拉克一个糟糕的消息：他的结果已经在德国由波恩和约尔当作出了，是通过矩阵的方式得到的。想来狄拉克一定为此感到很郁闷，因为显然他的法子更简洁明晰。随后狄拉克又出色地证明了新力学和氢分子实验数据的吻合，他又一次郁闷了——泡利比他快了一点点，五天而已。哥廷根的这帮家伙，海森堡，波恩，约尔当，泡利，他们是大军团联合作战，而狄拉克在剑桥则是孤军奋斗，因为在英国懂得量子力学的人简直屈指可数。但是，虽然狄拉克慢了那么一点，但每一次他的理论都显得更为简洁、优美、深刻。而且，上天很快会给他新的机会，让他的名字在历史上取得不逊于海森堡、波恩等人的地位。

现在，在旧的经典体系的废墟上，矗立起了一种新的力学，由海森堡为它奠基，波恩，约尔当用矩阵那实心的砖块为它建造了坚固的主体，而狄拉克的优美的 q 数为它做了最好的装饰。现在，唯一缺少的就是一个成功的广告和落成典礼，把那些还在旧废墟上唉声叹气的人们都吸引到新大厦里来定居。这个庆典在海森堡取得突破后 3 个月便召开了，它的主题叫做“电子自旋”。

我们还记得那让人头痛的“反常塞曼效应”，这种复杂现象要求引进 $1/2$ 的量子数。为此，泡利在 1925 年初提出了他那著名的“不相容原理”的假设，我们前面已经讨论过，这个规定是说，在原子大厦里，每一间房间都有一个 4 位数的门牌号码，而每间房只能入住一个电子。所以任何两个电子也不能共享同一组号码。

这个“4 位数的号码”，其每一位都代表了电子的一个量子数。当时人们已经知道电子有 3 个量子数，这第四个是什么，便成了众说纷纭的谜题。不相容原理提出后不久，当时在哥本哈根访问的克罗尼格（Ralph Kronig）想到了一种可能：就是把这第四个自由度看成电子绕着自己的轴旋转。他找到海森堡和泡利，提出了这一思路，结果遭到两个德国年轻人的一致反对。因为这样就又回到了一种图像化的电子概念那里，把电子想象成一个实实在在的小球，而违背了我们从观察和数学出发的本意了。如果电子真是这样一个带电小球的话，在麦克斯韦体系里是不稳定的，再说也违相对论——它的表面旋转速度要高于光速。

到了 1925 年秋天，自旋的假设又在荷兰莱顿大学的两个学生，乌仑贝克（George Eugene Uhlenbeck）和古德施密特

(Somul Abraham Goudsmit)那里死灰复燃了。当然，两人不知道克罗尼格曾经有过这样的意见，他们是在研究光谱的时候独立产生这一想法的。于是两人找到导师埃仑费斯特(Paul Ehrenfest)征求意见。埃仑费斯特也不是很确定，他建议两人先写一个小文章发表。于是两人当真写了一个短文交给埃仑费斯特，然后又去求教于老资格的洛仑兹。洛仑兹帮他们算了算，结果在这个模型里电子表面的速度达到了光速的10倍。两人大吃一惊，风急火燎地赶回大学要求撤销那篇短文，结果还是晚了，埃仑费斯特早就给Nature杂志寄了出去。据说，两人当时懊恼得都快哭了，埃仑费斯特只好安慰他们说：“你们还年轻，做点蠢事也没关系。”

还好，事情并没有想象的那么糟糕。玻尔首先对此表示赞同，海森堡用新的理论去算了算结果后，也转变了反对的态度。到了1926年，海森堡已经在说：“如果没有古德施密特，我真不知该如何处理塞曼效应。”一些技术上的问题也很快被解决了，比如有一个系数2，一直和理论所抵触，结果在玻尔研究所访问的美国物理学家托马斯发现原来人们都犯了一个计算错误，而自旋模型是正确的。很快海森堡和约尔当用矩阵力学处理了自旋，结果大获全胜，很快没有人怀疑自旋的正确性了。

哦，不过有一个例外，就是泡利，他一直对自旋深恶痛绝。在他看来，原本电子已经在数学当中被表达得很充分了——现在可好，什么形状、轨道、大小、旋转……种种经验性的概念又幽灵般地回来了。原子系统比任何时候都像个太阳系，本来只有公转，现在连自转都有了。他始终按照自己的路子走，决不向任何力学模型低头。事实上，在某种意义上泡利是对的，电子的自旋并不能想象成传统行星的那种自转，它具有 $1/2$ 的量子数，也就是说，它要转两圈才露出同一个面孔，这里面的意义只能由数学来把握。后来泡利真的从特定的矩阵出发，推出了这一性质，而一切又被伟大的狄拉克于1928年统统包含于他那相对论化了的量子体系中，成为电子内禀的自然属性。

但是，无论如何，1926年海森堡和约尔当的成功不仅是电子自旋模型的胜利，更是新生的矩阵力学的胜利。不久海森堡又天才般地指出了解决有着两个电子的原子——氦原子的道路，使得新体系的威力再次超越了玻尔的老系统，把它的疆域扩大到以前未知的领域中。已经在迷雾和荆棘中彷徨了好几年的物理学家们这次终于可以扬眉吐气，把长久郁积的坏心情一扫而空，好好地呼吸一下那新鲜的空气。

但是，人们还没有来得及歇一歇脚，欣赏一下周围的风景，为目前的成就自豪一下，我们的快艇便要前进了。物理学正处在激流之中，它飞流直下，一泻千里，带给人晕眩的速度和刺激。自牛顿起250年来，科学从没有在那个时期可以像如今这般翻天覆地，健步如飞。量子的力量现在已经完全苏醒了，在接下来的3年间，它将改变物理学的一切，在人类的智慧中刻下最深的烙印，并影响整个20世纪的面貌。

当乌仑贝克和古德施密特提出自旋的时候，玻尔正在去往莱登(Leiden)的路上。当他的火车到达汉堡的时候，他发现泡利和斯特恩(Stern)站在站台上，只是想问问他关于自旋的看法，玻尔不大相信，但称这很有趣。到达莱登以后，他又碰到了爱因斯坦和埃仑费斯特，爱因斯坦详细地分析了这个理论，于是玻尔改变了看法。在回去的路上，玻尔先经过哥廷根，海森堡和约尔当站在站台上。同样的问题：怎么看待自旋？最后，当玻尔的火车抵达柏林，泡利又站在了站台上——他从汉堡一路赶到柏林，想听听玻尔一路上有了什么看法的变化。

人们后来回忆起那个年代，简直像是在讲述一个童话。物理学家们一个个都被洪流冲击得站不住脚：节奏快得几乎不给人喘息的机会，爆炸性的概念一再地被提出，每一个都足以改变整个科学的面貌。但是，每一个人都感到深深的骄傲和自豪，在理论物理的黄金年代，能够扮演历史舞台上的那一个角色。人们常说，时势造英雄，在量子物理的大发展时代，英雄们的确留下了最最伟大的业绩，永远让后人神往。

回到我们的史话中来。现在，花开两朵，各表一支。我们去看看量子论是如何沿着另一条完全不同的思路，取得同样伟大的突破的。

第六章 大一统

6-1

当年轻气盛的海森堡在哥廷根披荆斩棘的时候，埃尔文·薛定谔（Erwin Schrodinger）已经是瑞士苏黎世大学的一位有名望的教授。当然，相比海森堡来说，薛定谔只能算是大器晚成。这位出生于维也纳的奥地利人并没有海森堡那么好的运气，在一个充满了顶尖精英人物的环境里求学，而几次在战争中的服役也阻碍了他的学术研究。但不管怎样，薛定谔的物理天才仍然得到了很好的展现，他在光学、电磁学、分子运动理论、固体和晶体的动力学方面都作出过突出的贡献，这一切使得苏黎世大学于 1921 年提供给他一份合同，聘其为物理教授。而从 1924 年起，薛定谔开始对量子力学和统计理论感到兴趣，从而把研究方向转到这上面来。

和玻尔还有海森堡他们不同，薛定谔并不想在原子那极为复杂的谱线迷宫里奋力冲突，撞得头破血流。他的灵感，直接来自于德布罗意那巧妙绝伦的工作。我们还记得，1923 年，德布罗意的研究揭示出，伴随着每一个运动的电子，总是有一个如影随形的“相波”。这一方面为物质的本性究竟是粒子还是波蒙上了更为神秘莫测的面纱，但同时也已经提供通往最终答案的道路。

薛定谔还是从爱因斯坦的文章中得知德布罗意的工作的。他在 1925 年 11 月 3 日写给爱因斯坦的信中说：“几天前我怀着最大的兴趣阅读了德布罗意富有独创性的论文，并最终掌握了它。我是从你那关于简并气体的第二篇论文的第 8 节中第一次了解它的。”把每一个粒子都看作是类波的思想对薛定谔来说极为迷人，他很快就在气体统计力学中应用这一理论，并发表了一篇题为《论爱因斯坦的气体理论》的论文。这是他创立波动力学前的最后一篇论文，当时距离那个伟大的时刻已经以及离婚的事宜。薛定谔写信给维也纳的一位“旧日的女朋友”，让她来阿罗萨陪伴自己。这位神秘女郎的身份始终是个谜题，二战后无论是科学史专家还是八卦新闻记者，都曾经竭尽所能地去求证她的真面目，却都没有成功。薛定谔当时的日记已经遗失了，而从留下的蛛丝马迹来看，她又不像任何一位已知的薛定谔的情人。但有一件事是肯定的：这位神秘女郎极大地激发了薛定谔的灵感，使得他在接下来的 12 个月里令人惊异地始终维持着一种极富创造力和洞察力的状态，并接连不断地发表了六篇关于量子力学的主要论文。薛定谔的同事在回忆的时候总是说，薛定谔的伟大工作是在他生命中一段情欲旺盛的时期做出的。从某种程度上来说，科学还要小小地感谢一下这位不知名的女郎。

回到比较严肃的话题上来。在咀嚼了德布罗意的思想后，薛定谔决定把它用到原子体系的描述中去。我们都已经知道，原子中电子的能量不是连续的，它由原子的分立谱线而充分地证实。为了描述这一现象，玻尔强加了一个“分立能级”的假设，海森堡则运用他那庞大的矩阵，经过复杂的运算后导出了这一结果。现在轮到薛定谔了，他说，不用那么复杂，也不用引入外部的假设，只要把我们的电子看成德布罗意波，用一个波动方程去表示它，那就行了。

薛定谔一开始想从建立在相对论基础上的德布罗意方程出发，将其推广到束缚粒子中去。为此他得出了一个方程，不过不太令人满意，因为没有考虑到电子自旋的情况。当时自旋刚刚发现不久，薛定谔还对其一知半解。于是，他回过头来，从经典力学的哈密顿-雅可比方程出发，利用变分法和德布罗意公式，最后求出了一个非相对论的波动方程，用希腊字母 ψ 来代表波的函数，最终形式是这样的：

$$\Delta\psi + [8(\pi^2)m/h^2] (E - V)\psi = 0$$

这便是名震整部 20 世纪物理史的薛定谔波函数。当然对于一般的读者来说并没有必要去探讨数学上的详细意义，我们只要知道一些符号的含义就可以了。三角 Δ 叫做“拉普拉斯算符”，代表了某种微分运算。 h 是我们熟知的普朗克常数。 E 是体系总能量， V 是势能，在原子中也就是 $-e^2/r$ 。在边界条件确定的情况下求解这个方程，我们可以算出 E 的解来。

如果我们求解方程 $\sin(x)=0$ ，答案将会是一组数值， x 可以是 $0, \pi, 2\pi$ ，或者是 $n\pi$ 。 $\sin(x)$ 的函数是连续的，但方程的解却是不连续的，依赖于整数 n 。同样，我们求解薛定谔方程中的 E ，也将得到一组分立的答案，其中包含了量子化的

特征：整数 n 。我们的解精确地吻合于实验，原子的神秘光谱不再为矩阵力学所专美，它同样可以从波动方程中被自然地推导出来。

现在，我们能够非常形象地理解为什么电子只能在某些特定的能级上运行了。电子有着一个内在的波动频率，我们想象一下吉他上一根弦的情况：当它被拨动时，它便振动起来。但因为吉他弦的两头是固定的，所以它只能形成整数个波节。如果一个波长是 20 厘米，那么弦的长度显然只能是 20 厘米、40 厘米、60 厘米……而不可以是 50 厘米。因为那就包含了半个波，从而和它被固定的两头互相矛盾。假如我们的弦形成了某种圆形的轨道，就像电子轨道那样，那么这种“轨道”的大小显然也只能是某些特定值。如果一个波长 20 厘米，轨道的周长也就只能是 20 厘米的整数倍，不然就无法头尾互相衔接了。

从数学上来说，这个函数叫做“本征函数”（Eigenfunction），求出的分立的解叫做“本征值”（Eigenvalue）。所以薛定谔的论文叫做《量子化是本征值问题》，从 1926 年 1 月起至 6 月，他一连发了四篇以此为题的论文，从而彻底地建立了另一种全新的力学体系——波动力学。在这四篇论文中间，他还写了一篇《从微观力学到宏观力学的连续过渡》的论文，证明古老的经典力学只是新生的波动力学的一种特殊表现，它完全地被包容在波动力学内部。

薛定谔的方程一出台，几乎全世界的物理学家都为之欢呼。普朗克称其为“划时代的工作”，爱因斯坦说：“……您的想法源自于真正的天才。”“您的量子方程已经迈出了决定性的一步。”埃伦费斯特说：“我为您的理论和其带来的全新观念所着迷。在过去的两个礼拜里，我们的小组每天都要在黑板前花上几个小时，试图从一切角度去理解它。”薛定谔的方程通俗形象，简明易懂，当人们从矩阵那陌生的迷宫里抬起头来，再次看到自己熟悉的以微分方程所表达的系统时，他们都像闻到了故乡泥土的芬芳，有一种热泪盈眶的冲动。但是，这种新体系显然也已经引起了矩阵方面的注意，哥廷根和哥本哈根的那些人，特别是海森堡本人，显然对这种“通俗”的解释是不满意的。

海森堡在写给泡利的信中说：

“我越是思考薛定谔理论的物理意义，就越感到厌恶。薛定谔对于他那理论的形象化的描述是毫无意义的，换一种说法，那纯粹是一个 Mist。”Mist 这个德文，基本上相当于英语里的 bullshit 或者 crap。

薛定谔也毫不客气，在论文中他说：

“我的理论是从德布罗意那里获得灵感的……我不知道它和海森堡有任何继承上的关系。我当然知道海森堡的理论，它是一种缺乏形象化的，极为困难的超级代数方法。我即使不完全排斥这种理论，至少也对此感到沮丧。”

矩阵力学，还是波动力学？全新的量子论诞生不到一年，很快已经面临内战。

6-2

回顾一下量子论在发展过程中所经历的两条迥异的道路是饶有趣味的。第一种办法的思路是直接从观测到的原子谱线出发，引入矩阵的数学工具，用这种奇异的方块去建立起整个新力学的大厦来。它强调观测到的分立性，跳跃性，同时又坚持以数学为唯一导向，不为日常生活的直观经验所迷惑。但是，如果追究根本的话，它所强调的光谱线及其非连续性的一面，始终可以看到微粒势力那隐约的身影。这个理论的核心人物自然是海森堡，波恩，约尔当，而他们背后的精神力量，那位幕后的“教皇”，则无疑是哥本哈根的那位伟大的尼尔斯·玻尔。这些关系密切的科学家们集中资源和火力，组成一个坚强的战斗集体，在短时间内取得突破，从而建立起矩阵力学这一壮观的堡垒来。

而沿着另一条道路前进的人们在组织上显然松散许多。大致说来，这是以德布罗意的理论为切入点，以薛定谔为主将的一个派别。而在波动力学的创建过程中起到关键的指导作用的爱因斯坦，则是他们背后的精神领袖。但是这个理论

的政治观点也是很明确的：它强调电子作为波的连续性一面，以波动方程来描述它的行为。它热情地拥抱直观的解释，试图恢复经典力学那种形象化的优良传统，有一种强烈的复古倾向，但革命情绪不如对手那样高涨。打个不太恰当的比方，矩阵方面提倡彻底的激进的改革，摒弃旧理论的直观性，以数学为唯一基础，是革命的左派。而波动方面相对保守，它强调继承性和古典观念，重视理论的形象化和物理意义，是革命的右派。这两派的大战将交织在之后量子论发展的每一步中，从而为人类的整个自然哲学带来极为深远的影响。

在上一节中，我们已经提到，海森堡和薛定谔互相对对方的理论表达出毫不掩饰的厌恶（当然，他们私人之间是无怨无仇的）。他们各自认定，自己的那套方法才是唯一正确的。这是自然的现象，因为矩阵力学和波动力学看上去是那样地不同，而两人的性格又都以好胜和骄傲闻名。当衰败的玻尔理论退出历史舞台，留下一个权力真空的时候，无疑每个人都想占有那一份无上的光荣。不过到了1926年4月份，这种对峙至少在表面上有了缓和，薛定谔，泡利，约尔当都各自证明了，两种力学在数学上来说是完全等价的！事实上，我们追寻它们各自的家族史，发现它们都是从经典的哈密顿函数而来，只不过一个是从粒子的运动方程出发，一个是从波动方程出发罢了。而光学和运动学，早就已经在哈密顿本人的努力下被联系在了一起，这当真叫做“本是同根生”了。很快人们已经知道，从矩阵出发，可以推导出波动函数的表达形式来，而反过来，从波函数也可以导出我们的矩阵。1930年，狄拉克出版了那本经典的量子力学教材，两种力学被完美地统一起来，作为一个理论的不同表达形式出现在读者面前。

但是，如果谁以为从此就天下太平，万事大吉，那可就大错特错了。虽然两种体系在形式上已经归于统一，但从内心深处意识形态来说，它们之间的分歧却越来越大，很快就形成了不可逾越的鸿沟。数学上的一致并不能阻止人们对它进行不同的诠释，就矩阵方面来说，它的本意是粒子性和不连续性。而波动方面却始终在谈论波动性和连续性。波粒战争现在到达了最高潮，双方分别找到了各自可以依赖的政府，并把这场战争再次升级到对整个物理规律的解释这一层次上去。

“波，只有波才是唯一的实在。”薛定谔肯定地说，“不管是电子也好，光子也好，或者任何粒子也好，都只是波动表面的泡沫。它们本质上都是波，都可以用波动方程来表达基本的运动方式。”

“绝对不敢苟同。”海森堡反驳道，“物理世界的基本现象是离散性，或者说不连续性。大量的实验事实证明了这一点：从原子的光谱，到康普顿的实验，从光电现象，到原子中电子在能级间的跳跃，都无可辩驳地显示出大自然是不连续的。你那波动方程当然在数学上是一个可喜的成就，但我们必须认识到，我们不能按照传统的那种方式去认识它——它不是那个意思。”

“恰恰相反。”薛定谔说，“它就是那个意思。波函数 ψ （读作 psai）在各个方向上都是连续的，它可以看成是某种振动。事实上，我们必须把电子想象成一种驻在的本征振动，所谓电子的“跃迁”，只不过是它振动方式的改变而已。没有什么‘轨道’，也没有什么‘能级’，只有波。”

“哈哈。”海森堡嘲笑说，“你恐怕对你自己的 ψ 是个什么东西都没有搞懂吧？它只是在某个虚拟的空间里虚拟出来的函数，而你硬要把它想象成一种实在的波。事实上，我们绝不能被日常的形象化的东西所误导，再怎么讲，电子作为经典粒子的行为你是不能否认的。”

“没错。”薛定谔还是不肯示弱，“我不否认它的确展示出类似质点的行为。但是，就像一个椰子一样，如果你敲开它那粒子的坚硬的外壳，你会发现那里面还是波动的柔软的汁水。电子无疑是由正弦波组成的，但这种波在各个尺度上伸展都不大，可以看成是一个‘波包’。当这种波包作为一个整体前进时，它看起来就像是一个粒子。可是，本质上，它还是波，粒子只不过是波的一种衍生物而已。”

正如大家都已经猜到的那样，两人谁也无法说服对方。1926年7月，薛定谔应邀到慕尼黑大学讲授他的新力学，海森堡就坐在下面，他站起来激烈地批评薛定谔的解释，结果悲哀地发现在场的听众都对他持有反对态度。早些时候，玻

尔原来的助手克莱默接受了乌特勒支（Utrecht）大学的聘书而离开哥本哈根，于是海森堡成了这个位置的继任者——现在他可以如梦想的那样在玻尔的身边工作了。玻尔也对薛定谔那种回归经典传统的理论观感到不安，为了解决这个问题，他邀请薛定谔到哥本哈根进行一次学术访问，争取在交流中达成某种一致意见。

9月底，薛定谔抵达哥本哈根，玻尔到火车站去接他。争论从那一刻便已经展开，日日夜夜，无休无止，一直到薛定谔最终离开哥本哈根为止。海森堡后来在他的《部分与整体》一书中回忆了这次碰面，他说，虽然平日里玻尔是那样一个和蔼可亲的人，但一旦他卷入这种物理争论，他看起来就像一个偏执的狂热者，决不肯妥协一步。争论当然是物理上的问题，但在很大程度上已经变成了哲学之争。薛定谔就是不能相信，一种“无法想象”的理论有什么实际意义。而玻尔则坚持认为，图像化的概念是不可能用在量子过程中的，它无法用日常语言来描述。他们激烈地从白天吵到晚上，最后薛定谔筋疲力尽，他很快病倒了，不得不躺到床上，由玻尔的妻子玛格丽特来照顾。即使这样，玻尔仍然不依不饶，他冲进病房，站在薛定谔的床头继续与之辩论。当然，最后一切都是徒劳，谁也没有被对方说服。

物理学界的空气业已变得非常火热。经典理论已经倒塌了，现在矩阵力学和波动力学两座大厦拔地而起，它们之间以某种天桥互相联系，从理论上说要算是一体。可是，这两座大厦的地基却仍然互不关联，这使得表面上的亲善未免有那么一些口是心非的味道。而且，波动和微粒，这两个 300 年来的宿敌还在苦苦交战，不肯从自己的领土上后退一步。双方都依旧宣称自己对于光、电，还有种种物理现象拥有一切主权，而对手是非法武装势力，是反政府组织。现在薛定谔加入波动的阵营，他甚至为波动提供了一部完整的宪法，也就是他的波动方程。在薛定谔看来，波动代表了从惠更斯，杨一直到麦克斯韦的旧日帝国的光荣，而这种贵族的传统必须新的国家得到保留和发扬。薛定谔相信，波动这一简明形象的概念将再次统治物理世界，从而把一切都归结到一个统一的图像里去。

不幸的是，薛定谔猜错了。波动方面很快就要发现，他们的宪法原来有着更为深长的意味。从字里行间，我们可以读出一些隐藏的意思来，它说，天下为公，哪一方也不能独占，双方必须和谈，然后组成一个联合政府来进行统治。它只有一个月。从中可以看出，德布罗意的思想已经最大程度地获取了薛定谔的信任，他开始相信，只有通过这种波的办法，才能够到达人们所苦苦追寻的那个目标。

1925 年的圣诞很快到来了，美丽的阿尔卑斯山上白雪皑皑，吸引了各地的旅游度假者。薛定谔一如既往地来到了他以前常去的那个地方：海拔 1700 米高的阿罗萨（Arosa）。自从他和安妮玛丽·伯特尔（Annemarie Bertel）在 1920 年结婚后，两人就经常来这里度假。薛定谔的生活有着近乎刻板的规律，他从来不让任何事情干扰他的假期。而每次夫妇俩来到阿罗萨的时候，总是住在赫维格别墅，这是一幢有着尖顶的，四层楼的小屋。

不过 1925 年，来的却只有薛定谔一个人，安妮留在了苏黎世。当时他们的关系显然极为紧张，不止一次地谈论着分手还披露了更为惊人的秘密：双方原来在血缘上有着密不可分的关系。最后，就像阿尔忒弥斯庙里的祭司所作出的神喻，它预言在这种联合统治下，物理学将会变得极为不同：更为奇妙，更为神秘，更为繁荣。

好一个精彩的预言。

饭后闲话：薛定谔的女朋友

2001 年 11 月，剧作家 Matthew Wells 的新作《薛定谔的女朋友》（Schrodinger's Girlfriend）在旧金山著名的 Fort Mason Center 首演。这出喜剧以 1926 年薛定谔在阿罗萨那位神秘女友的陪伴下创立波动力学这一历史为背景，探讨了爱情、性，还有量子物理的关系，受到了评论家的普遍好评。今年（2003 年）初，这个剧本搬到东岸演出，同样受到欢迎。近年来形成了一股以科学人物和科学史为题材的话剧创作风气，除了这出《薛定谔的女朋友》之外，恐怕更有名的就是那个东尼奖得主，Michael Frayn 的《哥本哈根》了。

不过，要数清薛定谔到底有几个女朋友，还当真是一件难事。这位物理大师的道德观显然和常人有着一定的距离，他的古怪行为一直为人们所排斥。1912年，他差点为了喜欢的一个女孩而放弃学术，改行经营自己的家庭公司（当时在大学教书不怎么赚钱），到他遇上安妮玛丽之前，薛定谔总共爱上过4个年轻女孩，而且主要是一种精神上的恋爱关系。对此，薛定谔的主要传记作者之一，Walter Moore 辩解说，不能把它简单地看成一种放纵行为。

如果以上都还算正常，婚后的薛定谔就有点不拘礼法的狂放味道了。他和安妮的婚姻之路从来不曾安定和谐，两人终生也没有孩子。而在外沾花惹草的事，薛定谔恐怕没有少做，他对太太也不隐瞒这一点。安妮，反过来，也和薛定谔最好的朋友之一，赫尔曼·威尔（Hermann Weyl）保持着暧昧的关系（威尔自己的老婆却又迷上了另一个人，真是天昏地暗）。两人讨论过离婚，但安妮的天主教信仰和昂贵的手续费事实上阻止了这件事的发生。《薛定谔的女朋友》一剧中调笑说：“到底是波-粒子的二象性难一点呢，还是老婆-情人的二象性更难？”

薛定谔，按照某种流行的说法，属于那种“多情种子”。他邀请别人来做他的助手，其实却是看上了他的老婆。这个女人（Hilde March）后来为他生了一个女儿，令人惊奇的是，安妮却十分乐意地照顾这个婴儿。薛定谔和这两个女子公开同居，事实上过着一种一妻一妾的生活（这个妾还是别人的合法妻子），这过于惊世骇俗，结果在牛津和普林斯顿都站不住脚，只好走人。他的风流史还可以开出一长串，其中有女学生、演员、OL，留下了若干私生子。但薛定谔却不是单纯的欲望的发泄，他的内心有着强烈的罗曼蒂克式的冲动，按照段正淳的说法，和每个女子在一起时，却都是死心塌地，恨不得把心掏出来，为之谱写了大量的情诗。希望大家不要认为我过于八卦，事实上对情史的分析是薛定谔研究中的重要内容，它有助于我们理解这位科学家极为复杂的内在心理和带有个人色彩的独特性格。

最最叫人惊讶的是，这样一个薛定谔的婚姻后来却几乎得到了完美的结局。尽管经历了种种风浪，穿越重重险滩，他和安妮却最终白头到老，真正像在誓言中所说的那样：to have and to hold, in sickness and in health, till death parts us。在薛定谔生命的最后时期，两人早已达成了谅解，安妮说：“在过去41年里的喜怒哀乐把我们紧紧结合在一起，这最后几年我们也不想分开了。”薛定谔临终时，安妮守在他的床前握住他的手，薛定谔说：“现在我又拥有了你，一切又都好起来了。”

薛定谔死后葬在 Alpbach，他的墓地不久就被皑皑白雪所覆盖。四年后，安妮玛丽·薛定谔也停止了呼吸。

6-3

1926年中，虽然矩阵派和波动派还在内心深处相互不服气，它们至少在表面上被数学所统一起来了。而且，不出意外地，薛定谔的波动方程以其琅琅上口，简明易学，为大多数物理学家所欢迎的特色，很快在形式上占得了上风。海森堡和他那诘屈聱牙的方块矩阵虽然不太乐意，也只好接受现实。事实证明，除了在处理关于自旋的几个问题时矩阵占点优势，其他时候波动方程抢走了几乎全部的人气。其实吗，物理学家和公众想象的大不一样，很少有人喜欢那种又难又怪的变态数学，既然两种体系已经被证明在数学上具有同等性，大家也就乐得选那个看起来简单熟悉的。

甚至在矩阵派内部，波动方程也受到了欢迎。首先是海森堡的老师索末菲，然后是建立矩阵力学的核心人物之一，海森堡的另一位导师马科斯·波恩。波恩在薛定谔方程刚出炉不久后就热情地赞叹了他的成就，称波动方程“是量子规律中最深刻的形式”。据说，海森堡对波恩的这个“叛变”一度感到十分伤心。

但是，海森堡未免多虑了，波恩对薛定谔方程的赞许并不表明他选择和薛定谔站在同一条战壕里。因为虽然方程确定了，但怎么去解释它却是一个大大不同的问题。首先人们要问的就是，薛定谔的那个波函数 ψ （再提醒一下，这个希腊字读成 psai），它在物理上代表了什么意义？

我们不妨再回顾一下薛定谔创立波动方程的思路：他是从经典的哈密顿方程出发，构造一个体系的新函数 ψ 代入，

然后再引用德布罗意关系式和变分法，最后求出了方程及其解答，这和我们印象中的物理学是迥然不同的。通常我们会以为，先有物理量的定义，然后才谈得上寻找它们的数学关系。比如我们懂得了力 F ，加速度 a 和质量 m 的概念，之后才会理解 $F=ma$ 的意义。但现代物理学的路子往往可能是相反的，比如物理学家很可能会先定义某个函数 F ，让 $F=ma$ ，然后才去寻找 F 的物理意义，发现它原来是力的量度。薛定谔的 ψ ，就是在空间中定义的某种分布函数，只是人们还不知道它的物理意义是什么。

这看起来颇有趣味，因为物理学家也不得不坐下来猜哑谜了。现在让我们放松一下，想象自己在某个晚会上，主持人安排了一个趣味猜谜节目供大家消遣。“女士们先生们，”他兴高采烈地宣布，“我们来玩一个猜东西的游戏，谁先猜出这个箱子里藏的是什么，谁就能得到晚会上的最高荣誉。”大家定睛一看，那个大箱子似乎沉甸甸的，还真像藏着好东西，箱盖上古色古香写了几个大字：“薛定谔方程”。

“好吧，可是什么都看不见，怎么猜呢？”人们抱怨道。“那当然那当然。”主持人连忙说，“我们不是学孙悟空玩隔板猜物，再说这里面也决不是破烂溜丢一口钟，那可是货真价实的关系到整个物理学的宝贝。嗯，是这样的，虽然我们都看不见它，但它的某些性质却是可以知道的，我会不断地提示大家，看谁先猜出来。”

众人一阵鼓噪，就这样游戏开始了。“这件东西，我们不知其名，强名之曰 ψ 。”主持人清了清嗓门说，“我可以告诉大家的是，它代表了原子体系中电子的某个函数。”下面顿时七嘴八舌起来：“能量？频率？速度？距离？时间？电荷？质量？”主持人不得不提高嗓门喊道：“安静，安静，我们还刚刚开始呢，不要乱猜啊。从现在开始谁猜错了就失去参赛资格。”于是瞬间鸦雀无声。

“好。”主持人满意地说，“那么我们继续。第二个条件是这样的：通过我的观察，我发现，这个 ψ 是一个连续不断的东西。”这次大家都不敢说话，但各人迅速在心里面做了排除。既然是连续不断，那么我们已知的那些量子化的条件就都排除了。比如我们都已经知道电子的能级不是连续的，那 ψ 看起来不像是这个东西。

“接下来，通过 ψ 的构造可以看出，这是一个没有量纲的函数。但它同时和电子的位置有某些联系，对于每一个电子来说，它都在一个虚拟的三维空间里扩展开去。”话说到这里好些人已经糊涂了，只有几个思维特别敏捷的还在紧张地思考。

“总而言之， ψ 如影随形地伴随着每一个电子，在它所处的那个位置上如同一团云彩般地扩散开来。这云彩时而浓厚时而稀薄，但却是按照某种确定的方式演化。而且，我再强调一遍，这种扩散及其演化都是经典的，连续的，确定的。”于是众人都陷入冥思苦想中，一点头绪都没有。

“是的，云彩，这个比喻真妙。”这时候一个面容瘦削，戴着夹鼻眼睛的男人呵呵笑着站起来说。主持人赶紧介绍：“女士们先生们，这位就是薛定谔先生，也是这口宝箱的发现者。”大家于是一阵鼓掌，然后屏息凝神地听他要发表什么高见。

“嗯，事情已经很明显了， ψ 是一个空间分布函数。”薛定谔满有把握地说，“当它和电子的电荷相乘，就代表了电荷在空间中的实际分布。云彩，尊敬的各位，电子不是一个粒子，它是一团波，像云彩一般地在空间四周扩展开去。我们的波函数恰恰描述了这种扩展和它的行为。电子是没有具体位置的，它也没有具体的路径，因为它是一团云，是一个波，它向每一个方向延伸——虽然衰减得很快，这使它粗看来像一个粒子。女士们先生们，我觉得这个发现的最大意义就是，我们必须把一切关于粒子的假相都从头脑里清除出去，不管是电子也好，光子也好，什么什么子也好，它们都不是那种传统意义上的粒子。把它们拉出来放大，仔细审视它们，你会发现它在空间里融化开来，变成无数振动的叠加。是的，一个电子，它是涂抹开的，就像涂在面包上的黄油那样，它平时蜷缩得那么紧，以致我们都把它当成小球，但是，这已经被我们的波函数 ψ 证明不是真的。多年来物理学误入歧途，我们的脑袋被光谱线，跃迁，能级，矩阵这些古怪的东西搞得混乱不堪，现在，是时候回归经典了。”

“这个宝箱，”薛定谔指着那口大箱子激动地说，“是一笔遗产，是昔日传奇帝国的所罗门王交由我们继承的。它时时提醒我们，不要为歪门邪道所诱惑，走到无法回头的岔路上去。物理学需要改革，但不能允许思想的混乱，我们已经听够了奇谈怪论，诸如电子像跳蚤一般地在原子中跳来跳去，像一个完全无法预见自己方向的醉汉。还有那故弄玄虚的所谓矩阵，没人知道它包含什么物理含义，而它却不停地叫嚷自己是物理学的正统。不，现在让我们回到坚实的土地上来，这片巨人们曾经奋斗过的土地，这片曾经建筑起那样雄伟构筑的土地，这片充满了骄傲和光荣历史的土地。简洁、明晰、优美、直观性、连续性、图像化，这是物理学王国中的胜利之杖，它代代相传，引领我们走向胜利。我毫不怀疑，新的力学将在连续的波动基础上作出，把一切都归于简单的图像中，并继承旧王室的血统。这决不是守旧，因为这种血统同时也是承载了现代科学 300 年的灵魂。这是物理学的象征，它的神圣地位决不容许受到撼动，任何人也不行。”

薛定谔这番雄辩的演讲无疑深深感染了在场的绝大部分观众，因为人群中爆发出一阵热烈的掌声和喝彩声。但是，等等，有一个人在不断地摇头，显得不以为然的样子，薛定谔很快就认出，那是哥廷根的波恩，海森堡的老师。他不是刚刚称赞过自己的方程吗？难道海森堡这小子又用了什么办法把他拉拢过去了不成？

“嗯，薛定谔先生”，波恩清了清嗓子站起来说，“首先我还是要对您的发现表示由衷的赞叹，这无疑是稀世奇珍，不是每个人都有如此幸运做出这样伟大的成就的。”薛定谔点了点头，心情放松了一点。“但是，”波恩接着说，“我可以问您一个问题吗？虽然这是您找到的，但您本人有没有真正地打开过箱子，看看里面是什么呢？”

这令薛定谔大大地尴尬，他踟躇了好一会儿才回答：“说实话，我也没有真正看见过里面的东西，因为我没有箱子的钥匙。”众人一片惊诧。

“如果是这样的话，”波恩小心翼翼地说，“我倒以为，我不太同意您刚才的猜测呢。”

“哦？”两个人对视了一阵，薛定谔终于开口说：“那么您以为，这里面究竟是什么东西呢？”

“毫无疑问，”波恩凝视着那雕满了古典花纹的箱子和它上面那把沉重的大锁，“这里面藏着一些至关重要的事物，它的力量足以改变整个物理学的面貌。但是，我也有一种预感，这股束缚着的力量是如此强大，它将把物理学搞得天翻地覆。当然，你也可以换个词语说，为物理学带来无边的混乱。”

“哦，是吗？”薛定谔惊奇地说，“照这么说来，难道它是潘多拉的盒子？”

“嗯。”波恩点了点头，“人们将陷入困惑和争论中，物理学会变成一个难以理解的奇幻世界。老实说，虽然我隐约猜到了里面是什么，我还是不能确定该不该把它说出来。”

薛定谔盯着波恩：“我们都相信科学的力量，在于它敢于直视一切事实，并毫不犹豫地去面对它，检验它，把握它，不管它是什么。何况，就算是潘多拉盒子，我们至少也还拥有盒底那最宝贵的东西，难道你忘了吗？”

“是的，那是希望。”波恩长出了一口气，“你说的对，不管是祸是福，我们至少还拥有希望。只有存在争论，物理学才拥有未来。”

“那么，你说这箱子里是……？”全场一片静默，人人都不敢出声。

波恩突然神秘地笑了：“我猜，这里面藏的是……”

“……骰子。”

6-4

骰子？骰子是什么东西？它应该出现在大富翁游戏里，应该出现在澳门和拉斯维加斯的赌场中，但是，物理学？不，那不是它应该来的地方。骰子代表了投机，代表了不确定，而物理学不是一门最严格最精密，最不能容忍不确定的科学吗？

可以想象，当波恩于 1926 年 7 月将骰子带进物理学后，是引起了何等的轩然大波。围绕着这个核心解释所展开的争论激烈而尖锐，把物理学加热到了沸点。这个话题是如此具有争议性，很快就要引发 20 世纪物理史上最著名的一场大论战，而可怜的波恩一直要到整整 28 年后，才因为这一杰出的发现而获得诺贝尔奖金——比他的学生们晚上许多。

不管怎么样，我们还是先来看看波恩都说了些什么。骰子，这才是薛定谔波函数 ψ 的解释，它代表的是一种随机，一种概率，而决不是薛定谔本人所理解的，是电子电荷在空间中的实际分布。波恩争辩道， ψ ，或者更准确一点， ψ 的平方，代表了电子在某个地点出现的“概率”。电子本身不会像波那样扩展开去，但是它的出现概率则像一个波，严格地按照 ψ 的分布所展开。

我们来回忆一下电子或者光子的双缝干涉实验，这是电子波动性的最好证明。当电子穿过两道狭缝后，便在感应屏上组成了一个明暗相间的图案，展示了波峰和波谷的相互增强和抵消。但是，正如粒子派指出的那样，每次电子只会在屏上打出一个点，只有当成群的电子穿过双缝后，才会逐渐组成整个图案。

现在让我们来做做一个思维实验，想象我们有一台仪器，它每次只发射出一个电子。这个电子穿过双缝，打到感光屏上，激发出一个小亮点。那么，对于这一个电子，我们可以说些什么呢？很明显，我们不能预言它组成类波的干涉条纹，因为一个电子只会留下一个点而已。事实上，对于这个电子将会出现在屏幕上的什么地方，我们是一点头绪都没有的，多次重复我们的实验，它有时出现在这里，有时出现在那里，完全不是一个确定的过程。

不过，我们经过大量的观察，却可以发现，这个电子不是完全没有规律的：它在某些地方出现的可能性要大一些，在另一些地方则小一些。它出现频率高的地方，恰恰是波动所预言的干涉条纹的亮处，它出现频率低的地方则对应于暗处。现在我们可以理解为什么大量电子能组成干涉条纹了，因为虽然每一个电子的行为都是随机的，但这个随机分布的总的模式却是确定的，它就是一个干涉条纹的图案。这就像我们掷骰子，虽然每一个骰子掷下去，它的结果都是完全随机的，从 1 到 6 都有可能，但如果你投掷大量的骰子到地上，然后数一数每个点的数量，你会发现 1 到 6 的结果差不多是平均的。

关键是，单个电子总是以一个点的面貌出现，它从来不会像薛定谔所说的那样，在屏幕上打出一滩图案来。只有大量电子接二连三地跟进，总的干涉图案才会逐渐出现。其中亮的地方也就是比较多的电子打中的地方，换句话说，就是单个电子比较容易出现的地方，暗的地带则正好相反。如果我们发现，有 9 成的粒子聚集在亮带，只有 1 成的粒子在暗带，那么我们就可以预言，对于单个粒子来说，它有 90% 的可能出现在亮带的区域，10% 的可能出现在暗带。但是，究竟出现在哪里，我们是无法确定的，我们只能预言概率而已。

我们只能预言概率而已。

但是，等等，我们怎么敢随便说出这种话来呢？这不是对于古老的物理学的一种大不敬吗？从伽利略牛顿以来，成千上百的先辈们为这门科学呕心沥血，建筑起了这样宏伟的构筑，它的力量统治整个宇宙，从最大的星系到最小的原子，万事万物都在它的威力下必恭必敬地运转。任何巨大的或者细微的动作都逃不出它的力量。星系之间产生可怕的碰撞，释放出难以想象的光和热，并诞生数以亿计的新恒星；宇宙射线以惊人的高速穿越遥远的空间，见证亘古的时光；微小得看不见的分子们你推我搡，喧闹不停；地球庄严地围绕着太阳运转，它自己的自转轴同时以难以觉察的速度轻微地振动；坚硬的岩石随着时光流逝而逐渐风化；鸟儿扑动它的翅膀，借着气流一飞冲天。这一切的一切，不都是在物理定律

的监视下一丝不苟地进行的吗？

更重要的是，物理学不仅能够解释过去和现在，它还能预言未来。我们的定律和方程能够毫不含糊地预测一颗炮弹的轨迹以及它降落的地点；我们能预言几千年后的日食，时刻准确到秒；给我一张电路图，多复杂都行，我能够说出它将做些什么；我们制造的机器乖乖地按照我们预先制定好的计划运行。事实上，对于任何一个系统，只要给我足够的初始信息，赋予我足够的运算能力，我能够推算出这个体系的一切历史，从它最初怎样开始运行，一直到它在遥远的未来的命运，一切都不是秘密。是的，一切系统，哪怕骰子也一样。告诉我骰子的大小，质量，质地，初速度，高度，角度，空气阻力，桌子的质地，摩擦系数，告诉我一切所需要的情报，那么，只要我拥有足够的运算能力，我可以毫不迟疑地预先告诉你，这个骰子将会掷出几点来。

物理学统治整个宇宙，它的过去和未来，一切都尽在掌握。这已经成了物理学家心中深深的信仰。19世纪初，法国的大科学家拉普拉斯（Pierre Simon de Laplace）在用牛顿方程计算出了行星轨道后，把它展示给拿破仑看。拿破仑问道：“在你的理论中，上帝在哪儿呢？”拉普拉斯平静地回答：“陛下，我的理论不需要这个假设。”

是啊，上帝在物理学中能有什么位置呢？一切都是由物理定律来统治的，每一个分子都遵照物理定律来运行，如果说上帝有什么作用的话，他最多是在一开始推动了这个世界一下，让它得以开始运转罢了。在之后的漫长历史中，有没有上帝都是无关紧要的了，上帝被物理学赶出了舞台。

“我不需要上帝这个假设。”拉普拉斯站在拿破仑面前说。这可算科学最光荣最辉煌的时刻之一了，它把无边的自豪和骄傲播撒到每一个科学家的心中。不仅不需要上帝，拉普拉斯想象，假如我们有一个妖精，一个大智者，或者任何拥有足够智慧的人物，假如他能够了解在某一时刻，这个宇宙所有分子的运动情况的话，那么他就可以从正反两个方向推演，从而得出宇宙在任意时刻的状态。对于这样的智者来说，没有什么过去和未来的分别，一切都历历在目。宇宙从它出生的那一刹那开始，就坠入了一个预定的轨道，它严格地按照物理定律发展，没有任何岔路可以走，一直到遇见它那注定的命运为止。就像你出手投篮，那么，这究竟是一个三分球，还是打中篮筐弹出，或者是一个 air ball，这都在你出手的一刹那决定了，之后我们所能做的，就是看着它按照写好的剧本发展而已。

是的，科学家知道过去；是的，科学家明白现在；是的，科学家了解未来。只要掌握了定律，只要搜集足够多的情报，只要能够处理足够大的运算量，科学家就能如同上帝一般无所不知。整个宇宙只不过是一台精密的机器，它的每个零件都按照定律一丝不苟地运行，这种想法就是古典的，严格的决定论（determinism）。宇宙从出生的那一刹那起，就有一个确定的命运。我们现在无法了解它，只是因为我们所知道的信息太少而已。

那么多的天才前仆后继，那么多的伟人呕心沥血，那么多在黑暗中的探索，挣扎，奋斗，这才凝结成物理学在19世纪黄金时代的全部光荣。物理学家终于可以说，他们能够预测神秘的宇宙了，因为他们找到了宇宙运行的奥秘。他们说这话时，带着一种神圣而不可侵犯的情感，决不饶恕任何敢于轻视物理学力量的人。

可是，现在有人说，物理不能预测电子的行为，它只能找到电子出现的概率而已。无论如何，我们也无法确定单个电子究竟会出现在什么地方，我们只能猜想，电子有90%的可能出现在这里，10%的可能出现在那里。这难道不是对整个物理历史的挑衅，对物理学的光荣和尊严的一种侮辱吗？

我们不能确定？物理学的词典里是没有这个字眼的。在中学的物理考试中，题目给了我们一个小球的初始参数，要求t时刻的状态，你敢写上“我不能确定”吗？要是你这样做了，你的物理老师准会气得吹胡子瞪眼睛，并且毫不犹豫地给你亮个红灯。不能确定？不可能，物理学什么都能确定。诚然，有时候为了方便，我们也会引进一些统计的方法，比如处理大量的空气分子运动时，但那是完全不同的一个问题。科学家只是凡人，无法处理那样多的复杂计算，所以应用了统计的捷径。但是从理论上来说，只要我们了解每一个分子的状态，我们完全可以严格地推断出整个系统的行为，分毫不爽。

然而波恩的解释不是这样，波恩的意思是，就算我们把电子的初始状态测量得精确无比，就算我们拥有最强大的计算机可以计算一切环境对电子的影响，即便如此，我们也不能预言电子最后的准确位置。这种不确定不是因为我们的计算能力不足而引起的，它是深藏在物理定律本身内部的一种属性。即使从理论上来说，我们也不能准确地预测大自然。这已经不是推翻某个理论的问题，这是对整个决定论系统的挑战，而决定论是那时整个科学的基础。量子论挑战整个科学。

波恩在论文里写道：“.....这里出现的是整个决定论的问题了。”（Hier erhebt sich der ganze Problematik des Determinismus.）

对于许多物理学家来说，这是一个不可原谅的假设。骰子？不确定？别开玩笑。对于他们中的好些人来说，物理学之所以那样迷人，那样富有魔力，正是因为它深刻，明晰，能够确定一切，扫清人们的一切疑惑，这才使他们义无反顾地投身到这一事业中去。现在，物理学竟然有变成摇奖机器的危险，竟然要变成一个掷骰子来决定命运的赌徒，这怎么能够容忍呢？

不确定？

一场史无前例的大争论即将展开，在争吵和辩论后面是激动，颤抖，绝望，泪水，伴随着整个决定论在 20 世纪的悲壮谢幕。

饭后闲话：决定论

可以说决定论的兴衰浓缩了整部自然科学在 20 世纪的发展史。科学从牛顿和拉普拉斯的时代走来，辉煌的成功使它一时得意忘形，认为它具有预测一切的能力。决定论认为，万物都已经由物理定律所规定下来，连一个细节都不能更改。过去和未来都像已经写好的剧本，宇宙的发展只能严格地按照这个剧本进行，无法跳出这个窠臼。

矜持的决定论在 20 世纪首先遭到了量子论的严重挑战，随后混沌动力学的兴起使它彻底被打垮。现在我们已经知道，即使没有量子论把概率这一基本属性赋予自然界，就牛顿方程本身来说，许多系统也是极不稳定的，任何细小的干扰都能够对系统的发展造成极大的影响，差之毫厘，失之千里。这些干扰从本质上说是不可预测的，因此想凭借牛顿方程来预测整个系统从理论上说也是不可行的。典型的例子是长期的天气预报，大家可能都已经听说过洛伦兹著名的“蝴蝶效应”，哪怕一只蝴蝶轻微地扇动它的翅膀，也能给整个天气系统造成戏剧性的变化。现在的天气预报也已经普遍改用概率性的说法，比如“明天的降水概率是 20%”。

1986 年，著名的流体力学权威，詹姆士·莱特希尔爵士（Sir James Lighthill，他于 1969 年从狄拉克手里接过剑桥卢卡萨教授的席位，也就是牛顿曾担任过的那个）于皇家学会纪念牛顿《原理》发表 300 周年的集会上发表了轰动一时的道歉：

“现在我们都深深意识到，我们的前辈对牛顿力学的惊人成就是那样崇拜，这使他们把它总结成一种可预言的系统。而且说实话，我们在 1960 年以前也大都倾向于相信这个说法，但现在我们知道这是错误的。我们以前曾经误导了公众，向他们宣传说满足牛顿运动定律的系统是决定论的，但是这在 1960 年后已被证明不是真的。我们都愿意在此向公众表示道歉。”

（We are all deeply conscious today that the enthusiasm of our forebears for the marvelous achievements of Newtonian mechanics led them to make generalizations in this area of predictability which, indeed, we may have generally tended to believe before 1960, but which we now recognize were false. We collectively wish to apologize for having misled the general educated

public by spreading ideas about the determinism of systems satisfying Newton's laws of motion that, after 1960, were to be proved incorrect.)

决定论的垮台是否注定了自由意志的兴起？这在哲学上是很值得探讨的。事实上，在量子论之后，物理学越来越陷于形而上学的争论中。也许形而上学（metaphysics）应该改个名字叫“量子论之后”（metaquantum）。在我们的史话后面，我们会详细地探讨这些问题。

Ian Stewart 写过一本关于混沌的书，书名也叫《上帝掷骰子吗》。这本书文字优美，很值得一读，当然和我们的史话没什么联系。我用这个名字，一方面是想强调决定论的兴衰是我们史话的中心话题，另外，毕竟爱因斯坦这句名言原本的版权是属于量子论的。

6-5

在我们出发去回顾新量子论与经典决定论的那场惊心动魄的悲壮决战之前，在本章的最后还是让我们先来关注一下历史遗留问题，也就是我们的微粒和波动的宿怨。波恩的概率解释无疑是对薛定谔传统波动解释的一个沉重打击，现在，微粒似乎可以暂时高兴一下了。

“看，”它嘲笑对手说，“薛定谔也救不了你，他对波函数的解释是站不住脚的。难怪总是有人说，薛定谔的方程比薛定谔本人还聪明哪。波恩的概率才是有道理的，电子始终是一个电子，任何时候你观察它，它都是一个粒子，你吵嚷多年的所谓波，原来只是那看不见摸不着的‘概率’罢了。哈哈，把这个头衔让给你，我倒是毫无异议的，但你得首先承认我的正统地位。”

但是波动没有被吓倒，说实话，双方 300 年的恩怨缠结，经过那么多风风雨雨，早就练就了处变不惊的本领。“哦，是吗？”它冷静地回应道，“恐怕事情不如你想象得那么简单吧？我们不如缩小到电子那个尺寸，去亲身感受一下一个电子在双缝实验中的经历如何？”

微粒迟疑了一下便接受了：“好吧，让你彻底死心也好。”

那么，现在让我们也想象自己缩小到电子那个尺寸，跟着它一起去看看事实上到底发生了什么事。一个电子的直径小于一亿分之一埃，也就是 10^{-23} 米，它的质量小于 10^{-30} 千克，变得这样小，看来这必定是一次奇妙的旅程呢。

好，现在我们已经和一个电子一样大了，突然缩小了那么多，还真有点不适应，看出去的世界也变得模糊扭曲起来。不过，我们第一次发现，世界原来那么空旷，几乎是空无一物，这也情有可原，从我们的尺度看来，原子核应该像是远在天边吧？好，现在迎面来了一个电子，这是个好机会，让我们睁大眼睛，仔细地看一看它究竟是个粒子还是波？奇怪，为什么我们什么都看不见呢？啊，原来我们忘了一个关键的事实！

要“看见”东西，必须有光进入我们的眼睛才行。但现在我们变得这么小，即使光——不管它是光子还是光波——对于我们来说也太大了。但是不管怎样，为了探明这个秘密，我们必须得找到从电子那里反射过来的光，凭感觉，我知道从左边来了一团光（之所以说“一团”光，是因为我不清楚它究竟是一个光粒子还是一道光波，没有光，我也看不到光本身，是吧？），现在让我们勇敢地迎上去，啊，秘密就要揭开了！

随着“砰”地一声，我们被这团光粗暴地击中，随后身不由己地飞到半空中，被弹出了十万八千里。这次撞击使得我们浑身筋骨欲脱，脑中天旋地转，眼前直冒金星。我们忘了自己现在是个什么尺寸！要不是运气好，这次碰撞已经要了咱们的小命。当好不容易爬起来时，早就不知道自己身在何方，那个电子更是无影无踪了。

刚才真是好险，看来这一招是行不通的。不过，我听见声音了，是微粒和波动在前面争论呢，咱们还是跟着这哥俩去看个究竟。它们为了模拟一个电子的历程，从某个阴极射线管出发，现在，面前就是那著名的双缝了。

“嗨，微粒。”波动说道，“假如电子是个粒子的话，它下一步该怎样行动呢？眼前有两条缝，它只能选择其中之一啊，如果它是个粒子，它不可能两条缝都通过吧？”

“嗯，没错。”微粒说，“粒子就是一个小点，是不可分割的。我想，电子必定选择通过了其中的某一条狭缝，然后投射到后面的光屏上，激发出一个小点。”

“可是，”波动一针见血地说，“它怎能够按照干涉模式的概率来行动呢？比如说它从右边那条缝过去了，当它打到屏幕前，它怎么能够知道，它应该有 90% 的机会出现到亮带区，10% 的机会留给暗带区呢？要知道这个干涉条纹可是和两条狭缝之间的距离密切相关啊，要是电子只通过了一条缝，它是如何得知两条缝之间的距离的呢？”

微粒有点尴尬，它迟疑地说：“我也承认，伴随着一个电子的有某种类波的东西，也就是薛定谔的波函数 ψ ，波恩说它是概率，我们就假设它是某种看不见的概率波吧。你可以把它想象成从我身上散发出去的某种看不见的场，我想，在我通过双缝之前，这种看不见的波场在空间中弥漫开去，探测到了双缝之间的距离，从而使我得以知道如何严格地按照概率行动。但是，我的实体必定只能通过其中的一条缝。”

“一点道理也没有。”波动摇头说，“我们不妨想象这样一个情景吧，假如电子是一个粒子，它现在决定通过右边的那条狭缝。姑且相信你的说法，有某种概率波事先探测到了双缝间的距离，让它胸有成竹知道如何行动。可是，假如在它进入右边狭缝前的那一刹那，有人关闭了另一道狭缝，也就是左边的那道狭缝，那时会发生什么情形呢？”

微粒有点脸色发白。

“那时候，”波动继续说，“就没有双缝了，只有单缝。电子穿过一条缝，就无所谓什么干涉条纹。也就是说，当左边狭缝关闭的一刹那，电子的概率必须立刻从干涉模式转换成普通模式，变成一条长狭带。”

“现在，我倒请问，电子是如何在穿过狭缝前的一刹那，及时地得知另一条狭缝关闭这个事实的呢？要知道它可是一个小得不能再小的电子啊，另一条狭缝距离它是如此遥远，就像从上海隔着大洋遥望洛杉矶。它如何能够瞬间作出反应，修改自己的概率分布呢？除非它收到了某种瞬时传播来的信号，怎么，你想开始反对相对论了吗？”

“好吧，”微粒不服气地说，“那么，我倒想听听你的解释。”

“很简单，”波动说，“电子是一个在空间中扩散开去的波，它同时穿过了两条狭缝，当然，这也就是它造成完美干涉的原因了。如果你关闭一个狭缝，那么显然就关闭了一部分波的路径，这时就谈不上干涉了。”

“听起来很不错。”微粒说，“照你这么说， ψ 是某种实际的波，它穿过两道狭缝，完全确定而连续地分布着，一直到击中感应屏前。不过，之后呢？之后发生了什么事？”

“之后……”波动也有点语塞，“之后，出于某种原因， ψ 收缩成了一个点。”

“哈，真奇妙。”微粒故意把声音拉长以示讽刺，“你那扩散而连续的波突然变成了一个小点！请问发生了什么事呢？波动家族突然全体罢工了？”

波动气得面红耳赤，它争辩道：“出于某种我们尚不清楚的机制……”

“好吧，”微粒不耐烦地说，“实践是检验真理的唯一标准是吧？既然我说电子只通过了一条狭缝，而你硬说它同时通过两条狭缝，那么搞清我们俩谁对谁错不是很简单吗？我们只要在两道狭缝处都安装上某种仪器，让它在有粒子——或者波，不论是什么——通过时记录下来或者发出警报，那不就成了？这种仪器又不是复杂而不可制造的。”

波动用一种奇怪的眼光看着微粒，良久，它终于说：“不错，我们可以装上这种仪器。我承认，一旦我们试图测定电子究竟通过了哪条缝时，我们永远只会在其中的一处发现电子。两个仪器不会同时响。”

微粒放声大笑：“你早说不就得了？害得我们白费了这么多口水！怎么，这不就证明了，电子只可能是一个粒子，它每次只能通过一条狭缝吗？你还跟我唠叨个什么！”但是它渐渐发现气氛有点不对劲，终于它笑不出来了。

“怎么？”它瞪着波动说。

波动突然咧嘴一笑：“不错，每次我们只能在一条缝上测量到电子。但是，你要知道，一旦我们展开这种测量的时候，干涉条纹也就消失了……”

……

时间是 1927 年 2 月，哥本哈根仍然是春寒料峭，大地一片冰霜。玻尔坐在他的办公室里若有所思：粒子还是波呢？5 个月前，薛定谔的那次来访还历历在目，整个哥本哈根学派为了应付这场硬仗，花了好些时间去钻研他的波动力学理论，但现在，玻尔突然觉得，这个波动理论非常出色啊。它简洁，明确，看起来并不那么坏。在写给赫维西（Hevesy）的信里，玻尔已经把它称作“一个美妙的理论”。尤其是有了波恩的概率解释之后，玻尔已经毫不犹豫地准备接受这一理论并把它当作量子论的基础了。

嗯，波动，波动。玻尔知道，海森堡现在对于这个词简直是条件反射似地厌恶。在他的眼里只有矩阵数学，谁要是跟他提起薛定谔的波他准得和谁急，连玻尔本人也不例外。事实上，由于玻尔态度的转变，使得向来亲密无间的哥本哈根派内部第一次产生了裂痕。海森堡……他在得知玻尔的意见后简直不敢相信自己的耳朵。现在，气氛已经闹得够僵了，玻尔为了不让事态恶化，准备离开丹麦去挪威度个长假。过去的 1926 年就是在无尽的争吵中度过的，那一整年玻尔只发表了一篇关于自旋的小文章，是时候停止争论了。

但是，粒子？波？那个想法始终在他脑中缠绕不去。

进来一个人，是他的另一位助手奥斯卡·克莱恩（Oskar Klein）。在过去的一年里他的成就斐然，他不仅成功地把薛定谔方程相对论化了，还在其中引进了“第五维度”的思想，这得到了老洛伦兹的热情赞扬。不管怎么说，他可算哥本哈根最熟悉量子波动理论的人之一了。有他助阵，玻尔更加相信，海森堡实在是持有一种偏见，波动理论是不可偏废的。“要统一，要统一。”玻尔喃喃地说。克莱恩抬起头来看他：“您对波动理论是怎么想的呢？”

“波，电子无疑是个波。”玻尔肯定地说。

“哦，那样说来……”

“但是，”玻尔打断他，“它同时又不是个波。从 BKS 倒台以来，我就隐约地猜到了。”

克莱恩笑了：“您打算发表这一观点吗？”

“不，还不是时候。”

“为什么？”

玻尔叹了一口气：“克莱恩，我们的对手非常强大……非常强大，我还没有准备好……”

（注：老的说法认为，互补原理只有在不确定原理提出后才成型。但现在学者们都同意，这一思想有着复杂的来源，为了把重头戏留给下一章，我在这里先带一笔波粒问题。）

第七章 不确定性

7-1

我们的史话说到这里，是时候回顾一下走过的路程了。我们已经看到煊赫一时的经典物理大厦如何忽喇喇地轰然倾倒，我们已经看到以黑体问题为导索，普朗克的量子假设是如何点燃了新革命的星星之火。在这之后，爱因斯坦的光量子理论赋予了新生的量子以充实的力量，让它第一次站起身来做视群雄，而玻尔的原子理论借助了它的无穷能量，开创出一片崭新的天地来。

我们也已经讲到，关于光的本性，粒子和波动两种理论是如何从 300 年前开始不断地交锋，其间兴废存亡有如白云苍狗，沧海桑田。从德布罗意开始，这种本质的矛盾成为物理学的基本问题，而海森堡从不连续性出发创立了他的矩阵力学，薛定谔沿着另一条连续性的道路也发现了他的波动方程。这两种理论虽然被数学证明是同等的，但是其物理意义却引起了广泛的争论，波恩的概率解释更是把数百年来决定论推上了怀疑的舞台，成为浪尖上的焦点。而另一方面，波动和微粒的战争现在也到了最关键的时候。

接下去，物理学中将会发生一些真正奇怪的事情。它将把人们的哲学观改造成一种似是而非的疯狂理念，并把物理学本身变成一个大漩涡。20 世纪最著名的争论即将展开，其影响一直延绵到今日。我们已经走了这么长的路，现在都筋疲力尽，委顿不堪，可是我们却已经无法掉头。回首处，白云遮断归途，回到经典理论那温暖的安乐窝中已经是不可能的了，摆在我们眼前的，只有一条漫长而崎岖的道路，一直通向遥远而未知的远方。现在，就让我们鼓起最大的勇气，跟着物理学家们继续前进，去看看隐藏在这道路尽头的，究竟是怎样的一副景象。

我们这就回到 1927 年 2 月，那个神奇的冬天。过去的几个月对于海森堡来说简直就像一场噩梦，越来越多的人转投向薛定谔和他那该死的波动理论一方，把他的矩阵忘得个一干二净。海森堡当初的那些出色的论文，现在给人们改写成波动方程的另类形式，这让他尤其不能容忍。他后来给泡利写信说：“对于每一份矩阵的论文，人们都把它改写成‘共轭’的波动形式，这让我非常讨厌。我想他们最好两种方法都学学。”

但是，最让他伤心的，无疑是玻尔也转向了他的对立面。玻尔，那个他视为严师、慈父、良友的玻尔，那个他们背后称作“量子论教皇”的玻尔，那个哥本哈根军团的总司令和精神领袖，现在居然反对他！这让海森堡感到无比的委屈和悲伤。后来，当玻尔又一次批评他的理论时，海森堡甚至当真哭出了眼泪。对海森堡来说，玻尔在他心目中的地位是独一无二的，失去了他的支持，海森堡感觉就像在河中游水的小孩子失去了大人的臂膀，有种孤立无援的感觉。

不过，现在玻尔已经去挪威度假了，他大概在滑雪吧？海森堡记得玻尔的滑雪水平拙劣得很，不禁微笑一下。玻尔已经不能提供什么帮助了，他现在和克莱恩抱成一团，专心致志地研究什么相对论化的波动。波动！海森堡哼了一声，打死他他也不承认，电子应该解释成波动。不过事情还不至于糟糕到顶，他至少还有几个战友：老朋友泡利，哥廷根的约尔当，还有狄拉克——他现在也到哥本哈根来访问了。

不久前，狄拉克和约尔当分别发展了一种转换理论，这使得海森堡可以方便地用矩阵来处理一些一直用薛定谔方程来处理的概率问题。让海森堡高兴的是，在狄拉克的理论里，不连续性被当成了一个基础，这更让他相信，薛定谔的解释是靠不住的。但是，如果以不连续性为前提，在这个体系里有些变量就很难解释，比如，一个电子的轨迹总是连续的吧？

海森堡尽力地回想矩阵力学的创建史，想看看问题出在哪里。我们还记得，海森堡当时的假设是：整个物理理论只能以可被观测到的量为前提，只有这些变量才是确定的，才能构成任何体系的基础。不过海森堡也记得，爱因斯坦不太同意这一点，他受古典哲学的熏陶太浓，是一个无可救药的先验主义者。

“你不会真的相信，只有可观察的量才能有资格进入物理学吧？”爱因斯坦曾经这样问他。

“为什么不呢？”海森堡吃惊地说，“你创立相对论时，不就是因为‘绝对时间’不可观察而放弃它的吗？”

爱因斯坦笑了：“好把戏不能玩两次啊。你要知道在原则上，试图仅仅靠可观察的量来建立理论是不对的。事实恰恰相反：是理论决定了我们能够观察到的东西。”

是吗？理论决定了我们观察到的东西？那么理论怎么解释一个电子在云室中的轨迹呢？在薛定谔看来，这是一系列本征态的叠加，不过，forget him！海森堡对自己说，还是用我们更加正统的矩阵来解释解释吧。可是，矩阵是不连续的，而轨迹是连续的，而且，所谓“轨迹”早就在矩阵创立时被当作不可观测的量被抛弃了……

窗外夜阑人静，海森堡冥思苦想而不得要领。他愁肠百结，辗转难寐，决定起身到离玻尔研究所不远的 Faelled 公园去散散步。深夜的公园空无一人，晚风吹在脸上还是凛冽寒冷，不过却让人清醒。海森堡满脑子都装满了大大小小的矩阵，他又想起矩阵那奇特的乘法规则：

$$p \times q \neq q \times p$$

理论决定了我们观察到的东西？理论说， $p \times q \neq q \times p$ ，它决定了我们观察到的什么东西呢？

I × II 什么意思？先搭乘 I 号线再转乘 II 号线。那么， $p \times q$ 什么意思？ p 是动量， q 是位置，这不是说……

似乎一道闪电划过夜空，海森堡的神志突然一片清澈空明。

$p \times q \neq q \times p$ ，这不是说，先观测动量 p ，再观测位置 q ，这和先观测 q 再观测 p ，其结果是不一样的吗？

等等，这说明了什么？假设我们有一个小球向前运动，那么在每一个时刻，它的动量和位置不都是两个确定的变量吗？为什么仅仅是观测次序的不同，其结果就会产生不同呢？海森堡的手心捏了一把汗，他知道这里藏着一个极为重大的秘密。这怎么可能呢？假如我们要测量一个矩形的长和宽，那么先测量长还是先测量宽，这不是一回事吗？

除非……

除非测量动量 p 这个动作本身，影响到了 q 的数值。反过来，测量 q 的动作也影响 p 的值。可是，笑话，假如我同时测量 p 和 q 呢？

海森堡突然间像看见了神启，他豁然开朗。

$p \times q \neq q \times p$, 难道说, 我们的方程想告诉我们, 同时观测 p 和 q 是不可能的吗? 理论不但决定我们能够观察到的东西, 它还决定哪些是我们观察不到的东西!

但是, 我给搞糊涂了, 不能同时观测 p 和 q 是什么意思? 观测 p 影响 q ? 观测 q 影响 p ? 我们到底在说些什么? 如果我说, 一个小球在时刻 t , 它的位置坐标是 10 米, 速度是 5 米/秒, 这有什么问题吗?

“有问题, 大大地有问题。”海森堡拍手说。“你怎么能够知道在时刻 t , 某个小球的位置是 10 米, 速度是 5 米/秒呢? 你靠什么知道呢?”

“靠什么? 这还用说吗? 观察呀, 测量呀。”

“关键就在这里! 测量!”海森堡敲着自己的脑壳说, “我现在全明白了, 问题就出在测量行为上面。一个矩形的长和宽都是定死的, 你测量它的长的同时, 其宽绝不会因此而改变, 反之亦然。再来说经典的小球, 你怎么测量它的位置呢? 你必须得看到它, 或者用某种仪器来探测它, 不管怎样, 你得用某种方法去接触它, 不然你怎么知道它的位置呢? 就拿‘看到’来说吧, 你怎么能‘看到’一个小球的位置呢? 总得有某个光子从光源出发, 撞到这个球身上, 然后反弹到你的眼睛里吧? 关键是, 一个经典小球是个庞然大物, 光子撞到它就像蚂蚁撞到大象, 对它的影响小得可以忽略不计, 绝不会影响它的速度。正因为如此, 我们大可以测量了它的位置之后, 再从从容地测量它的速度, 其误差微不足道。”

“但是, 我们现在在谈论电子! 它是如此地小而轻, 以致于光子对它的撞击决不能忽略不计了。测量一个电子的位置? 好, 我们派遣一个光子去执行这个任务, 它回来怎么报告呢? 是的, 我接触到了这个电子, 但是它给我狠狠撞了一下后, 飞到不知什么地方去了, 它现在的速度我可什么都说不上来。看, 为了测量它的位置, 我们剧烈地改变了它的速度, 也就是动量。我们没法同时既准确地知道一个电子的位置, 同时又准确地了解它的动量。”

海森堡飞也似地跑回研究所, 埋头一阵苦算, 最后他得出了一个公式:

$$p \times q > h/2\pi$$

p 和 q 分别是测量 p 和测量 q 的误差, h 是普朗克常数。海森堡发现, 测量 p 和测量 q 的误差, 它们的乘积必定要大于某个常数。如果我们把 p 测量得非常精确, 也就是说 p 非常小, 那么相应地, q 必定会变得非常大, 也就是说我们关于 q 的知识就要变得非常模糊和不确定。反过来, 假如我们把位置 q 测得非常精确, p 就变得摇摆不定, 误差急剧增大。

假如我们把 p 测量得 100% 地准确, 也就是说 $p=0$, 那么 q 就要变得无穷大。这就是说, 假如我们了解了一个电子动量 p 的全部信息, 那么我们就同时失去了它位置 q 的所有信息, 我们一点都不知道, 它究竟身在何方, 不管我们怎么安排实验都没法做得更好。鱼与熊掌不能得兼, 要么我们精确地知道 p 而对 q 放手, 要么我们精确地知道 q 而放弃对 p 的全部知识, 要么我们折衷一下, 同时获取一个比较模糊的 p 和比较模糊的 q 。

p 和 q 就像一对前世冤家, 它们人生不相见, 动如参与商, 处在一种有你无我的状态。不管我们亲近哪个, 都会同时急剧地疏远另一个。这种奇特的量被称为“共轭量”, 我们以后会看到, 这样的量还有许多。

海森堡的这一原理于 1927 年 3 月 23 日在《物理学杂志》上发表, 被称作 Uncertainty Principle。当它最初被翻译成中文的时候, 被十分可爱地译成了“测不准原理”, 不过现在大多数都改为更加具有普遍意义的“不确定性原理”。

薛定谔：



海森堡：



玻尔：



7-2

不确定性原理……不确定？我们又一次遇到了这个讨厌的词。还是那句话，这个词在物理学中是不受欢迎的。如果物理学什么都不能确定，那我们还要它来干什么呢？本来波恩的概率解释已经够让人烦恼的了——即使给定全部条件，也无法预测结果。现在海森堡干得更绝，给定全部条件？这个前提本身都是不可能的，给定了其中一部分条件，另一部分条件就要变得模糊不清，无法确定。给定了 p ，那么我们就对 q 说拜拜了。

这可不太美妙，一定有什么地方搞错了。我们测量了 p 就无法测量 q ？我倒不死心，非要来试试看到底行不行。好吧，海森堡接招，还记得威尔逊云室吧？你当初不就是为了这个问题苦恼吗？透过云室我们可以看见电子运动的轨迹，那么通过不断地测量它的位置，我们当然能够计算出它的瞬时速度来，这样不就可以同时知道它的动量了吗？

“这个问题，”海森堡笑道，“我终于想通了。电子在云室里留下的并不是我们理解中的精细的‘轨迹’，事实上那只是一连串凝结的水珠。你把它放大了看，那是不连续的，一团一团的‘虚线’，根本不可能精确地得出位置的概念，更谈不上违反不确定原理。”

“哦？是这样啊。那么我们就仔细一点，把电子的精细轨迹找出来不就行了？我们可以用一个大一点的显微镜来干这活，理论上不是不可能的吧？”

“对了，显微镜！”海森堡兴致勃勃地说，“我正想说显微镜这事呢。就让我们来做一个思维实验（Gedanken-experiment），想象我们有一个无比强大的显微镜吧。不过，再厉害的显微镜也有它基本的原理啊，要知道，不管怎样，如果我们用一种波去观察比它的波长还要小的事物的话，那就根本谈不上精确了，就像用粗笔画不出细线一样。如果我们想要观察电子这般微小的东西，我们必须采用波长很短的光。普通光不行，要用紫外线，X 射线，甚至 γ 射线才行。”

“好吧，反正是思维实验用不着花钱，我们就假设上头破天荒地拨了巨款，给我们造了一台最先进的 γ 射线显微镜吧。那么，现在我们就准确地看到电子的位置了吗？”“可是，”海森堡指出，“你难道忘了吗？任何探测到电子的波必然给电子本身造成扰动。”

波长越短的波，它的频率就越高，是吧？大家都应该还记得普朗克的公式 $E=h\nu$ ，频率一高的话能量也相应增强，这样给电子的扰动就越厉害，同时我们就更加无法了解它的动量了。你看，这完美地满足不确定性原理。”

“你这是狡辩。好吧我们接受现实，每当我们用一个光子去探测电子的位置，就会给它造成强烈的扰动，让它改变方向速度，向另一个方向飞去。可是，我们还是可以采用一些聪明的，迂回的方法来实现我们的目的啊。比如我们可以测量这个反弹回来的光子的方向速度，从而推导出它对电子产生了何等的影响，进而导出电子本身的方向速度。怎样，这不就破解了你的把戏吗？”

“还是不行。”海森堡摇头说，“为了达到那样高的灵敏度，我们的显微镜必须有一块很大直径的透镜才行。你知道，透镜把所有方向来的光都聚集到一个焦点上，这样我们根本就无法分辨出反弹回来的光子究竟来自何方。假如我们缩小透镜的直径以确保光子不被聚焦，那么显微镜的灵敏度又要变差而无法胜任此项工作。所以你的小聪明还是不奏效。”

“真是邪门。那么，观察显微镜本身的反弹怎样？”“一样道理，要观察这样细微的效应，就要用波长短的光，所以它的能量就大，就给显微镜本身造成抹去一切的扰动……”

等等，我们并不死心。好吧，我们承认，我们的观测器材是十分粗糙的，我们的十指笨拙，我们的文明才几千年历史，现代科学更是仅创立了 300 年不到的时间。我们承认，就我们目前的科技水平来说，我们没法同时观测到一个细小电子的位置和动量，因为我们的仪器又傻又笨。可是，这并不表明，电子不同时具有位置和动量啊，也许在将来，哪怕遥远的将来，我们会发展出一种尖端科技，我们会发明极端精细的仪器，从而准确地测出电子的位置和动量呢？你不能否认这种可能性啊。

“话不是这样说的。”海森堡若有所思地说，“这里的问题是理论限制了我们能够观测到的东西，而不是实验导致的误差。同时测量到准确的动量和位置在原则上都是不可能的，不管科技多发达都一样。就像你永远造不出永动机，你也永远造不出可以同时探测到 p 和 q 的显微镜来。不管今后我们创立了什么理论，它们都必须服从不确定性原理，这是一个基本原则，所有的后续理论都要在它的监督下才能取得合法性。”

海森堡的这一论断是不是太霸道了点？而且，这样一来物理学家的脸不是都给丢尽了吗？想象一下公众的表现吧：什么，你是一个物理学家？哦，我真为你们惋惜，你们甚至不知道一个电子的动量和位置！我们家汤米至少还知道怎么摆弄他的皮球。

不过，我们还是要摆事实，讲道理，以德服人。一个又一个的思想实验被提出来，可是我们就是没法既精确地测量出电子的动量，同时又精确地得到它的位置。两者的误差之乘积必定要大于那个常数，也就是 h 除以 2π 。幸运的是，我们都记得 h 非常小，只有 6.626×10^{-34} 焦耳秒，那么假如 Δp 和 Δq 的量级差不多，它们各自便都在 10^{-17} 这个数量级上。我们现在可以安慰一下不明真相的群众：事情并不是那么糟糕，这种效应只有在电子和光子的尺度上才变得十分明显。对于汤米玩的皮球， 10^{-17} 简直是微不足道到了极点，根本就无法感觉出来。汤米可以安心地拍他的皮球，不必担心因为测不准它的位置而把它弄丢了。

不过对于电子尺度的世界来说，那可就大大不同了。在上一章的最后，我们曾经假想自己缩小到电子大小去一探原子中的奥秘，那时我们的身高只有 10^{-23} 米。现在，妈妈对于我们淘气的行为感到担心，想测量一下我们到了哪里，不过她们注定要失望了：测量的误差达到 10^{-17} 米，是我们本身高度的 100 万倍！100 万倍的误差意味着什么，假如我们平时身高 1 米 75，这个误差就达到 175 万米，也就是 1750 公里，母亲们得在整条京沪铁路沿线到处寻找我们才行。“测不准”变得名副其实了。

在任何时候，大自然都固执地坚守着这一底线，绝不让我们有任何机会可以同时得到位置和动量的精确值。任凭我们机关算尽，花样百出，它总是比我们高明一筹，每次都狠狠的把我们的小聪明击败。不能测量电子的位置和动量？我

们来设计一个极小极小的容器，它内部只能容纳一个电子，不留下任何多余的空间，这下如何？电子不能乱动了吧？可是，首先这种容器肯定是造不出来的，因为它本身也必定由电子组成，所以它本身也必然要有位置的起伏，使内部的空间涨涨落落。退一步来说，就算可以，在这种情况下，电子也会神秘地渗过容器壁，出现在容器外面，像传说中穿墙而过的崂山道士。不确定性原理赋予它这种神奇的能力，冲破一切束缚。还有一种办法，降温。我们都知道原子在不停地振动，温度是这种振动的宏观表现，当温度下降到绝对零度，理论上原子就完全静止了。那时候动量确定为零，只要测量位置就可以了？可惜，绝对零度是无法达到的，无论如何努力，原子还是拼命地保有最后的一点内能不让我们测准它的动量。不管是谁，也无法让原子完全静止下来，传说中的圣斗士也不行——他们无法克服不确定性原理。

动量 p 和位置 q ，它们真正是“不共戴天”。只要一个量出现在宇宙中，另一个就神秘地消失。要么，两个都以一种模糊不清的面目出现。海森堡很快又发现了另一对类似的仇敌，它们是能量 E 和时间 t 。只要能量 E 测量得越准确，时刻 t 就愈加模糊；反过来，时间 t 测量得愈准确，能量 E 就开始大规模地起伏不定。而且，它们之间的关系遵守相同的不确定性规则：

$$\Delta E \times \Delta t > h/2\pi$$

各位看官，我们的宇宙已经变得非常奇妙了。各种物理量都遵循着海森堡的这种不确定性原理，此起彼伏，像神秘的大海不断升起和破灭的泡沫。在古人看来，“空”就是空荡荡无一物。不过后来人们知道了，看不见的空气中也有无数分子，“空”应该指抽空了空气的真空。再后来，人们觉得各种场，从引力场到电磁场，也应该排除在“空”的概念之外，它应该仅仅指空间本身而已。

但现在，这个概念又开始混乱了。首先爱因斯坦的相对论告诉我们空间本身也能扭曲变形，事实上引力只不过是它的弯曲而已。而海森堡的不确定性原理展现了更奇特的场景：我们知道 t 测量得越准确， E 就越不确定。所以在非常非常短的一刹那，也就是 t 非常确定的一瞬间，即使真空中也会出现巨大的能量起伏。这种能量完全是靠着不确定性而凭空出现的，它的确违反了能量守恒定律！但是这一刹那极短，在人们还没有来得及发现以前，它又神秘消失，使得能量守恒定律在整体上得以维持。间隔越短， t 就越确定， E 就越不确定，可以凭空出现的能量也就越大。

所以，我们的真空其实无时无刻不在沸腾着，到处有神秘的能量产生并消失。爱因斯坦告诉我们，能量和物质可以互相转换，所以在真空中，其实不停地有一些“幽灵”物质在出没，只不过在我们没有抓住它们之前，它们就又消失在了另一世界。真空本身，就是提供这种涨落的最好介质。

现在如果我们谈论“空”，应该明确地说：没有物质，没有能量，没有时间，也没有空间。这才是什么都没有，它根本不能够想象（你能想象没有空间是什么样子吗？）。不过大有人说，这也不算“空”，因为空间和时间本身似乎可以通过某种机制从一无所有中被创造出来，我可真要发疯了，那究竟怎样才算“空”呢？

饭后闲话：无中生有

曾几何时，所有的科学家都认为，无中生有是绝对不可能的。物质不能被凭空制造，能量也不能被凭空制造，遑论时空本身。但是不确定性原理的出现把这一切旧观念都摧枯拉朽一般地粉碎了。

海森堡告诉我们，在极小的空间和极短的时间里，什么都是有可能发生的，因为我们对时间非常确定，所以反过来对能量就非常地不确定。能量物质可以逃脱物理定律的束缚，自由自在地出现和消失。但是，这种自由的代价就是它只能限定在那一段极短的时间内，当时刻一到，灰姑娘就要现出原形，这些神秘的物质能量便要消失，以维护质能守恒定律在大尺度上不被破坏。

不过上世纪 60 年代末，有人想到了一种可能性：引力的能量是负数（因为引力是吸力，假设无限远的势能是 0，那

么当物体靠近后因为引力做功使得其势能为负值)，所以在短时间内凭空生出的物质能量，它们之间又可以形成引力场，其产生的负能量正好和它们本身抵消，使得总能量仍然保持为 0，不破坏守恒定律。这样，物质就真的从一无所有中产生了。

许多人都相信，我们的宇宙本身就是通过这种机制产生的。量子效应使得一小块时空突然从根本没有时空中产生，然后因为各种力的作用，它突然指数级地膨胀起来，在瞬间扩大到整个宇宙的尺度。MIT 的科学家阿伦·古斯 (Alan Guth) 在这种想法上出发，创立了宇宙的“暴涨理论”(Inflation)。在宇宙创生的极早期，各块空间都以难以想象的惊人速度暴涨，这使得宇宙的总积增大了许许多多倍。这就可以解释为什么今天它的结构在各个方向看来都是均匀同一的。

暴涨理论创立以来也已经出现多个版本，不过很难确定地证实这个理论究竟是否正确，因为宇宙毕竟不像我们的实验室可以随心所欲地观测研究。但大多数物理学家对其还是偏爱的，认为这是一个有希望的理论。1998 年，古斯还出版了一本通俗的介绍暴涨的书，他最爱说的一句话是：“宇宙本身就是一顿免费午餐。”意思是宇宙是从一无所有中而来的。

不过，假如再苛刻一点，这还不能算严格的“无中生有”。因为就算没有物质，没有时间空间，我们还有一个前提：存在着物理定律！相对论和量子论的各种规则，比如不确定原理本身又是如何从无中生出的呢？或者它们不言而喻地存在？我们越说越玄了，这就打住吧。

7-3

当海森堡完成了他的不确定性原理后，他迅即写信给泡利和远在挪威的玻尔，把自己的想法告诉他们。收到海森堡的信后，玻尔立即从挪威动身返回哥本哈根，准备就这个问题和海森堡展开深入的探讨。海森堡可能以为，这样伟大的一个发现必定能打动玻尔的心，让他同意自己对于量子力学的一贯想法。可是，他却大大地错了。

在挪威，玻尔于滑雪之余好好地思考了一下波粒问题，新想法逐渐在他脑中定型了。当他看到海森堡的论文，他自然而然地用这种想法去印证整个结论。他问海森堡，这种不确定性是从粒子的本性而来，还是从波的本性导出的呢？海森堡一愣，他压根就没考虑过什么波。当然是粒子，由于光子击中了电子而造成了位置和动量的不确定，这不是明摆的吗？

玻尔很严肃地摇头，他拿海森堡想象的那个巨型显微镜开刀，证明在很大程度上不确定性不单单出自不连续的粒子性，更是出自波动性。我们在前面讨论过德布罗意波长公式 $\lambda = h/mv$ ， mv 就是动量 p ，所以 $p = h/\lambda$ ，对于每一个动量 p 来说，总是有一个波长的概念伴随着它。对于 $E-t$ 关系来说， $E = h\nu$ ，依然有频率 ν 这一波动概念在里面。海森堡对此一口拒绝，要让他接受波动性可不是一件容易的事情，对海森堡的顽固玻尔显然开始不耐烦了，他明确地对海森堡说：“你的显微镜实验是不对的”，这把海森堡给气哭了。两人大吵一场，克莱恩当然帮着玻尔，这使得哥本哈根内部的气氛闹得非常尖锐。从物理问题出发，后来几乎变成了私人误会，以致海森堡不得不把写给泡利的信要回去以作出澄清。最后，泡利本人亲自跑去丹麦，这才最后平息了事件的余波。

对海森堡来说不幸的是，在显微镜问题上的确是他错了。海森堡大概生来患有某种“显微镜恐惧症”，一碰到显微镜就犯晕。当年，他在博士论文答辩里就搞不清最基本的显微镜分辨率问题，差点没拿到学位。这次玻尔也终于让他意识到，不确定性是建立在波和粒子的双重基础上的，它其实是电子在波和粒子间的一种摇摆：对于波的属性了解得越多，关于粒子的属性就了解得越少。海森堡最后终于接受了玻尔的批评，给他的论文加了一个附注，声明不确定性其实同时建筑在连续性和不连续性两者之上，并感谢玻尔指出了这一点。玻尔也在这场争论中有所收获，他发现不确定原理的普遍意义原来比他想象中的要大。他本以为，这只是一个局部的原理，但现在他领悟到这个原理是量子论中最核心的基石之一。

在给爱因斯坦的信中，玻尔称赞了海森堡的理论，说他“用一种极为漂亮的手法”显示了不确定如何被应用在量子

论中。复活节长假后，双方各退一步，局面终于海阔天空起来。海森堡写给泡利的信中又恢复了良好的心情，说是“又可以单纯地讨论物理问题，忘记别的一切”了。的确，兄弟阋于墙，也要外御其侮，哥本哈根派现在又团结得像一块坚石了，他们很快就要共同面对更大的挑战，并把哥本哈根这个名字深深镌刻在物理学的光辉历史上。

不过，话又说回来。波动性，微粒性，从我们史话的一开始，这两个词已经深深困扰我们，一直到现在。好吧，不确定性同时建立在波动性和微粒性上……可这不是白说吗？我们的耐心是有限的，不如摊开天窗说亮话吧，这个该死的电子到底是个粒子还是波那？粒子还是波，真是令人感慨万千的话题啊。这是一出 300 年来的传奇故事，其中悲欢起落，穿插着物理史上最伟大的那些名字：牛顿、胡克、惠更斯、杨、菲涅尔、傅科、麦克斯韦、赫兹、汤姆逊、爱因斯坦、康普顿、德布罗意……恩恩怨怨，谁又能说得明白？我们处在一种进退维谷的境地中，一方面双缝实验和麦氏理论毫不含糊地揭示出光的波动性，另一方面光电效应，康普顿效应又同样清晰地表明它是粒子。就电子来说，玻尔的跃迁，原子光谱，海森堡的矩阵都强调了它不连续的一面，似乎粒子性占了上风，但薛定谔的方程却又大渲染它的连续性，甚至把波动的标签都贴到了它脸上。

怎么看，电子都没法不是个粒子；怎么看，电子都没法不是个波。

这该如何是好呢？

当遇到棘手的问题时，最好的办法还是问问咱们的偶像，无所不能的歇洛克·福尔摩斯先生。他是这样说的：“我的方法，就建立在这样一种假设上面：当你把一切不可能的结论都排除之后，那剩下的，不管多么离奇，也必然是事实。”（《新探案·皮肤变白的军人》）真是至理名言啊。那么，电子不可能不是个粒子，它也不可能不是波。那剩下的，唯一的可能性就是……

它既是个粒子，同时又是个波！

可是，等等，这太过分了吧？完全没法叫人接受嘛。什么叫“既是个粒子，同时又是波”？

这两种图像分明是互相排斥的呀。一个人可能既是男的，又是女的吗（太监之类的不算）？这种说法难道不自相矛盾吗？

不过，要相信福尔摩斯，更要相信玻尔，因为玻尔就是这样想的。毫无疑问，一个电子必须由粒子和波两种角度去作出诠释，任何单方面的描述都是不完全的。只有粒子和波两种概念有机结合起来，电子才成为一个有血有肉电子，才真正成为完备的图像。没有粒子性的电子是盲目的，没有波动性的电子是跛足的。

这还是不能让我们信服啊，既是粒子又是波？难以想象，难道电子像一个幽灵，在粒子的周围同时散发出一种奇怪的波，使得它本身成为这两种状态的叠加？谁曾经亲眼目睹这种恶梦般的场景吗？出来作个证？

“不，你理解得不对。”玻尔摇头说，“任何时候我们观察电子，它当然只能表现出一种属性，要么是粒子要么是波。声称看到粒子-波混合叠加的人要么是老花眼，要么是纯粹在胡说八道。但是，作为电子这个整体概念来说，它却表现出一种波-粒的二像性来，它可以展现出粒子的一面，也可以展现出波的一面，这完全取决于我们如何去观察它。我们想看到一个粒子？那好，让它打到荧光屏上变成一个小点。看，粒子！我们想看到一个波？也行，让它通过双缝组成干涉图样。看，波！”

奇怪，似乎哪里不对，却说不出……好吧，电子有时候变成粒子的模样，有时候变成波的模样，嗯，不错的变脸把戏。可是，撕下它的面具，它本来的真身究竟是个什么呢？

“这就是关键！这就是你我的分歧所在了。”玻尔意味深长地说，“电子的‘真身’？或者换几个词，电子的原型？电子的本来面目？电子的终极理念？这些都是毫无意义的单词，对于我们来说，唯一知道的只是每次我们看到的电子是什么。我们看到电子呈现出粒子性，又看到电子呈现出波动性，那么当然我们就假设它是粒子和波的混合体。我一点都不关心电子‘本来’是什么，我觉得那是没有意义的。事实上我也不关心大自然‘本来’是什么，我只关心我们能够‘观测’到大自然是什么。电子又是个粒子又是个波，但每次我们观察它，它只展现出其中的一面，这里的关键是我们‘如何’观察它，而不是它‘究竟’是什么。”

玻尔的话也许太玄妙了，我们来通俗地理解一下。现在流行手机换彩壳，我昨天心情好，就配一个 shining 的亮银色，今天心情不好，换一个比较有忧郁感的蓝色。咦奇怪了，为什么我的手机昨天是银色的，今天变成蓝色了呢？这两种颜色不是互相排斥的吗？我的手机怎么可能又是银色，又是蓝色呢？很显然，这并不是说我的手机同时展现出银色和蓝色，变成某种稀奇的“银蓝”色，它是银色还是蓝色，完全取决于我如何搭配它的外壳。我昨天决定这样装配它，它就呈现出银色，而今天改一种方式，它就变成蓝色。它是什么颜色，取决于我如何装配它！

但是，如果你一定要打破砂锅地问：我的手机“本来”是什么颜色？那就可就糊涂了。假如你指的是它原装出厂时配着什么外壳，我倒可以告诉你。不过要是你强调是哲学意义上的“本来”，或者“理念中手机的颜色”到底是什么，我会觉得你不可理喻。真要我说，我觉得它“本来”没什么颜色，只有我们给它装上某种外壳并观察它，它才展现出某种颜色来。它是什么颜色，取决于我们如何观察它，而不是取决于它“本来”是什么颜色。我觉得，讨论它“本来的颜色”是痴人说梦。

再举个例子，大家都知道“白马非马”的诡辩，不过我们不讨论这个。我们问：这匹马到底是什么颜色呢？你当然会说：白色啊。可是，也许你身边有个色盲，他会争辩说：不对，是红色！大家指的是同一匹马，它怎么可能又是白色又是红色呢？你当然要说，那个人在感觉颜色上有缺陷，他说的不是马本来的颜色，可是，谁又知道你看到的就一定是正确的颜色呢？假如世上有一半色盲，谁来分辨哪一半说的是“真相”呢？不说色盲，我们戴上一副红色眼镜，这下看出去的马也变成了红色吧？它怎么刚刚是白色，现在是红色呢？哦，因为你改变了观察方式，戴上了眼镜。那么哪一种方式看到的是真实呢？天晓得，庄周做梦变成了蝴蝶还是蝴蝶做梦变成了庄周？你戴上眼镜看到的是真实还是脱下眼镜看到的是真实？

我们的结论是，讨论哪个是“真实”毫无意义。我们唯一能说的，是在某种观察方式确定的前提下，它呈现出什么样子来。我们可以说，在我们运用肉眼的观察方式下，马呈现出白色。同样我们也可以说，在戴上眼镜的观察方式下，马呈现出红色。色盲也可以声称，在他那种特殊构造的感光方式观察下，马是红色。至于马“本来”是什么色，完全没有意义。甚至我们可以说，马“本来的颜色”是子虚乌有的。我们大多数人说马是白色，只不过我们大多数人采用了一种类似的观察方式罢了，这并不指向一种终极真理。

电子也是一样。电子是粒子还是波？那要看你怎么观察它。如果采用光电效应的观察方式，那么它无疑是个粒子；要是用双缝来观察，那么它无疑是个波。它本来到底是个粒子还是波呢？又来了，没有什么“本来”，所有的属性都是同观察联系在一起的，让“本来”见鬼去吧。

但是，一旦观察方式确定了，电子就要选择一种表现形式，它得作为一个波或者粒子出现，而不能再暧昧地混杂在一起。这就像我们可怜的马，不管谁用什么方式观察，它只能在某一时刻展现出一种颜色。从来没有人有过这样奇妙的体验：这匹马同时又是白色，又是红色。波和粒子在同一时刻是互斥的，但它们却在一个更高的层次上统一在一起，作为电子的两面被纳入一个整体概念中。这就是玻尔的“互补原理”（Complementary Principle），它连同波恩的概率解释，海森堡的不确定性，三者共同构成了量子论“哥本哈根解释”的核心，至今仍然深刻地影响我们对于整个宇宙的终极认识。

“第三次波粒战争”便以这样一种戏剧化的方式收场。而量子世界的这种奇妙结合，就是大名鼎鼎的“波粒二象性”。

7-4

三百年硝烟散尽，波和粒子以这样一种奇怪的方式达成了妥协：两者原来是不可分割的一个整体。就像漫画中教皇善与恶的两面，虽然在每个确定的时刻，只有一面能够体现出来，但它们确实集中在一个人的身上。波和粒子是一对孪生兄弟，它们如此苦苦争斗，却原来是演出了一场物理学中的绝代双骄故事，这教人拍案惊奇，唏嘘不已。

现在我们再回到上一章的最后，重温一下波和粒子在双缝前遇到的困境：电子选择左边的狭缝，还是右边的狭缝呢？现在我们知道，假如我们采用任其自然的观测方式，它波动的一面就占了上风。这个电子于是以某种方式同时穿过了两道狭缝，自身与自身发生干涉，它的波函数 ψ 按照严格的干涉图形花样发展。但是，当它撞上感应屏的一刹那，观测方式发生了变化！我们现在在试图探测电子的实际位置了，于是突然间，粒子性接管了一切，这个电子凝聚成一点，按照 ψ 的概率随机地出现在屏幕的某个地方。

假使我们在某个狭缝上安装仪器，试图测出电子究竟通过了哪一边，注意，这是另一种完全不同的观测方式!!! 我们试图探测电子在通过狭缝时的实际位置，可是只有粒子才有实际的位置。这实际上是我们施加的一种暗示，让电子早早地展现出粒子性。事实上，的确只有一边的仪器将记录下它的踪影，但同时，干涉条纹也被消灭，因为波动性随着粒子性的唤起而消失了。我们终于明白，电子如何表现，完全取决于我们如何观测它。种瓜得瓜，种豆得豆，想记录它的位置？好，那是粒子的属性，电子善解人意，便表现出粒子性来，同时也就没有干涉。不作这样的企图，电子就表现出波动性来，穿过两道狭缝并形成熟悉的干涉条纹。

量子派物理学家现在终于逐渐领悟到了事情的真相：我们的结论和我们的观测行为本身大有联系。这就像那匹马是白的还是红的，这个结论和我们用什么样的方法去观察它有关系。有些看官可能还不服气：结论只有一个，亲眼看见的才是唯一的真实。色盲是视力缺陷，眼镜是外部装备，这些怎么能够说是看到“真实”呢？其实没什么分别，它们不外乎是两种不同的观测方式罢了，我们的论点是，根本不存在所谓“真实”。

好吧，现在我视力良好，也不戴任何装置，看到马是白色的。那么，它当真是白色的吗？其实我说这话前，已经隐含了一个前提：“用人类正常的肉眼，在普通光线下看来，马呈现出白色。”再技术化一点，人眼只能感受可见光，波长在 400—760 纳米左右，这些频段的光混合在一起才形成我们印象中的白色。所以我们论断的前提就是，在 400—760 纳米的光谱区感受马，它是白色的。

许多昆虫，比如蜜蜂，它的复眼所感受的光谱是大大不同的。蜜蜂看不见波长比黄光还长的光，却对紫外线很敏感。在它看来，这匹马大概是一种蓝紫色，甚至它可能绘声绘色地向你描绘一种难以想象的“紫外色”。现在你和蜜蜂吵起来了，你坚持这马是白色的，而蜜蜂一口咬定是蓝紫色。你和蜜蜂谁对谁错呢？其实都对。那么，马怎么可能又是白色又是紫色呢？其实是你们的观测手段不同罢了。对于蜜蜂来说，它也是“亲眼”见到，人并不比蜜蜂拥有更多的正确性，离“真相”更近一点。话说回来，色盲只是对于某些频段的光有盲点，眼镜只不过加上一个滤镜而已，本质上也是一样的，也没理由说它们看到的就是“虚假”。

事实上，没有什么“客观真相”。讨论马本质上“到底是什么颜色”，正如我们已经指出过的，是很无聊的行为。根本不存在一个绝对的所谓“本色”，除非你先定义观测的方式。玻尔也好，海森堡也好，现在终于都明白：谈论任何物理量都是没有意义的，除非你首先描述你测量这个物理量的方式。一个电子的动量是什么？我不知道，一个电子没有什么绝对的动量，不过假如你告诉我你打算怎么去测量，我倒可以告诉你测量结果会是什么。根据测量方式的不同，这个动量可以从十分精确一直到万分模糊，这些结果都是可能的，也都是正确的。一个电子的动量，只有当你测量时，才有意义。假如这不好理解，想象有人在纸上画了两横夹一竖，问你这是什么字。嗯，这是一个“工”字，但也可能是横过来的“H”，在他没告诉你怎么看之前，这个问题是没有定论的。现在，你被告知：“这个图案的看法应该是横过来看。”这下我们明确了：这是一个大写字母 H。只有观测手段明确之后，答案才有意义。

测量！在经典理论中，这不是一个被考虑的问题。测量一块石头的重量，我用天平，用弹簧秤，用磅秤，或者用电子秤来做，理论上没有什么区别的。在经典理论看来，石头是处在一个绝对的，客观的外部世界中，而我——观测者——对这个世界是没有影响的，至少，这种影响是微小得可以忽略不计的。你测得的数据是多少，石头的“客观重量”就是多少。但量子世界就不同了，我们已经看到，我们测量的对象都是如此微小，以致我们的介入对其产生了致命的干预。我们本身的扰动使得我们的测量中充满了不确定性，从原则上都无法克服。采取不同的手段，往往会得到不同的答案，它们随着不确定性原理摇摇摆摆，你根本不能说有一个客观确定的答案在那里。在量子论中没有外部世界和我之分，我们和客观世界天人合一，融和成为一体，我们和观测物互相影响，使得测量行为成为一种难以把握的手段。在量子世界，一个电子并没有什么“客观动量”，我们能谈论的，只有它的“测量动量”，而这又和我们的测量手段密切相关。

各位，我们已经身陷量子论那奇怪的沼泽中了，我只希望大家不要过于头昏脑涨，因为接下来还有无数更稀奇古怪的东西，错过了未免可惜。我很抱歉，这几节我们似乎沉浸于一种玄奥的哲学讨论，而且似乎还要继续讨论下去。这是因为量子革命牵涉到我们世界观的根本变革，以及我们对于宇宙的认识方法。量子论的背后有一些非常形而上学的东西，它使得我们的理性战战兢兢，汗流浹背。但是，为了理解量子论的伟大力量，我们又无法绕开这些而自欺欺人地盲目前进。如果你从史话的一开始跟着我一起走到了现在，我至少对你的勇气和毅力表示赞赏，但我也无法给你更多的帮助。假如你感到困惑彷徨，那么玻尔的名言“如果谁不为量子论而感到困惑，那他就是没有理解量子论”或许可以给你一些安慰。而且，正如我们以后即将描述的那样，你也许应该感到非常自豪，因为爱因斯坦和你是一个处境。

但现在，我们必须走得更远。上面一段文字只是给大家一个小小的喘息机会，我们这就继续出发了。

如果不定义一个测量动量的方式，那么我们谈论电子动量就是没有意义的？这听上去似乎是一种唯心主义的说法。难道我们无法测量电子，它就没有动量了吗？让我们非常惊讶和尴尬的是，玻尔和海森堡两个人对此大点其头。一点也不错，假如一个物理概念是无法测量的，它就是没有意义的。我们要时时刻刻注意，在量子论中观测者是和外部宇宙结合在一起的，它们之间现在已经没有明确的分界线，是一个整体。在经典理论中，我们脱离一个绝对客观的外部世界而存在，我们也许不了解这个世界的某些因素，但这不影响其客观性。可如今我们自己也已经融入这个世界了，对于这个物我合一的世界来说，任何东西都应该是可以测量和感知的。只有可观测的量才是存在的！

卡尔·萨根（Karl Sagan）曾经举过一个很有意思的例子，虽然不是直接关于量子论的，但颇能说明问题。

“我的车库里有一条喷火的龙！”他这样声称。

“太稀罕了！”他的朋友连忙跑到车库中，但没有看见龙。“龙在哪里？”

“哦，”萨根说，“我忘了说明，这是一条隐身的龙。”

朋友有些狐疑，不过他建议，可以撒一些粉末在地上，看看龙的爪印是不是会出现。但是萨根又声称，这龙是飘在空中的。

“那既然这条龙在喷火，我们用红外线检测仪做一个热扫描？”

“也不行。”萨根说，“隐形的火也没有温度。”

“要么对这条龙喷漆让它现形？”——“这条龙是非物质的，滑不溜手，油漆无处可粘。”

反正没有一种物理方法可以检测到这条龙的存在。萨根最后问：“这样一条看不见摸不着，没有实体的，飘在空中喷着没有热度的火的龙，一条任何仪器都无法探测的龙，和‘根本没有龙’之间又有什么差别呢？”

现在，玻尔和海森堡也以这种苛刻的怀疑主义态度去对待物理量。不确定性原理说，不可能同时测准电子的动量 p 和位置 q ，任何精密的仪器也不行。许多人或许会认为，好吧，就算这是理论上的限制，和我们实验的笨拙无关，我们仍然可以安慰自己，说一个电子实际上是同时具有准确的位置和动量的，只不过我们出于某种限制无法得知罢了。

但哥本哈根派开始严厉地打击这种观点：一个具有准确 p 和 q 的经典电子？这恐怕是自欺欺人吧。有任何仪器可以探测到这样的一个电子吗？——没有，理论上也不可能有。那么，同样道理，一个在臆想的世界中生存的，完全探测不到的电子，和根本没有这样一个电子之间又有什么区别呢？

事实上，同时具有 p 和 q 的电子是不存在的！ p 和 q 也像波和微粒一样，在不确定原理和互补原理的统治下以一种此长彼消的方式生存。对于一些测量手段来说，电子呈现出一个准确的 p ，对于另一些测量手段来说，电子呈现出准确的 q 。我们能够测量到的电子才是唯一的实在，这后面不存在一个“客观”的，或者“实际上”的电子！

换言之，不存在一个客观的，绝对的世界。唯一存在的，就是我们能够观测到的世界。物理学的全部意义，不在于它能够揭示出自然“是什么”，而在于它能够明确，关于自然我们能“说什么”。没有一个脱离于观测而存在的绝对自然，只有我们和那些复杂的测量关系，熙攘攘纵横交错，构成了这个令人心醉的宇宙的全部。测量是新物理学的核心，测量行为创造了整个世界。

饭后闲话：奥卡姆剃刀

同时具有 p 和 q 的电子是不存在的。有人或许感到不理解，探测不到的就不是实在吗？

我们来问自己，“这个世界究竟是什么”和“我们在最大程度上能够探测到这个世界是什么”两个命题，其实质到底有多大的不同？我们探测能力所达的那个世界，是不是就是全部实在的世界？比如说，我们不管怎样，每次只能探测到电子是个粒子或者是个波，那么，是不是有一个“实在”的世界，在那里电子以波-粒子的奇妙方式共存，我们每次探测，只不过探测到了这个终极实在于我们感观中的一部分投影？同样，在这个“实在世界”中还有同时具备 p 和 q 的电子，只不过我们与它缘悭一面，每次测量都只有半面之交，没法窥得它的真面目？

假设宇宙在创生初期膨胀得足够快，以致它的某些区域对我们来说是如此遥远，甚至从创生的一刹那以光速出发，至今也无法与它建立起任何沟通。宇宙年龄大概有 150 亿岁，任何信号传播最远的距离也不过 150 亿光年，那么，在距离我们 150 亿光年之外，有没有另一些“实在”的宇宙，虽然它们不可能和我们的宇宙之间有任何因果联系？

在那个实在世界里，是不是有我们看不见的喷火的龙，是不是有一匹具有“实在”颜色的马，而我们每次观察只不过是这种“实在颜色”的肤浅表现而已。我跟你争论说，地球“其实”是方的，只不过它在我们观察的时候，表现出圆形而已。但是在那个“实在”世界里，它是方的，而这个实在世界我们是观察不到的，但不表明它不存在。

如果我们运用“奥卡姆剃刀原理”(Occam's Razor)，这些观测不到的“实在世界”全都是子虚乌有的，至少是无意义的。这个原理是 14 世纪的一个修士威廉所创立的，奥卡姆是他出生的地方。这位奥卡姆的威廉还有一句名言，那是他对巴伐利亚的路易四世说的：“你用剑来保卫我，我用笔来保卫你。”

剃刀原理是说，当两种说法都能解释相同的事实时，应该相信假设少的那个。比如，地球“本来”是方的，但观测时显现出圆形。这和地球“本来就是圆的”说明的是同一件事。但前者引入了一个莫名其妙的不必要的假设，所以前者是胡说。同样，“电子本来有准确的 p 和 q ，但是观测时只有 1 个能显示”，这和“只存在具有 p 或者具有 q 的电子”说明的也是同一回事，但前者多了一个假设，我们应当相信后者。“存在但观测不到”，这和“不存在”根本就是一码事。

同样道理，没有粒子-波混合的电子，没有看不见的喷火的龙，没有“绝对颜色”的马，没有 150 亿光年外的宇宙（150 亿光年这个距离称作“视界”），没有隔着 1 厘米四维尺度观察我们的四维人，没有绝对的外部世界。史蒂芬·霍金在《时间简史》中说：“我们仍然可以想像，对于一些超自然的生物，存在一组完全地决定事件的定律，它们能够观测宇宙现在的状态而不必干扰它。然而，我们人类对于这样的宇宙模型并没有太大的兴趣。看来，最好是采用奥卡姆剃刀原理，将理论中不能被观测到的所有特征都割除掉。”

你也许对这种实证主义感到反感，反驳说：“一片无人观察的荒漠，难道就不存在吗？”以后我们会从另一个角度来讨论这片无人观察的荒漠，这里只想指出，“无人的荒漠”并不是原则上不可观察的。

7-5

正如我们的史话在前面一再提醒各位的那样，量子论革命的破坏力是相当惊人的。在概率解释，不确定性原理和互补原理这三大核心原理中，前两者摧毁了经典世界的因果性，互补原理和不确定原理又合力捣毁了世界的客观性和实在性。新的量子图景展现出一个前所未有的世界，它是如此奇特，难以想象，和人们的日常生活格格不入，甚至违背我们的理性本身。但是，它却能够解释量子世界一切不可思议的现象。这种主流解释被称为量子论的“哥本哈根”解释，它是以玻尔为首的一帮科学家作出的，他们大多数曾在哥本哈根工作过，许多是量子论本身的创立者。哥本哈根派的人物除了玻尔，自然还有海森堡、波恩、泡利、狄拉克、克莱默、约尔当，也包括后来的魏扎克和盖莫夫等等，这个解释一直被当作是量子论的正统，被写进各种教科书中。

当然，因为它太过奇特，太教常人困惑，近 80 年来没有一天它不受到来自各方面的置疑、指责、攻击。也有一些别的解释被纷纷提出，这里面包括德布罗意-玻姆的隐函数理论，埃弗莱特的多重宇宙解释，约翰·泰勒的系综解释、Ghirardi-Rimini-Weber 的“自发定域”（Spontaneous Localization），Griffiths-Omnès-GellMann-Hartle 的“脱散历史态”（Decoherent Histories, or Consistent Histories），等等，等等。我们的史话以后会逐一地去看看这些理论，但是公平地说，至今没有一个理论能取代哥本哈根解释的地位，也没有人能证明哥本哈根解释实际上“错了”（当然，可能有人争辩说它“不完备”）。隐函数理论曾被认为相当有希望，可惜它的胜利直到今天还仍然停留在口头上。因此，我们的史话仍将以哥本哈根解释为主线来叙述，对于读者来说，他当然可以自行判断，并得出他自己的独特看法。

哥本哈根解释的基本内容，全都围绕着三大核心原理而展开。我们在前面已经说到，首先，不确定性原理限制了我们对微观事物认识的极限，而这个极限也就是具有物理意义的一切。其次，因为存在着观测者对于被观测物的不可避免的扰动，现在主体和客体世界必须被理解成一个不可分割的整体。没有一个孤立地存在于客观世界的“事物”（being），事实上一个纯粹的客观世界是没有的，任何事物都只有结合一个特定的观测手段，才谈得上具体意义。对象所表现出的形态，很大程度上取决于我们的观察方法。对同一个对象来说，这些表现形态可能是互相排斥的，但必须被同时用于这个对象的描述中，也就是互补原理。最后，因为我们的观测给事物带来各种原则上不可预测的扰动，量子世界的本质是“随机性”。传统观念中的严格因果关系在量子世界是不存在的，必须以一种统计性的解释来取而代之，波函数 ψ 就是一种统计，它的平方代表了粒子在某处出现的概率。当我们说“电子出现在 x 处”时，我们并不知道这个事件的“原因”是什么，它是一个完全随机的过程，没有因果关系。

有些人可能觉得非常糟糕：又是不确定又是没有因果关系，这个世界不是乱套了吗？物理学家既然什么都不知道，那他们还好意思呆在大学里领薪水，或者在电视节目上欺世盗名？然而事情并没有想象的那么坏，虽然我们对单个电子的行为只能预测其概率，但我们都知道，当样本数量变得非常非常大时，概率论就很有用了。我们没法知道一个电子在屏幕上出现在什么位置，但我们很有把握，当数以万亿记的电子穿过双缝，它们会形成干涉图案。这就好比保险公司没法预测一个客户会在什么时候死去，但它对一个城市的总体死亡率是清楚的，所以保险公司一定是赚钱的！

传统的电视或者电脑屏幕，它后面都有一把电子枪，不断地逐行把电子打到屏幕上形成画面。对于单个电子来说，我并不知道它将出现在屏幕上的哪个点，只有概率而已。不过大量电子叠在一起，组成稳定的画面是确定无疑的。看，就算本质是随机性，但科学家仍然能够造出一些有用的东西。如果你家电视画面老是有雪花，不要怀疑到量子论头上来，先去检查一下天线。

当然时代在进步，俺的电脑屏幕现在变成了薄薄的液晶型，那是另一回事了。

至于令人迷惑的波粒二象性，那也只是量子微观世界的奇特性质罢了。我们已经谈到德布罗意方程 $\lambda = h/p$ ，改写一下就是 $\lambda p = h$ ，波长和动量的乘积等于普朗克常数 h 。对于微观粒子来说，它的动量非常小，所以相应的波长便不能忽略。但对于日常事物来说，它们质量之大相比 h 简直是个天文数字，所以对于生活中的一个足球，它所伴随的德布罗意波微乎其微，根本感觉不到。我们一点都用不着担心，在世界杯决赛中，眼看要入门的那个球会突然化为一缕波，消失得杳然无踪。

但是，我们还是觉得不太满意，因为对“观测行为”，我们似乎还没有作出合理的解释。一个电子以奇特的分身术穿过双缝，它的波函数自身与自身发生了干涉，在空间中严格地，确定地发展。在这个阶段，因为没有进行观测，说电子在什么地方是没有什么意义的，只有它的概率在空间中展开。物理学家们常常摆弄玄虚说：“电子无处不在，而又无处在”，指的就是这个意思。然而在那以后，当我们把一块感光屏放在它面前以测量它的位置的时候，事情突然发生了变化！电子突然按照波函数的概率分布而随机地作出了一个选择，并以一个小点的形式出现在了某处。这时候，电子确定地存在于某点，自然这个点的概率变成了 100%，而别的地方的概率都变成了 0。也就是说，它的波函数突然从空间中收缩，聚集到了这一个点上面，在这个点出现了强度为 1 的高峰。而其他地方的波函数都瞬间降为 0。

哦，上帝，发生了什么事？为什么电子的波函数在一刹那发生了这样的巨变？原本形态优美，严格地符合薛定谔方程的波函数在一刹那轰然崩溃，变成了一个针尖般的小点。从数学上来说，这两种状态显然是没法互相推导的。在我们观测电子以前，它实际上处在一种叠加态，所有关于位置的可能性叠合在一起，弥漫到整个空间中去。但是，当我们真的去“看”它的时候，电子便无法保持它这样优雅而面面俱到的行为方式了，它被迫作出选择，在无数种可能性中挑选一种，以一个确定的位置出现在我们面前。

波函数这种奇迹般的变化，在哥本哈根派的口中被称之为“坍缩”（collapse），每当我们试图测量电子的位置，它那原本按照薛定谔方程演变的波函数 ψ 便立刻按照那个时候的概率分布坍缩（我们记得 ψ 的平方就是概率），所有的可能全都在瞬间集中到某一点上。而一个实实在在的电子便大摇大摆地出现在那里，供我们观赏。

在电子通过双缝前，假如我们不去测量它的位置，那么它的波函数就按照方程发散开去，同时通过两个缝而自我互相干涉。但要是我们试图在两条缝上装个仪器以探测它究竟通过了哪条缝，在那一刹那，电子的波函数便坍缩了，电子随机地选择了一个缝通过。而坍缩过的波函数自然就无法再进行干涉，于是乎，干涉条纹一去不复返。

奇怪，非常奇怪。为什么我们一观测，电子的波函数就开始坍缩了呢？

事实似乎是这样的，当我们闭上眼睛不去看这个电子，它就不是一个实实在在的电子。它像一个幽灵一般按照波函数向四周散发开去，虚无飘渺，没有实体，而以概率波的形态漂浮在空间中。随着时间的演化，这种概率波严格地按照薛定谔波动方程的指使，听话而确定地按照经典方式发展。这个时候，与其说它是一个电子，不如说它是一个鬼魂，一团混沌，一幅浸润开来的水彩画，一朵概率云，爱丽丝梦境中那难以捉摸的柴郡猫的笑容。不管你怎么形容都好，反正它不是一个实体，它以概率的方式扩散开来，这种概率似波动一般起伏，可以干涉和叠加，为 ψ 所精确描述。

但是，当你一睁开眼睛，奇妙的事情发生了！所有的幻影，所有的幽灵都消失了。电子那散发开去的波函数在瞬间坍缩，它重新变成了一个实实在在的粒子，随机地出现在某处。除了这个地方之外，一切的概率波，一切的可能性都消

失了。化为一缕清风的妖怪重新凝聚成为一个白骨精，被牢牢地摁死在一个地方。电子回到了现实世界里来，又成了大家所熟悉的经典粒子。

你又闭上眼睛，刚刚变回原型的电子又化为概率波，向四周扩散。再睁开眼睛，它又变回粒子出现在某个地方。你测量一次，它的波函数就坍缩一次，随机地决定一个新的位置。当然，这里的随机是严格按照波函数所严格描述的概率分布来决定的。

我们不如叙述得更加生动活泼一些。金庸在《笑傲江湖》第二十六回里描述了令狐冲在武当脚下与冲虚一战，冲虚一柄长剑幻为一个个光圈，让令狐冲眼花缭乱，看不出剑尖所在。用量子语言说，这时候冲虚的剑已经不是一个实体，它变成许许多多的“虚剑”，在光圈里分布开来，每一个“虚剑尖”都代表一种可能性，它可能就是“实剑尖”所在。冲虚的剑可以为一个波函数所描述，很有可能在光圈的中心，这个波函数的强度最大，也就是说这剑最可能出现在光圈中心。现在令狐冲挥剑直入，注意，这是一次“测量行为”！好，在那瞬间冲虚剑的波函数坍缩了，又变成一柄实剑。令狐冲运气好，它真的出现在光圈中间，于是破了此招。要是猜错了呢？那免不了断送一条手臂，但冲虚剑的波函数总是坍缩了，它无论如何要实实在在地出现在某处，这才能伤敌。

在《三国演义》评话里，有一个类似的情节。赵云在长坂坡遇上高览（有些说是张绣），后者使一招百鸟朝凤，枪尖幻化为千百点，赵云侥幸破了此招——他随便一挡，迫使其波函数坍缩，结果正好坍缩到两枪相遇的位置，然后高览心慌意乱，反死于赵云之蛇盘七探枪下，这就不多说了。

我们还是回到物理上来。这种哥本哈根解释听起来未免也太奇怪了，我们观测一下，电子才变成实在，不然就是个幽灵。许多人一定觉得不可思议：当我们背过身，或者闭着眼的时候，电子一定在某个地方，只不过我们不知道而已。但正如我们指出的，假使电子真的“在”某个地方，它便只能通过一道狭缝，这就难以解释干涉条纹。而且我们以后也会看到，实验完全排除了这种可能。也许我们说“幽灵”太耸人听闻，严格地说，电子在没有观测的时候什么也不是，谈论它是无意义的，只有数学可以描述——波函数！按照哥本哈根解释，不观测的时候，根本没有个实在！自然也就没有实在的电子。事实上，不存在“电子”这个东西，只存在“我们与电子之间的观测关系”。

我已经可以预见到即将扔过来的臭鸡蛋的数量——不过它现在还是个波函数，等一会儿才会坍缩，哈哈——然而在那些扔臭鸡蛋的人中，有几位是让我感到十分荣幸的。事实上，哥本哈根派这下遇到真正的麻烦了，他们要面对一些强大的怀疑论者，这些人中间不少还刚刚和他们并肩战斗过。二十世纪物理史上最激烈，影响最大，意义最深远的一场争论马上就要展开，这使得我们能够对自然的行为和精神有更加深刻的理解。下一章我们就来谈这场伟大的辩论——玻尔-爱因斯坦之争。

第八章 论战

8-1

意大利北部的科莫市（Como）是一个美丽的小城，北临风景胜地科莫湖，与米兰相去不远。它市中心那几座著名的教堂洋溢着哥特式风格以及文艺复兴时代的气息，折射出这个国家那悠远的历史和文化沉淀。这个小城也有一支足球队——科莫队，在上个赛季（2002—2003）还打入了甲级联赛，可惜现在又降级了。一度报道说，它对中国球员吴承瑛有兴趣，想来对球迷不算陌生。

不过，科莫市最著名的人物，当然还是1745年出生于此的大科学家，亚里山德罗·伏打（Alessandro Volta）。他在电学方面的成就如此伟大，以致人们用他的名字来作为电压的单位：伏特（volt）。伏打于1827年9月去世，被他的家乡视为永远的光荣和骄傲。他出世的地方被命名为伏打广场，他的雕像自1839年起耸立于此。他的名字被用来命名教堂和科莫湖畔的灯塔，他的光辉照耀这个城镇，给它带来世界性的声名。

斗转星移，眨眼间已是 1927，科学巨人已离开我们整整 100 周年。一向安静宁谧的科莫忽然又热闹起来，新时代的科学家大师们又聚集于此，在纪念先人的同时探讨物理学的最新进展。科莫会议邀请了当时几乎所有的最杰出的物理学家，洵为盛会。赴会者包括玻尔、海森堡、普朗克、泡利、波恩、洛伦兹、德布罗意、费米、克莱默、劳厄、康普顿、魏格纳、索末菲、德拜、冯诺依曼（当然严格说来此人是数学家）……遗憾的是，爱因斯坦和薛定谔都别有要务，未能出席。这两位哥本哈根派主要敌手的缺席使得论战的火花向后推迟了几个月。同样没能赶到科莫的还有狄拉克和玻色。其中玻色的 case 颇为离奇：大会本来是邀请了他的，但是邀请信发给了“加尔各答大学物理系的玻色教授”。显然这封信是寄给著名的 S.N.玻色，也就是发现了玻色-爱因斯坦统计的那个玻色，他和爱因斯坦还预测了有名的玻色-爱因斯坦凝聚现象。2001 年，3 位分别来自美国和德国的科学家因为以实验证实了这一现象而获得诺贝尔物理学奖。

不过在 1927 年，玻色早就离开了加尔各答去了达卡大学。但无巧不成书，加尔各答还有一个 D.M.玻色。阴差阳错之下，这个名不见经传的“玻色”就参加了众星云集的科莫会议，也算是饭后的一大谈资吧。

在准备科莫会议讲稿的过程中，互补原理的思想进一步在玻尔脑中成型。他决定在这个会议上把这一大胆的思想披露出来。在准备讲稿的同时，他还给 Nature 杂志写短文以介绍这个发现，事情太多而时间仓促，最后搞得他手忙脚乱。在出发前的一刹那，他竟然找不到他的护照——这耽误了几个小时的火车。

但是，不管怎么样，玻尔最后还是完成那长达 8 页的讲稿，并在大会上成功地作了发言。这个演讲名为《量子公设和原子论的最近发展》，在其中玻尔第一次描述了波-粒的二象性，用互补原理详尽地阐明我们对待原子尺度世界的态度。他强调了观测的重要性，声称完全独立和绝对的测量是不存在的。当然互补原理本身在这个时候还没有完全定型，一直要到后来的索尔维会议它才算最终完成，不过这一思想现在已经引起了人们的注意。

波恩赞扬了玻尔“中肯”的观点，同时又强调了量子论的不确定性。他特别举了波函数“坍缩”的例子，来说明这一点。这种“坍缩”显然引起了冯诺伊曼的兴趣，他以后会证明关于它的一些有趣的性质。海森堡和克莱默等人也都作了评论。

当然我们也要指出的是，许多不属于“哥本哈根派”的人物，对玻尔等人的想法和工作一点都不熟悉，这种互补原理对他们来说令人迷惑不解。许多人都以为这不过是一种文字游戏，是对大家都了解的情况“换一种说法”罢了。正如罗森菲尔德（Rosenfeld）后来在访谈节目中评论的：“这个互补原理只是对各人所清楚的情况的一种说明……科莫会议并没有明确论据，关于概念的定义要到后来才作出。”尤金·魏格纳（Eugene Wigner）总结道：“……（大家都觉得，玻尔的演讲）没能改变任何人关于量子论的理解方式。”

但科莫会议的历史作用仍然不容低估，互补原理第一次公开亮相，标志着哥本哈根解释迈出了关键的一步。不久出版了玻尔的讲稿，内容已经有所改进，距离这个解释的最终成熟只差最后一步了。

在哥本哈根派聚集力量的同时，他们的反对派也开始为最后的决战做好准备。对于爱因斯坦来说，一个没有严格因果律的物理世界是不可想象的。物理规律应该统治一切，物理学应该简单明确：A 导致了 B，B 导致了 C，C 导致了 D。每一个事件都有来龙去脉，原因结果，而不依赖于什么“随机性”。至于抛弃客观实在，更是不可思议的事情。这些思想从他当年对待玻尔的电子跃迁的看法中，已经初露端倪。1924 年他在写给波恩的信中坚称：“我决不愿意被迫放弃严格的因果性，并将对其进行强有力的辩护。我觉得完全不能容忍这样的想法，即认为电子受到辐射的照射，不仅它的跃迁时刻，而且它的跃迁方向，都由它自己的‘自由意志’来选择。”

旧量子论已经让爱因斯坦无法认同，那么更加“疯狂”的新量子论就更使他忍无可忍了。虽然爱因斯坦本人曾经提出了光量子假设，在量子论的发展历程中作出过不可磨灭的贡献，但现在他却完全转向了这个新生理论的对立面。爱因斯坦坚信，量子论的基础大有毛病，从中必能挑出点刺来，迫使人们回到一个严格的，富有因果性的理论中来。玻尔后来回忆说：“爱因斯坦最善于不抛弃连续性和因果性来标示表面上矛盾着的经验，他比别人更不愿意放弃这些概念。”

两大巨头未能在科莫会议上碰面，然而低头不见抬头见，命运已经在冥冥中安排好了这样的相遇不可避免。仅仅一个多月后，另一个历史性的时刻就到来了，第五届索尔维会议在比利时布鲁塞尔召开。这一次，各路冤家对头终于聚首一堂，就量子论的问题作一个大决战。从黄金年代走来的老人，在革命浪潮中成长起来的反叛青年，经典体系的庄严守护者，新时代的冒险家，这次终于都要作一个最终了断。世纪大辩论的序幕即将拉开，像一场熊熊的大火燃烧不已，而量子论也将在这大火中接受最严苛的洗礼，锻烧出更加璀璨的光芒来。

布鲁塞尔见。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（一）

如果说玻尔-爱因斯坦之争是二十世纪科学史上最著名的辩论，那么海森堡在二战中的角色恐怕就是二十世纪科学史上最大的谜题。不知多少历史学家为此费尽口水，牵涉到数不清的跨国界的争论。甚至到现在，还有人不断地提出异议。我打算在这一章的饭后闲话里专门地来谈一谈这个话题，这件事说来话长，可能要用掉一整章，我们还是废话少说，这就开始吧。

纳粹德国为什么没能造出原子弹？战后几乎人人都在问这个问题。是政策上的原因？理论上的原因？技术上的原因？资源上的原因？或是道德上的原因？不错，美国造出了原子弹，他们有奥本海默，有费米，有劳伦斯、贝特、西伯格、魏格纳、查德威克、佩尔斯、弗里西、塞格雷，后来又有了玻尔，以致像费因曼这样的小字辈根本就不起眼，而洛斯阿拉莫斯也被称作“诺贝尔得奖者的集中营”。但德国一点也不差。是的，希特勒的犹太政策赶走了国内几乎一半的精英，纳粹上台的第一年，就有大约 2600 名学者离开了德国，四分之一的物理学家从德国的大学辞职而去，到战争前夕已经有 40% 的大学教授失去了职位。是的，整个轴心国流失了多达 27 名诺贝尔获奖者，其中甚至包括爱因斯坦、薛定谔、费米、波恩、泡利、德拜这样最杰出的人物，这个数字还不算间接损失的如玻尔之类。但德国凭其惊人的实力仍保有对抗全世界的能力。

战争甫一爆发，德国就展开了原子弹的研究计划。那时是 1939 年，全世界只有德国一家在进行这样一个原子能的军事应用项目。德国占领着世界上最大的铀矿（在捷克斯洛伐克），德国有世界上最强大的化学工业，他们仍然拥有世界上最好的科学家，原子的裂变现象就是两个德国人——奥托·哈恩（Otto Hahn）和弗里兹·斯特拉斯曼（Fritz Strassmann）在前一年发现的，这两人都还在德国，哈恩以后会因此发现获得诺贝尔化学奖。当然不止这两人，德国还有劳厄（1914 年诺贝尔物理）、波特（Bothe, 1954 诺贝尔物理）、盖革（盖革计数器的发明者，他进行了 α 散射实验）、魏扎克（Karl von Weizsacker）、巴格（Erich Bagge）、迪布纳（Kurt Diebner）、格拉赫（Walther Gerlach）、沃兹（Karl Wirtz）……当然，他们还有定海神针海森堡，这位 20 世纪最伟大的物理学家之一。所有的这些科学家都参与了希特勒的原子弹计划，成为“铀俱乐部”的成员之一，海森堡是这个计划的总负责人。

然而，德国并没能造出原子弹，它甚至连门都没有入。从 1942 年起，德国似乎已经放弃整个原子弹计划，而改为研究制造一个能提供能源的原子核反应堆。主要原因是因为 1942 年 6 月，海森堡向军备部长斯佩尔（Albert Speer）报告说，铀计划因为技术原因在短时间内难以产出任何实际的结果，在战争期间造出原子弹是不大可能的。但他同时也使斯佩尔相信，德国的研究仍处在领先的地位。斯佩尔将这一情况报告希特勒，当时由于整个战场情况的紧迫，德国的研究计划被迫采取一种急功近利的方略，也就是不能在短时间，确切地说是六周内见效的计划都被暂时放在一边。希特勒和斯佩尔达成一致意见：对原子弹不必花太大力气，不过既然在这方面仍然“领先”，也不妨继续拨款研究下去。当时海森堡申请附加的预算只有寥寥 35 万帝国马克，有它无它都影响不大。

这个计划在高层放任了近 2 年后，终于到 1944 年又为希姆莱所注意到。他下令大力拨款，推动原子弹计划的前进，

并建了几个新的铀工厂。计划确实有所进展，不过到了那时，全德国的工业早已被盟军的轰炸破坏得体无完肤，难以进一步支撑下去。而且为时也未免太晚，不久德国就投降了。

1942年的报告是怎么一回事？海森堡在其中扮演了一个什么样的角色？这答案扑朔迷离，历史学家们各执一词，要不是新证据的逐一披露，恐怕人们至今仍然在云里雾中。这就是科学史上有名的“海森堡之谜”。

8-2

索尔维会议是由一位比利时的实业家 Ernest Solvay 创立的，并以他的名字命名。第一届索尔维会议于 1911 年在布鲁塞尔召开，后来虽然一度被第一次世界大战所打断，但从 1921 年开始又重新恢复，定期 3 年举行一届。到了 1927 年，这已经是第五届索尔维会议了，也许，这也将是最著名的一次索尔维会议。

这次会议弥补了科莫的遗憾，爱因斯坦，薛定谔等人都如约而至。目前流传得最广的那张“物理学全明星梦之队”的照片，就是这次会议的合影。当然世事无完美，硬要挑点缺陷，那就是索末菲和约尔当不在其中，不过我们要求不能太高了，人生不如意者还是十有八九的。

这次会议从 10 月 24 日到 29 日，为期 6 天。主题是“电子和光子”（我们还记得，“光子-photon”是个新名词，它刚刚在 1926 年由美国人刘易斯所提出），会议议程如下：首先劳伦斯·布拉格作关于 X 射线的实验报告，然后康普顿报告康普顿实验以及其和经典电磁理论的不一致。接下来，德布罗意作量子新力学的演讲，主要是关于粒子的德布罗意波。随后波恩和海森堡介绍量子力学的矩阵理论，而薛定谔介绍波动力学。最后，玻尔在科莫演讲的基础上再次做那个关于量子公设和原子新理论的报告，进一步总结互补原理，给量子论打下整个哲学基础。这个议程本身简直就是量子论的一部微缩史，从中可以明显地分成三派：只关心实验结果的实验派：布拉格和康普顿；哥本哈根派：玻尔、波恩和海森堡；还有哥本哈根派的死敌：德布罗意，薛定谔，以及坐在台下的爱因斯坦。

会议的气氛从一开始便是火热的，像拳王争霸赛一样，重头戏到来之前先有一系列的垫赛：大家先就康普顿的实验做了探讨，然后各人分成了泾渭分明的阵营，互相炮轰。德布罗意一马当先做了发言，他试图把粒子融合到波的图像里去，提出了一种“导波”（pivot wave）的理论，认为粒子是波动方程的一个奇点，它必须受波的控制和引导。泡利站起来狠狠地批评这个理论，他首先不能容忍历史车轮倒转，回到一种传统图像中，然后他引了一系列实验结果来反驳德布罗意。众所周知，泡利是世界第一狙击手，谁要是被他盯上了多半是没有好下场的，德布罗意最后不得不公开声明放弃他的观点。幸好薛定谔大举来援，不过他还是坚持一个非常传统的解释，这连盟军德布罗意也觉得不大满意，泡利早就嘲笑薛定谔为“幼稚”。波恩和海森堡躲在哥本哈根掩体后面对其开火，他们在报告最后说：“我们主张，量子力学是一种完备的理论，它的基本物理假说和数学假设是不能进一步修改的。”他们也集中火力猛烈攻击了薛定谔的“电子云”，后者认为电子的确在空间中实际地如波般扩散开去。海森堡评论说：“我从薛定谔的计算中看不到任何东西可以证明事实如同他所希望的那样。”薛定谔承认他的计算确实还不太令人满意，不过他依然坚持，谈论电子的轨道是“胡扯”（应该是波本征态的叠加），波恩回敬道：“不，一点都不是胡扯。”在一片硝烟中，会议的组织者，老资格的洛伦兹也发表了一些保守的观点，and so on and so on.....

爱因斯坦一开始按兵不动，保持着可怕的沉默，不过当波恩提到他的名字后，他终于忍不住出击了。他提出了一个模型：一个电子通过一个小孔得到衍射图像。爱因斯坦指出，目前存在着两种观点，第一是说这里没有“一个电子”，只有“一团电子云”，它是一个空间中的实在，为德布罗意-薛定谔波所描述。第二是说的确有一个电子，而 ψ 是它的“几率分布”，电子本身不扩散到空中，而是它的几率波。爱因斯坦承认，观点 II 是比观点 I 更加完备的，因为它整个包含了观点 I。尽管如此，爱因斯坦仍然说，他不得不反对观点 II。因为这种随机性表明，同一个过程会产生许多不同的结果，而且这样一来，感应屏上的许多区域就要同时对电子的观测作出反应，这似乎暗示了一种超距作用，从而违背相对论。

风云变幻，龙虎交济，现在两大阵营的幕后主将终于都走到台前，开始进行一场决定命运的单挑。可惜的是，玻尔

等人的原始讨论记录没有官方资料保存下来，对当时情景的重建主要依靠几位当事人的回忆。这其中玻尔本人 1949 年为庆祝爱因斯坦 70 岁生日而应邀撰写的《就原子物理学中的认识论问题与爱因斯坦进行的商榷》长文，有海森堡、德布罗意和埃仑菲斯特的回忆和信件等等。当时那一场激战，讨论的问题中有我们已经描述过的那个电子在双缝前的困境：如何选择它的路径以及快速地关闭/打开一条狭缝对电子产生的影响。还有许许多多别的思维实验。埃仑菲斯特在写给他那些留守在莱登的弟子们（乌仑贝特和古德施密特等）的信中描述说：爱因斯坦像一个弹簧玩偶，每天早上都带着新的主意从盒子里弹出来，而玻尔则从云雾缭绕的哲学中找到工具，把对方所有的论据都一一碾碎。

海森堡 1967 年的回忆则说：

“讨论很快就变成了一场爱因斯坦和玻尔之间的决斗：当时的原子理论在多大程度上可以看成是讨论了几十年的那些困难的最终答案呢？我们一般在旅馆用早餐时就见面了，于是爱因斯坦就描绘一个思维实验，他认为从中可以清楚地看出哥本哈根解释的内部矛盾。然后爱因斯坦，玻尔和我便一起走去会场，我就可以现场聆听这两个哲学态度迥异的人的讨论，我自己也常常在数学表达结构方面插几句话。在会议中间，尤其是会间休息的时候，我们这些年轻人——大多数是我和泡利——就试着分析爱因斯坦的实验，而在吃午饭的时候讨论又在玻尔和别的来自哥本哈根的人之间进行。一般来说玻尔在傍晚的时候就对这些理想实验完全心中有数了，他会在晚餐时把它们分析给爱因斯坦听。爱因斯坦对这些分析提不出反驳，但在心里他是不服气的。”

爱因斯坦当然是不服气的，他如此虔诚地信仰因果律，以致决不能相信哥本哈根那种愤世嫉俗的概率解释。玻尔回忆说，爱因斯坦有一次嘲弄般地问，难道他真的相信上帝的力量要依靠掷骰子（ob der liebe Gott würfelt）？

上帝不掷骰子！这已经不是爱因斯坦第一次说这话了。早在 1926 年写给波恩的信里，他就说：“量子力学令人印象深刻，但是一种内在的声音告诉我它并不是真实的。这个理论产生了许多好的结果，可它并没有使我们更接近‘老头子’的奥秘。我毫无保留地相信，‘老头子’是不掷骰子的。”

“老头子”是爱因斯坦对上帝的昵称。

然而，1927 年这场华山论剑，爱因斯坦终究输了一招。并非剑术不精，实乃内力不足。面对浩浩荡荡的历史潮流，他顽强地逆流而上，结果被冲刷得站立不稳，苦苦支撑。1927 年，量子革命的大爆发已经进入第三年，到了一个收官的阶段。当年种下的种子如今开花结果，革命的思潮已经席卷整个物理界，毫无保留地指明了未来的方向。越来越多的人终究领悟到了哥本哈根解释的核心奥义，并诚心皈依，都投在量子门下。爱因斯坦非但没能说服玻尔，反而常常被反驳得说不出话来，而且他这个“反动”态度引得了许多人扼腕叹息。遥想当年，1905，爱因斯坦横空出世，一年之内六次出手，每一役都打得天摇地动，惊世骇俗，独自创下了一番轰轰烈烈的事业。当时少年意气，睥睨群雄，扬鞭策马，笑傲江湖，这一幅传奇画面在多少人心目中留下了永恒的神往！可是，当年那个最反叛，最革命，最不拘礼法，最蔑视权威的爱因斯坦，如今竟然站在新生量子论的对立面！

波恩哀叹说：“我们失去了我们的领袖。”

埃仑菲斯特气得对爱因斯坦说：“爱因斯坦，我为你感到脸红！你把自己放到了和那些徒劳地想推翻相对论的人一样的位置上了。”

爱因斯坦这一仗输得狼狈，玻尔看上去沉默笃钝，可是重剑无锋，大巧不工，在他一生中几乎没有输过哪一场认真的辩论。哥本哈根派和它对量子论的解释大获全胜，海森堡在写给家里的信中说：“我对结果感到非常满意，玻尔和我的观点被广泛接受了，至少没人提得出严格的反驳，即使爱因斯坦和薛定谔也不行。”多年后他又总结道：“刚开始（持有这种观点的）主要是玻尔，泡利和我，大概也只有我们三个，不过它很快就扩散开去了。”

但是爱因斯坦不是那种容易被打败的人，他逆风而立，一头乱发掩不住眼中的坚决。他身后还站着两位，一个是德布罗意，一个是薛定谔。三人吴带凌风，衣袂飘飘，在量子时代到来的曙光中，大有长铗寒瑟，易水萧萧，誓与经典理论共存亡的悲壮气概。

时光荏苒，一弹指又是三年，各方俊杰又重聚布鲁塞尔，会面于第六届索尔维会议。三年前那一战已成往事，这第二次华山论剑，又不知谁胜谁负？

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（二）

1944年，盟军在诺曼底登陆，形成两面夹攻之势。到1945年4月，纳粹德国大势已去，欧洲战场战斗的结束已经近在眼前。摆在美国人面前的任务现在是尽可能地搜罗德国残存的科学家和设备仪器，不让他们落到别的国家手里（苏联不用说，法国也不行）。和苏联人比赛看谁先攻占柏林是无望的了，他们转向南方，并很快俘获了德国铀计划的科学家们，缴获了大部分资料和设备。不过那时候海森堡已经提前离开逃回厄菲尔德（Urfeld）的家中，这个地方当时还在德国人手里，但为了得到海森堡这个“第一目标”，盟军派出一支小分队，于5月3日，也就是希特勒夫妇自杀后的第四天，到海森堡家中抓住了他。这位科学家倒是表现得颇有风度，他礼貌地介绍自己的妻子和孩子们，并问那些美国大兵，他们觉得德国的风景如何。到了5月7日，德国便投降了。

10位德国最有名的科学家被秘密送往英国，关在剑桥附近的一幢称为“农园堂”（Farm Hall）的房子里。他们并不知道这房子里面装满了窃听器，他们在此的谈话全部被录了音并记录下来，我们在后面会谈到这些关键性的记录。8月6日晚上，广岛原子弹爆炸的消息传来，这让每一个人都惊得目瞪口呆。关于当时的详细情景，我们也会在以后讲到。

战争结束后，这些科学家都被释放了。但现在不管是专家还是公众，都对德国为什么没能造出原子弹大感兴趣。以德国科学家那一贯的骄傲，承认自己技不如人是绝对无法接受的。还在监禁期间，广岛之后的第三天，海森堡等人便起草了一份备忘录，声称：1.原子裂变现象是德国人哈恩和斯特拉斯曼在1938年发现的。2.只有到战争爆发后，德国才成立了相关的研究小组。但是从当时的德国来看并无可能造出一颗原子弹，因为即使技术上存在着可能性，仍然有资源不足的问题，特别是需要更多的重水。

返回德国后，海森堡又起草了一份更详细的声明。大致是说，德国小组早就意识到铀235可以作为反应堆或者炸弹来使用，但是从天然铀中分离出稀少的同位素铀235却是一件极为困难的事情。（*这里补充一下原子弹的常识：当一个中子轰击容易分裂的铀235原子核时，会使它裂成两半，同时放出更多的中子去进一步轰击别的原子核。这样就引起一连串的连锁反应，在每次分裂时都放出大量能量，便是通常说的“链式反应”。但只有铀235是不稳定而容易裂变的，它的同位素铀238则不是，所以必须提高铀235的浓度才能引发可持续的反应，不然中子就都被铀238吸收了。但天然铀中铀238占了99%以上，所以要把那一点铀235分离出来，这在当时的技术来说是极困难的。）

海森堡说，分离出足够的铀235需要大量的资源和人力物力，这项工作战争期间是难以完成的。德国科学家也意识到了另一种可能的方法，那就是说，虽然铀238本身不能分裂，但它吸收中子后会衰变成另一种元素——钚。而这种元素和铀235一样，是可以形成链式反应的。不过无论如何，前提是要有一个原子反应堆，制造原子的反应堆需要中子减速剂。一种很好的减速剂是重水，但对德国来说，唯一的重水来源是在挪威的一个工厂，这个工厂被盟军的特遣队多次破坏，不堪使用。

总而言之，海森堡的潜台词是，德国科学家和盟国科学家在理论和技术上的优势是相同的。但是因为德国缺乏相应的资源，因此德国人放弃了这一计划。他声称一直到1942年以前，双方的进展还“基本相同”，只不过由于外部因素的影响，德国认为在战争期间没有条件（而不是没有理论能力）造出原子弹，因此转为反应堆能源的研究。

海森堡声称，德国的科学家一开始就意识到了原子弹所引发的道德问题，这样一种如此大杀伤力的武器使他们也意识到对人类所负有的责任。但是对国家（不是纳粹）的义务又使得他们不得不投入到工作中去。不过他们心怀矛盾，消极怠工，并有意无意地夸大了制造的难度，因此在 1942 年使得高层相信原子弹并没有实际意义。再加上外部环境的恶化使得实际制造成为不可能，这让德国科学家松了一口气，因为他们不必像悲剧中的安提戈涅，亲自来作出这个道德上两难的决定了。

这样一来，德国人的科学优势得以保持，同时又捍卫了一种道德地位。两全其美。

这种说法惹火了古德施密特，他战时是曼哈顿计划的重要领导人，本来也是海森堡的好朋友。他认为说德国人和盟国一样地清楚原子弹的技术原理和关键参数是胡说八道。1942 年海森堡报告说难以短期制造出原子弹，那是因为德国人算错了参数，他们真的相信不可能造出它，而不是什么虚与委蛇，更没有什么消极。古德施密特地位特殊，手里掌握着许多资料，包括德国自己的秘密报告，他很快写出一本书叫做 ALSOS，主要是介绍曼哈顿计划的过程，但同时也汇报德国方面的情况。海森堡怎肯苟同，两人在 Nature 杂志和报纸上公开辩论，断断续续地打了好多年笔仗，最后私下讲和，不了了之。

双方各有支持者。《纽约时报》的通讯记者 Kaempffert 为海森堡辩护，说了一句引起轩然大波的话：“说谎者得不了诺贝尔奖！”言下之意自然是说古德施密特说谎。这滋味对于后者肯定不好受，大家知道古德施密特是电子自旋的发现者之一，以如此伟大发现而终究未获诺贝尔奖，很多人是鸣不平的。ALSOS 的出版人舒曼（Schuman）当真写信给爱因斯坦，问“诺贝尔得奖者真的不说谎？”爱因斯坦只好回信说：“说谎是得不了诺贝尔的，但也不能排除有些幸运者会在压力下在特定的场合可能说谎。”

爱因斯坦大概想起了勒纳德和斯塔克，两位货真价实的诺贝尔得主，为了狂热的纳粹信仰而疯狂攻击他和相对论，这情景犹然在眼前呢。

8-3

花开花落，黄叶飘零，又是秋风季节，第六届索尔维会议在布鲁塞尔召开了。玻尔来到会场时心中惴惴，看爱因斯坦表情似笑非笑，吃不准他三年间练成了什么新招，不知到了一个什么境界。不过玻尔倒也不是太过担心，量子论的兴起已经是板上钉钉的事实，现在整个体系早就站稳脚跟，枝繁叶茂地生长起来。爱因斯坦再厉害，凭一人之力也难以撼动它的根基。玻尔当年的弟子们，海森堡，泡利等，如今也都是独当一面的大宗师了，哥本哈根派名震整个物理界，玻尔自信吃不了大亏。

爱因斯坦则在盘算另一件事：量子论方兴未艾，当其之强，要打败它的确太难了。可是难道因果律和经典理论就这么完了不成？不可能，量子论一定是错的！嗯，想来想去，要破量子论，只有釜底抽薪，击溃它的基础才行。爱因斯坦凭着和玻尔交手的经验知道，在细节问题上争不出个什么所以然的，量子论就像神话中那个九头怪蛇海德拉（Hydra），你砍掉它一个头马上会再生一个出来。必须得瞄准最关键的那一个头才行，这个头就是其精髓所在——不确定性原理！

爱因斯坦站起来发话了：

想象一个箱子，上面有一个小孔，并有一道可以控制其开闭的快门，箱子里面有若干个光子。好，假设快门可以控制得足够好，它每次打开的时间是如此之短，以致于每次只允许一个光子从箱子里飞到外面。因为时间极短， t 是足够小的。那么现在箱子里少了一个光子，它轻了那么一点点，这可以用一个理想的称测量出来。假如轻了 m 吧，那么就是说飞出去的光子重 m ，根据相对论的质能方程 $E=mc^2$ ，可以精确地算出减少的能量 E 。

那么， E 和 t 都很确定，海森堡的公式 $\Delta E \times \Delta t > h/2\pi$ 也就不成立。所以整个量子论是错误的！

这可以说是爱因斯坦凝聚了毕生功夫的一击，其中还包含了他的成名绝技相对论。这一招如白虹贯日，直中要害，沉稳老辣，干净漂亮。玻尔对此毫无思想准备，他大吃一惊，一时想不出任何反击的办法。据目击者说，他变得脸如死灰，呆若木鸡（不是比喻！），张口结舌地说不出话来。一整个晚上他都闷闷不乐，搜肠刮肚，苦思冥想。

罗森菲尔德后来描述说：

“（玻尔）极力劝说每一个人，试图使他们相信爱因斯坦说的不可能是真的，不然那就是物理学的末日了。但是他想不出任何反驳来。我永远不会忘记两个对手离开会场时的情景：爱因斯坦的身影高大庄严，带着一丝嘲讽的笑容，静悄悄地走了出去。玻尔跟在后面一路小跑，他激动不已，词不达意地辩解说要是爱因斯坦的装置真的管用，物理学就完蛋了。”

这一招当真如此醇厚完美，无懈可击？玻尔在这关键时刻力挽沧海，方显英雄本色。他经过一夜苦思，终于想出了破解此招的方法，一个更加妙到巅毫的巧招。

罗森菲尔德接着说：

“第二天早上，玻尔的胜利便到来了。物理学也得救了。”

玻尔指出：好，一个光子跑了，箱子轻了 m 。我们怎么测量这个 m 呢？用一个弹簧称，设置一个零点，然后看箱子位移了多少。假设位移为 q 吧，这样箱子就在引力场中移动了 q 的距离，但根据广义相对论的红移效应，这样的话时间的快慢也要随之改变相应的 T 。可以根据公式计算出： $T > h/mc^2$ 。再代以质能公式 $E = mc^2$ ，则得到最终的结果，这结果是如此眼熟： $T \times E > h$ ，正是海森堡测不准关系！

我们可以不理睬数学推导，关键是爱因斯坦忽略了广义相对论的红移效应！引力场可以使原子频率变低，也就是红移，等效于时间变慢。当我们测量一个很准确的 m 时，我们在很大程度上改变了箱子里的时钟，造成了一个很大的不确定的 T 。也就是说，在爱因斯坦的装置里，假如我们准确地测量 m ，或者 E 时，我们就根本没法控制光子逃出的时间 T ！

广义相对论本是爱因斯坦的独门绝技，玻尔这一招“以彼之道，还施彼身”不但封挡住了爱因斯坦那雷霆万钧的一击，更把这诸般招数都回加到了他自己身上。虽说是殚精竭虑最后想出此法，但招数精奇，才气横溢，教人击节叹服，大开眼界。觉得见证两大纵世奇才出全力相拚，实在不虚此行。

现在轮到爱因斯坦自己说不出话来了。难道量子论当真天命所归，严格的因果性当真已经迟迟老去，不再属于这个叛逆的新时代？玻尔是最坚决的革命派，他的思想辽阔深远，穷幽极渺，却又如大江奔流，浩浩荡荡，翻腾不息。物理学的未来只有靠量子，这个古怪却又强大的精灵去开拓。新世界不再有因果性，不再有实在性，可能让人觉得不太安全，但它却是那样胸怀博大，气派磅礴，到处都有珍贵的宝藏和激动人心的秘密等待着人们去发掘。狄拉克后来有一次说，自海森堡取得突破以来，理论物理进入了前所未有的黄金年代，任何一个二流的学生都可能在其中作出一流的发现。是的，人们应当毫不畏惧地走进这样一个生机勃勃的，充满了艰险、挑战和无上光荣的新时代中来，把过时的因果性做成一个纪念物，装饰在泛黄的老照片上去回味旧日的似水年华。

革命！前进！玻尔在大会上又开始显得精神抖擞，豪气万丈。爱因斯坦的这个光箱实验非但没能击倒量子论，反而成了它最好的证明，给它的光辉又添上了浓重的一笔。现在没什么好怀疑的了，因果性是不存在的，哥本哈根解释如野火一般在人们的思想中蔓延开来。玻尔是这场革命的旗手，他慷慨陈词，就像当年在议会前的罗伯斯庇尔。要是可能的

话，他大概真想上来这么一句：

因果性必须死，因为物理学需要生！

停止争论吧，上帝真的掷骰子！随机性是世界的基石，当电子出现在这里时，它是一个随机的过程，并不需要有谁给它加上难以忍受的条条框框。全世界的粒子和波现在都得到了解放，从牛顿和麦克斯韦写好的剧本中挣扎出来，大口地呼吸自由空气。它们和观测者玩捉迷藏，在他们背后融化成概率波弥漫开去，神秘地互相渗透和干涉。当观测者回过头去寻找它们，它们又快乐地现出原型，呈现出一个面貌等候在那里。这种游戏不致于过火，因为还有波动方程和不确定原理在起着规则的作用。而统计规律则把微观上的无法无天抹平成为宏观上的井井有条。

爱因斯坦失望地看着这个场面，发展到如此地步实在让他始料不及。没有因果性，一片混乱……恐怕约翰·米尔顿描绘的那个“群魔殿”（Pandemonium）就是这个样子吧？爱因斯坦对玻尔已经两战两败，他现在知道量子论的根基比想象的要牢固得多。看起来，量子论不太可能是错误的，或者自相矛盾的。

但爱因斯坦也决不会相信它代表了真相。好吧，量子论内部是没有矛盾的，但它并不是一幅“完整”的图像。我们看到的量子论，可能只是管中窥豹，虽然看到了真实的一部分，但仍然有更多的“真实”未能发现。一定有一些其他的因素，它们虽然不为我们所见，但无疑对电子的行为有着影响，从而严格地决定了它们的行为。好比我们在赌场扔骰子赌钱，虽然我们睁大眼睛看明白四周一切，确定没人作弊，但的确可能还有一个暗中的武林高手，凭借一些独门手法比如说吹气来影响骰子的结果。虽然我们水平不行，发现不了这个武林高手的存在，觉得骰子是完全随机的，但事实上不是！它是完全人为的，如果把这个隐藏的高手也考虑进去，它是有严格因果关系的！尽管单单从我们看到的来讲，也没有什么互相矛盾，但一幅“完整”的图像应该包含那个隐藏着的人，这个人是一个“隐变量”！

不管怎么说，因果关系不能抛弃！爱因斯坦的信念到此时几乎变成一种信仰了，他已决定终生为经典理论而战，这不知算是科学的悲剧还是收获。一方面，那个大无畏的领路人，那个激情无限的开拓者永远地从历史上消失了。亚伯拉罕·帕斯（Abraham Pais）在《爱因斯坦曾住在这里》一书中说，就算 1925 年后，爱因斯坦改行钓鱼以度过余生，这对科学来说也没什么损失。但另一方面，爱因斯坦对量子论的批评和诘问也确实使它时时三省吾身，冷静地审视和思考自己存在的意义，并不断地在斗争中完善自己。大概可算一种反面的激励吧？

反正他不久又要提出一个新的实验，作为对量子论的进一步考验。可怜的玻尔得第三次接招了。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（三）

玩味一下海森堡的声明是很有意思的：讨厌纳粹和希特勒，但忠实地执行对祖国的义务，作为国家机器的一部分来履行爱国的职责。这听起来的确像一幅典型的德国式场景。服从，这是德国文化的一部分，在英语世界的人们看来，对付一个邪恶的政权，符合道德的方式是不与之合作甚至摧毁它，但对海森堡等人来说，符合道德的方式是服从它——正如他以后所说的那样，虽然纳粹占领全欧洲不是什么好事，但对一个德国人来说，也许要好过被别人占领，一战后那种惨痛的景象已经不堪回首。

原子弹，对于海森堡来说，是“本质上”邪恶的，不管它是为希特勒服务，还是为别的什么人服务。战后在西方科学家中有一种对海森堡的普遍憎恶情绪。当海森堡后来访问洛斯阿拉莫斯时，那里的科学家拒绝同其握手，因为他是“为希特勒制造原子弹的人”。这在海森堡看来是天大的委屈，他不敢相信，那些“实际制造了原子弹的人”竟然拒绝与他握手！也许在他心中，盟军的科学家比自己更加应该在道德上加以谴责。但显然在后者看来，只有为希特勒制造原子弹才是邪恶，如果以消灭希特勒和法西斯为目的而研究这种武器，那是非常正义和道德的。

这种道德观的差异普遍存在于双方阵营之中。魏扎克曾经激动地说：“历史将见证，是美国人和英国人造出了一颗炸弹，而同时德国人——在希特勒政权下的德国人——只发展了铀引擎动力的和平研究。”这在一个美国人看来，恐怕要喷饭。

何况在许多人看来，这种声明纯粹是马后炮。要是德国人真的造得出来原子弹，恐怕伦敦已经从地球上消失了，也不会罗里罗嗦地讲这一大通风凉话。不错，海森堡肯定在 1940 年就意识到铀炸弹是可能的，但这不表明他确切地知道到底怎么去制造啊！海森堡在 1942 年意识到以德国的环境来说分离铀 235 十分困难，但这不表明他确切地知道到底要分离“多少”铀 235 啊！事实上，许多证据表明，海森堡非常错误地估计了工程量，为了维持链式反应，必须至少要有一个最小量的铀 235 才行，这个质量叫做“临界质量”（critical mass），海森堡——不管他是真的算错还是假装不知——在 1942 年认为至少需要几吨的铀 235 才能造出原子弹！事实上，只要几十千克就可以了。

诚然，即使只分离这么一点点铀 235 也是非常困难的。美国动用了 15000 人，投资超过 20 亿美元才完成整个曼哈顿计划。而德国整个只有 100 多人在搞这事，总资金不过百万马克左右，这简直是笑话。但这都不是关键，关键是，海森堡到底知不知道准确的数字？如果他的确有一个准确数字的概念，那么虽然这德国来说仍然是困难的，但至少不是那样的遥不可及，难以克服。英国也同样困难，但他们知道准确的临界质量数字，于是仍然上马了原子弹计划。

海森堡争辩说，他对此非常清楚，他引用了许多证据说明在与斯佩尔会面前他的确知道准确的数字。可惜他的证据全都模糊不清，无法确定。德国的报告上的确说一个炸弹可能需要 10—100 千克，海森堡也描绘过一个“菠萝”大小的炸弹，这被许多人看作证明。然而这些全都是指钚炸弹，而不是铀 235 炸弹。这些数字不是证明出来的，而是猜测的，德国根本没有反应堆来大量生产钚。德国科学家们在许多时候都流露出这样的印象，铀炸弹至少需要几吨的铀 235。

不过当然你也可以从反方面去理解，海森堡故意隐瞒了数字，只有天知地知他一个人知。他一手造成夸大的假相。

至于反应堆，其实石墨也可以做很好的减速剂，美国人就是用的石墨。可是当时海森堡委派波特去做实验，他的结果错了好几倍，显示石墨不适合用在反应堆中，于是德国人只好在重水这一棵树上吊死。这又是一个悬案，海森堡把责任推到波特身上，说他用的石墨不纯，因此导致了整个计划失败。波特是非常有名的实验物理学家，后来也得了诺贝尔奖，这个黑锅如何肯背。他给海森堡写信，暗示说石墨是纯的，而且和理论相符合！如果说实验错了，那还不如说理论错了，理论可是海森堡负责的。在最初的声明中海森堡被迫撤回了对波特的指责，但在以后的岁月中，他，魏扎克，沃兹等人仍然不断地把波特拉进来顶罪。目前看来，德国人当年无论是理论还是实验上都错了。

对这一公案的争论逐渐激烈起来，最有影响的几本著作有：Robert Jungk 的《比一千个太阳更明亮》（Brighter Than a Thousand Suns, 1956），此书赞扬了德国科学家那高尚的道义，在战时不忘人类公德，虽然洞察原子弹的奥秘，却不打开这潘多拉盒子。1967 年 David Irving 出版了《德国原子弹计划》（The German Atomic Bomb），此时德国当年的秘密武器报告已经得见天日，给作品带来了丰富的资料。Irving 虽然不认为德国科学家有吹嘘的那样高尚的品德，但他仍然相信当年德国人是清楚原子弹技术的。然后是 Margaret Gowing 那本关于英国核计划的历史，里面考证说德国人当年在一些基本问题上错得离谱，这让海森堡本人非常恼火。他说：“（这本书）大错特错，每一句都是错的，完全是胡说八道。”他随后出版了著名的自传《物理和物理之外》（Physics and Beyond），自然再次地强调了德国人的道德和科学水平。凡是当年和此事有点关系的人都纷纷发表评论意见，众说纷纭，有如聚讼，谁也没法说服对方。

1989 年，杨振宁在上海交大演讲的时候还说：“……很好的海森堡传记至今还没写出，而已有的传记对这件事是语焉不详的……这是一段非常复杂的历史，我相信将来有人会写出重要的有关海森堡的传记。”

幸运的是，从那时起到今天，事情总算是如其所愿，有了根本性的变化。

8-4

爱因斯坦没有出席 1933 年第七届索尔维会议，他被纳粹德国逼得离开家乡，流落异国，忧郁地思索着欧洲那悲惨的未来。另一方面，这届索尔维会议的议题也早就不是量子论本身，而换成了另一个激动人心的话题：爆炸般发展的原子物理。不过这个领域里的成就当然也是在量子论的基础上取得的，而量子力学的基本形式已经确定下来，成为物理学的基础。似乎是尘埃落定，没什么人再怀疑它的力量和正确性了。

在人们的一片乐观情绪中，爱因斯坦和薛定谔等寥寥几人愈加显得孤独起来。薛定谔和德布罗意参加了 1933 年索尔维会议，却都没有发言，也许是对这一领域不太熟悉的缘故吧。新新人类们在激动地探讨物质的产生和湮灭、正电子、重水、中子……那样多的新发现让人眼花缭乱，根本忙不过来。而爱因斯坦他们现在还能做什么呢？难道他们的思想真的已经如此过时，以致跟不上新时代那飞一般的步伐了吗？

1933 年 9 月 25 日，埃仑费斯特在荷兰莱登枪杀了他那患有智力障碍的儿子，然后自杀了。他在留给爱因斯坦，玻尔等好友的信中说：“这几年我越来越难以理解物理学的飞速发展，我努力尝试，却更为绝望和撕心裂肺，我终于决定放弃一切。我的生活令人极度厌倦……我仅仅是为了孩子们的经济来源而活着，这使我感到罪恶。我试过别的方法但是收效甚微，因此我越来越多地去考虑自杀的种种细节，除此之外我没有第二条路走了……原谅我吧。”

在爱因斯坦看来，埃仑费斯特的悲剧无疑是一个时代的悲剧。两代物理学家的思想猛烈冲突和撞击，在一个天翻地覆的飘摇乱世，带给整个物理学以强烈的阵痛。埃仑费斯特虽然从理智上支持玻尔，但当文化衰落之时，曾经为此文化所感之人必感到强烈的痛苦。昔日黄金时代的黯淡老去，代以雨后春笋般兴起的新思潮，从量子到量子场论，原子中各种新粒子层出不穷，稀奇古怪的概念统治整个世界。爱因斯坦的心中心何曾没有埃仑费斯特那样难以名状的巨大忧伤？爱因斯坦远远地，孤独地站在鸿沟的另一边，看着年轻人们义无反顾地高唱着向远方进军，每一个人都对他说他站错了地方。这种感觉是那样奇怪，似乎世界都显得朦胧而不真实。难怪曾经有人叹息说，宁愿早死几年，也不愿看到现代物理这样一幅令人难以接受的画面。不过，爱因斯坦却仍然没有倒下，虽然他身在异乡，他的第二个妻子又重病缠身，不久将与他生离死别，可这一切都不能使爱因斯坦放弃内心那个坚强的信仰，那个对于坚固的因果关系，对于一个宇宙和谐秩序的痴痴信仰。爱因斯坦仍然选择战斗，他的身影在斜阳下拉得那样长，似乎是勇敢的老战士为一个消逝的王国做最后的悲壮抗争。

这一次他争取到了两个同盟军，他们分别是他的两个同事波多尔斯基（Boris Podolsky）和罗森（Nathan Rosen）。1935 年 3 月，三人共同在《物理评论》（Physics Review）杂志上发表了一篇文章，名字叫《量子力学对物理实在的描述可能是完备的吗？》，再一次对量子论的基础发起攻击。当然他们改变策略，不再说量子论是自相矛盾，或者错误的，而改说它是“不完备”的。具体来说，三人争辩量子论的那种对于观察和波函数的解释是不对的。

我们用一个稍稍简化了的实验来描述他们的主要论据。我们已经知道，量子论认为在我们没有观察之前，一个粒子的状态是不确定的，它的波函数弥散开来，代表它的概率。但当我们探测以后，波函数坍缩，粒子随机地取一个确定值出现在我们面前。

现在让我们想象一个大粒子，它是不稳定的，很快就会衰变成两个小粒子，向相反的两个方向飞开去。我们假设这种粒子有两种可能的自旋，分别叫“左”和“右”，那么如果粒子 A 的自旋为“左”，粒子 B 的自旋便一定是“右”，以保持总体守恒，反之亦然。

好，现在大粒子分裂了，两个小粒子相对飞了出去。但是要记住，在我们没有观察其中任何一个之前，它们的状态都是不确定的，只有一个波函数可以描绘它们。只要不去探测，每个粒子的自旋便都处在一种左/右可能性叠加的混合状态，为了方便我们假定两种概率对半分，各 50%。

现在我们观察粒子 A，于是它的波函数一瞬间坍缩了，随机地选择了一种状态，比如说是“左”旋。但是因为我们知道两个粒子总体要守恒，那么现在粒子 B 肯定就是“右”旋了。问题是，在这之前，粒子 A 和粒子 B 之间可能已经相隔非常遥远的距离，比如说几万光年好了。它们怎么能够做到及时地互相通信，使得在粒子 A 坍缩成左的一刹那，粒子 B 毅然坍缩成右呢？

量子论的概率解释告诉我们，粒子 A 选择“左”，那是一个完全随机的决定，两个粒子并没有事先商量好，说粒子 A 一定会选择左。事实上，这种选择是它被观测的那一刹那才做出的，并没有先兆。关键在于，当 A 随机地作出一个选择时，远在天边的 B 便一定要根据它的决定而作出相应的坍缩，变成与 A 不同的状态以保持总体守恒。那么，B 是如何得知这一遥远的信息的呢？难道有超过光速的信号来回于它们之间？

假设有两个观察者在宇宙的两端守株待兔，在某个时刻 t，他们同时进行了观测。一个观测 A，另一个同时观测 B，那么，这两个粒子会不会因为距离过于遥远，一时无法对上口径而在仓促间做出手忙脚乱的选择，比如两个同时变成了“左”，或者“右”？显然是不太可能的，不然就违反了守恒定律，那么是什么让它们之间保持着心有灵犀的默契，当你是“左”的时候，我一定是“右”？

爱因斯坦等人认为，既然不可能有超过光速的信号传播，那么说粒子 A 和 B 在观测前是“不确定的幽灵”显然是难以自圆其说的。唯一的可能是两个粒子从分离的一刹那开始，其状态已经确定了，后来人们的观测只不过是得到了这种状态的信息而已，就像经典世界中所描绘的那样。粒子在观测时才变成真实的说法显然违背了相对论的原理，它其中涉及到瞬间传播的信号。这个诘难以三位发起者的首字母命名，称为“EPR 佯谬”。

玻尔在得到这个消息后大吃一惊，他马上放下手头的其他工作，来全神贯注地对付爱因斯坦的这次挑战。这套潜心演练的新阵法看起来气势汹汹，宏大堂皇，颇能夺人心魄，但玻尔也算是爱因斯坦的老对手了。他睡了一觉后，马上发现了其中的破绽所在，原来这看上去让人眼花缭乱的一次攻击却是个完完全全的虚招，并无实质力量。玻尔不禁得意地唱起一支小调，调侃了波多尔斯基一下。

原来爱因斯坦和玻尔根本没有个共同的基础。在爱因斯坦的潜意识里，一直有个经典的“实在”影像。他不言而喻地假定，EPR 实验中的两个粒子在观察之前，分别都有个“客观”的自旋状态存在，就算是概率混合吧，但粒子客观地存在于那里。但玻尔的意思是，在观测之前，没有一个什么粒子的“自旋”！那时候自旋的粒子是不存在的，不是客观实在的一部分，这不能用经典语言来表达，只有波函数可以描述。因此在观察之前，两个粒子——无论相隔多远都好——仍然是一个互相关联的整体！它们仍然必须被看作母粒子分裂时的一个全部，直到观察以前，这两个独立的粒子都是不存在的，更谈不上客观的自旋状态！

这是爱因斯坦和玻尔思想基础的尖锐冲突，玻尔认为，当没有观测的时候，不存在一个客观独立的世界。所谓“实在”只有和观测手段连起来讲才有意义。在观测之前，并没有“两个粒子”，而只有“一个粒子”，直到我们观测了 A 或者 B，两个粒子才变成真实，变成客观独立的存在。但在那以前，它们仍然是互相联系的一个虚无整体。并不存在什么超光速的信号，两个遥远的粒子只有到观测的时候才同时出现在宇宙中，它们本是协调的一体，之间无需传递什么信号。其实是这个系统没有实在性，而不是没有定域性。

EPR 佯谬其实根本不是什么佯谬，它最多表明了，在“经典实在观”看来，量子论是不完备的，这简直是废话。但是在玻尔那种“量子实在观”看来，它是非常完备和逻辑自洽的。

既生爱，何生玻。两人的世纪争论进入了尾声。在哲学基础上的不同使得两人间的意见分歧直到最后也没能调和。一直到死，玻尔也未能使爱因斯坦信服，认为量子论的解释是完备的。而玻尔本人也一直在同爱因斯坦的思想作斗争，在他 1962 年去世后的第二天，人们在他的黑板上仍然发现画有当年爱因斯坦光箱实验的草图。两位科学巨人都为各自的信念而奋斗了毕生，但别的科学家已经甚少关心这种争执。在量子论的引导下，科学显得如此朝气蓬勃，它的各个分支

以火箭般的速度发展，给人类社会带来了伟大的技术革命。从半导体到核能，从激光到电子显微镜，从集成电路到分子生物学，量子论把它的光辉播撒到人类社会的每一个角落，成为有史以来在实用中最成功的物理理论。许多人觉得，争论量子论到底对不对简直太可笑了，只要转过头，看看身边发生的一切，看看社会的日新月异，目光所及，无不是量子论的最好证明。

如果说 EPR 最大的价值所在，那就是它和别的奇想空谈不同。只要稍微改装一下，EPR 是可以为实践所检验的！我们的史话在以后会谈，人们是如何在实验室里用实践裁决了爱因斯坦和玻尔的争论，经典实在的概念无可奈何花落去，只留下一个苍凉的身影和深沉的叹息。

但量子论仍然困扰着我们。它的内在意义是如此扑朔迷离，使得对它的诠释依旧众说纷纭。量子论取得的成就是无可怀疑的，但人们一直无法确认它的真实面目所在，这争论一直持续到今天。它将把一些让物理学家们毛骨悚然的概念带入物理中，令人一想来就不禁倒吸一口凉气。而反对派那里还有一个薛定谔，他要放出一只可怕的怪兽，撕咬人们的理智和神经，这就是叫许多人闻之色变的“薛定谔的猫”。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（四）

海森堡本人于 1976 年去世了。在他死后两年，英国人 Jones 出版了《高度机密战争：英国科学情报部门》（Most Secret War: British Scientific Intelligence）一书，详细地分析了海森堡当年在计算时犯下的令人咋舌的错误。但他的分析却没有被 Mark Walker 所采信，在资料详细的《德国国家社会主义及核力量的寻求》（German National Socialism and the Quest for Nuclear Power, 1989 年出版）中，Walker 还是认为海森堡在 1942 年头脑清楚，知道正确的事实。

到了 1992 年，Hofstra 大学的戴维·卡西迪（David Cassidy）出版了著名的海森堡传记《不确定性：海森堡传》，这至今仍被认为是海森堡的标准传记。他分析了整件事情，并最终站在了古德施密特等人的立场上，认为海森堡并没有什么主观的愿望去“摧毁”一个原子弹计划，他当年确实算错了。

但是很快到了 1993 年，戏剧性的情况又发生了。Thomas Powers 写出了巨著《海森堡的战争》（Heisenberg's War）。Powers 本是记者出身，非常了解如何使得作品具有可读性。因此虽然这本厚书足有 607 页，但文字奇巧，读来引人入胜，很快成了畅销作品。Powers 言之凿凿地说，海森堡当年不仅仅是“消极”地对待原子弹计划，他更是“积极”地破坏了这个计划的成功实施。他绘声绘色地向人们描绘了一幕幕阴谋、间谍、计划，后来有人揶揄说，这本书的前半部分简直就是一部间谍小说。不管怎么样说，这本书在公众中的反响是很大的，海森堡作为一个高尚的，富有机智和正义感的科学家形象也深入人心，更直接影响了后来的戏剧《哥本哈根》。从以上的描述可以见到，对这件事的看法在短短几年中产生了多少极端不同的看法，这在科学史上几乎独一无二。

1992 年披露了一件非常重要的史料，那就是海森堡他们当初被囚在 Farm Hall 的窃听录音抄本。这个东东长期来是保密的，只能在几个消息灵通者的著作中见到一星半点。1992 年这份被称为 Farm Hall Transcript 的文件解密，由加州大学伯克利出版，引起轰动。Powers 就借助了这份新资料，写出了他的著作。

《海森堡的战争》一书被英国记者兼剧作家 Michael Frayn 读到，后者为其所深深吸引，不由产生了一个巧妙的戏剧构思。在“海森堡之谜”的核心，有一幕非常神秘，长期为人们争议不休的场景，那就是 1941 年他对玻尔访问。当时丹麦已被德国占领，纳粹在全欧洲的攻势势如破竹。海森堡那时意识到了原子弹制造的可能性，他和魏扎克两人急急地假借一个学术会议的名头，跑到哥本哈根去会见当年的老师玻尔。这次会见的目的和谈话内容一直不为人所知，玻尔本人对此隐讳莫深，绝口不谈。唯一能够确定的就是当时两人闹得很不愉快，玻尔和海森堡之间原本情若父子，但这次见面后多年的情义一朝了断，只剩下表面上的客气。发生了什么事？

有人说，海森堡去警告玻尔让他注意德国的计划。有人说海森堡去试图把玻尔也拉进他们的计划中来。有人说海森堡想探听盟军在这方面的进展如何。有人说海森堡感到罪孽，要向玻尔这位“教皇”请求宽恕……

Michael Frayn 着迷于 Powers 的说法，海森堡去到哥本哈根向玻尔求证盟军在这方面的进展，并试图达成协议，双方一起“破坏”这个可怕的计划。也就是说，任何一方的科学家都不要积极投入到原子弹这个领域中去，这样大家扯平，人类也可以得救。这几乎是一幕可遇而不可求的戏剧场景，种种复杂的环境和内心冲突交织在一起，纠缠成千千情结，组成精彩的高潮段落。一方面海森堡有强烈的爱国热情和服从性，他无法拒绝为德国服务的命令。但海森堡又挣扎于人类的责任感，感受到科学家的道德情怀。而且他又是那样生怕盟军也造出原子弹，给祖国造成永远的伤痕。海森堡面对玻尔，那个伟大的老师玻尔，那个他当作父亲一样看待的玻尔，曾经领导梦幻般哥本哈根派的玻尔，却也是“敌人”玻尔，视德国为仇敌的玻尔，却又教人如何开口，如何遣词……少年的回忆，物理上的思索，敬爱的师长，现实的政治，祖国的感情，人类的道德责任，战争年代……这些融在一起会产生怎样的语言和思绪？还有比这更杰出的戏剧题材吗？

《哥本哈根》的第一幕中为海森堡安排了如此的台词：

“玻尔，我必须知道（盟军的计划）！我是那个能够作出最后决定的人！如果盟军也在制造炸弹，我正在为我的祖国作出怎样的选择？……要是一个人认为如果祖国做错了，他就不应该爱她，那是错误的。德意志是生我养我的地方，是我长大成人的地方，她是我童年时的一张张面孔，是我跌倒时把我扶起的那双双大手，是鼓起我的勇气支持我前进的那些声音，是和我内心直接对话的那些灵魂。德国是我孀居的母亲和难缠的兄弟，德国是我的妻子，是我的孩子，我必须知道我正在为她作出怎样的决定！是又一次的失败？又一场恶梦，如同伴随我成长起来的那个一样的恶梦？玻尔，我在慕尼黑的童年结束在无政府和内战中，我们的孩子们是不是要再一次挨饿，就像我们当年那样？他们是不是要像我那样，在寒冷的冬夜里手脚并用地爬过敌人的封锁线，在黑暗的掩护下于雪地中匍匐前进，只是为了给家里找来一些食物？他们是不是会像我 17 岁那年时，整个晚上守着惊恐的犯人，长夜里不停地和他们说话，因为他们一早就要被处决？”

这样的残酷的两难，造成观众情感上的巨大冲击，展示整个复杂的人性。戏剧本质上便是一连串的冲突，如此精彩的题材，已经注定了这是一出伟大的戏剧作品。但从历史上来说，这样的美妙景象却是靠不住的。Michael Frayn 后来说他认为 Powers 有道理，至少他掌握了以前人们没有的资料，也就是 Farm Hall Transcript，可惜他的这一宝似乎押错了。

8-5

即使摆脱了爱因斯坦，量子论也没有多少轻松。关于测量的难题总是困扰着多数物理学家，只不过他们通常乐得不去想它。不管它有多奇怪，太阳还是每天升起，不是吗？周末仍然有联赛，那个足球还是硬梆梆的。你的工资不会因为不确定性而有奇妙的增长。考试交白卷而依然拿到学分的机会仍旧是没有的。你化成一团概率波直接穿过墙壁而走到房子外面，怎么说呢，不是完全不可能的，但机会是如此之低，以致你数尽了恒河沙，轮回了亿万世，宇宙入灭而又涅槃了无数回，还是难得见到这种景象。

确实是这样，电子是个幽灵就让它去好了。只要我们日常所见的那个世界实实在在，这也就不会增添乐观的世人太多的烦恼。可是薛定谔不这么想，如果世界是建立在幽灵的基础上，谁说世界本身不就是个幽灵呢？量子论玩的这种瞒天过海的把戏，是别想逃过他的眼睛的。

EPR 出台的时候，薛定谔大为高兴，称赞爱因斯坦“抓住了量子论的小辫子。”受此启发，他在 1935 年也发表了一篇论文，题为《量子力学的现状》(Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik)，文中的口气非常讽刺。总而言之，是和哥本哈根派誓不两立的了。

在论文的第 5 节，薛定谔描述了那个常被视为恶梦的猫实验。好，哥本哈根派说，没有测量之前，一个粒子的状态

模糊不清，处于各种可能性的混合叠加，是吧？比如一个放射性原子，它何时衰变是完全概率性的。只要没有观察，它便处于衰变/不衰变的叠加状态中，只有确实地测量了，它才随机选择一种状态而出现。

好得很，那么让我们把这个原子放在一个不透明的箱子中让它保持这种叠加状态。现在薛定谔想象了一种结构巧妙的精密装置，每当原子衰变而放出一个中子，它就激发一连串连锁反应，最终结果是打破箱子里的一个毒气瓶，而同时在箱子里的还有一只可怜的猫。事情很明显：如果原子衰变了，那么毒气瓶就被打破，猫就被毒死。要是原子没有衰变，那么猫就好好地活着。

自然的推论：当它们都被锁在箱子里时，因为我们没有观察，所以那个原子处在衰变/不衰变的叠加状态。因为原子的状态不确定，所以猫的状态也不确定，只有当我们打开箱子察看，事情才最终定论：要么猫四脚朝天躺在箱子里死掉了，要么它活蹦乱跳地“喵喵”直叫。问题是，当我们没有打开箱子之前，这只猫处在什么状态？似乎唯一的可能就是，它和我们的原子一样处在叠加态，这只猫当时陷于一种死/活的混合。

现在就不光是原子是否幽灵的问题了，现在猫也变成了幽灵。一只猫同时又是死的又是活的？它处在不死不活的叠加态？这未免和常识太过冲突，同时在生物学角度来讲也是奇谈怪论。如果打开箱子出来一只活猫，那么要是它能说话，它会不会描述那种死/活叠加的奇异感受？恐怕不太可能。

薛定谔的实验把量子效应放大到了我们的日常世界，现在量子的奇特性质牵涉到我们的日常生活了，牵涉到我们心爱的宠物猫究竟是死还是活的问题。这个实验虽然简单，却比 EPR 要辛辣许多，这一次扎得哥本哈根派够疼的。他们不得不退一步以咽下这杯苦酒：是的，当我们没有观察的时候，那只猫的确是又死又活的。

不仅仅是猫，一切的一切，当我们不去观察的时候，都是处在不确定的叠加状态的，因为世间万物也都是由服从不确定性原理的原子组成，所以一切都不能免俗。量子派后来有一个被哄传得很广的论调说：“当我们不观察时，月亮是不存在的”。这稍稍偏离了本意，准确来说，因为月亮也是由不确定的粒子组成的，所以如果我们转过头不去看月亮，那一大堆粒子就开始按照波函数弥散开去。于是乎，月亮的边缘开始显得模糊而不确定，它逐渐“融化”，变成概率波扩散到周围的空间里去。当然这么大一个月亮完全融化成空间中的概率是需要很长很长时间的，不过问题的实质是：要是不观察月亮，它就从确定的状态变成无数不确定的叠加。不观察它时，一个确定的，客观的月亮是不存在的。但只要一回头，一轮明月便又高悬空中，似乎什么事也没发生过一样。

不能不承认，这听起来很有强烈的主观唯心论的味道。虽然它其实和我们通常理解的那种哲学理论有一定区别，不过讲到这里，许多人大概都会自然而然地想起贝克莱（George Berkeley）主教的那句名言：“存在就是被感知”（拉丁文：Esse Est Percipi）。这句话要是稍微改一改讲成“存在就是被测量”，那就和哥本哈根派的意思不离了。贝克莱在哲学史上的地位无疑是重要的，但人们通常乐于批判他，我们的哥本哈根派是否比他走得更远呢？好歹贝克莱还认为事物是连续客观地存在的，因为总有“上帝”在不停地看着一切。而量子论？“陛下，我不需要上帝这个假设”。

与贝克莱互相辉映的东方代表大概要算王阳明。他在《传习录·下》中也说过一句有名的话：“你未看此花时，此花与汝同归于寂；你来看此花时，则此花颜色一时明白起来……”如果王阳明懂量子论，他多半会说：“你未观测此花时，此花并未实在地存在，按波函数而归于寂；你来观测此花时，则此花波函数发生坍缩，它的颜色一时变成明白的实在……”测量即是理，测量外无理。

当然，我们无意把这篇史话变成纯粹的乏味的哲学探讨，经验往往表明，这类空洞的议论最终会变成毫无意义，让人昏昏欲睡的鸡肋文字。我们还是回到具体的问题上来，当我们不去观察箱子内的情况的时候，那只猫真的“又是活的又是死的”？

这的确是一个让人尴尬和难以想象的问题。霍金曾说过：“当我听说薛定谔的猫的时候，我就跑去拿枪。”薛定谔本

人在论文里把它描述成一个“恶魔般的装置”（diabolische，英文 diabolical，玩 Diablo 的人大概能更好地理解它的意思）。我们已经见识到了量子论那种令人惊异甚至瞠目结舌的古怪性质，但那只是在我们根本不熟悉也没有太大兴趣了解的微观世界而已，可现在它突然要开始影响我们周围的一切了？一个人或许能接受电子处在叠加状态的事实，但一旦谈起宏观的事物比如我们的猫也处在某种“叠加”状态，任谁都要感到一点畏首畏尾。不过，对于这个问题，我们现在已经知道许多，特别是近十年来有着许多杰出的实验来证实它的一些奇特的性质。但我们还是按着我们史话的步伐，一步步地来探究这个饶有趣味的话题，还是从哥本哈根解释说起吧。

猫处于死/活的叠加态？人们无法接受这一点，最关键的地方就在于：经验告诉我们这种奇异的二重状态似乎是不大可能被一个宏观的生物，比如猫或者我们自己，所感受到的。还是那句话：如果猫能说话，它会描述这种二象性的感觉吗？如果它侥幸生存，它会不会说：“是的，我当时变成了一缕概率波，我感到自己弥漫在空间里，一半已经死去了，而另一半还活着。这真是令人飘飘然的感觉，你也来试试看？”这恐怕没人相信。

好，我们退一步，猫不会说话，那么我们把一个会说话的人放入箱子里面去。当然，这听起来有点残忍，似乎是纳粹的毒气集中营，不过我们只是在想象中进行而已。这个人如果能生还，他会那样说吗？显然不会，他肯定无比坚定地宣称，自己从头到尾都活得好好的，根本没有什么半生半死的状态出现。可是，这次不同了，因为他自己已经是一个观察者了啊！他在箱子里不断观察自己的状态，从而不停地触动自己的波函数坍缩，我们把一个观测者放进了箱子里！

可是，奇怪，为什么我们对猫就不能这样说呢？猫也在不停观察着自己啊。猫和人有什么不同呢？难道区别就在于一个可以出来愤怒地反驳量子论的论调，一个只能“喵喵”叫吗？令我们吃惊的是，这的确可能是至关重要的分别！人可以感觉到自己的存活，而猫不能，换句话说，人有能力“测量”自己活着与否，而猫不能！人有一样猫所没有的东西，那就是“意识”！因此，人能够测量自己的波函数使其坍缩，而猫无能为力，只能停留在死/活叠加任其发展的波函数中。

意识！这个字眼出现在物理学中真是难以想象。如果它还出自一位诺贝尔物理学奖得主之口，是不是令人晕眩不已？难道，这世界真的已经改变了么？

半死半活的“薛定谔的猫”是科学史上著名的怪异形象之一，和它同列名人堂的也许还有芝诺的那只永远追不上的乌龟，拉普拉斯的那位无所不知从而预言一切的老智者，麦克斯韦的那个机智地控制出入口，以致快慢分子逐渐分离，系统熵为之倒流的妖精，被相对论搞得头昏脑涨，分不清谁是哥哥谁是弟弟的那对双生子，等等等等。薛定谔的猫在大众中也十分受欢迎，常常出现在剧本，漫画和音乐中，虽然比不上同胞 Garfield 或者 Tom，也算是有点人气。有意思的是，它常常和“巴甫洛夫的狗”作为搭档一唱一和出现。它最长脸的一次大概是被“恐惧之泪”(Tears for Fears)，这个在 80 年代红极一时的乐队作为一首歌的标题演唱，虽然歌词是“薛定谔的猫死在了这个世界”。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（五）

《哥本哈根》一剧于 1998 年 5 月 21 日于伦敦皇家剧院首演，随后进军法国和百老汇，引起轰动，囊括了包括英国标准晚报奖（Evening Standard），法国莫里哀戏剧奖和美国东尼奖等一系列殊荣。剧本描写玻尔和夫人玛格丽特，还有海森堡三人在死后重聚在某个时空，不断地回首前尘往事，追寻 1941 年会面的前因后果。时空维度的错乱，从各个角度对前生的探寻，简洁却富于深意的对话，平淡到极点的布景，把气氛塑造得迷离惆怅，如梦如幻，从戏剧角度说极其出色，得到好评如潮。后来 PBS 又把它改编成电视剧播出，获得的成功是巨大的。

但 Thomas Powers《海森堡的战争》一书的命运却大相径庭。甚至早在《哥》剧大红大紫之前，它便开始被许多历史学家所批评，一时间在各种学术期刊上几乎成为众矢之的。因为对 Farm Hall Transcript 稍加深入的研究很快就表明事实完全和 Powers 说的不一样。海森堡的主要传记作者 Cassidy 在为 Nature 杂志写的书评里说：“……该作者在研究中过于肤

浅，对材料的处理又过于带有偏见，以致于他的精心论证一点也不令人信服。(Nature V363)”而 Science 杂志的评论则说：“这本书，就像铀的临界质量一样，需要特别小心地对待。(Science V259)”纽约大学的 Paul Forman 在《美国历史评论》杂志上说：“(这本书)更适合做一本小说，而不是学术著作。”他统计说在英美的评论者中，大约 3/5 的人完全不相信 Powers 的话，1/5 的人认为他不那么具有说服力，只有 1/5 倾向于赞同他的说法。

而在 1998 年出版的《海森堡与纳粹原子弹计划》一书中，历史学家 Paul Rose 大约是过于义愤填膺，用了许多在学者中少见的尖刻词语来评价 Powers 的这本书，诸如“彻头彻尾虚假的 (entirely bogus)”、“幻想 (fantasy)”、“学术上的灾难 (scholarly disaster)”、“臃肿的 (elephantine)”……等等。

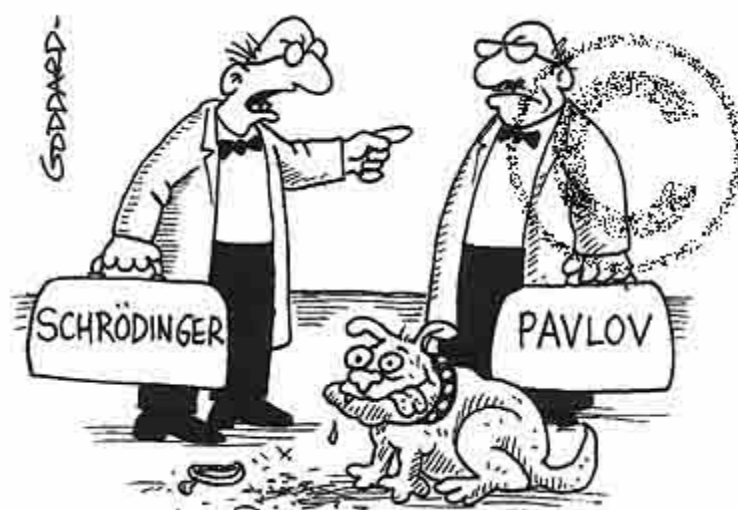
OK，不管人们怎么说，我们还是回过头来看看海森堡宣称的一切。首先非常明显可以感受到的就是他对于德国物理学的一种极其的自负，这种态度是如此明显，以致后来一位德国教授评论时都说：“我真不敢相信他们竟能有如此傲慢的态度。”海森堡大约是死也不肯承认德国人在理论上“技不如人”的了，他说直到 1942 年双方的进展还“基本相当”，这本身就很奇怪。盟国方面在 1942 年已经对原子弹的制造有了非常清楚的概念，他们明确地知道正确的临界质量参数，他们已经做了大量的实验得到了充分的相关数据。到了 1942 年 12 月，费米已经在芝加哥大学的网球场房里建成了世界上第一个可控反应堆，而德国直到战争结束也只在这方面得到了有限的进展。一旦万事具备，曼哈顿计划启动，在盟国方面整个工程就可以顺利地地上马进行，而德国方面显然不具备这样的能力。

海森堡的这种骄傲心理是明显的，当然这不是什么坏事，但似乎能够使我们更好地揣摩他的心理。当广岛的消息传来，众人都陷入震惊。没心计的哈恩对海森堡说：“你只是一个二流人物，不如卷铺盖回家吧。”而且……前后说了两次。海森堡要是可以容忍“二流”，那也不是海森堡了。

早在 1938 年，海森堡因为不肯放弃教授所谓“犹太物理学”而被党卫军报纸称为“白犹太人”，他马上通过私人关系找到希姆莱要求澄清，甚至做好了离国的准备。海森堡对索末菲说：“你知道离开德国对我来说是痛苦的事情，不是万不得已我不会这样做。但是，我也没有兴趣在这里做一个二等公民。”海森堡对个人荣誉还是很看重的。

但是，一流的海森堡却在计算中犯了一个末流，甚至不入流的错误，直接导致了德国对临界质量的夸大估计。这个低级错误实在令人吃惊，至今无法理解为何如此，或许，一些偶然的事件真的能够改变历史吧？（待续）

贴图：巴甫洛夫的狗吃了薛定谔的猫



第九章 测量问题

9-1

我们已经在科莫会议上认识了冯·诺伊曼 (John Von Neumann)，这位现代计算机的奠基人之一，20 世纪最杰出的数学家。关于他的种种传说在科学界就像经久不息的传奇故事，流传得越来越广越来越玄：说他 6 岁就能心算 8 位数乘法啦，8 岁就懂得微积分啦，12 岁就精通泛函分析啦，又有人说他过目不忘，精熟历史，有人举出种种匪夷所思的例子来说明他的心算能力如何惊人。有人说他 10 岁便通晓 5 种语言，并能用每一种来写搞笑的打油诗，这一数字在另一些人口中变成了 7 种。不管怎么样，每个人都承认，这家伙是一个百年罕见的天才。

要一一列举他的杰出成就得花上许多时间：从集合论到数学基础方面的研究；从算子环到遍历理论，从博弈论到数值分析，从计算机结构到自动机理论，每一项都可以大书特书。不过我们在这里只关注他对于量子论的贡献，仅仅这一项也已经足够让他在我们的史话里占有一席之地。

我们在前面已经说到，狄拉克在 1930 年出版了著名的《量子力学原理》教材，完成了量子力学的普遍综合。但从纯数学上来说，量子论仍然缺乏一个共同的严格基础，这一缺陷便由冯诺伊曼来弥补。1926 年，他来到哥廷根，担任著名的希尔伯特的助手，他们俩再加上诺戴姆不久便共同发表了《量子力学基础》的论文，将希尔伯特的算子理论引入量子论中，将这一物理体系从数学上严格化。到了 1932 年，冯诺伊曼又发展了这一工作，出版了名著《量子力学的数学基础》。这本书于 1955 年由普林斯顿推出英文版，至今仍是经典的教材。我们无意深入数学中去，不过冯诺伊曼证明了几个很有意思的结论，特别是关于我们的测量行为的，这深深影响了一代物理学家对波函数坍缩的看法。

我们还对上一章困扰我们的测量问题记忆犹新：每当我们一观测时，系统的波函数就坍缩了，按概率跳出来一个实际的结果，如果不观测，那它就按照方程严格发展。这是两种迥然不同的过程，后者是连续的，在数学上可逆的，完全确定的，而前者却是一个“坍缩”，它随机，不可逆，至今也不清楚内在的机制究竟是什么。这两种过程是如何转换的？是什么触动了波函数这种剧烈的变化？是“观测”吗？但是，我们这样讲的时候，用的语言是日常的，暧昧的，模棱两可的。我们一直理所当然地使用“观测”这个词语，却没有给它下一个精确的定义。什么样的行为算是一次“观测”？如果说睁开眼睛看算是一次观测，那么闭上眼睛用手去摸呢？用棍子去捅呢？用仪器记录呢？如果说人可以算是“观测者”，那么猫呢？一台计算机呢？一个盖革计数器又如何？

冯诺伊曼敏锐地指出，我们用于测量目标的那些仪器本身也是由不确定的粒子所组成的，它们自己也拥有自己的波函数。当我们用仪器去“观测”的时候，这只会把仪器本身也卷入到这个模糊叠加态中间去。怎么说呢，假如我们想测量一个电子是通过了左边还是右边的狭缝，我们用一台仪器去测量，并用指针摇摆的方向来报告这一结果。但是，令人哭笑不得的是，因为这台仪器本身也有自己的波函数，如果我们不“观测”这台仪器本身，它的波函数便也陷入一种模糊的叠加态中！诺伊曼的数学模型显示，当仪器测量电子后，电子的波函数坍缩了不假，但左/右的叠加只是被转移到了仪器那里而已。现在是我们的仪器处于指针指向左还是右的叠加状态了！假如我们再用仪器 B 去测量那台仪器 A，好，现在 A 的波函数又坍缩了，它的状态变成确定，可是 B 又陷入模糊不定中……总而言之，当我们用仪器去测量仪器，这整个链条的最后一台仪器总是处在不确定状态中，这叫做“无限后退” (infinite regression)。从另一个角度看，假如我们把用于测量的仪器也加入到整个系统中去，这个大系统的波函数从未彻底坍缩过！

可是，我们相当肯定的是，当我们看到了仪器报告的结果后，这个过程就结束了。我们自己不会处于什么荒诞的叠加态中去。当我们的的大脑接受到测量的信息后，game over，波函数不再捣乱了。

难道说，人类意识 (Consciousness) 的参予才是波函数坍缩的原因？只有当电子的随机选择结果被“意识到了”，它才真正地变为现实，从波函数中脱胎而出来到这个世界上。而只要它还没有“被意识到”，波函数便总是留在不确定的状态，只不过从一个地方不断地往最后一个测量仪器那里转移罢了。在诺伊曼看来，波函数可以看作希尔伯特空间中的一个矢

量，而“坍缩”则是它在某个方向上的投影。然而是什么造成这种投影呢？难道是我们的自由意识？

换句话说，因为一台仪器无法“意识”到自己的指针是指向左还是指向右的，所以它必须陷入左/右的混合态中。一只猫无法“意识”到自己是活着还是死了，所以它可以陷于死/活的混合态中。但是，你和我可以“意识”到电子究竟是左还是右，我们是生还是死，所以到了我们这里波函数终于彻底坍缩了，世界终于变成现实，以免给我们的意识造成混乱。

疯狂？不理性？一派胡言？难以置信？或许每个人都有这种震惊的感觉。自然科学，这最骄傲的贵族，宇宙万物的立法者，对自然终极奥秘孜孜不倦的探险家，这个总是自诩为最客观，最严苛、最一丝不苟、最不能容忍主观意识的法官，现在居然要把人类的意识，或者换个词说，灵魂，放到宇宙的中心！哥白尼当年将人从宇宙中心驱逐了出去，而现在他们又改头换面地回来了？这足以让每一个科学家毛骨悚然。

不，这一定是胡说八道，说这话的人肯定是发疯了，要不就是个物理白痴。物理学需要“意识”？这是本世纪最大的笑话！但是，且慢，说这话的人也许比你聪明许多，说不定，还是一位诺贝尔物理学奖得主？

尤金·维格纳（Eugene Wigner）于1902年11月17日出生于匈牙利布达佩斯。他在一间路德教会中学上学时认识了冯诺伊曼，后者是他的学弟。两人一个更擅长数学，一个更擅长物理，在很长时间里是一个相当互补的组合。维格纳是20世纪最重要的物理学家之一，他把群论应用到量子力学中，对原子核模型的建立起到了至关重要的作用。他和狄拉克、约尔当等人一起成为量子场论的奠基人，顺便说一句，他的妹妹嫁给了狄拉克，因而成为后者的大舅子。他参与了曼哈顿计划，在核反应理论方面有着突出的贡献。1963年，他被授予诺贝尔物理奖金。

对于量子论中的观测问题，维格纳的意见是：意识无疑在触动波函数中担当了一个重要的角色。当人们还在为薛定谔那只倒霉的猫而争论不休的时候，维格纳又出来插了一个更大的马蜂窝，这就是所谓的“维格纳的朋友”。

“维格纳的朋友”是他所想象的某个熟人（我猜想其原型不是狄拉克就是冯诺伊曼！），当薛定谔的猫在箱子里默默地等待命运的判决之时，这位朋友戴着一个防毒面具也同样呆在箱子里观察这只猫。维格纳本人则退到房间外面不去观测箱子里到底发生了什么。现在，对于维格纳来说，他对房间里的情况一无所知，他是不是可以假定箱子里处于一个（活猫+高兴的朋友）AND（死猫+悲伤的朋友）的混合态呢？可是，当他事后询问那位朋友的时候，后者肯定会否认这一种叠加状态。维格纳总结道，当朋友的意识被包含在整个系统中的时候，叠加态就不适用了。即使他本人在门外，箱子里的波函数还是因为朋友的观测而不断地被触动，因此只有活猫或者死猫两个纯态的可能。

维格纳论证说，意识可以作用于外部世界，使波函数坍缩是不足为奇的。因为外部世界的变化可以引起我们意识的改变，根据牛顿第三定律，作用与反作用原理，意识也应当能够反过来作用于外部世界。他把论文命名为《对于灵肉问题的评论》（Remarks on the mind-body question），收集在他1967年的论文集里。

量子论是不是玩得过火了？难道“意识”，这种虚无飘渺的概念真的要占领神圣的物理领域，成为我们理论的一个核心吗？人们总在内心深处排斥这种“恐怖”的想法，柯文尼（Peter Coveney）和海菲尔德（Roger Highfield）写过一本叫做《时间之箭》（The arrow of time）的书，其中讲到了维格纳的主张。但在这本书的中文版里，译者特地加了一个“读者存照”，说这种基于意识的解释是“牵强附会”的，它声称观测完全可以由一套测量仪器作出，因此是“完全客观”的。但是这种说法显然也站不住脚，因为仪器也只不过给冯诺伊曼的无限后退链条增添了一个环节而已，不观测这仪器，它仍然处在叠加的波函数中。

可问题是，究竟什么才是“意识”？这带来的问题比我们的波函数本身还要多得多，是一个得不偿失的策略。意识是独立于物质的吗？它服从物理定律吗？意识可以存在于低等动物身上吗？可以存在于机器中吗？更多的难题如潮水般地涌来把无助的我们吞没，这滋味并不比困扰于波函数怎样坍缩来得好受多少。

事实上，只有没事干的哲学家才对这种问题津津乐道，真正的脑科学家和神经科学家对此往往是不屑一顾或者漠不关心。当意识问题被拉入对于量子论的解释后，许多介绍物理的书籍里都煞有介事地出现了大脑的剖面图，不厌其烦地讲解皮层的各个分区，神经结的连接，海马体……这的确是有趣的景象！接下来，我们不如对这个意识问题做几句简单的探讨，不过我们并不想在这上面花太多的时间，因为我们的史话还要继续前进，仍有一些新奇的东西正等着我们。

在这节的最后要特别声明的是，关于“意识作用于外部世界”只是一种可能的说法而已。这并不意味着种种所谓的“特异功能”，“心灵感应”，“意念移物”，“远距离弯曲勺子”等等有了理论基础。对于这些东西，大家最好还是坚持“特别异乎寻常的声明需要有特别坚强的证据支持”这一原则，要求对每一个个例进行严格的，可重复的双盲实验。就我所知，还没有一个特异功能的例子通过了类似的检验。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（六）

计算临界质量的大小本质上是一个统计问题。为了确保在过多的中子逃逸而使链式反应停止之前有足够的铀 235 分子得到分裂，它至少应该能保证 2^{80} 个分子（大约 1 摩尔）进行了反应，也就是维持 80 次分裂。这个范围是多大呢？这相当于问，一个人（分子）在随机地前进并折返了 80 次之后大约会停留在多大的半径里。这是非常有名的“醉鬼走路”问题，如果你读过盖莫夫的老科普书《从一到无穷大》，也许你还会对它有点印象。海森堡就此算出了一个距离：54 厘米，这相当于需要 13 吨铀 235，而在当时要分离出如此之多是难以想象的。

但是，54 厘米这个数字是一个上限，也就是说，在最坏的情况下才需要 54 厘米半径的铀 235。实际上在计算中忽略了许多具体情况比如中子的吸收，或者在少得多的情况下也能够引起链式反应，还有种种海森堡因为太过“聪明”而忽略的重要限制条件。海森堡把一个相当复杂的问题过分简化，从他的计算中可以看出，他对快中子反应其实缺乏彻底的了解，这一切都导致他在报告中把几吨的铀 235 当作一个下限，也就是“最少需要”的质量，而且直到广岛原子弹爆炸后还带着这一观点（他不知道，佩尔斯在 1939 年已经做出了正确的结果！）。

这样一个错误，不要说是海森堡这样的一流物理学家，哪怕是一个普通的物理系大学生也不应该犯下。而且竟然没有人对他的结果进行过反驳！这未免让一些人浮想联翩，认为海森堡“特地”炮制了这样一个错误来欺骗上头从而阻止原子弹的制造。可惜从一切的情况来看，海森堡自己对此也是深信不疑的。

1945 年 8 月 6 日，被囚在 Farm Hall 的德国科学家们被告知广岛的消息，各个震惊不已。海森堡一开始评论说：“我一点也不相信这个原子弹的消息，当然我可能错了。我以为他们（盟国）可能有 10 吨的富铀，但没想到他们有 10 吨的纯铀 235！”海森堡仍然以为，一颗核弹要几吨的铀 235。哈恩对这个评论感到震惊，因为他原以为只要很少的铀就可以制造炸弹（这是海森堡以前说过的，但那是指一个“反应堆炸弹”，也就是反应堆陷入不稳定而变成爆炸物，哈恩显然搞错了）。海森堡纠正了这一观点，然后猜测盟国可能找到了一种有效地分离同位素的办法（他仍然以为盟国分离了那么多铀 235，而不是自己的估计错了！）。

9 点整，众人一起收听了 BBC 的新闻，然后又展开热烈讨论。海森堡虽然作了一些正确的分析，但却又提出了那个“54 厘米”的估计。第二天，众人开始起草备忘录。第三天，海森堡和沃兹讨论了钚炸弹的可能性，海森堡觉得钚可能比想象得更容易分裂（他从报纸上得知原子弹并不大），但他自己没有数据，因为德国没有反应堆来生产钚。直到此时，海森堡仍然以为铀弹需要几吨的质量才行。（这个专题再有一节就结束了，呵呵。）

9-2

意识使波函数坍缩？可什么才是意识呢？这是被哲学家讨论得最多的问题之一，但在科学界的反应却相对冷淡。在

心理学界，以沃森（John B. Watson）和斯金纳（B.F. Skinner）等人所代表的行为主义学派通常乐于把精神事件分解为刺激和反应来研究，而忽略无法用实验确证的“意识”本身。的确，甚至给“意识”下一个准确的定义都是困难的，它产生于何处，具体活动于哪个部分，如何作用于我们的身体都还是未知之谜。人们一般能够达成共识的是，并非大脑的所有活动都是“意识”，事实上大脑的许多活动是我们本身意识不到的，我们通常只注意到它的输出结果，而并不参控它运行的整个过程。当我的耳边响起《第九交响曲》时，我的眼前突然不由浮现出我在中学时代的童年时光，但我自己一点都不知道我的大脑是如何具体地一步步完成了这个过程，这是在我的“下意识”中完成的！有时候我甚至会奇怪：我为什么会这样想呢？另外，许多人也承认，“意识”似乎与我们的“注意”密切相关，它同时还要求一定的记忆能力来完成前后连贯的动作。

可以肯定的是，意识不是一种具体的物质实在。没有人在进行脑科手术时在颅骨内发现过任何有形的“意识”的存在。它是不是脑的一部分的作用体现呢？看起来应该如此，但具体哪个部分负责“意识”却是众说纷纭。有人说是大脑，因为大脑才有种种复杂的交流性功能，而掌握身体控制的小脑看起来更像一台自动机器。我们在学习游泳或者骑自行车的时候，一开始总是要战战兢兢，注意身体每个姿势的控制，每个动作前都要想想好。但一旦熟练以后，小脑就接管了身体的运动，把它变成了一种本能般的行为。比如骑惯自行车的人就并不需要时时“意识”到他的每个动作。事实上，我们“意识”的反应是相当迟缓的（有实验报告说有半秒的延迟），当一位钢琴家进行熟练的演奏时，他往往是“不假思索”，一气呵成，从某种角度来说，这已经不能称作“完全有意识”的行为，就像我们平常说的：“熟极而流，想都不想”。而且值得注意的是，这种后天学习的身体技能往往可以保持很长时间不被遗忘。

也有人说，大脑并没有意识，而只是指挥身体的行动。在一个实验中，我们刺激大脑的某个区域使得试验者的右手运动，但试验者本身“并不想”使它运动！那么，当我们“有意识”地想要运动我们的右手时，必定在某处由意识产生了这种欲望，然后通过电信号传达给特定的皮层，最后才导致运动本身。实验者认为中脑和丘脑是这种自由意识所在。但也有别人认为是网状体，或者海马体的。很多人还认为，大脑左半球才可以称得上“有意识”，而右半球则是自动机。

这些具体的争论且放在一边不管，我们站高一点来看问题：意识在本质上是什么东西呢？它是不是某种神秘的非物质世界的幽灵，完全脱离我们的身体大脑而存在，只有当它“附体”在我们身上时，我们才会获得这种意识呢？显然绝大多数科学家都不会认同这种说法，一种心照不宣的观点是，意识是一种结构模式，它完全基于物质基础（我们的脑）而存在，但却需要更高层次的规律去阐释它。这就是所谓的“整体论”（Holism）的解释。

什么是意识？这好比问：什么是信息？一个消息是一种信息，但是，它的载体本身并非信息，它所蕴涵的内容才是。我告诉你：“湖人队今天输球了”，这8个字本身并不是信息，它的内容“湖人队输球”才是真正的信息。同样的信息完全可以用另外的载体来表达，比如写一行字告诉你，或者发一个E-Mail给你，或者做一个手势。所以，研究载体本身并不能得出对相关信息有益的结论，就算我把这8个字拆成一笔一划研究个透彻，这也不能帮助我了解“湖人队输球”的意义何在。信息并不存在于每一个字中，而存在于这8个字的组合中，对于它的描述需要用到比单个字更高层次的语言和规律。

什么是贝多芬的《第九交响曲》？它无非是一串音符的组合。但音符本身并不是交响曲，如果我们想描述这首伟大作品，我们要涉及的是音符的“组合模式”！什么是海明威的《老人与海》？它无非是一串字母的组合。但字母本身也不是小说，它们的“组合模式”才是！为了更好地理解字母不是小说，组合模式才是小说的概念，我们假设用最简单的编码方法来加密《老人与海》这部作品，也就是对于每一个字母用相应的符号来替换。比如说A换成圆圈，B换成方块，C换成三角……等等。现在我们手上有一本充满了古怪符号的书，我问你：这还是《老人与海》吗？大部分人应该承认：还是。因为原书的信息并没有任何的损失，它的“组合模式”仍然原封不动地保留在那里，只不过在基础层面上换了一种表达方式罢了，它完全可以再反编译回来。这本密码版《老人与海》完全等价于原本《老人与海》！

回到我们的问题上来：什么是意识？意识是组成脑的原子群的一种“组合模式”！我们脑的物质基础和一块石头没什么不同，是由同样的碳原子、氢原子、氧原子……组成的。构成我们脑的电子和构成一块石头的电子完全相同，就算把它们相互调换，也不会造成我们的脑袋变成一块石头的奇观。我们的意识，完全建筑在我们脑袋的结构模式之上！只要

一堆原子按照特定的方式排列起来，它就可以构成我们的意识，就像只要一堆字母按照特定的方式排列起来，就可以构成《老人与海》一样。这里并不需要某个非物质的“灵魂”来附体，就如你不会相信，只有当“海明威之魂”附在一堆字母上才会使它变成《老人与海》一样。单个脑细胞显然不能意识到任何东西，但是许多脑细胞按照特定的模式组合起来，“意识”就在组合中产生了。

好，到此为止，大部分人还是应该对这种相当唯物的说法感到满意的。但只要再往下合理地推论几步，许多人可能就要觉得背上出冷汗了。如果“意识”完全取决于原子的“组合模式”的话，第一个推论就是：它可以被复制。出版社印刷成千上万本的《老人与海》，为什么原子不能被复制呢？假如我们的技术发达到一定程度，可以扫描你身体里每一个原子的位置和状态，并在另一个地方把它们重新组合起来的话，这个新的“人”是不是你呢？他会不会拥有和你一样的“意识”？或者干脆说，他和你是不是同一个人？假如我们承认意识完全基于原子排列模式，我们的回答无疑就是 YES！这和“克隆人”是两个概念，克隆人只不过继承了你的基因，而这个“复制人”却拥有你的意识，你的记忆，你的感情，你的一切，他就是你本人！

近几年来，在量子通信方面我们有了极大的突破。把一个未知的量子态原封不动地传输到第三者那里已经成为可能，而且事实上已经有许多具体协议的提出。虽然令人欣慰的是，有一个叫做“不可复制定理”（no cloning theorem, 1982 年 Wootters, Zurek 和 Dieks 提出）的原则规定在传输量子态的同时一定会毁掉原来那个原本。换句话说，量子态只能 cut + paste, 不能 copy + paste, 这阻止了两个“你”的出现。但问题是，如果你“毁掉”，然后在另一个地方“重建”起来，你是否认为这还是“原来的你”？

另一个推论就是：“组合模式”本身并非要特定的物质基础才能呈现。我们已经看到，我们完全可以用另一套符号系统去重写《老人与海》，这并不造成实质的差别。一套电影，我可以用胶片记录，也可以用录像带，VCD, LD 或者 DVD 记录。当然有人会提出异议，说压缩实际上造成了信息的损失，VCD 版的 Matrix 已经不是电影版的 Matrix，其实这无所谓，我们换个比喻说，一张彩色数字照片可以用 RGB 来表示色彩，也可以用另一些表达系统比如说 CMY, HSI, YUV 或者 YIQ 来表示。再比如，任何序列都可以用一些可逆的压缩手法例如 Huffman 编码来压缩，字母也可以用摩尔斯电码来替换，歌曲可以用简谱或者五线谱记录，虽然它们看上去很不同，但其中包含的信息却是相同的！假如你有兴趣，用围棋中的白子代表 0，黑子代表 1，你无疑也可以用铺满整个天安门广场的围棋来拷贝一张 VCD，这是完全等价的！

那么，只要有某种复杂的系统可以包含我们“意识模式”的主要信息或者与其等价，显然我们应该认为，意识并不一定要依赖于我们这个生物有机体的肉身而存在！假设我们大脑的所有信息都被扫描而存入一台计算机中，这台计算机严格地按照物理定律来计算这些分子对于各种刺激的反应而最终求出相应结果以作出回应，那么从理论上说，这台计算机的行为完全等同于我们自身！我们是不是可以说，这台计算机实际上拥有了我们的“意识”？

对于许多实证主义者来说，判定“拥有意识”或者“能思考”的标准便严格地按照这个“模式结构理论”的方法。意识只不过是某种复杂的模式结构，或者说，是在输入和输出之间进行的某种复杂算法。任何系统只要能够模拟这种算法，它就可以被合理地认为拥有意识。和冯·诺伊曼同为现代计算机奠基人的阿兰·图灵（Alan Turing）在 1950 年提出了判定计算机能否像人那般实际“思考”的标准，也就是著名的“图灵检验”。他设想一台超级计算机和一个人躲藏在幕后回答提问者的问题，而提问者则试图分辨哪个是人哪个是计算机。图灵争辩说，假如计算机伪装得如此巧妙，以致没有人可以在实际上把它和一个真人分辨开来的话，那么我们就可以声称，这台计算机和人一样具备了思考能力，或者说，意识（他的原词是“智慧”）。现代计算机已经可以击败国际象棋大师（可怜的卡斯帕罗夫！），真正骗倒一个测试者的日子不知还有多久才能来到，大家自己估计一下好了。

计算机在复杂到了一定程度之后便可以实际拥有意识，持这种看法的人通常被称为“强人工智能派”。在他们看来，人的大脑本质上也不过是一台异常复杂的计算机，只是它不由晶体管或者集成电路构成，而是生物细胞而已。但细胞也得靠细微的电流工作，就算我们尚不完全清楚其中的机制，也没有理由认为有某种超自然的东西在里面。就像薛定谔在他那本名扬四海的小册子《生命是什么》中所做的比喻一样，一个蒸汽机师在第一次看到电动机时会惊讶地发现这机器

和他所了解的热力学机器十分不同，但他会合理地假定这是按照某些他所不了解的原理所运行的，而不会大惊小怪地认为是幽灵驱动了一切。

你可能要问，算法复杂到了何种程度才有资格被称为“意识”呢？这的确对我们理解波函数何时坍缩有实际好处！但这很可能又是一个难题，像那个著名的悖论：一粒沙落地不算一个沙堆，两粒沙落地不算一个沙堆，但10万粒沙落地肯定是一个沙堆了。那么，具体到哪一粒沙落地时才形成一个沙堆呢？对这种模糊性的问题科学家通常不屑解答，正如争论猫或者大肠杆菌有没有意识一样，我们对波函数还是一头雾水！

当然，也有一些更为极端的看法认为，任何执行了某种算法的系统都可以看成具有某种程度的“意识”！比如指南针，人们会论证说，它“喜欢”指着南方，当把它拨乱后，它就出于“厌恶”而竭力避免这种状态，而回到它所“喜欢”的状态里去。以这种带相当泛神论色彩的观点来看，万事万物都有着“意识”，只是程度的不同罢了。意识，简单来说，就是一个系统的算法，它“喜欢”那些大概率的输出，“讨厌”那些小概率的输出。一个有着趋光性的变形虫也有意识，只不过它“意识”的复杂程度比我们人类要低级好多好多倍罢了。

你也许不相信这种说法，但你只要承认“意识”只是在物质基础上的一种排列模式，你便很难否认我们说到的一些奇特性质。甚至连“意识是否可能在死后继续存在”这样的可怕问题，我们的答案也应该是在原则上肯定的！这就好比问，《第九交响曲》在音乐会结束后是不是还继续存在？显然我们只要保留了这个排列信息的资料，我们随时可以用不同的方法把它具体重现出来（任何时候都不缺碳原子、氢原子……）。当然，在我们的技术能力还达不到能够获得全部组合信息并保留它们之前（可能我们永远也没有这个技术），人死后自然就没有意识了，就像音乐会后烧毁了所有的乐谱一样，这个乐曲自然就“失传”了。

你可能已经看得瞠目结舌，不过我们的说法把意识建立在完全客观和唯物的基础上，它实在已经是最不故作神秘的一种！意识不是一个独立的存在，而是系统复杂到了一定程度后表现出来的客观性质。它虽然是一种组合机制，但脱离了具体的物质（暂时肉体是唯一可能）它也无法表现出来。就像软件脱离了硬件无法具体运行一样，意识的体现不可能脱离物质而进行。假如我们被迫去寻找一种独立于物质的“意识”的话，那未免走得太远了。

当然，对于习惯了二元论的公众来说，试图使他们相信灵魂或者意识只是大量神经原的排列和集体行为是教他们吃惊的。对于彻底的唯物论者，试图使他们相信意识作为一种特定的排列信息可能长期保存并在不同平台上重现也是艰难的任务。心理学家和神经科学家克里克（Francis Crick）不得不把这一论断称为“惊人的假说”（见《惊人的假说：灵魂的科学探索》）。但对于大多数科学家来说，这也许是一种理所当然的推论。当然也有某些人认为意识或者灵魂并非复杂性造就的一个客观的副产品，它并不一定能够用算法来模拟，并的确具有某种主动效应！这里面包括牛津大学的罗杰·彭罗斯（Roger Penrose），诸位如果有兴趣了解他的观点，可以阅读其著作《皇帝新脑》（The Emperor's New Mind）。

9-3

我们在“意识问题”那里头晕眼花地转了一圈回来之后，究竟得到了什么收获呢？我们弄清楚猫的量子态在何时产生坍缩了吗？我们弄清意识究竟是如何作用于波函数了吗？似乎都没有，反倒是疑问更多了：如果说意识只不过是脑复杂性的一种表现，那么这个精巧结构是如何具体作用到波函数上的呢？我们是不是已经可以假设，一台足够复杂的计算机也具有坍缩波函数的能力了呢？反而让我们感到困惑的是，似乎这是一条走不通的死路。电子的波函数是自然界在一个最基本层次上的物理规律，而正如我们已经讨论过的那样，“意识”所遵循的规则，是一个大量原子的组合才可能体现出来的整体效果，它很可能处在一个很高的层次上面。就像你不能用处理单词和句子的语法规则去处理小说情节一样，用波函数和意识去互相联系，看起来似乎是一种层面的错乱，好比有人试图用牛顿定律去阐述经济学规则一样。

如果说“意识”使得一切从量子叠加态中脱离，成为真正的现实的话，那么我们不禁要问一个自然的问题：当智能生物尚未演化出来，这个宇宙中还没有“意识”的时候，它的状态是怎样的呢？难道说，第一个有意识的生物的出现才使得

从创生起至那一刹那的宇宙历史在一瞬间成为现实？难道说“智能”的参予可以在那一刻改变过去，而这个“过去”甚至包含了它自身的演化历史？

1979年是爱因斯坦诞辰100周年，在他生前工作的普林斯顿召开了一次纪念他的讨论会。在会上，爱因斯坦的同事，也是玻尔的密切合作者之一约翰·惠勒(John Wheeler)提出了一个相当令人吃惊的构想，也就是所谓的“延迟实验”(delayed choice experiment)。在前面的章节里，我们已经对电子的双缝干涉非常熟悉了，根据哥本哈根解释，当我们不去探究电子到底通过了哪条缝，它就同时通过双缝而产生干涉，反之，它就确实地通过一条缝而顺便消灭干涉图纹。惠勒通过一个戏剧化的思维实验指出，我们可以“延迟”电子的这一决定，使得它在已经实际通过了双缝屏幕之后，再来选择究竟是通过了一条缝还是两条！

这个实验的基本思路是，用涂着半镀银的反射镜来代替双缝。一个光子有一半可能通过反射镜，一半可能被反射，这是一个量子随机过程，跟它选择双缝还是单缝本质上是一样的。把反射镜和光子入射途径摆成45度角，那么它一半可能直飞，另一半可能被反射成90度角。但是，我们可以通过另外的全反射镜，把这两条分开的岔路再交汇到一起。在终点观察光子飞来的方向，我们可以确定它究竟是沿着哪一条道路飞来的。

但是，我们也可以在终点处再插入一块呈45度角的半镀银反射镜，这又会造成光子的自我干涉。如果我们仔细安排位相，我们完全可以使得在一个方向上的光子呈反相而相互抵消，而在一个确定的方向输出。这样的话我们每次都得到一个确定的结果(就像每次都得到一个特定的干涉条纹一样)，根据量子派的说法，此时光子必定同时沿着两条途径而来！

总而言之，如果我们不在终点处插入半反射镜，光子就沿着某一条道路而来，反之它就同时经过两条道路。现在的问题是，是不是要在终点处插入反射镜，这可以在光子实际通过了第一块反射镜，已经快要到达终点时才决定。我们可以在事情发生后再来决定它应该怎样发生！如果说我们是这出好戏的导演的话，那么我们的光子在其中究竟扮演了什么角色，这可以等电影拍完以后再由我们决定！

虽然听上去古怪，但这却是哥本哈根派的一个正统推论！惠勒后来引玻尔的话说，“任何一种基本量子现象只在其被记录之后才是一种现象”，我们是在光子上路之前还是途中来做出决定，这在量子实验中是没有区别的。历史不是确定和实在的——除非它已经被记录下来。更精确地说，光子在通过第一块透镜到我们插入第二块透镜这之间“到底”在哪里，是个什么，是一个无意义的问题，我们没有权利去谈论它，它不是一个“客观真实”！惠勒用那幅著名的“龙图”来说明这一点，龙的头和尾巴(输入输出)都是确定的清晰的，但它的身体(路径)却是一团迷雾，没有人可以说清。

在惠勒的构想提出5年后，马里兰大学的卡洛尔·阿雷(Carroll O Alley)和其同事当真做了一个延迟实验，其结果真的证明，我们何时选择光子的“模式”，这对于实验结果是无影响的(和玻尔预言的一样，和爱因斯坦的相反!)，与此同时慕尼黑大学的一个小组也作出了类似的结果。

这样稀奇古怪的事情说明了什么呢？

这说明，宇宙的历史，可以在它实际发生后才被决定究竟是怎样发生的！在薛定谔的猫实验里，如果我们也能设计某种延迟实验，我们就能在实验结束后再来决定猫是死是活！比如说，原子在1点钟要么衰变毒死猫，要么就断开装置使猫存活。但如果有个延迟装置能够让我们在2点钟来“延迟决定”原子衰变与否，我们就可以在2点钟这个“未来”去实际决定猫在1点钟的死活！

这样一来，宇宙本身由一个有意识的观测者创造出来也不是什么不可能的事情。虽然宇宙的行为在道理上讲已经演化了几百亿年，但某种“延迟”使得它直到被一个高级生物所观察才成为确定。我们的观测行为本身参予了宇宙的创造过程！这就是所谓的“参予性宇宙”模型(The Participatory Universe)。宇宙本身没有一个确定的答案，而其中的生物参予了这个谜题答案的构建本身！

这实际上是某种增强版的“人择原理”（anthropic principle）。人择原理是说，我们存在这个事实本身，决定了宇宙的某些性质为什么是这样的而不是那样的。也就是说，我们讨论所有问题的前提是：事实上已经存在了一些像我们这样的智能生物来讨论这些问题。我们回忆一下笛卡儿的“第一原理”：不管我怀疑什么也好，有一点我是不能怀疑的，那就是“我在怀疑”本身。“我思故我在”！类似的原则也适用于人择原理：不管这个宇宙有什么样的性质也好，它必须要使得智能生物可能存在于其中，不然就没有人来问“宇宙为什么是这样的？”这个问题了。随便什么问题也好，你首先得保证有一个“人”来问问题，不然就没有意义了。

举个例子，目前宇宙似乎是在以一个“恰到好处”的速度在膨胀。只要它膨胀得稍稍快一点，当初的物质就会四散飞开，而无法凝聚成星系和行星。反过来，如果稍微慢一点点，引力就会把所有的物质都吸到一起，变成一团具有惊人的密度和温度的大杂烩。而我们正好处在一个“临界速度”上，这才使得宇宙中的各种复杂结构和生命的诞生成为可能。这个速度要准确到什么程度呢？大约是 10^{55} 分之一，这是什么概念？你从宇宙的一端瞄准并打中在另一端的一只苍蝇（相隔 300 亿光年），所需准确性也不过 10^{30} 分之一。类似的惊人准确的宇宙常数，我们还可以举出几十个。

我们问：为什么宇宙以这样一个速度膨胀？人择原理的回答是：宇宙必须以这样一个速度膨胀，不然就没有“你”来问这个问题了。因为只有以这样一个速度膨胀，生命和智慧才可能诞生，从而使问题的提出成为可能！显然不会有人问：“为什么宇宙以 1 米/秒的速度膨胀？”因为以这个速度膨胀的宇宙是一团火球，不会有人在那里存在。

参予性宇宙是增强的人择原理，它不仅表明我们的存在影响了宇宙的性质，更甚，我们的存在创造了宇宙和它的历史本身！可以想象这样一种情形：各种宇宙常数首先是一个不确定的叠加，只有被观测者观察后才变成确定。但这样一来它们又必须保持在某些精确的范围内，以便创造一个好的环境，令观测者有可能在宇宙中存在并观察它们！这似乎是一个逻辑循环：我们选择了宇宙，宇宙又创造了我们。这件怪事叫做“自指”或者“自激活”（self-exciting），意识的存在反过来又创造了它自身的过去！

请各位读者确信，我写到这里已经和你们一样头大如斗，嗡嗡作响不已。这个理论的古怪差不多已经超出了我们可以承受的心理极限，我们在“意识”这里已经筋疲力尽，无力继续前进了。对此感到不可接受的也绝不仅仅是我们这些门外汉，当时已经大大有名的约翰·贝尔（John Bell，我们很快就要讲到他）就嘟囔道：“难道亿万年来，宇宙波函数一直在等一个单细胞生物的出现，然后才坍缩？还是它还得等多等一会儿，直到出现了一个有资格的，有博士学位的观测者？”要是爱因斯坦在天有灵，看到有人在他的诞辰纪念上发表这样古怪的，违反因果律的模型，不知作何感想？

就算从哥本哈根解释本身而言，“意识”似乎也走得太远了。大多数“主流”的物理学家仍然小心谨慎地对待这一问题，持有一种更为“正统”的哥本哈根观点。然而所谓“正统观念”其实是一种鸵鸟政策，它实际上就是把这个问题抛在一边，简单地假设波函数一观测就坍缩，而对它如何坍缩，何时坍缩，为什么会坍缩不闻不问。量子论只要在实际中管用就行了，我们更为关心的是一些实际问题，而不是这种玄之又玄的阐述！

但是，无论如何，当新物理学触及到这样一个困扰了人类千百年的本体问题核心后，这无疑也激起了许多物理学家们的热情和好奇心。的确有科学家沿着维格纳的方向继续探索，并论证意识在量子论解释中所扮演的地位。这里面的代表人物是伯克利劳伦斯国家物理实验室的美国物理学家亨利·斯塔普（Henry Stapp），他自 1993 年出版了著作《精神，物质和量子力学》（Mind, Matter, and Quantum Mechanics）之后，便一直与别的物理学家为此辩论至今（大家如果有兴趣，可以去他的网页 <http://www-physics.lbl.gov/~stapp/stappfiles.html> 看看他的文章）。这种说法也获得了某些人的支持，去年，也就是 2003 年，还有人（阿姆斯特丹大学的 Dick J. Bierman）宣称用实验证明了人类意识“的确”使波函数坍缩。不过这一派的支持者也始终无法就“意识”建立起有说服力的模型来，对于他们的宣称，我们在心怀惧意的情况下最好还是采取略为审慎的保守态度，看看将来的发展如何再说。

我们沿着哥本哈根派开拓的道路走来，但或许是走得过头了，误入歧途，结果发现在尽头藏着一只叫做“意识”的怪

兽让我们惊恐不已。这已经不是玻尔和哥本哈根派的本意，我们还是退回到大多数人站着的地方，看看还有没有别的道路可以前进。嗯，我们发现的确还有几条小路通向未知的尽头，让我们试着换几条道路走走，看看它是不是会把我们引向光明的康庄大道。不过让我们先在原来的那条路上做好记号，醒目地写下“意识怪兽”的字样并打上惊叹号以警醒后人。好，现在我们出发去另一条道路探险，这条小道看上去笼罩在一片浓雾缭绕中，并且好像在远处分裂成无限条岔路。我似乎已经有不太美妙的预感，不过还是让我们擦擦汗，壮着胆子前去看看吧。

饭后闲话：海森堡和德国原子弹计划（七）

海森堡不久便从报上得知了炸弹的实际重量：200 千克，核心爆炸物只有几千克。他显得烦躁不已，对自己的估计错在何处感到非常纳闷。他对哈特克说：“他们是怎么做到的？如果我们这些曾经干过同样工作的教授们连他们（理论上）是怎么做到的都搞不懂，我感到很丢脸。”德国人讨论了多种可能性，但一直到 14 号，事情才起了决定性的转变。

到了 8 月 14 号，海森堡终于意识到了正确的计算方法（也不是全部的），他在别的科学家面前进行了一次讲授，并且大体上得到了相对正确的结果。他的结论是 6.2 厘米半径——16 千克！而在他授课时，别的科学家对此表现一无所知，他们的提问往往幼稚可笑。德国人为他们的骄傲自大付出了最终的代价。

对此事的进一步分析可以在 1998 年出版的《海森堡与纳粹原子弹计划》（Paul Rose）和 2000 年出版的《希特勒的铀俱乐部》（Jeremy Bernstein）二书中找到非常详尽的资料。大体上说，近几年来已经比较少有认真的历史学家对此事表示异议，至少在英语世界是如此。

关于 1941 年海森堡和玻尔在哥本哈根的会面，也就是《哥本哈根》一剧中所探寻的那个场景，我们也已经有了突破性的进展。关于这场会面的讨论是如此之多之热烈，以致玻尔的家属提前 10 年（原定保密 50 年）公布了他的一些未寄出的信件，其中谈到了 1941 年的会面（我们知道，玻尔生前几乎从不谈起这些），为的是不让人们再“误解它们的内容”。这些信件于 2002 年 2 月 6 日在玻尔的官方网站（<http://www.nbi.dk>）上公布，引起一阵热潮，使这个网站的日点击率从 50 左右猛涨至 15000。

在这些首次被披露的信件中，我们可以看到玻尔对海森堡来访的态度。这些信件中主要的一封是在玻尔拿到 Robert Jungk 的新书《比一千个太阳更明亮》之后准备寄给海森堡的，我们在前面已经说到，这本书赞扬了德国人在原子弹问题上表现出的科学道德（基于对海森堡本人的采访！）。玻尔明确地说，他清楚地记得当年的每一句谈话，他和妻子玛格丽特都留下了强烈的印象：海森堡和魏扎克努力地试图说服玻尔他们，德国的最终胜利不可避免，因此采取不合作态度是不明智的。玻尔说，海森堡谈到原子弹计划时，给他留下的唯一感觉就是在海森堡的领导下，德国正在按部就班地完成一切。他强调说，他保持沉默，不是海森堡后来宣称的因为对原子弹的可行性感到震惊，而是因为德国在致力于制造原子弹！玻尔显然对海森堡的以及 Jungk 的书造成的误导感到不满。在别的信件中，他也提到，海森堡等人对别的丹麦科学家解释说，他们对德国的态度是不明智的，因为德国的胜利十分明显。玻尔似乎曾经多次想和海森堡私下谈一次，以澄清关于这段历史的误解，但最终他的信件都没有发出，想必是思量再三，还是觉得恩恩怨怨就这样让它去吧。

这些文件可以在 <http://www.nbi.dk/NBA/papers/docs/cover.html> 找到。

容易理解，为什么多年后玻尔夫人再次看到海森堡和魏扎克时，愤怒地对旁人说：“不管别人怎么说，那不是一次友好的访问！”

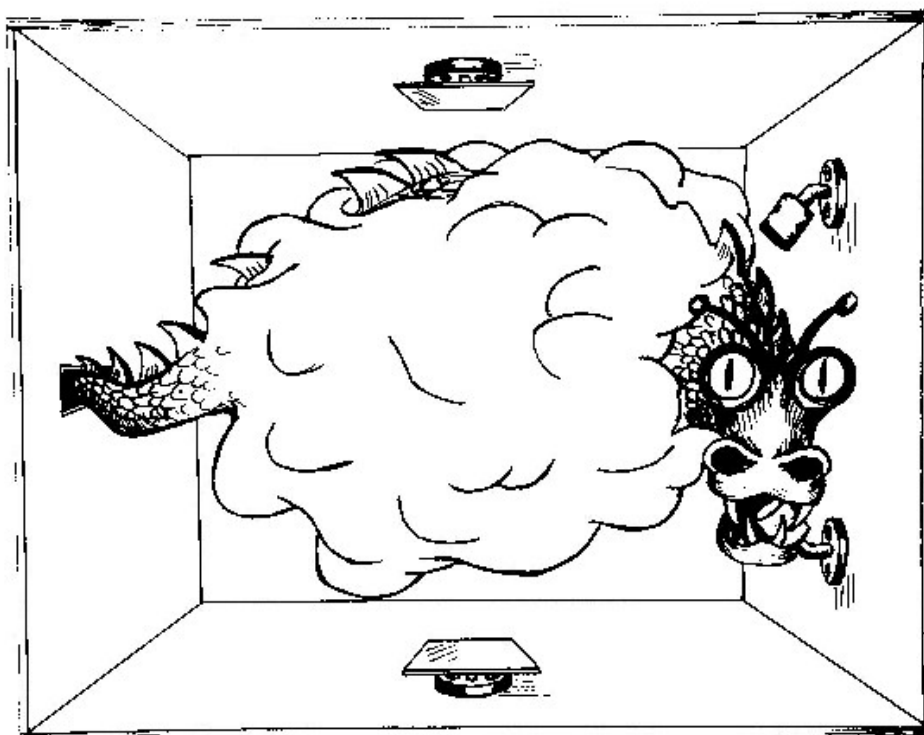
这些文件也部分支持了海森堡的传记作者 Cassidy 在 2000 年的 Physics Today 杂志上的文章（这篇文章是针对《哥本哈根》一剧而写的）。Cassidy 认为海森堡当年去哥本哈根是为了说服玻尔德国占领欧洲并不是最坏的事（至少比苏联占领欧洲好），并希望玻尔运用他的影响来说服盟国的科学家不要制造原子弹。

当然仍然有为海森堡辩护的人，主要代表是他的一个学生 Klaus Gottstein，当年一起同行的魏扎克也仍然认定，是玻尔犯了一个“可怕的记忆错误”。

不管事实怎样也好，海森堡的真实形象也许也就是一个普通人——毫无准备地被卷入战争岁月里去的普通德国人。他不是英雄，也不是恶棍，他对于纳粹的不认同态度有目共睹，他或许也只是身不由己地做着一切战争年代无奈的事情。尽管历史学家的意见逐渐在达成一致，但科学界的态度反而更趋于对他的同情。Rice 大学的 Duck 和 Texas 大学的 Sudarshan 说：“再伟大的人也只有 10% 的时候是伟大的……重要的只是他们曾经做出过原创的，很重要，很重要的贡献……所以海森堡在他的后半生是不是一个完人对我们来说不重要，重要的是他创立了量子力学。”

在科学史上，海森堡的形象也许一直还将是那个在赫尔格兰岛日出时分为物理学带来了黎明的大男孩吧？

贴图：惠勒的龙 Field Gilbert 画，扫描自 Niels Bohr: A Centenary Volume(Harvard 1985),p151



9-4

吃一堑，长一智，我们总结一下教训。之所以前头会碰到“意识”这样的可怕东西，关键在于我们无法准确地定义一个“观测者”！一个人和一台照相机之间有什么分别，大家都说不清道不明，于是给“意识”乘隙而入。而把我们逼到不得不去定义什么是“观测者”这一步的，则是那该死的“坍缩”。一个观测者使得波函数坍缩？这似乎就赋予了所谓的观测者一种在宇宙中至高无上的地位，他们享有某种超越基本物理定律的特权，可以创造一些真正奇妙的事情出来。

真的，追本溯源，罪魁祸首就在暧昧的“波函数坍缩”那里了。这似乎像是哥本哈根派的一个魔咒，至今仍然把我们陷在其中不得动弹，而物理学的未来也在它的诅咒下显得一片黯淡。拿康奈尔大学的物理学家科特·戈特弗雷德（Kurt Gottfried）的话来说，这个“坍缩”就像是“一个美丽理论上的一道丑陋疤痕”，它云遮雾绕，似是而非，模糊不清，每个人都各持己见，为此吵嚷不休。怎样在观测者和非观测者之间划定界限？薛定谔猫的波函数是在我们打开箱子的那一刹那坍缩？还是它要等到光子进入我们的眼睛并在视网膜上激起电脉冲信号？或者它还要再等一会儿，一直到这信号传输到大脑皮层的某处并最终成为一种“精神活动”时才真正坍缩？如果我们在这上面大钻牛角尖的话，前途似乎不太美妙。

那么，有没有办法绕过这所谓的“坍缩”和“观测者”，把智能生物的介入从物理学中一脚踢开，使它重新回到我们所熟

悉和热爱的轨道上来呢？让我们重温那个经典的双缝困境：电子是穿过左边的狭缝呢，还是右边的？按照哥本哈根解释，当我们未观测时，它的波函数呈现两种可能的线性叠加。而一旦观测，则在一边出现峰值，波函数“坍缩”了，随机地选择通过了左边或者右边的一条缝。量子世界的随机性在坍缩中得到了最好的体现。

要摆脱这一困境，不承认坍缩，那么只有承认波函数从未“选择”左还是右，它始终保持在一个线性叠加的状态，不管是不是进行了观测。可是这又明显与我们的实际经验不符，因为从未有人在现实中观察到同时穿过左和右两条缝的电子，也没有人看见过同时又死又活的猫（半死不活，奄奄一息的倒有不少）。事到如今，我们已经是骑虎难下，进退维谷，哥本哈根的魔咒已经缠住了我们，如果我们不鼓起勇气，作出最惊世骇俗的假设，我们将注定困顿不前。

如果波函数没有坍缩，则它必定保持线性叠加。电子必定是左/右的叠加，但在现实世界中从未观测到这种现象。

有一个狂想可以解除这个可憎的诅咒，虽然它听上去真的很疯狂，但慌不择路，我们已经是 *nothing to lose*。失去的只是桎梏，但说不定赢得的是整个世界呢？

是的！电子即使在观测后仍然处在左/右的叠加，但是，我们的世界也只不过是叠加的一部分！当电子穿过双缝后，处于叠加态的不仅仅是电子，还包括我们整个的世界！也就是说，当电子经过双缝后，出现了两个叠加在一起的世界，在其中的一个世界里电子穿过了左边的狭缝，而在另一个里，电子则通过了右边！

波函数无需“坍缩”，去随机选择左还是右，事实上两种可能都发生了！只不过它表现为整个世界的叠加：生活在一个世界中的人们发现在他们那里电子通过了左边的狭缝，而在另一个世界中，人们观察到的电子则在右边！量子过程造成了“两个世界”！这就是量子论的“多世界解释”（Many Worlds Interpretation，简称 MWI）。

要更好地了解 MWI，不得不从它的创始人，一生颇有传奇色彩的休·埃弗莱特（Hugh Everett III，他的祖父和父亲也都叫 Hugh Everett，因此他其实是“埃弗莱特三世”）讲起。1930年11月9日，爱因斯坦在《纽约时报杂志》上发表了其著名的文章《论科学与宗教》，他的那句名言至今仍然在我们耳边回响：“没有宗教的科学是跛足的，没有科学的宗教是盲目的。”两天后，小埃弗莱特就在华盛顿出生了。

埃弗莱特对爱因斯坦怀有深深的崇敬，在他只有12岁的时候，他就写信问在普林斯顿的爱因斯坦一些关于宇宙的问题，而爱因斯坦还真的复信回答了他。当他拿到化学工程的本科学位之后，他也进入了普林斯顿攻读。一开始他进的是数学系，但他很快想方设法转投物理。50年代正是量子论方兴未艾，而哥本哈根解释如日中天，一统天下的时候。埃弗莱特认识了许多在这方面的物理学生，其中包括玻尔的助手 Aage Peterson，后者和他讨论了量子论中的观测难题，这激起了埃弗莱特极大的兴趣。他很快接触了约翰·惠勒，惠勒鼓励了他在这方面的思考，到了1954年，埃弗莱特向惠勒提交了两篇论文，多世界理论（有时也被称作“埃弗莱特主义—Everettism”）第一次亮相了。

按照埃弗莱特的看法，波函数从未坍缩，而只是世界和观测者本身进入了叠加状态。当电子穿过双缝后，整个世界，包括我们本身成为了两个独立的叠加，在每一个世界里，电子以一种可能出现。但不幸的是，埃弗莱特用了一个容易误导和引起歧义的词“分裂”（splitting），他打了一个比方，说宇宙像一个阿米巴变形虫，当电子通过双缝后，这个虫子自我裂变，繁殖成为两个几乎一模一样的变形虫。唯一的不同是，一个虫子记得电子从左而过，另一个虫子记得电子从右而过。

惠勒也许意识到了这个用词的不妥，他在论文的空白里写道：“分裂？最好换个词。”但大多数物理学家并不知道他的意见。也许，惠勒应该搞得戏剧化一点，比如写上“我想到了一个绝妙的用词，可惜空白太小，写不下。”在很长的一段时间里，埃弗莱特的理论被人们理解成：当电子通过双缝的时候，宇宙神奇地“分裂”成了两个独立的宇宙，在一个里面电子通过左缝，另一个相反。这样一来，宇宙的历史就像一条岔路，每进行一次观测，它就分岔成若干小路，每条路对应于一个可能的结果。而每一条岔路又随着继续观察而进一步分裂，直至无穷。但每一条路都是实在的，只不过它们

之间无法相互沟通而已。

假设我们观测双缝实验，发现电子通过了左缝。其实当我们观测的一瞬间，宇宙已经不知不觉地“分裂”了，变成了几乎相同的两个。我们现在处于的这个叫做“左宇宙”，另外还有一个“右宇宙”，在那里我们将发现电子通过了右缝，但除此之外一切都和我们这个宇宙完全一样。你也许要问：“为什么我在左宇宙里，而不是在右宇宙里？”这种问题显然没什么意义，因为在另一个宇宙中，另一个你或许也在问：“为什么我在右宇宙，而不是左宇宙里？”观测者的地位不再重要，因为无论如何宇宙都会分裂，实际上“所有的结果”都会出现，量子过程所产生的一切可能都对应于相应的一个宇宙，只不过在大多数“蛮荒宇宙”中，没有智能生物来提出问题罢了。

这样一来，薛定谔的猫也不必再为死活问题困扰。只不过是宇宙分裂成了两个，一个有活猫，一个有死猫罢了。对于那个活猫的宇宙，猫是一直活着的，不存在死活叠加的问题。对于死猫的宇宙，猫在分裂的那一刻就实实在在地死了，不要等人们打开箱子才“坍缩”，从而盖棺定论。

从宇宙诞生以来，已经进行过无数次这样的分裂，它的数量以几何级数增长，很快趋于无穷。我们现在处于的这个宇宙只不过是其中的一个，在它之外，还有非常多的其他的宇宙。有些和我们很接近，那是在家谱树上最近刚刚分离出来的，而那些从遥远的古代就同我们分道扬镳的宇宙则可能非常不同。也许在某个宇宙中，小行星并未撞击地球，恐龙仍是世界主宰。在某个宇宙中，埃及艳后克娄帕特拉的鼻子稍短了一点，没有教恺撒和安东尼怦然心动。那些反对历史决定论的“鼻子派历史学家”一定会对后来的发展大感兴趣，看看是不是真的存在历史蝴蝶效应。在某个宇宙中，格鲁希没有在滑铁卢迟到，而希特勒没有在敦刻尔克前下达停止进攻的命令。而在更多的宇宙里，因为物理常数的不适合，根本就没有生命和行星的存在。

严格地说，历史和将来一切可能发生的事情，都已经实际上发生了，或者将要发生。只不过它们在另外一些宇宙里，和我们所在的这个没有任何物理接触。这些宇宙和我们的世界互相平行，没有联系，根据奥卡姆剃刀原理，这些奇妙的宇宙对我们都是没有意义的。多世界理论有时也称为“平行宇宙”（Parallel Universes）理论，就是因为这个道理。

宇宙的“分裂”其实应该算是一种误解，不过直到现在，大多数人，包括许多物理学家仍然是这样理解埃弗莱特的！这样一来，这个理论就显得太大惊小怪了，为了一个小小的电子从左边还是右边通过的问题，我们竟然要兴师动众地牵涉整个宇宙的分裂！许多人对此的评论是“杀鸡用牛刀”。爱因斯坦曾经有一次说：“我不能相信，仅仅是因为看了它一眼，一只老鼠就使得宇宙发生剧烈的改变。”这话他本来是对着哥本哈根派说的，不过的确代表了许多人的想法：用牺牲宇宙的代价来迎合电子的随机选择，未免太不经济廉价，还产生了那么多不可观察的“平行宇宙”的废料。MWI 后来最为积极的鼓吹者之一，德克萨斯大学的布莱斯·德威特（Bryce S. DeWitt）在描述他第一次听说 MWI 的时候说：“我仍然清晰地记得，当我第一次遇到多世界概念时所受到的震动。100 个略有缺陷的自我拷贝，都在不停地分裂成进一步的拷贝，而最后面目全非。这个想法是很难符合常识的。这是一种彻头彻尾的精神分裂症……”对于我们来说，也许接受“意识”，还要比相信“宇宙分裂”来得容易一些！

不难想象，埃弗莱特的 MWI 在 1957 年作为博士论文发表后，虽然有惠勒的推荐和修改，在物理界仍然反应冷淡。埃弗莱特曾经在 1959 年特地飞去哥本哈根见到玻尔，但玻尔根本就不想讨论任何对于量子论新的解释，也不想对此作什么评论，这使他心灰意冷。作为玻尔来说，他当然一生都坚定地维护着哥本哈根理论，对于 50 年代兴起的一些别的解释，比如玻姆的隐函数理论（我们后面要谈到），他的评论是“这就好比我们希望以后能证明 $2 \times 2 = 5$ 一样。”在玻尔临死前的最后的访谈中，他还在批评一些哲学家，声称：“他们不知道它（互补原理）是一种客观描述，而且是唯一可能的客观描述。”

受到冷落的埃弗莱特逐渐退出物理界，他先供职于国防部，后来又成为著名的 Lambda 公司的创建人之一和主席，这使他很快成为百万富翁。但他的见解——后来被人称为“20 世纪隐藏得最深的秘密之一”的——却长期不为人们所重视。直到 70 年代，德威特重新发掘了他的多世界解释并在物理学家中大力宣传，MWI 才开始为人所知，并迅速成为热门的

话题之一。如今，这种解释已经拥有大量支持者，坐稳哥本哈根解释之后的第二把交椅，并大有后来居上之势。为此，埃弗莱特本人曾计划复出，重返物理界去做一些量子力学方面的研究工作，但他不幸在 1982 年因为心脏病去世了。

在惠勒和德威特所在的德州大学，埃弗莱特是最受尊崇的人之一。当他应邀去做量子论的演讲时，因为他的烟瘾很重，被特别允许吸烟。这是那个礼堂有史以来唯一的一次例外。

9-5

针对人们对 MWI 普遍存在的误解，近来一些科学家也试图为其正名，澄清这种稀奇古怪的“宇宙分裂”并非 MWI 和埃弗莱特的本意（如 Tegmark1998），我们在这里也不妨稍微讲一讲。当然要准确地描述它需要用到非常复杂的数学工具和数学表达，我们的史话还是以史为本，在理论上尽量浅显一点。这里只是和诸位进行一点最肤浅的探讨，用到的数学保证不超过中学水平，希望各位看官也不要望而却步。

首先我们要谈谈所谓“相空间”的概念。每个读过中学数学的人应该都建立过二维的笛卡儿平面：画一条 x 轴和一条与其垂直的 y 轴，并加上箭头和刻度。在这样一个平面系统里，每一个点都可以用一个包含两个变量的坐标 (x, y) 来表示，例如 $(1, 2)$ ，或者 $(4.3, 5.4)$ ，这两个数字分别表示该点在 x 轴和 y 轴上的投影。当然，并不一定要使用直角坐标系，也可以用极坐标或者其他坐标系来描述一个点，但不管怎样，对于 2 维平面来说，用两个数字就可以唯一地指明一个点了。如果要描述三维空间中的一个点，那么我们的坐标里就要有 3 个数字，比如 $(1, 2, 3)$ ，这 3 个数字分别代表该点在 3 个互相垂直的维度方向的投影。

让我们扩展一下思维：假如有一个四维空间中的点，我们又应该如何去描述它呢？显然我们要使用含有 4 个变量的坐标，比如 $(1, 2, 3, 4)$ ，如果我们用的是直角坐标系，那么这 4 个数字便代表该点在 4 个互相垂直的维度方向的投影，推广到 n 维，情况也是一样。诸位大可不必费神在脑海中努力构想 4 维或者 11 维空间是如何在 4 个乃至 11 个方向上都互相垂直的，事实上这只是我们在数学上构造的一个假想系统而已。我们所关心的是： n 维空间中的一个点可以用 n 个变量来唯一描述，而反过来， n 个变量也可以用一个 n 维空间中的点来涵盖。

现在让我们回到物理世界，我们如何去描述一个普通的粒子呢？在每一个时刻 t ，它应该具有一个确定的位置坐标 (q_1, q_2, q_3) ，还具有一个确定的动量 p 。动量也就是速度乘以质量，是一个矢量，在每个维度方向都有分量，所以要描述动量 p 还得用 3 个数字： p_1 ， p_2 和 p_3 ，分别表示它在 3 个方向上的速度。总而言之，要完全描述一个物理质点在 t 时刻的状态，我们一共要用到 6 个变量。而我们在前面已经看到了，这 6 个变量可以用 6 维空间中的一个点来概括，所以用 6 维空间中的一个点，我们可以描述 1 个普通物理粒子的经典行为。我们这个存心构造出来的高维空间就是系统的相空间。

假如一个系统由两个粒子组成，那么在每个时刻 t 这个系统则必须由 12 个变量来描述了。但同样，我们可以用 12 维空间中的一个点来代替它。对于一些宏观物体，比如一只猫，它所包含的粒子可就太多了，假设有 n 个吧，不过这不是一个本质问题，我们仍然可以用一个 $6n$ 维相空间中的质点来描述它。这样一来，一只猫在任意一段时期内的活动其实都可以等价于 $6n$ 空间中一个点的运动（假定组成猫的粒子数目不变）。我们这样做并不是吃饱了饭太闲的缘故，而是因为从数学上，描述一个点的运动，哪怕是 $6n$ 维空间中的一个点，也要比描述普通空间中的一只猫来得方便。在经典物理中，对于这样一个代表了整个系统的相空间中的点，我们可以用所谓的哈密顿方程去描述，并得出许多有益的结论。

在我们史话的前面已经提到过，无论是海森堡的矩阵力学还是薛定谔的波动力学，都是从哈密顿的方程改造而来，所以它们后来被证明互相等价也是不足为奇。现在，在量子理论中，我们也可以使用与相空间类似的手法来描述一个系统的状态，只不过把经典的相空间改造成复的希尔伯特矢量空间罢了。具体的细节读者们可以不用理会，只要把握其中的精髓：一个复杂系统的状态可以看成某种高维空间中的一个点或者一个矢量。比如一只活猫，它就对应于某个希尔伯特空间中的一个态矢量，如果采用狄拉克引入的符号，我们可以把它用一个带尖角的括号来表示，写成： $|\text{活猫}\rangle$ 。死猫可以类似地写成： $|\text{死猫}\rangle$ 。

说了那么多，这和量子论或者 MWI 有什么关系呢？

让我们回头来看一个量子过程，比如那个经典的双缝困境吧。正如我们已经反复提到的那样，如果我们不去观测电子究竟通过了哪条缝，它就应该同时通过两条缝而产生干涉。此时它的波函数是一个线性叠加，且严格按照薛定谔方程演化。也就是说， $|\psi\rangle$ 可以表示为：

$$a|\text{通过左缝}\rangle + b|\text{通过右缝}\rangle$$

我们还记得波函数强度的平方就是概率，为了简化起见我们假定粒子通过左右缝的概率是相等的，而且没有别的可能。如此一来则 $a^2+b^2=1$ ，得出 a 和 b 均为根号 2 分之 1。不过这些只是表明概率的系数而已，我们也不去理会，关键是系统在未经观察时，必须是一个“ $|\text{左}\rangle+|\text{右}\rangle$ ”的叠加！

如果我们不去干扰这个系统，则其按薛定谔波动方程严格地发展。为了表述方便，我们按照彭罗斯的话，把这称为“U 过程”，它是一个确定的、严格的、经典的、可逆（时间对称）的过程。但值得一提的是，薛定谔方程是“线性”的，也就是说，只要 $|\text{左}\rangle$ 和 $|\text{右}\rangle$ 都是可能的解，则 $a|\text{左}\rangle+b|\text{右}\rangle$ 也必定满足方程！不管 U 过程如何发展，系统始终会保持在线性叠加的状态。

只有当我们去观测电子的实际行为时，电子才被迫表现为一个粒子，选择某一条狭缝穿过。拿哥本哈根派的话来说，电子的波函数“坍缩”了，最终我们只剩下 $|\text{左}\rangle$ 或者 $|\text{右}\rangle$ 中的一个态独领风骚。这个过程像是一个奇迹，它完全按照概率随机地发生，也不再可逆，正如你不能让实际已经发生的事情回到许多概率的不确定叠加中去。还是按照彭罗斯的称呼，我们把这叫做“R 过程”，其实就是所谓的坍缩。如何解释 R 过程的发生，这就是困扰我们的难题。哥本哈根派认为“观测者”引发了这一过程，个别极端的则扯上“意识”，那么，MWI 又有何高见呢？

它的说法可能让你大吃一惊：根本就没有所谓的“坍缩”，R 过程实际上从未发生过！从开天辟地以来，在任何时刻，任何孤立系统的波函数都严格地按照薛定谔方程以 U 过程演化！如果系统处在叠加态，它必定永远按照叠加态演化！

可是，等等，这样说固然意气风发，畅快淋漓，但它没有解答我们的基本困惑啊！如果叠加态是不可避免的，为什么我们在现实中从未观察到同时穿过双缝的电子，或者又死又活的猫呢？只有当我们不去观测，它们才似乎处于叠加，MWI 如何解释我们的观测难题呢？

让我们来小心地看看埃弗莱特的假定：“任何孤立系统都必须严格地按照薛定谔方程演化”。所谓孤立系统指的是与外界完全隔绝的系统，既没有能量也没有物质交流，这是个理想状态，在现实中很难做到，所以几乎是不可能的。只有一样东西例外——我们的宇宙本身！因为宇宙本身包含了一切，所以也就无所谓“外界”，把宇宙定义为一个孤立系统似乎是没有问题的。宇宙包含了 n 个粒子， n 即便不是无穷，也是非常非常大的，但这不是本质问题，我们仍然可以把整个宇宙的状态用一个态矢量来表示，描述宇宙波函数的演化。

MWI 的关键在于：虽然宇宙只有一个波函数，但这个极为复杂的波函数却包含了许许多多互不干涉的“子世界”。宇宙的整体态矢量实际上是许许多多子矢量的叠加和，每一个子矢量都是在某个“子世界”中的投影，代表了薛定谔方程一个可能的解，但这些“子世界”却都是互相垂直正交，彼此不能干涉的！

为了各位容易理解，我们假想一种没有维度的“质点人”，它本身是一个小点，而且只能在一个维度上做直线运动。这样一来，它所生活的整个“世界”，便是一条特定的直线，对于这个质点人来说，它只能“感觉”到这条直线上的东西，而对别的一无所知。现在我们回到最简单的二维平面。假设有一个矢量 $(1, 2)$ ，我们容易看出它在 x 轴上投影为 1， y 轴上投影为 2。如果有两个“质点人”A 和 B，A 生活在 x 轴上，B 生活在 y 轴上，那么对于 A 君来说，他对我们的矢量的所有

“感觉”就是其在 x 轴上的那段长度为 1 的投影，而 B 君则感觉到其在 y 轴上的长度为 2 的投影。因为 A 和 B 生活在不同的两个“世界”里，所以他们的感觉是不一样的！但事实上，“真实的”矢量只有一个，它是 A 和 B 所感觉到的“叠加”！

我们的宇宙也是如此。“真实的，完全的”宇宙态矢量存在于一个非常高维的希尔伯特空间中，但这个高维的空间却由许许多多低维的“世界”所构成（正如我们的三维空间可以看成由许多二维平面构成一样），每个“世界”都只能感受到那个“真实”的矢量在其中的投影。因此在每个“世界”看来，宇宙都是不同的。但实际上，宇宙波函数是按照薛定谔方程演化的叠加态。

但还剩下一个问题：如果说每一种量子态代表一个“世界”，为什么我们感觉不到别的“世界”呢？而相当稀奇的是，未经观测的电子却似乎有特异功能，可以感觉来自“别的世界”的信息。比如不受观察的电子必定同时感受到了“左缝世界”和“右缝世界”的信息，不然如何产生干涉呢？这其实还是老问题：为什么我们一“观察”，量子层次上的叠加态就土崩瓦解，绝不会带到宏观世界中来？

非常妙的解释是：这牵涉到我们所描述“世界”的维数，或者说自由度的数量。在上面的例子中，我们举了 A 和 B 分别生活在 x 轴和 y 轴上的例子。因为 x 轴和 y 轴互相垂直，所以 A 世界在 B 世界上根本没有投影，也就是说，B 完全无法感觉到 A 所生活的那个世界究竟是怎样的。但是，这是一个非常极端的例子，事实上如果我们在二维平面上随便取两条直线作为“两个世界”，则它们很有可能并不互相垂直。态矢量在这两个世界上的投影在很大程度上仍然是彼此“相干”（coherent）的，B 仍然能够在很大程度上感受到 A 世界的观测结果，反之亦然（参见附图）。

但是，假如不是 2 维，而是在很多维的空间中，我们随便画两条直线，其互相垂直的程度就很可能要比 2 维中的来得大。因为它比 2 维有着多得多的维数，亦即自由度，直线可以寻求在多个方向上的发展而互不干扰。如果有一个非常高维的空间，比如说 1000 亿维空间，那么我们随便画两条直线或者平面，它们就几乎必定是基本垂直了。如果各位不相信，不妨自己动手证明一下。

在双缝实验中，假如我们不考虑测量仪器或者我们自己的态矢量，不考虑任何环境的影响，单单考虑电子本身的态矢量的话，那么所涉及的变量是相对较少的，也就是说，单纯描述电子行为的“世界”是一个较低维的空间。我们在前面已经讨论过了，在双缝实验中，必定存在着两个“世界”：左世界和右世界。宇宙态矢量分别在这两个世界上投影为|通过左缝> 和|通过右缝>两个量子态。但因为这两个世界维数较低，所以它们互相并不是完全垂直的，每个世界都还能清晰地“感觉”到另外一个世界的投影。这两个世界仍然彼此“相干”着！因此电子能够同时感觉到双缝而自我干涉。

请各位密切注意，“左世界”和“右世界”只是单纯地描述了电子的行为，并不包括任何别的东西在内！当我们通过仪器而观测到电子究竟是通过了左还是右之后，对于这一事件的描述就不再是“左世界”等可以胜任的了。事实上，为了描述“我们发现了电子在左”这个态，我们必须动用更大的“世界”，叫做“我们感知到电子在左”世界，或者简称“知左”世界。这个世界包括了电子、仪器和我们本身在内，对它的描述就要用到比单个电子多得多的变量（光我们本身就有 n 个粒子组成）。“知左”世界的维度，要比“左”世界高出不知凡几，现在“知左”和“知右”世界，就很难不互相垂直了，这个戏剧性的变化在于拥有巨大变量数目的环境的引入：当电子层次上的量子态叠加被仪器或者任何宏观事物放大，我们所用于描述该态的“世界”的维数也就迅速增加，这直接导致了原本相干的两个投影变成基本垂直而互不干涉。这个过程叫做“离析”或者“退相干”（decoherence），量子叠加态在宏观层面上的瓦解，正是退相干的直接后果。

用前面所引的符号来表示可能会直观一些，在我们尚未进行观测时，唯一的不确定是电子本身，只有它是两个态的叠加。此时宇宙的态可以表示为：

$$(a|通过左缝> + b|通过右缝>) \times |未进行观测的我们> \times |宇宙的其他部分>$$

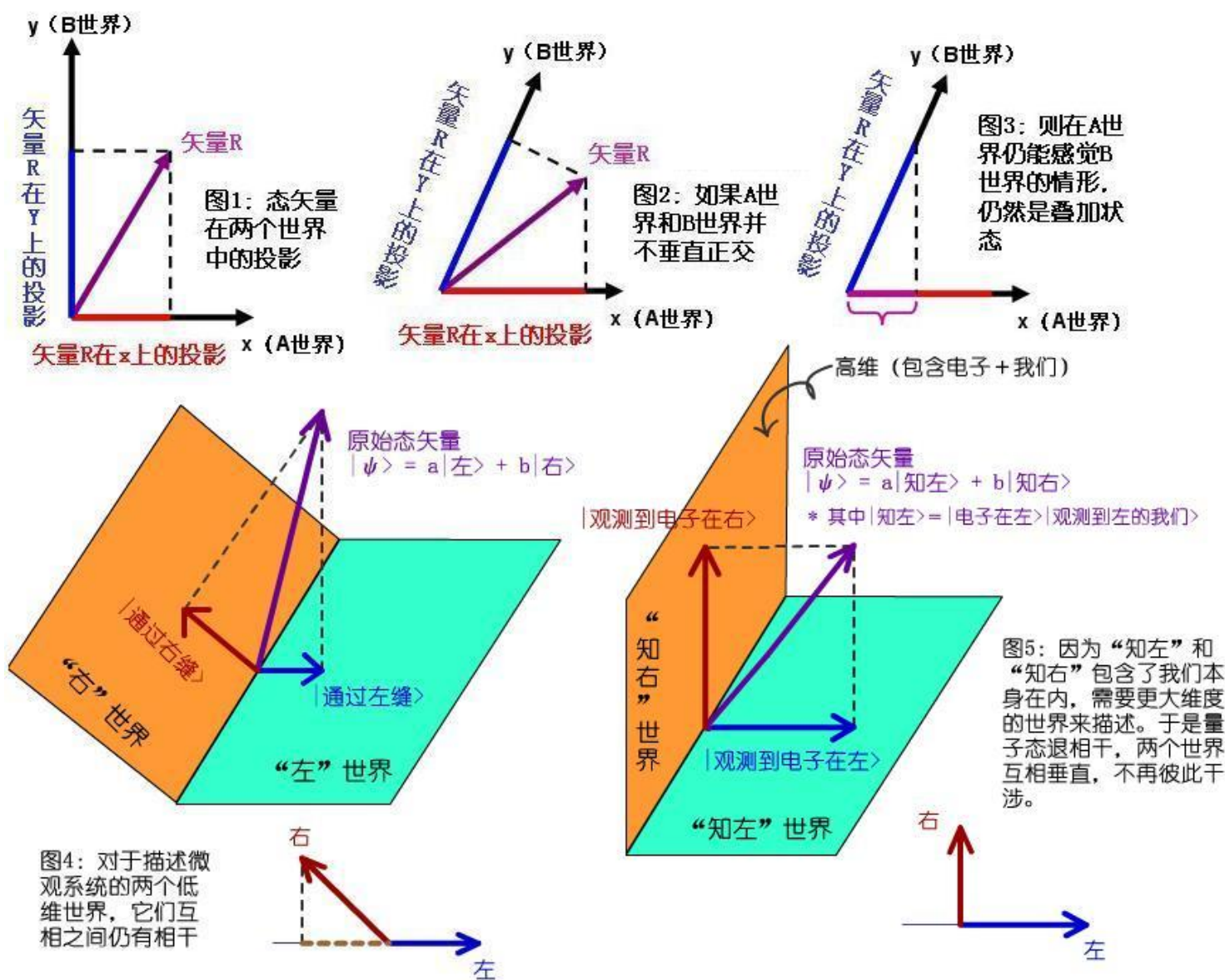
×号表示“并且”（AND），这里无非是说，宇宙的态由电子态，我们的态和其他部分的态共同构成。在我们尚未进行

观测时，只有电子态处在叠加中，而正如我们讨论过的，仅涉及电子时，这两个态仍然可能在另一个世界里造成投影而互相感觉。可是，一旦我们进行了观测，宇宙态就变成：

$$(a|\text{通过左缝}\rangle|\text{观测到左的我们}\rangle + b|\text{通过右缝}\rangle|\text{观测到右的我们}\rangle) \times |\text{宇宙的其他部分}\rangle$$

现在叠加的是两个更大的系统态：“通过左缝|观测到左的我们>”和“通过右缝|观测到右的我们>”，它们可以简并成|我们发现电子在左>和|我们发现电子在右>，分别存在于“知左”和“知右”世界。观测者的“分裂”，也就在这一刻因为退相干而发生了。因为维数庞大，“知左”和“知右”世界几乎不互相干涉，因此在这个层次上，我们感觉不到量子态的叠加。

但是，作为宇宙态矢量本身来说，它始终按照薛定谔方程演化。只有一个“宇宙”，但它包含了多个“世界”。所谓的“坍缩”，只不过是投影在的某个世界里的“我们”因为身在此山中而产生的幼稚想法罢了。最后要提醒大家的是，我们这里所说的空间、维度，都是指构造的希尔伯特空间，而非真实时空。事实上，所有的“世界”都发生在同一个时空中（而不是在另一些维度中），只不过因为互相正交而无法彼此交流。你一定会觉得很不可思议，但量子论早就已经不止一次地带给我们无比的惊讶了，不是吗？



第十章 不等式

10-1

在多世界奇境中的这趟旅行可能会让大家困惑不解，但就像爱丽丝在镜中读到的那首晦涩的长诗 Jabberwocky，它无疑应该给人留下深刻的印象。的确，想象我们自身随着时间的流逝不停地分裂成多个世界里的投影，而这些分身以几何

数目增长，以至无穷。这样一幅奇妙的景象实在给这个我们生活其中的宇宙增添了几分哭笑不得的意味。也许有人会觉得，这样一个模型，实在看不出有比“意识”更加可爱的地方，埃弗莱特，还有那些拥护多世界的科学家们，究竟看中了它哪一点呢？

不过 MWI 的好处也是显而易见的，它最大的丰功伟绩就是把“观测者”这个碍手碍脚的东西从物理中一脚踢开。现在整个宇宙只是严格地按照波函数演化，不必再低声下气地去求助于“观测者”，或者“智能生物”的选择了。物理学家现在也不必再为那个奇迹般的“坍缩”大伤脑筋，无奈地在漂亮的理论框架上贴上丑陋的补丁，用以解释 R 过程的机理。我们可怜的薛定谔猫也终于摆脱了那又死又活的煎熬，而改为自得其乐地生活（一死一活）在两个不同的世界中。

重要的是，大自然又可以自己做主了，它不必在“观测者”的阴影下战战兢兢地苟延残喘，直到某个拥有“意识”的主人赏了一次“观测”才得以变成现实，不然就只好在概率波叠加中埋没一生。在 MWI 里，宇宙本身重新成为唯一的主宰，任何观测者都是它的一部分，随着它的演化被分裂、投影到各种世界中去。宇宙的分裂只取决于环境的引入和不可逆的放大过程，这样一幅客观的景象还是符合大部分科学家的传统口味的，至少不会像哥本哈根派那样让人抓狂，以致寝食难安。

MWI 的一个副产品是，它重新回到了经典理论的决定论中去。因为就薛定谔方程本身来说，它是决定性的，也就是说，给定了某个时刻 t 的状态，我们就可以从正反两个方向推演，得出系统在任意时刻的状态。从这个意义上来说，时间的“流逝”不过是种错觉！另外，既然不存在“坍缩”或者 R 过程，只有确定的 U 过程，“随机性”便不再因人而异地胡搅蛮缠。从这个意义上说，上帝又不掷骰子了，他老人家站在一个高高在上的角度，鸟瞰整个宇宙的波函数，则一切仍然尽在把握：宇宙整体上还是严格地按照确定的薛定谔方程演化。电子也不必投掷骰子，做出随机的选择来穿过一条缝：它同时在两个世界中各穿过了一条缝而已。只不过，对于我们这些凡夫俗子，芸芸众生来说，因为我们纠缠在红尘之中，与生俱来的限制迷乱了我们的眼睛，让我们只看得见某一个世界的影子。而在这个投影中，现实是随机的，跳跃的，让人惊奇的。

(* 这里顺便澄清一下词语方面的问题，对于 MWI，一般人们喜欢把多个分支称为“世界”(World)，把它们总和称为“宇宙”(Universe)，这样一来宇宙只有一个，它按照薛定谔方程发展，而“世界”有许多，随着时间不停地分裂。但也有人喜欢把各个分支都称为“宇宙”，把它们总和称为“多宙”(Multiverse)，比如著名的多宇宙派物理学家 David Deutsch。这只是一个叫法的问题，多世界还是多宇宙，它们指的是一个意思。)

然而，虽然 MWI 也算可以自圆其说，但无论如何，现实中存在着许多个宇宙，这在一般人听起来也实在太古怪了。哪怕是出于哲学上的雅致理由（特别是奥卡姆剃刀），人们也觉得应当对 MWI 采取小心的态度：这种为了小小电子动辄把整个宇宙拉下水的做法不大值得欣赏。但在宇宙学家中，MWI 却是很流行和广受欢迎的观点。特别是它不要求“观测者”的特殊地位，而把宇宙的历史和进化归结到它本身上去，这使得饱受哥本哈根解释，还有参予性模型诅咒之苦的宇宙学家们感到异常窝心。大致来说，搞量子引力（比如超弦）和搞宇宙论等专业的物理学家比较青睐 MWI，而如果把范围扩大到一般的“科学家”中去，则认为其怪异不可接受的比例就大大增加。在多世界的支持者中，有我们熟悉的费因曼、温伯格、霍金，有人把夸克模型的建立者，1969 年诺贝尔物理奖得主盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 也计入其中，不过作为量子论“一致历史”(consistent history) 解释的创建人之一，我们还是把他留到史话相应的章节中去讲，虽然这种解释实际上可以看作 MWI 的加强版。

对 MWI 表示直接反对的，著名的有贝尔、斯特恩 (Stein)、肯特 (Kent)、彭罗斯等。其中有些人比如彭罗斯也是搞引力的，可以算是非常独特了。

但是，对于我们史话的读者们来说，也许大家并不用理会宇宙学家或者其他科学家的哲学口味有何不同，重要的是，现在我们手上有一个哥本哈根解释，有一个多宇宙解释，我们如何才能知道，究竟应该相信哪一个呢？各人在生活中的审美观点不同是很正常的，比如你喜欢贝多芬而我喜欢莫扎特，你中意李白我沉迷杜甫，都没有什么好大惊小怪，但科

学，尤其是自然科学就不同了。科学之所以伟大，不正是因为它可以不受主观意志的影响，成为宇宙独一无二的法则吗？经济学家们或者为了各种不同的模型而争得你死我活，但物理学的终极目标不是经世致用，而是去探索大自然那深深隐藏着的奥秘。它必须以最严苛的态度去对待各种假设，把那些不合格的挑剔出来从自身体系中清除出去，以永远保持它那不朽的活力。科学的历史应该是一个不断检讨自己，不断以实践为唯一准绳，不断向那个柏拉图式的理想攀登的过程。为了这一点，它就必须提供一个甄别的机制，把那些虽然看上去很美，但确实不符合事实的理论踢走，这也就成为它和哲学，或者宗教所不同的重要标志。

也许我们可以接受那位著名而又饱受争议的科学哲学家，卡尔·波普尔（Karl Popper）的意见，把科学和形而上学的分界线画在“可证伪性”这里。也就是说，一个科学的论断必须是可能被证明错误的。比如我说：“世界上不存在白色的乌鸦。”这就是一个符合“科学方法”的论断，因为只要你真的找到一只白色的乌鸦，就可以证明我的错误，从而推翻我这个理论。但是，如前面我们举过的那个例子，假如我声称“我的车库里有一条看不见的飞龙。”，这就不是一个科学的论断，因为你无论如何也不能证明我是错的。要是我们把这些不能证明错误的论断都接受为科学，那“科学”里滑稽的事情可就多了：除了飞龙以外，还会有三个头的狗、八条腿的驴，讲中文的猴子……无奇不有了。无论如何，你无法证明“不存在”三个头的狗，是吧？

如果赫兹在 1887 年的实验中没有发现电磁波引发的火花，那么麦克斯韦理论就被证伪了。如果爱丁顿在 1919 年日食中没有发现那些恒星的位移，那么爱因斯坦的相对论就被证伪了（虽然这个实验在今天看来不是全无问题）。如果吴健雄等人在 1956—1957 年的那次实验中没有找到他们所预计的效应，那么杨和李的弱作用下宇称不守恒设想就被证伪了。不管是当时还是以后，你都可以设计一些实验，假如它的结果是某某，就可以证明理论是不正确的，这就是科学的可证伪性。当然，有一些概念真的被证伪了，比如地平说、燃素、以太，但不管如何，我们至少可以说它们所采取的表达方式是符合“科学”方法的。

另外一些，比如“上帝”，那可就没法说了，没有什么实验可能证明上帝“不存在”（不是一定要证明不存在，而是连这种可能都没有）。所以我们最好还是把它踢出科学领域，留给宗教爱好者们去思考。

回到史话中来，为了使我们的两种解释符合波普尔的原则，我们能不能设计一种实验，来鉴定究竟哪一种可信，哪一种虚假的呢？哥本哈根解释说观测者使得波函数坍缩，MWI 说宇宙分裂，可是，对于现实中的我们来说，这没有可观测的区别啊！不管怎么样，事实一定是电子“看似”随机地按照波函数概率出现在屏幕的某处，不是吗？就算观测 100 万次，我们也无法区分哥本哈根和多世界究竟哪个不对啊！

自 70 年代以来由泽（Dieter Zeh）、苏雷克（Wojciech H Zurek）、盖尔曼等人提出、发展、并走红至今的退相干理论（decoherence）对于埃弗莱特的多宇宙解释似乎有巨大的帮助。我们在前面已经略微讨论过了，这个理论解释了物体如何由微观下的叠加态过渡到宏观的确定态：它主要牵涉到类如探测器或者猫一类物体的宏观性，也即比起电子来说多得多的自由度的数量，以及它们和环境的相互作用。这个理论在 MWI 里可谓如鱼得水，它解释了为何世界没有在大尺度下显示叠加性，解释了世界如何“分裂”，这些都是 MWI 以前所无法解释的。笼统地说，当仪器观测系统时，它同时还与环境发生了纠缠，结果导致仪器的叠加态迅速退化经典的关联。我们这样讲是非常粗略的，事实上可以从数学上证明这一点。假如我们采用系统所谓的“密度矩阵”（Density Matrix）来表示的话，那么这个矩阵对角线上的元素代表了经典的概率态，其他地方则代表了这些态之间的相干关联。我们会看到，当退相干产生时，仪器或者猫的密度矩阵迅速对角化，从而使得量子叠加性质一去不复返（参见附图）。这个过程极快，我们根本就无法察觉到。

不过，尽管退相干理论是 MWI 的一个有力补充，它却不能说明 MWI 就是唯一的解释。退相干可以解答为什么在一个充满了量子叠加和不确定的宇宙中，我们在日常大尺度下看世界仍然似乎是经典和“客观”的，但它不能解答波函数到底是一直正常发展下去，还是会时不时地跃迁。事实上，我们也可以把退相干用在哥本哈根解释里，用来确定“观测者”和“非观测者”之间的界限——按照它们各自的 size，或者自由度的数量！那些容易产生退相干的或许便更有资格作为观测者出现，所谓的观测或许也不过是种不可逆的放大过程。可是归根到底，我们还是不能确定到底是哥本哈根，还是多宇

宙！

波普尔晚年的时候（他 1994 年去世），我想他的心情会比较复杂。一方面他当年的一些论断是对的，比如量子力学本身的确没有排除决定论的因素（也没有排除非决定论）。关于互补原理，当年他在哥本哈根几乎被玻尔所彻底说服，不过现在他还是可以重新考虑一下别的 alternatives。另一方面，我们也会很有兴趣知道波普尔对于量子论领域各种解释并立，几乎无法用实践分辨开来的现状发表会有什么看法。

但我们还是来描述一些有趣的“强烈支持”MWI 的实验，其中包括那个疯狂的“量子自杀”，还有目前炙手可热，号称“利用多个平行世界一起工作”的量子计算机。

饭后闲话：证伪和证实

关于“科学”的界定，证实和证伪两派一直吵个不休，这个题目太大，我们没有兴趣参与，这里只是随便聊两句证实和证伪的问题。

怎样表述一个命题才算是科学的？按照证伪派，它必须有可能被证明是错误的。比如“所有的乌鸦都是黑的”，那么你只要找到一只不是黑色的乌鸦，就可以证明这个命题的错误，因此这个命题没有问题。相反，如果非要“证实”才接受这个论断的话，那就可就困难了，而且实际上是不可能的！除非你把所有的乌鸦都抓来看过，但你怎么能知道你已经抓尽了天下所有的乌鸦呢？

对于科学理论来说，“证实”几乎也是不可能的。比如我们说“宇宙的规律是 $F=ma$ ”，这里说的是一种普遍性，而你如何去证实它呢？除非你观察遍了自古至今，宇宙每一个角落的现象，发现无一例外，你才可以“证实”这一点。即使这样，你也无法保证在将来，这条规律仍然起着作用。事实上，几乎没有什么科学理论是可以被“证实”的，只要它能够被证明为“错”但还未被证明“错”（按照波普尔，以一种积极面对证伪的态度），我们就暂时接受它为可靠的理论。自休谟以来人们已经承认，单靠有限的个例（哪怕再多）也不能构成证实的基础。

不过，按照洛克之类经验主义者的说法，我们全部知识的基础都来自于我们的经验，而科学的建立，也就是在经验上的一种归纳主义。好比说，我们每天都看到太阳从东边升起，几千年来日日如此，那么我们应该可以“合理地”从中归纳出一条规律：太阳每天都从东方升起。并用它来预测明天太阳依旧要从东方升起。假如堕入休谟的不可知论，那么我们就根本谈不上任何“知识”了，因为反正明天的一切都是不确定的。

按照归纳主义，我们从过去的现象中归纳出一种规律，而当这个现象一再重复，则它每次都又成为对这个规律的再一次“证实”。比如每次太阳又升起来的时候，“太阳每天从东方升起”这个命题的确定性就被再次稍稍证实。我们每看到一只黑乌鸦，则“乌鸦都是黑的”这个命题的正确性就再次稍稍上升，直到我们遇到一只不黑的乌鸦为止。

我们大多数人也许都是这样以为的，但这种经验主义又会导出非常有趣的结果。我们来做这样一个推理，大家都知道，一个命题的逆否命题和它本身是等价的。比如“乌鸦都是黑的”，可以改为等价的命题“凡不黑的都不是乌鸦”。现在假如我们遇见一只白猫，这个现象无疑证实了“凡不黑的都不是乌鸦”（白猫不黑，白猫也不是乌鸦）的说法，所以同样，它也再次稍稍证实了“乌鸦都是黑的”这个原命题。

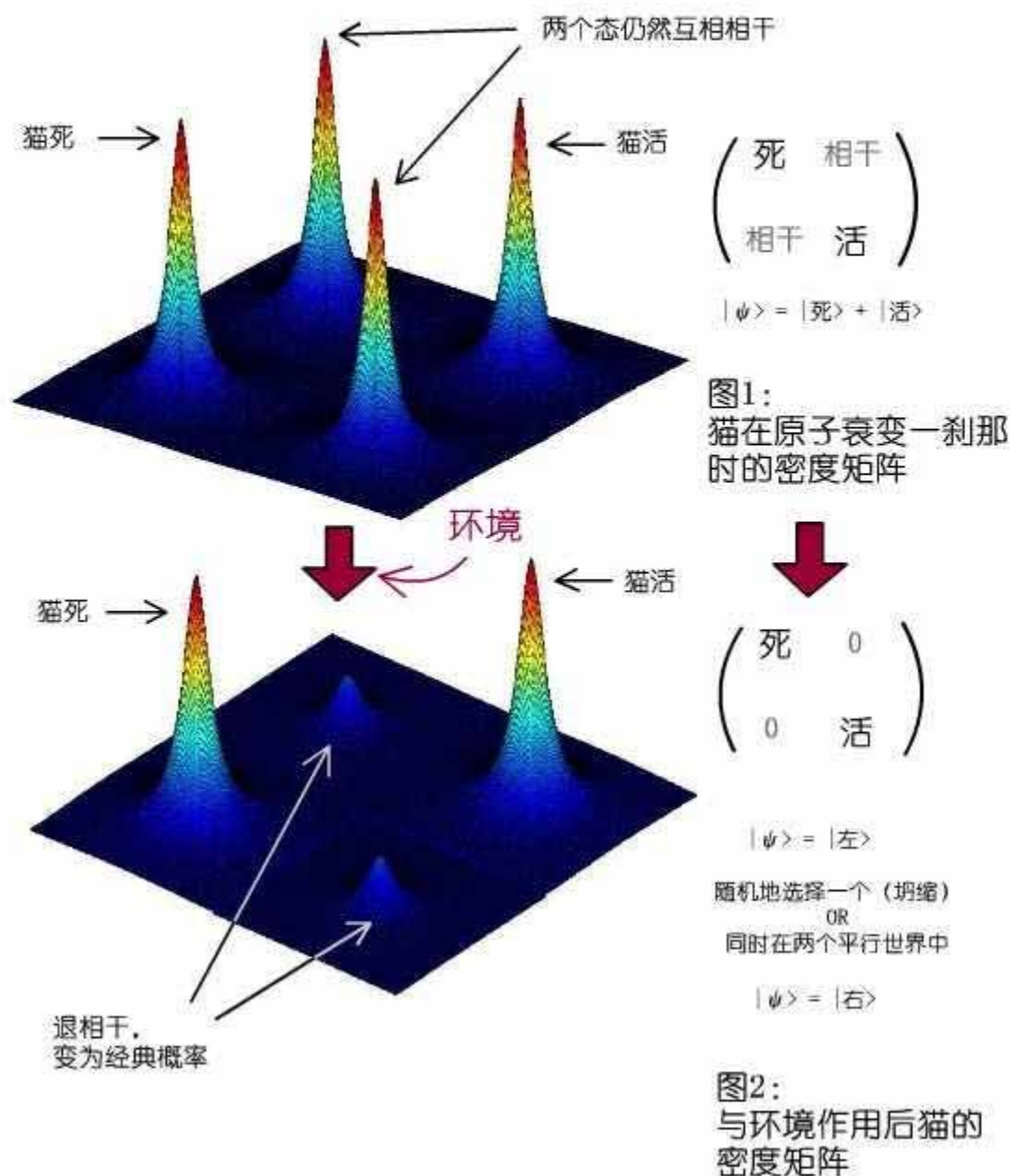
总而言之，“遇见一只白猫”略微增加了“乌鸦都是黑的”的可能性。有趣吧？

这个悖论由著名的德国逻辑实证论者亨普尔（Carl G Hempel）提出，他年轻时也曾跟着希尔伯特学过数学。如果你

接受这个论断，那么下次导师叫你去野外考察证明例如“昆虫都是六只脚”之类的命题，你大可不必出外风吹雨淋。只要坐在家观察大量“没有六只脚的都不是昆虫”的事例（比如桌子、椅子、台灯、你自己……），你可以和在野外实际观察昆虫对这个命题做出同样多的贡献！

我们对于认识理论的了解实在还是非常肤浅的。

薛定谔猫为什么不是又死又活



10-2

令人毛骨悚然和啼笑皆非的“量子自杀”实验在 80 年代末由 Hans Moravec, Bruno Marchal 等人提出，而又在 1998 年为宇宙学家 Max Tegmark 在那篇广为人知的宣传 MWI 的论文中所发展和重提。这实际上也是薛定谔猫的一个真人版。大家知道在猫实验里，如果原子衰变，猫就被毒死，反之则存活。对此，哥本哈根派的解释是：在我们没有观测它之前，猫是“又死又活”的，而观测后猫的波函数发生坍缩，猫要么死要么活。MWI 则声称：每次实验必定同时产生一只活猫和一只死猫，只不过它们存在于两个平行的世界中。

两者有何实质不同呢？其关键就在于，哥本哈根派认为猫始终只有一只，它开始处在叠加态，坍缩后有 50% 的可能

死，50%的可能活。而多宇宙认为猫并未叠加，而是“分裂”成了两只，一死一活，必定有一只活猫！

现在假如有一位勇于为科学献身的仁人义士，他自告奋勇地去代替那只倒霉的猫。出于人道主义，为了让他少受痛苦，我们把毒气瓶改为一把枪。如果原子衰变（或者利用别的量子机制，比如光子通过了半镀银），则枪就“砰”地一响送我们这位朋友上路。反之，枪就只发出“咔”地一声空响。

现在关键问题来了，当一个光子到达半镀镜的时候，根据哥本哈根派，你有一半可能听到“咔”一声然后安然无恙，另一半就不太美妙，你听到“砰”一声然后什么都不知道。而根据多宇宙，必定有一个你听到“咔”，另一个你在另一个世界里听到“砰”。但问题是，听到“砰”的那位随即就死掉了，什么感觉都没有了，这个世界对“你”来说就已经没有意义了。对你来说，唯一有意义的世界就是你活着的那个世界。

所以，从人择原理（我们在前面已经讨论过人择原理）的角度上来讲，对你唯一有意义的“存在”就是那些你活着的世界。你永远只会听到“咔”而继续活着！因为多宇宙和哥本哈根不同，永远都会有一个你活在某个世界！

让我们每隔一秒钟发射一个光子到半镀镜来触动机关。此时哥本哈根预言，就算你运气非常之好，你也最多听到几声“咔”然后最终死掉。但多宇宙的预言是：永远都会有一个“你”活着，而他的那个世界对“你”来说是唯一有意义的存在。只要你坐在枪口面前，那么从你本人的角度来看，你永远只会听到每隔一秒响一次的“咔”声，你永远不死（虽然在别的数目惊人的世界中，你已经尸横遍野，但那些世界对你没有意义）！

但只要你从枪口移开，你就又会听到“砰”声了，因为这些世界重新对你恢复了意义，你能够活着见证它们。总而言之，多宇宙的预言是：只要你在枪口前，（对你来说）它就绝对不会发射，一旦你移开，它就又开始随机地“砰”。

所以，对这位测试者他自己来说，假如他一直听到“咔”而好端端地活着，他就可以在很大程度上确信，多宇宙解释是正确的。假如他死掉了，那么哥本哈根解释就是正确的。不过这对他来说也已经没有意义了，人都死掉了。

各位也许对这里的人择原理大感困惑。无论如何，枪一直“咔”是一个极小极小的概率不是吗（如果 n 次，则概率就是 $1/2^n$ ）？怎么能说对你而言枪“必定”会这样行动呢？但问题在于，“对你而言”的前提是，“你”必须存在！

让我们这样来举例：假如你是男性，你必定会发现这样一个“有趣”的事实：你爸爸有儿子、你爷爷有儿子、你曾祖父有儿子……一直上溯到任意 n 代祖先，不管历史上冰川严寒、洪水猛兽、兵荒马乱、饥饿贫瘠，他们不但都能存活，而且子嗣不断，始终有儿子，这可是一个非常小的概率（如果你是女性，可以往娘家那条路上推）。但假如你因此感慨说，你的存在是一个百年不遇的“奇迹”，就非常可笑了。很明显，你能够感慨的前提条件是你的存在本身！事实上，如果“客观”地讲，一个家族 n 代都有儿子的概率极小，但对你我来说，却是“必须”的，概率为 100%的！同理，有人感慨宇宙的精巧，其产生的概率是如此低，但按照人择原理，宇宙必须如此！在量子自杀中，只要你始终存在，那么对你来说枪就必须 100%地不发射！

但很可惜的是：就算你发现了多宇宙解释是正确的，这也只是对你自己一个人而言的知识。就我们这些旁观者而言事实永远都是一样的：你在若干次“咔”后被一枪打死。我们能够做的，也就是围绕在你的尸体旁边争论，到底是按照哥本哈根，你已经永远地从宇宙中消失了，还是按照 MWI，你仍然在某个世界中活得逍遥自在。我们这些“外人”被投影到你活着的那个世界，这个概率极低，几乎可以不被考虑，但对你“本人”来说，你存在于那个世界却是 100%必须的！而且，因为各个世界之间无法互相干涉，所以你永远也不能从那个世界来到我们这里，告诉我们多宇宙论是正确的！

其实，Tegmark 等人根本不必去费心设计什么“量子自杀”实验，按照他们的思路，要是多宇宙解释是正确的，那么对于某人来说，他无论如何试图去自杀都不会死！要是他拿刀抹脖子，那么因为组成刀的是一群符合薛定谔波动方程的粒子，所以总有一个非常非常小，但确实不为 0 的可能性，这些粒子在那一刹那都发生了量子隧道效应，以某种方式丝毫

无损地穿透了该人的脖子，从而保持该人不死！当然这个概率极小极小，但按照 MWI，一切可能发生的都实际发生了，所以这个现象总会发生在某个世界！在“客观”上讲，此人在 99.99999...99% 的世界中都命丧黄泉，但从他的“主观视角”来说，他却一直活着！不管换什么方式都一样，跳楼也好，卧轨也好，上吊也好，总存在那么一些世界，让他还活着。从该人自身的视角来看，他怎么死都死不掉！

这就是从量子自杀思想实验推出的怪论，美其名曰“量子永生”（quantum immortality）。只要从主观视角来看，不但一个人永远无法完成自杀，事实上他一旦开始存在，就永远不会消失！总存在着一些量子效应，使得一个人不会衰老，而按照 MWI，这些非常低的概率总是对应于某个实际的世界！如果多宇宙理论是正确的，那么我们得到的推论是：一旦一个“意识”开始存在，从它自身的角度来看，它就必定永生！（天哪，我们怎么又扯到了“意识”！）

这是最强版本的人择原理，也称为“最终人择原理”。

可以想象，Tegmark 等多宇宙论的支持者见到自己的提议被演绎成了这么一个奇谈怪论后，是怎样的一种哭笑不得的心态。这位宾夕法尼亚大学的宇宙学家不得不出来说明，说“永生”并非 MWI 的正统推论。他说一个人在“死前”，还经历了某种非量子化的过程，使得所谓的意识并不能连续过渡保持永存。可惜也不太有人相信他的辩护。

关于这个问题，科学家和哲学家们无疑都会感到兴趣。支持 MWI 的人也会批评说，大量宇宙样本中的“人”的死去不能被简单地忽略，因为对于“意识”我们还是几乎一无所知的，它是如何“连续存在”的，根本就没有经过考察。一些偏颇的意见会认为，假如说“意识”必定会在某些宇宙分支中连续地存在，那么我们应该断定它不但始终存在，而且永远“连续”，也就是说，我们不该有“失去意识”的时候（例如睡觉或者昏迷）。不过，也许的确存在一些世界，在那里我们永不睡觉，谁又知道呢？再说，暂时沉睡然后又苏醒，这对于“意识”来说好像不能算作“无意义”的。而更为重要的，也许还是如何定义在多世界中的“你”究竟是个什么东西的问题。总之，这里面逻辑怪圈层出不穷，而且几乎没有什么可以为实践所检验的东西，都是空对空。我想，波普尔对此不会感到满意的！

关于自杀实验本身，我想也不太有人会仅仅为了检验哥本哈根和 MWI 而实际上真的去尝试！因为不管怎么样，实验的结果也只有你自己一个人知道而已，你无法把它告诉广大人民群众。而且要是哥本哈根解释不幸地是正确的，那你就呜呼哀哉了。虽说“朝闻道，夕死可矣”，但一般来说，闻了道，最好还是利用它做些什么来得更有意义。而且，就算你在枪口前真的不死，你也无法确实地判定，这是因为多世界预言的结果，还是只不过仅仅因为你的运气非常非常非常好。你最多能说：“我有 99.999999...99% 的把握宣称，多世界是正确的。”如此而已。

根据 Shikhovtsev 最新的传记，埃弗莱特本人也在某种程度上相信他的“意识”会沿着某些不通向死亡的宇宙分支而一直延续下去（当然他不知道自杀实验）。但具有悲剧和讽刺意味的是，他一家子都那么相信平行宇宙，以致他的女儿丽兹（Liz）在自杀前留下的遗书中说，她去往“另一个平行世界”和他相会了（当然，她并非为了检验这个理论而自杀）。或许埃弗莱特一家真的在某个世界里相会也未可知，但至少在我们现在所在的这个世界（以及绝大多数其他世界）里，我们看到人死不能复生了。所以，至少考虑在绝大多数世界中家人和朋友们的感情，我强烈建议各位读者不要在科学热情的驱使下做此尝试。

我们在多世界理论这条路上走得也够久了，和前面在哥本哈根派那里一样，我们的探索越到后来就越显得古怪离奇，道路崎岖不平，杂草丛生，让我们筋疲力尽，而且最后居然还会又碰到“意识”，“永生”之类形而上的东西（真是见鬼）！我们还是知难而退，回到原来的岔路口，再看看还有没有别的不同选择。不过我们在离开这条道路前，还有一样东西值得一提，那就是所谓的“量子计算机”。1977 年，埃弗莱特接受惠勒和德威特等人的邀请去德克萨斯大学演讲，午饭的时候，德威特特意安排惠勒的一位学生坐在埃弗莱特身边，后者向他请教了关于希尔伯特空间的问题。这个学生就是大卫·德义奇（David Deutsch）。

10-3

计算机的发明是 20 世纪最为重要的事件之一，这个新生事物的出现从根本上改变了人类的社会，使得我们的能力突破极限，达到了一个难以想象的地步。今天，计算机已经渗入了我们生活的每一个角落，离开它我们简直寸步难行。别的不说，各位正在阅读的本史话，便是用本人的膝上型计算机输入与编辑的，虽然拿一台现代的 PC 仅仅做文字处理简直是杀鸡用牛刀，或者拿伊恩·斯图尔特的话说，“就像开着罗尔斯·罗伊斯送牛奶”，但感谢时代的进步，这种奢侈品毕竟已经进入了千家万户。而且在如今这个信息商业社会，它的更新换代是如此之快，以致人们每隔两三年就要不断地开始为自己“老旧”电脑的升级而操心，不无心痛地向资本家们掏出那些好不容易积攒下来的银子。

回头看计算机的发展历史，人们往往会慨叹科技的发展一日千里，沧海桑田。通常我们把宾夕法尼亚大学 1946 年的那台 ENIAC 看成世界上的第一台电子计算机，不过当然，随着各人对“计算机”这个概念的定义不同，人们也经常提到德国人 Konrad Zuse 在 1941 年建造的 Z3，伊阿华州立大学在二战时建造的 ABC (Atanasoff-Berry Computer)，或者图灵小组为了破解德国密码而建造的 Collosus。不管怎么样，这些都是笨重的大家伙，体积可以装满整个房间，有的塞满了难看的电子管，有的拖着长长的电线，输入输出都靠打孔的纸或者磁带，和现代轻便精致的家庭电脑比起来，就好像美女与野兽的区别。但是，如果我们把看起来极为不同的这两位从数学上理想化，美女和野兽在本质上却是一样的！不管是庞大的早期计算机，还是我们现在使用的 PC，它们其实都可以简化成这样一种机器：它每次读入一个输入，并且视自己当时内态的不同，按照事先编好的一个规则表做出相应的操作：这操作可以是写入输出，或者是改变内态，或者干脆什么都不做乃至停机。这里的关键是，我们机器的输入和输出可以是无限多的，但它的内态和规则表却必须是有限的。这个模型其实也就是一切“计算机”的原型，由现代计算机的奠基人之一阿兰·图灵 (Alan Turing) 提出，也称作“图灵机” (The Turing Machine)。在图灵的原始论文中，它被描述成某种匣子样的东西，有一根无限长的纸带贯穿其中，一端是作为输入，另一端则是输出。磁带上记录了信息，一般来说是 0 和 1 的序列。这台机器按照需要移动磁带，从一端读入数据，并且按照编好的规则表进行操作，最后在另一端输出运算结果。

我们如今所使用的电脑，不管看上去有多精巧复杂，本质上也就是一种图灵机。它读入数据流，按照特定的算法来处理它，并在另一头输出结果。从这个意义上来讲，奔腾 4 和 286 的区别只不过是前者更快更有效率而已，但它们同样做为图灵机来说，所能做到的事情其实是一样多的！我的意思是，假如给予 286 以足够的时间和输出空间（可以记录暂时的储存数据），奔腾机所能做到的它同样可以做到。286 已经太高级了，即使退化成图灵机最原始的形式，也就是只能向左或向右移动磁带并做出相应行动的那台机器，它们所能解决的事情也是同样多的，只不过是快慢和效率的问题罢了。

计算机所处理的信息在最基本的层面上是 2 进制码，换句话说，是 0 和 1 的序列流。对计算机稍稍熟悉的朋友们都知道，我们把每一“位”信息称作一个“比特” (bit，其实是 binary digit 的缩写)，例如信息 1010，就包含了 4 个 bits。8 个 bits 就等于 1 个 byte，1024 个 bytes 就是 1K，1024K=1M，1024M=1G，各位想必都十分清楚了。

对于传统的计算机来说，1 个 bit 是信息的最小单位。它要么是 0，要么是 1，对应于电路的开或关。假如一台计算机读入了 10 个 bits 的信息，那相当于说它读入了一个 10 位的 2 进制数（比方说 1010101010），这个数的每一位都是一个确定的 0 或者 1。这在人们看来，似乎是理所当然的。

但是，接下来就让我们进入神奇的量子世界。一个 bit 是信息流中的最小单位，这看起来正如一个量子！我们回忆一下走过的路上所见到的那些奇怪景象，量子论最叫人困惑的是什么呢？是不确定性。我们无法肯定地指出一个电子究竟在哪里，我们不知道它是通过了左缝还是右缝，我们不知道薛定谔的猫是死了还是活着。根据量子论的基本方程，所有的可能性都是线性叠加在一起的！电子同时通过了左和右两条缝，薛定谔的猫同时活着和死了。只有当实际观测它的时候，上帝才随机地掷一下骰子，告诉我们一个确定的结果，或者他老人家不掷骰子，而是把我们投影到两个不同的宇宙中去。

大家不要忘记，我们的电脑也是由微观的原子组成的，它当然也服从量子定律（事实上所有的机器肯定都是服从量

子论的，只不过对于传统的机器来说，它们的工作原理并不主要建立在量子效应上)。假如我们的信息由一个个电子来传输，我们规定，当一个电子是“左旋”的时候，它代表了 0，当它是“右旋”的时候，则代表 1（通常我们会以“上”和“下”来表示自旋方向，不过可能有读者会对“上旋”感到困惑，我们换个称呼，这无所谓)。现在问题来了，当我们的电子到达时，它是处于量子叠加态的。这岂不是说，它同时代表了 0 和 1？

这就对了，在我们的量子计算机里，一个 bit 不仅只有 0 或者 1 的可能性，它更可以表示一个 0 和 1 的叠加！一个“比特”可以同时记录 0 和 1，我们把它称作一个“量子比特”（qubit）。假如我们的量子计算机读入了一个 10bits 的信息，所得到的就不仅仅是一个 10 位的二进制数了，事实上，因为每个 bit 都处在 0 和 1 的叠加态，我们的计算机所处理的是 2^{10} 个 10 位数的叠加！

换句话说，同样是读入 10bits 的信息，传统的计算机只能处理 1 个 10 位的二进制数，而如果是量子计算机，则可以同时处理 2^{10} 个这样的数！

利用量子演化来进行某种图灵机式的计算早在 70 年代和 80 年代初便由 Bennett, Benioff 等人进行了初步的讨论。到了 1982 年，那位极富传奇色彩的美国物理学家理查德·费因曼（Richard Feynman）注意到，当我们试图使用计算机来模拟某些物理过程，例如量子叠加的时候，计算量会随着模拟对象的增加而指数式地增长，以致使得传统的模拟很快变得不可能。费因曼并未因此感到气馁，相反，他敏锐地想到，也许我们的计算机可以使用实际的量子过程来模拟物理现象！如果说模拟一个“叠加”需要很大的计算量的话，为什么不用叠加本身去模拟它呢？每一个叠加都是一个不同的计算，当所有这些计算都最终完成之后，我们再对它进行某种么正运算，把一个最终我们需要答案投影到输出中去。费因曼猜想，这在理论上是可行的，而他的确猜对了！

1985 年，我们那位在埃弗莱特的谆谆教导和多宇宙论的熏陶下成长起来的大卫·德义奇闪亮登场了。他仿照图灵当年走的老路子，成功地证明了，一台普适的量子计算机是可能的。所谓“普适机”（universal machine）的概念可能对大家有点陌生以及令人困惑，它可以回到图灵那里，其基本思想是，存在某种图灵机，把一段指令编成合适的编码对其输入，可以令这台机器模拟任何图灵机的行为。我无意在这里过于深入细节，因为那是相当费脑筋的事情，虽然其中的数学一点也不复杂。如果各位有兴趣深入探索的话可以参阅一些介绍图灵工作的文章（我个人还是比较推荐彭罗斯的《皇帝新脑》），在这里各位所需要了解的无非是：我们聪明睿智的德义奇先生证明了一件事，那就是我们理论上可以建造一种机器，它可以模拟任何特殊量子计算机的过程，从而使得一切形式的量子计算成为可能。传统的电脑处理信息流的时候用到的是所谓的“布尔逻辑门”（Boolean Logic Gate），比如 AND, OR, NOT, XOR 等等。在量子计算机中只需把它们换成相应的量子逻辑门即可。

说了那么多，一台量子计算机有什么好处呢？

德义奇证明，量子计算机无法实现超越算法的任务，也就是说，它无法比普通的图灵机做得更多。从某种确定的意义上来说，量子计算机也是一种图灵机。但和传统的机器不同，它的内态是不确定的，它同时可以执行多个指向下一阶段的操作。如果把传统的计算机称为决定性的图灵机（Deterministic Turing Machine, DTM），量子计算机则是非决定性的图灵机（NDTM）。德义奇同时证明，它将具有比传统的计算机大得多的效率。用术语来讲，执行同一任务时它所要求的复杂性（complexity）要低得多。理由是显而易见的，量子计算机执行的是一种并行计算，正如我们前面举的例子，当一个 10bits 的信息被处理时，量子计算机实际上操作了 2^{10} 个态！

在如今这个信息时代，网上交易和电子商务的浪潮正席卷全球，从政府至平民百姓，都越来越依赖于电脑和网络系统。与此同时，电子安全的问题也显得越来越严峻，谁都不想黑客们大摇大摆地破解你的密码，侵入你的系统篡改你的资料，然后把你银行里的存款提得精光，这就需要对私隐资料执行严格的加密保护。目前流行的加密算法不少，很多都是依赖于这样一个靠山，也即所谓的“大数不可分解性”。大家中学里都苦练过因式分解，也做过质因数分解的练习，比如把 15 这个数字分解成它的质因数的乘积，我们就会得到 $15=5 \times 3$ 这样一个唯一的答案。

问题是，分解 15 看起来很简单，但如果要分解一个很大很大的数，我们所遭遇到的困难就变得几乎不可克服了。比如，把 10949769651859 分解成它的质因数的乘积，我们该怎么做呢？糟糕的是，在解决这种问题上，我们还没有发现一种有效的算法。一种笨办法就是用所有已知的质数去一个一个地试，最后我们会发现 $10949769651859 = 4220851 \times 2594209$ （数字取自德义奇的著作 *The Fabric of Reality*），但这是异常低效的。更遗憾的是，随着数字的加大，这种方法所费的时间呈现出几何式的增长！每当它增加一位数，我们就要多费 3 倍多的时间来分解它，很快我们就会发现，就算计算时间超过宇宙的年龄，我们也无法完成这个任务。当然我们可以改进我们的算法，但目前所知最好的算法（我想应该是 GNFS）所需的复杂性也只不过比指数性的增长稍好，仍未达到多项式的要求（所谓多项式，指的是当处理数字的位数 n 增大时，算法所费时间按照多项式的形式，也就是 n^k 的速度增长）。

所以，如果我们用一个大数来保护我们的秘密，只有当这个大数被成功分解时才会泄密，我们应当是可以感觉非常安全的。因为从上面的分析可以看出，想使用“暴力”方法，也就是穷举法来破解这样的密码几乎是不可能的。虽然我们的处理器速度每隔 18 个月就翻倍，但也远远追不上安全性的增长：只要给我们的数增加一两位数，就可以保好几十年的平安。目前最流行的一些加密术，比如公钥的 RSA 算法正是建筑在这个基础之上。

但量子计算机实现的可能使得所有的这些算法在瞬间人人自危。量子计算机的并行机制使得它可以同时处理多个计算，这使得大数不再成为障碍！1994 年，贝尔实验室的彼得·肖（Peter Shor）创造了一种利用量子计算机的算法，可以有效地分解大数（复杂性符合多项式！）。比如我们要分解一个 250 位的数字，如果用传统计算机的话，就算我们利用最有效的算法，把全世界所有的计算机都联网到一起联合工作，也要花上几百万年的漫长时间。但如果用量子计算机的话，只需几分钟！一台量子计算机在分解 250 位数的时候，同时处理了 10^{500} 个不同的计算！

更糟的事情接踵而来。在肖发明了他的算法之后，1996 年贝尔实验室的另一位科学家洛弗·格鲁弗（Lov Grover）很快发现了另一种算法，可以有效地搜索未排序的数据库。如果我们想从一个有 n 个记录但未排序的数据库中找出一个特定的记录的话，大概只好靠随机地碰运气，平均试 $n/2$ 次才会得到结果，但如果用格鲁弗的算法，复杂性则下降到根号 n 次。这使得另一种著名的非公钥系统加密算法，DES 面临崩溃。现在几乎所有的人都开始关注量子计算，更多的量子算法肯定会接连不断地被创造出来，如果真的能够造出量子计算机，那么对于现在所有的加密算法，不管是 RSA，DES，或者别的什么椭圆曲线，都可以看成是末日的来临。最可怕的是，因为量子并行运算内在的机制，即使我们不断增加密码的位数，也只不过给破解者增加很小的代价罢了，这些加密术实际上都破产了！

2001 年，IBM 的一个小组演示了肖的算法，他们利用 7 个量子比特把 15 分解成了 3 和 5 的乘积。当然，这只是非常初步的进展，我们还不知道，是否真的可以造出有实际价值的量子计算机，量子态的纠缠非常容易退相干，这使得我们面临着技术上的严重困难。虽然 2002 年，斯坦福和日本的科学家声称，一台硅量子计算机是可以利用现在的技术实现的，2003 年，马里兰大学的科学家们成功地实现了相距 0.7 毫米的两个量子比特的互相纠缠，一切都在向好的方向发展，但也许量子计算机真正的运用还要过好几十年才会实现。这个项目是目前最为热门的话题之一，让我们且拭目以待。

就算强大的量子计算机真的问世了，电子安全的前景也并非一片黯淡，俗话说得好，上帝在这里关上了门，但又在别处开了一扇窗。量子论不但给我们提供了威力无比的计算破解能力，也让我们看到了另一种可能性：一种永无可能破解的加密方法。这是另一个炙手可热的话题：量子加密术（quantum cryptography）。如果篇幅允许，我们在史话的最后会简单描述一下这方面的情况。这种加密术之所以能够实现，是因为神奇的量子可以突破爱因斯坦的上帝所安排下的束缚——那个宿命般神秘的不等式。而这，也就是我们马上要去讨论的内容。

但是，在本节的最后，我们还是回到多宇宙解释上来。我们如何去解释量子计算机那神奇的计算能力呢？德义奇声称，唯一的可能是它利用了多个宇宙，把计算放在多个平行宇宙中同时进行，最后汇总那个结果。拿肖的算法来说，我们已经提到，当它分解一个 250 位数的时候，同时进行着 10^{500} 个计算。德义奇愤愤不平地请求那些不相信 MWI 的人解释这个事实：如果不是把计算同时放到 10^{500} 个宇宙中进行的话，它哪来的资源可以进行如此惊人的运算？他特别指

出，整个宇宙也只不过包含大约 10^{80} 个粒子而已。但是，虽然把计算放在多个平行宇宙中进行是一种可能的说法（虽然听上去仍然古怪），其实 MWI 并不是唯一的解释。基本上，量子计算机所依赖的只是量子论的基本方程，而不是某个解释。它的模型是从数学上建筑起来的，和你如何去解释它无干。你可以把它想象成 10^{500} 个宇宙中的每一台计算机在进行着计算，但也完全可以按照哥本哈根解释，想象成未观测（输出结果）前，在这个宇宙中存在着 10^{500} 台叠加的计算机在同时干活！至于这是如何实现的，我们是没有权利去讨论的，正如我们不知道电子如何同时穿过了双缝，猫如何同时又死又活一样。这听起来不可思议，但在许多人看来，比起瞬间突然分裂出了 10^{500} 个宇宙，其古怪程度也半斤八两。正如柯文尼在《时间之箭》中说的那样，即使这样一种计算机造出来，也未必能证明多世界一定就比其它解释优越。关键是，我们还没有得到实实在在可以去判断的证据，也许我们还是应该去看看还有没有别的道路，它们都通向哪些更为奇特的方向。

10-4

我们终于可以从多世界这条道路上抽身而退，再好好反思一下量子论的意义。前面我们留下的那块“意识怪兽”的牌子还历历在目，而在多宇宙这里我们的境遇也不见得好多少，也许可以用德威特的原话，立一块“精神分裂”的牌子来警醒世人注意。在哥本哈根那里，我们时刻担心的是如何才能使波函数坍缩，而在多宇宙那里，问题变成了“我”在宇宙中究竟算是个什么东西。假如我们每时每刻都不停地被投影到无数的世界，那么究竟哪一个才算是真正的“我”呢？或者，“我”这个概念干脆就应该定义成由此刻开始，同时包含了将来那 n 条宇宙岔路里的所有“我”的一个集合？如果是这样的话，那么“量子永生”听起来就不那么荒诞了：在这个集合中“我”总在某条分支上活着嘛。假如你不认同，认为“我”只不过是某时某刻的一个存在，随着每一次量子测量而分裂成无数个新的不同的“我”，那么难道我们的精神只不过是一种瞬时的概念，它完全不具有连续性？生活在一个无时无刻不在分裂的宇宙中，无时无刻都有无穷个新的“我”的分身被制造出来，天知道我们为什么还会觉得时间是平滑而且连续的，天知道为什么我们的“自我意识”的连续性没有遭到割裂。

不管是哥本哈根还是多宇宙，其实都是在努力地试图解释量子世界中的这样一个奇妙性质：叠加性。正如我们已经在史话中反复为大家所揭示的那样，当没有观测前，古怪的量子精灵始终处在不确定的状态，必须描述为所有的可能性的叠加。电子既在这里又在那里，在实际观测之前并不像以前经典世界中我们不言而喻地假定的那样，有一个唯一确定的位置。当一个光子从 A 点运动到 B 点，它并不具有经典力学所默认的一条确定的轨迹。相反，它的轨迹是一团模糊，是所有可能的轨迹的总和！而且不单单是所有可能的空间轨迹，事实上，它是全部空间以及全部时间的路径的总和！换句话说，光子从 A 到 B，是一个过去、现在、未来所有可能的路线的叠加。在此基础之上费因曼建立了他的“路径积分”（path integral）方法，用以计算量子体系在四维空间中的几率振幅。我们在史话的前面已经看到了海森堡的矩阵和薛定谔的波，费因曼的路径积分是第三种描述量子体系的手段。但同样可以证明，它和前两者是完全等价的，只不过是又一种不同的数学表达形式罢了。配合费因曼图，这种方法简单实用，而且非常巧妙。把它运用到原子体系中，我们会惊奇地发现在绝大部分路径上，作用量都互相抵消，只留下少数可能的“轨道”，而这正和观测相符！

我们必须承认，量子论在现实中是成功的，它能够完美地解释和说明观测到的现象。可是要承认叠加，不管是哥本哈根式的叠加还是多宇宙式的叠加，这和我们对于现实世界的常识始终有着巨大的冲突。我们还是不由地怀念那流金的古典时代，那时候“现实世界”仍然保留着高贵的客观性血统，它简单明确，符合常识，一个电子始终有着确定的位置和动量，不以我们的意志或者观测行为而转移，也不会莫名其妙地分裂，而只是一丝不苟地在一个优美的宇宙规则的统治下按照严格的因果律而运行。哦，这样的场景温馨而暖人心扉，简直就是物理学家们梦中的桃花源，难道我们真的无法再现这样的理想，回到那个令人怀念的时代了吗？

且慢，这里就有一条道路，打着一个大广告牌：回到经典。它甚至把爱因斯坦拉出来作为它的代言人：这条道路通向爱因斯坦的梦想。天哪，爱因斯坦的梦想，不就是那个古典客观，简洁明确，一切都由严格的因果性来主宰的世界吗？那里面既没有掷骰子的上帝，也没有多如牛毛的宇宙拷贝，这是多么教人心动的情景。我们还犹豫什么呢，赶快去看看吧！

时空倒转，我们先要回到 1927 年，回到布鲁塞尔的第五届索尔维会议，再回味一下那场决定了量子论兴起的大辩论。我们在史话的第八章已经描写了这次名留青史的会议的一些情景，我们还记得法国的那位贵族德布罗意在会上讲述了他的“导波”理论，但遭到了泡利的质疑。在第五届索尔维会议上，玻尔的互补原理还刚刚出台，粒子和波动还正打得不亦乐乎，德布罗意的“导波”正是试图解决这一矛盾的一个尝试。我们都还记得，德布罗意发现，每当一个粒子前进时，都伴随着一个波，这深刻地揭示了波粒二象性的难题。但德布罗意并不相信玻尔的互补原理，亦即电子同时又是粒子又是波的解释。德布罗意想象，电子始终是一个实实在在的粒子，但它的确受到时时伴随着它的那个波的影响，这个波就像盲人的导航犬，为它探测周围的道路的情况，指引它如何运动，也就是我们为什么把它称作“导波”的原因。德布罗意的理论里没有波恩统计解释的地位，它完全是确定和实在论的。量子效应表面上的随机性完全是由一些我们不可知的变量所造成的，换句话说，量子论是一个不完整的理论，它没有考虑到一些不可见的变量，所以才显得不可预测。假如把那些额外的变量考虑进去，整个系统是确定和可预测的，符合严格因果关系的。这样的理论称为“隐变量理论”（Hidden Variable Theory）。

德布罗意理论生不逢时，正遇上伟大的互补原理出台的那一刻，加上它本身的不成熟，于是遭到了众多的批评，而最终判处它死刑的是 1932 年的冯诺伊曼。我们也许还记得，冯诺伊曼在那一年为量子论打下了严密的数学基础，他证明了量子体系的一些奇特性质比如“无限后退”。然而在这些之外，他还顺便证明了一件事，那就是：任何隐变量理论都不可能对测量行为给出确定的预测。换句话说，隐变量理论试图把随机性从量子论中赶走的努力是不可能实现的，任何隐变量理论——不管它是怎样的——注定都要失败。

冯诺伊曼那华丽的天才倾倒每一个人，没有人对这位 20 世纪最伟大的数学家之一产生怀疑。隐变量理论那无助的努力似乎已经逃脱不了悲惨的下场，而爱因斯坦对于严格的因果性的信念似乎也注定要化为泡影。德布罗意接受这一现实，他在内心深处不像玻尔那样顽强而充满斗志，而是以一种贵族式的风度放弃了他的观点。整个 3、40 年代，哥本哈根解释一统天下，量子的不确定性精神深植在物理学的血液之中，众多的电子和光子化身为波函数神秘地在宇宙中弥漫，众星拱月般地烘托出那位伟大的智者——尼尔斯·玻尔的魔力来。

1969 年诺贝尔物理奖得主盖尔曼后来调侃地说：“玻尔给整整一代的物理学家洗了脑，使他们相信，事情已经最终解决了。”

约翰·贝尔则气忿忿地说：“德布罗意在 1927 年就提出了他的理论。当时，以我现在看来是丢脸的一种方式，被物理学界一笑置之，因为他的论据没有被驳倒，只是被简单地践踏了。”

谁能想到，就连像冯诺伊曼这样的天才，也有阴沟里翻船的时候。他的证明不成立！冯诺伊曼关于隐函数理论无法对观测给出唯一确定的解的证明建立在 5 个前提假设上，在这 5 个假设中，前 4 个都是没有什么问题的，关键就在第 5 个那里。我们都知道，在量子力学里，对一个确定的系统进行观测，我们是无法得到一个确定的结果的，它按照随机性输出，每次的结果可能都不一样。但是我们可以按照公式计算出它的期望（平均）值。假如对于一个确定的态矢量 Φ 我们进行观测 X ，那么我们可以把它坍缩后的期望值写成 $\langle X, \Phi \rangle$ 。正如我们一再强调的那样，量子论是线性的，它可以叠加。如果我们进行了两次观测 X, Y ，它们的期望值也是线性的，即应该有关系：

$$\langle X+Y, \Phi \rangle = \langle X, \Phi \rangle + \langle Y, \Phi \rangle$$

但是在隐函数理论中，我们认为系统光由态矢量 Φ 来描述是不完全的，它还具有不可见的隐藏函数，或者隐藏的态矢量 H 。把 H 考虑进去后，每次观测的结果就不再随机，而是唯一确定的。现在，冯诺伊曼假设：对于确定的系统来说，即使包含了隐函数 H 之后，它们也是可以叠加的。即有：

$$\langle X+Y, \Phi, H \rangle = \langle X, \Phi, H \rangle + \langle Y, \Phi, H \rangle$$

这里的问题大大地有。对于前一个式子来说，我们讨论的是平均情况。也就是说，假如真的有隐函数 H 的话，那么我们单单考虑 Φ 时，它其实包含了所有的 H 的可能分布，得到的是关于 H 的平均值。但把具体的 H 考虑进去后，我们

所说的就不是平均情况了！相反，考虑了 H 后，按照隐函数理论的精神，就无所谓期望值，而是每次都得到唯一的结果。关键是，平均值可以相加，并不代表一个个单独的情况都能够相加！

我们这样打比方：假设我们扔骰子，骰子可以掷出 1—6 点，那么我们每扔一个骰子，平均得到的点数是 3.5。这是一个平均数，能够按线性叠加，也就是说，假如我们同时扔两粒骰子，得到的平均点数可以看成是两次扔一粒骰子所得到的平均数的和，也就是 $3.5+3.5=7$ 点。再通俗一点，假设 ABC 三个人同时扔骰子，A 一次扔两粒，B 和 C 都一次扔一粒，那么从长远的平均情况来看，A 得到的平均点数等于 B 和 C 之和。

但冯诺伊曼的假设就变味了。他其实是假定，任何一次我们同时扔两粒骰子，它必定等于两个人各扔一粒骰子的点数之和！也就是说只要三个人同时扔骰子，不管是哪一次，A 得到的点数必定等于 B 加 C。这可大大未必，当 A 掷出 12 点的时候，B 和 C 很可能各只掷出 1 点。虽然从平均情况来看 A 的确等于 B 加 C，但这并非意味着每回合都必须如此！

冯诺伊曼的证明建立在这样一个不牢靠的基础上，自然最终轰然崩溃。终结他的人是 大卫·玻姆 (David Bohm)，当代最著名的量子力学专家之一。玻姆出生于宾夕法尼亚，他曾在爱因斯坦和奥本海默手下学习（事实上，他是奥本海默在伯克利所收的最后一个研究生），爱因斯坦的理想也深深打动着玻姆，使他决意去追寻一个回到严格的因果律，恢复宇宙原有秩序的理论。1952 年，玻姆复活了德布罗意的导波，成功地创立了一个完整的隐函数体系。全世界的物理学家都吃惊得说不出话来：冯诺伊曼不是已经把这种可能性彻底排除掉了吗？现在居然有人举出了一个反例！

奇怪的是，发现冯诺伊曼的错误并不需要太高的数学技巧和洞察能力，但它硬是在 20 年的时间里没有引起值得一提的注意。David Mermin 揶揄道，真不知道它自发表以来是否有过任何专家或者学生真正研究过它。贝尔在访谈里毫不客气地说：“你可以这样引用我的话：冯诺伊曼的证明不仅是错误的，更是愚蠢的！”

看来我们在前进的路上仍然需要保持十二分的小心。

饭后闲话：第五公设

冯诺伊曼栽在了他的第五个假设上，这似乎是冥冥中的天道循环，2000 年前，伟大的欧几里德也曾经在他的第五个公设上小小地绊过一下。

无论怎样形容《几何原本》的伟大也不会显得过分夸张，它所奠定的公理化思想和演绎体系，直接孕育了现代科学，给它提供了最强大的力量。《几何原本》把几何学的所有命题推理都建筑在一开头给出的 5 个公理和 5 个公设上，用最基本的砖石建筑起了一幢高不可攀的大厦。

对于欧氏所给出的那 5 个公理和前 4 个公设（适用于几何学的他称为公设），人们都可以接受。但对于第五个公设，人们觉得有一些不太满意。这个假设原来的形式比较冗长，人们常把它改成一个等价的表述方式：“过已知直线外的一个特定的点，能够且只能够作一条直线与已知直线平行”。长期以来，人们对这个公设的正确性是不怀疑的，但觉得它似乎太复杂了，也许不应该把它当作一个公理，而能够从别的公理中把它推导出来。但 2000 年过去了，竟然没有一个数学家做到这一点（许多时候有人声称他证明了，但他们的证明都是错的）！

欧几里德本人显然也对这个公设感到不安，相比其他 4 个公设，第五公设简直复杂到家了（其他 4 个公设是：1，可以在任意两点间划一直线。2，可以延长一线段做一直线。3，圆心和半径决定一个圆。4，所有的直角都相等）。在《几何原本》中，他小心翼翼地尽量避免使用这一公设，直到没有办法的时候才不得不用它，比如在要证明“任意三角形的内角和为 180 度”的时候。

长期的失败使得人们不由地想，难道第五公设是不可证明的？如果我们用反证法，假设它不成立，那么假如我们导出矛盾，自然就可以反过来证明第五公设本身的正确性。但如果假设第五公设不成立，结果却导致不出矛盾呢？

俄国数学家罗巴切夫斯基（N. Lobachevsky）正是这样做的。他假设第五公设不成立，也就是说，过直线外一点，可以作一条以上的直线与已知直线平行，并以此为基础进行推演。结果他得到了一系列稀奇古怪的结果，可是它们却是一个自成体系的系统，它们没有矛盾，在逻辑上是自洽的！一种不同于欧几里得的几何——非欧几何诞生了！

从不同于第五公设的其他假设出发，我们可以得到和欧几里得原来的版本稍有不同的一些定理。比如“三角形内角和等于 180 度”是从第五公设推出来的，假如过一点可以作一条以上的平行线，那么三角形的内角和便小于 180 度了。反之，要是过一点无法作已知直线的平行线，结果就是三角形的内角和大于 180 度。对于后者来说容易想象的就是球面，任何看上去平行的直线最终必定交汇。比方说在地球的赤道上所有的经线似乎都互相平行，但它们最终都在两极点相交。如果你在地球表面画一个三角形，它的内角和会超出 180 度，当然，你得画得足够大才测量得到。传说高斯曾经把三座山峰当作三角形的三个顶点来测量它们的内角和，但似乎没有发现什么，不过他要是在星系间做这样的测量，其结果就会很明显了：星系的质量造成了空间的明显弯曲。

罗巴切夫斯基假设过一点可以做一条以上的直线与已知直线平行，另一位数学家黎曼则假设无法作这样的平行线，创立了黎曼非欧几何。他把情况推广到 n 维中去，彻底奠定了非欧几何的基础。更重要的是，他的体系被运用到物理中去，并最终孕育了 20 世纪最杰出的科学巨构——广义相对论。

10-5

玻姆的隐变量理论是德布罗意导波的一个增强版，只不过他把所谓的“导波”换成了“量子势”（quantum potential）的概念。在他的描述中，电子或者光子始终是一个实实在在的粒子，不论我们是否观察它，它都具有确定的位置和动量。但是，一个电子除了具有通常的一些性质，比如电磁势之外，还具有所谓的“量子势”。这其实就是一种类似波动的东西，它按照薛定谔方程发展，在电子的周围扩散开去。但是，量子势所产生的效应和它的强度无关，而只和它的形状有关，这使它可以一直延伸到宇宙的尽头，而不发生衰减。

在玻姆理论里，我们必须把电子想象成这样一种东西：它本质上是一个经典的粒子，但以它为中心发散出一种势场，这种势弥漫在整个宇宙中，使它每时每刻都对周围的环境了如指掌。当一个电子向一个双缝进发时，它的量子势会在它到达之前便感应到双缝的存在，从而指导它按照标准的干涉模式行动。如果我们试图关闭一条狭缝，无处不在的量子势便会感应到这一变化，从而引导电子改变它的行为模式。特别地，如果你试图去测量一个电子的具体位置的话，你的测量仪器将首先与它的量子势发生作用，这将使电子本身发生微妙的变化，这种变化是不可预测的，因为主宰它们的是一些“隐变量”，你无法直接探测到它们。

玻姆用的数学手法十分高超，他的体系的确基本做到了传统的量子力学能做到的一切！但是，让我们感到不舒服的是，这样一个隐变量理论始终似乎显得有些多余。量子力学从世纪初一路走来，诸位物理大师为它打造了金光闪闪的基本数学形式。它是如此漂亮而简洁，在实际中又是如此管用，以致于我们觉得除非绝对必要，似乎没有理由给它强迫加上笨重而丑陋的附加假设。玻姆的隐函数理论复杂繁琐又难以服众，他假设一个电子具有确定的轨迹，却又规定因为隐变量的扰动关系，我们绝对观察不到这样的轨迹！这无疑违反了奥卡姆剃刀原则：存在却绝对观测不到，这和不存在又有何分别呢？难道，我们为了这个世界的实在性，就非要放弃物理原理的优美、明晰和简洁吗？这连爱因斯坦本人都会反对，他对科学美有着比任何人都要深的向往和眷恋。事实上，爱因斯坦，甚至德布罗意生前都没有对玻姆的理论表示过积极的认同。

更不可原谅的是，玻姆在不惜一切代价地恢复了世界的实在性和决定性之后，却放弃了另一样同等重要的东西：定域性（Locality）。定域性指的是，在某段时间里，所有的因果关系都必须维持在一个特定的区域内，而不能超越时空

来瞬间地作用和传播。简单来说，就是指不能有超距作用的因果关系，任何信息都必须以光速这个上限而发送，这也就是相对论的精神！但是在玻姆那里，他的量子势可以瞬间把它的触角伸到宇宙的尽头，一旦在某地发生什么，其信息立刻便传达到每一个电子耳边。如果玻姆的理论成立的话，超光速的通讯在宇宙中简直就是无处不在，爱因斯坦不会容忍这一切的！

但是，玻姆他的确打破了因为冯诺伊曼的错误而造成的坚冰，至少给隐变量从荆棘中艰难地开辟出了一条道路。不管怎么样，隐变量理论在原则上毕竟是可能的，那么，我们是不是至少还保有一线希望，可以发展出一个完美的隐变量理论，使得我们在将来的某一天得以同时拥有一个确定、实在，而又拥有定域性的温暖世界呢？这样一个世界，不就是爱因斯坦的终极梦想吗？

1928年7月28日，距离量子论最精彩的华章——不确定性原理的谱写已经过去一年有余。在这一天，约翰·斯图尔特·贝尔（John Stewart Bell）出生在北爱尔兰的首府贝尔法斯特。小贝尔在孩提时代就表现出了过人的聪明才智，他在11岁上向母亲立志，要成为一名科学家。16岁时贝尔因为尚不够年龄入读大学，先到贝尔法斯特女王大学的实验室当了一年的实习工，然而他的才华已经深深感染了那里的教授和员工。一年后他顺理成章地进入女王大学攻读物理，虽然主修的是实验物理，但他同时也对理论物理表现出非凡的兴趣。特别是方兴未艾的量子论，它展现出的深刻的哲学内涵令贝尔相当沉迷。

贝尔在大学的时候，量子论大厦主体部分的建设已经尘埃落定，基本的理论框架已经由海森堡和薛定谔所打造完毕，而玻尔已经为它作出了哲学上最意味深长的诠释。20世纪物理史上最激动人心的那些年代已经逝去，没能参与其间当然是一件遗憾的事，但也许正是因为这样，人们得以稍稍冷静下来，不致于为了那伟大的事业而过于热血沸腾，身不由己地便拜倒在尼尔斯·玻尔那几乎不可抗拒的个人魔力之下。贝尔不无吃惊地发现，自己并不同意老师和教科书上对于量子论的正统解释。海森堡的不确定性原理——它听上去是如此具有主观的味道，实在不讨人喜欢。贝尔想要的是一个确定的，客观的物理理论，他把自己描述为一个爱因斯坦的忠实追随者。

毕业以后，贝尔先是进入英国原子能研究所（AERE）工作，后来转去了欧洲粒子中心（CERN）。他的主要工作集中在加速器和粒子物理领域方面，但他仍然保持着对量子物理的浓厚兴趣，在业余时间里密切关注着它的发展。1952年玻姆理论问世，这使贝尔感到相当兴奋。他为隐变量理论的想法所着迷，认为它恢复了实在论和决定论，无疑迈出了通向那个终极梦想的第一步。这个终极梦想，也就是我们一直提到的，使世界重新回到客观独立，优雅确定，严格遵守因果关系的轨道上来。贝尔觉得，隐变量理论正是爱因斯坦所要求的东西，可以完成对量子力学的完备化。然而这或许是贝尔的一厢情愿，因为极为讽刺的是，甚至爱因斯坦本人都不认同玻姆！

不管怎么样，贝尔准备仔细地考察一下，对于德布罗意和玻姆的想法是否能够有实际的反驳，也就是说，是否真如他们所宣称的那样，对于所有的量子现象我们都可以抛弃不确定性，而改用某种实在论来描述。1963年，贝尔在日内瓦遇到了约克教授，两人对此进行了深入的讨论，贝尔逐渐形成了他的想法。假如我们的宇宙真的是如爱因斯坦所梦想的那样，它应当具有怎样的性质呢？要探讨这一点，我们必须重拾起爱因斯坦昔日与玻尔论战时所提到的一个思想实验——EPR 佯谬。

要是你已经忘记了 EPR 是个什么东西，可以先复习一下我们史话的 8-4。我们所描述的实际上是经过玻姆简化过的 EPR 版本，不过它们在本质上是一样的。现在让我们重做 EPR 实验：一个母粒子分裂成向相反方向飞开去的两个小粒子 A 和 B，它们理论上具有相反的自旋方向，但在没有观察之前，照量子派的讲法，它们的自旋是处在不确定的叠加态中的，而爱因斯坦则坚持，从分离的那一刻起，A 和 B 的状态就都是确定了的。

我们用一个矢量来表示自旋方向，现在甲乙两人站在遥远的天际两端等候着 A 和 B 的分别到来（比方说，甲在人马座的方向，乙在双子座的方向）。在某个按照宇宙标准时间所约好了的关键时刻（比方说，宇宙历 767 年 8 月 12 日 9 点整，听起来怎么像银英传，呵呵），两人同时对 A 和 B 的自旋在同一个方向上作出测量。那么，正如我们已经讨论过的，

因为要保持总体上的守恒，这两个自旋必定相反，不论在哪个方向上都是如此。假如甲在某方向上测量到 A 的自旋为正（+），那么同时乙在这个方向上得到的 B 自旋的测量结果必定为负（-）！

换句话说，A 和 B——不论它们相隔多么遥远——看起来似乎总是如同约好了那样，当 A 是+的时候 B 必定是一，它们的合作率是 100%！在统计学上，拿稍微正式一点的术语来说，（A+，B-）的相关性（correlation）是 100%，也就是 1。我们需要熟悉一下相关性这个概念，它是表示合作程度的一个变量，假如 A 和 B 每次都合作，比如 A 是+时 B 总是-，那么相关性就达到最大值 1，反过来，假如 B 每次都不和 A 合作，每当 A 是+是 B 偏偏也非要是+，那么（A+，B-）的相关率就达到最小值-1。当然这时候从另一个角度看，（A+，B+）的相关就是 1 了。要是 B 不和 A 合作也不有意对抗，它的取值和 A 毫无关系，显得完全随机，那么 B 就和 A 并不相关，相关性是 0。

在 EPR 里，不管两个粒子的状态在观测前究竟确不确定，最后的结果是肯定的：在同一个方向上要么是（A+，B-），要么是（A-，B+），相关性是 1。但是，这是在同一方向上，假设在不同方向上呢？假设甲沿着 x 轴方向测量 A 的自旋，乙沿着 y 轴方向测量 B，其结果的相关率会是如何呢？冥冥中一丝第六感告诉我们，决定命运的时刻就要到来了。

实际上我们生活在一个 3 维空间，可以在 3 个方向上进行观测，我们把这 3 个方向假设为 x，y，z。它们并不一定需要互相垂直，任意地取便是。每个粒子的自旋在一个特定的方向无非是正负两种可能，那么在 3 个方向上无非总共是 8 种可能（把每个方向想像成一根爻，那么组合结果无非是 8 个卦）。

x y z
 +++
 ++-
 +-+
 +--
 -++
 -+-
 --+

对于 A 来说有 8 种可能，那么对于 A 和 B 总体来说呢？显然也是 8 种可能，因为我们一旦观测了 A，B 也就确定了。如果 A 是（+，+，-），那么因为要守恒，B 一定是（-，-，+）。现在让我们假设量子论是错误的，A 和 B 的观测结果在分离时便一早注定，我们无法预测，只不过是不清楚其中的隐变量究竟是多少的缘故。不过没关系，我们假设这个隐变量是 H，它可以取值 1-8，分别对应于一种观测的可能性。再让我们假设，对应于每一种可能性，其出现的概率分别是 N1, N2.....一直到 N8。现在我们就有了一个可能的观测结果的总表：

Ax Ay Az Bx By Bz 出现概率
 + + + - - - N1
 + + - - - + N2
 + - + - + - N3
 + - - - + + N4
 - + + + - - N5
 - + - + - + N6
 - - + + + - N7
 - - - + + + N8

上面的每一行都表示一种可能出现的结果，比如第一行就表示甲观察到 A 在 x, y, z 三个方向上的自旋都为 +，而乙观察到 B 在 3 个方向上的自旋相应地均为 -，这种结果出现的可能性是 N_1 。因为观测结果 8 者必居其一，所以 $N_1 + N_2 + \dots + N_8 = 1$ ，这个各位都可以理解吧？

现在让我们运用一点小学数学的水平，来做一做相关性的练习。我们暂时只察看 x 方向，在这个方向上，(Ax+, Bx-) 的相关性是多少呢？我们需要这样做：当一个记录符合两种情况之一：当在 x 方向上 A 为 + 而 B 同时为 -，或者 A 不为 + 而 B 也同时不为 -，如果这样，它便符合我们的要求，标志着对 (Ax+, Bx-) 的合作态度，于是我们就加上相应的概率。相反，如果在 x 上 A 为 + 而 B 也同时为 +，或者 A 为 - 而 B 也为 -，这是对 (Ax+, Bx-) 组合的一种破坏和抵触，我们必须减去相应的概率。

从上表可以看出，前 4 种可能都是 Ax 为 + 而 Bx 同时为 -，后 4 种可能都是 Ax 不为 + 而 Bx 也不为 -，所以 8 行都符合我们的条件，全是正号。我们的结果是 $N_1 + N_2 + \dots + N_8 = 1$ ！所以 (Ax+, Bx-) 的相关是 1，这毫不奇怪，我们的表本来就是以此为前提编出来的。如果我们要计算 (Ax+, Bx+) 的相关，那么 8 行就全不符合条件，全是负号，我们的结果是 $-N_1 - N_2 - \dots - N_8 = -1$ 。

接下来我们要走得远一点，A 在 x 方向上为 +，而 B 在 y 方向上为 +，这两个观测结果的相关性是多少呢？现在是两个不同的方向，不过计算原则是一样的：要是有一个记录符合 Ax 为 + 以及 By 为 +，或者 Ax 不为 + 以及 By 也不为 + 时，我们就加上相应的概率，反之就减去。让我们仔细地考察上表，最后得到的结果应该是这样的，用 P_{xy} 来表示：

$$P_{xy} = -N_1 - N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 - N_7 - N_8$$

嗯，蛮容易的嘛，我们再来算算 P_{xz} ，也就是 Ax 为 + 同时 Bz 为 + 的相关：

$$P_{xz} = -N_1 + N_2 - N_3 + N_4 + N_5 - N_6 + N_7 - N_8$$

再来，这次是 P_{zy} ，也就是 Az 为 + 且 By 为 +：

$$P_{zy} = -N_1 + N_2 + N_3 - N_4 - N_5 + N_6 + N_7 - N_8$$

好了，差不多了，现在我们把玩一下我们的计算结果，把 P_{xz} 减去 P_{zy} 再取绝对值：

$$|P_{xz} - P_{zy}| = |-2N_3 + 2N_4 + 2N_5 - 2N_6| = 2|N_3 + N_4 - N_5 - N_6|$$

这里需要各位努力一下，超越小学数学的水平，回忆一下初中的知识。关于绝对值，我们有关系式 $|x - y| \leq |x| + |y|$ ，所以套用到上面的式子里，我们有：

$$|P_{xz} - P_{zy}| = 2|N_3 + N_4 - N_5 - N_6| \leq 2(|N_3 + N_4| + |N_5 + N_6|)$$

因为所有的概率都不为负数，所以 $2(|N_3 + N_4| + |N_5 + N_6|) = 2(N_3 + N_4 + N_5 + N_6)$ 。最后，我们还记得 $N_1 + N_2 + \dots + N_8 = 1$ ，所以我们可以从上式中凑一个 1 出来：

$$2(N_3 + N_4 + N_5 + N_6) = 1 + (-N_1 - N_2 + N_3 + N_4 + N_5 + N_6 - N_7 - N_8)$$

看看我们前面的计算，后面括号里的一大串不正是 P_{xy} 吗？所以我们得到最终的结果：

$$|P_{xz} - P_{zy}| \leq 1 + P_{xy}$$

恭喜你，你已经证明了这个宇宙中最为神秘和深刻的定理之一。现在放在你眼前的，就是名垂千古的“贝尔不等式”。它被人称为“科学中最深刻的发现”，它即将对我们这个宇宙的终极命运作出最后的判决。

（我们的证明当然是简化了的，隐变量不一定是离散的，而可以定义为区间 λ 上的一个连续函数。即使如此，只要稍懂一点积分知识也不难推出贝尔不等式来，各位有兴趣的可以动手一试。）

第十一章 上帝的判决

11-1

$$|P_{xz} - P_{zy}| \leq 1 + P_{xy}$$

嗯，这个不等式看上去普普通通，似乎不见得有什么神奇的魔力，更不用说对于我们宇宙的本质作出终极的裁决。它真的有这样的威力吗？

我们还是先来看看，贝尔不等式究竟意味着什么。我们在上一章已经描述过了， P_{xy} 代表了 A 粒子在 x 方向上为+，而同时 B 粒子在 y 方向上亦为+这两个事件的相关性。相关性是一种合作程度的体现（不管是双方出奇地一致还是出奇地不一致都意味着合作程度很高），而合作则需要双方都了解对方的情况，这样才能够有效地协调。在隐变量理论中，我们对于两个粒子的描述是符合常识的：无论观察与否，两个粒子始终存在于客观现实之内，它们的状态从分裂的一霎那起就都是确定无疑的。假如我们禁止宇宙中有超越光速的信号传播，那么理论上当我们同时观察两个粒子的时候，它们之间无法交换任何信息，它们所能达到的最大协作程度仅仅限于经典世界所给出的极限。这个极限，也就是我们用经典方法推导出来的贝尔不等式。

如果世界的本质是经典的，具体地说，如果我们的世界同时满足：1.定域的，也就是没有超光速信号的传播。2.实在的，也就是说，存在着一个独立于我们观察的外部世界。那么我们任意取 3 个方向观测 A 和 B 的自旋，它们所表现出来的协作程度必定要受限贝尔不等式之内。也就是说，假如上帝是爱因斯坦所想象的那个不掷骰子的慈祥的“老头子”，那么贝尔不等式就是他给这个宇宙所定下的神圣的束缚。不管我们的观测方向是怎么取的，在 EPR 实验中的两个粒子决不可能冒犯他老人家的尊严，而胆敢突破这一禁区。事实上，这不是敢不敢的问题，而是两个经典粒子在逻辑上根本不具有这样的能力：它们之间既然无法交换信号，就决不能表现得亲密无间。

但是，量子论的预言就不同了！贝尔证明，在量子论中，只要我们把 a 和 b 之间的夹角 θ 取得足够小，则贝尔不等式是可以被突破的！具体的证明需要用到略微复杂一点的物理和数学知识，我在这里略过不谈了，但请诸位相信我，在一个量子主宰的世界里，A 和 B 两粒子在相隔非常遥远的情况下，在不同方向上仍然可以表现出很高的协作程度，以致于贝尔不等式不成立。这在经典图景中是决不可能发生的。

我们这样来想象 EPR 实验：有两个罪犯抢劫了银行之后从犯罪现场飞也似地逃命，但他们慌不择路，两个人沿着相反的两个方向逃跑，结果于同一时刻在马路的两头被守候的警察分别抓获。现在我们来录取他们的口供，假设警察甲问罪犯 A：“你是带头的那个吗？”A 的回答无非是“是”，或者“不是”。在马路另一头，如果警察乙问罪犯 B 同一个问题：“你是带头的那个吗？”那么 B 的回答必定与 A 相反，因为大哥只能有一个，不是 A 带着 B 就是 B 带着 A。两个警察问的问题在“同一方向”上，知道了 A 的答案，就等于知道了 B 的答案，他们的答案，100%地不同，协作率 100%。在这点上，无论是经典世界还是量子世界都是一样的。

但是，回到经典世界里，假如两个警察问的是不同角度的问题，比如说问 A：“你需要自己聘请律师吗？”问 B：“你

现在要喝水吗？”这是两个彼此无关的问题（在不同的方向上），A 可能回答“要”或者“不要”，但这应该对 B 怎样回答问题毫无关系，因为 B 和 A 理论上已经失去了联系，B 不可能按照 A 的行动来斟酌自己的答案。

不过，这只是经典世界里的罪犯，要是我们有两个“量子罪犯”，那可就不同了。当 A 决定聘请律师的时候，B 就会有更大的可能性想要喝水，反之亦然！看起来，似乎是 A 和 B 之间有一种神奇的心灵感应，使得他们即使面临不同的质询时，仍然回答得出奇地一致！量子世界的 Bonnie&Clyde，即使他们相隔万里，仍然合作无间，按照哥本哈根解释，这是因为在具体地回答问题前，两个人根本不存在于“实在”之中，而是合为一体，按照波函数弥漫。用薛定谔发明的术语来说，在观测之前，两个人（粒子）处在一种“纠缠”（entanglement）的状态，他们是一个整体，具有一种“不可分离性”（inseparability）！

这样说当然是简单化的，具体的条件还是我们的贝尔不等式。总而言之，如果世界是经典的，那么在 EPR 中贝尔不等式就必须得到满足，反之则可以突破。我们手中的这个神秘的不等式成了判定宇宙最基本性质的试金石，它仿佛就是那把开启奥秘之门的钥匙，可以带领我们领悟到自然的终极奥义。

而最叫人激动的是，和胡思乱想的一些实验（比如说疯狂的量子自杀）不同，EPR 不管是在技术或是伦理上都不是不可实现的！我们可以确实地去做一些实验，来看看我们生活其中的世界究竟是如爱因斯坦所祈祷的那样，是定域实在的，还是它的神奇终究超越我们的想象，让我们这些凡人不得不怀着更为敬畏的心情去继续探索它那深深隐藏的秘密。

1964 年，贝尔把他的不等式发表在一份名为《物理》(Physics)的杂志的创刊号上，题为《论 EPR 佯谬》(On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox)。这篇论文是 20 世纪物理史上的名篇，它的论证和推导如此简单明晰却又深得精髓，教人拍案叫绝。1973 年诺贝尔物理奖得主约瑟夫森 (Brian D. Josephson) 把贝尔不等式称为“物理学中最重要的新进展”，斯塔普 (Henry Stapp, 就是我们前面提到的，鼓吹精神使波函数坍缩的那个) 则把它称作“科学中最深刻的发现” (the most profound discovery in science)。

不过，《物理》杂志却没有因为发表了这篇光辉灿烂的论文而得到什么好运气，这份期刊只发行了一年就倒闭了。如今想要寻找贝尔的原始论文，最好还是翻阅他的著作《量子力学中的可道与不可道》(Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics, Cambridge 1987)。

在这之前，贝尔发现了冯诺伊曼的错误，并给《现代物理评论》(Reviews of Modern Physics) 杂志写了文章。虽然因为种种原因，此文直到 1966 年才被发表出来，但无论如何已经改变了这样一个尴尬的局面，即一边有冯诺伊曼关于隐函数理论不可能的“证明”，另一边却的确存在着玻姆的量子势！冯诺伊曼的封咒如今被摧毁了。

现在，贝尔显得踌躇满志：通往爱因斯坦梦想的一切障碍都已经给他扫清了，冯诺伊曼已经不再挡道，玻姆已经迈出了第一步。而他，已经打造出了足够致量子论以死命的武器，也就是那个威力无边的不等式。贝尔对世界的实在性深信不已，大自然不可能是依赖于我们的观察而存在的，这还用说吗？现在，似乎只要安排一个 EPR 式的实验，用无可辩驳的证据告诉世人：无论在任何情况下，贝尔不等式也是成立的。粒子之间心灵感应式的合作是纯粹的胡说八道，可笑的妄想，量子论已经把我们的思维搞得混乱不堪，是时候回到正常状况来了。量子不确定性……嗯，是一个漂亮的作品，一种不错的尝试，值得在物理史上获得它应有的地位，毕竟它管用。但是，它不可能是真实，而只是一种近似！更为可靠，更为接近真理的一定是一种传统的隐变量理论，它就像相对论那样让人觉得安全，没有骰子乱飞，没有奇妙的多宇宙，没有超光速的信号。是的，只有这样才能恢复物理学的光荣，那个值得我们骄傲和炫耀的物理学，那个真正的，庄严的宇宙的立法者，而不是靠运气和随机性来主宰一切的投机贩子。

真的，也许只差那么小小的一步，我们就可以回到旧日的光辉中去了。那个从海森堡以来失落已久的极乐世界，那个宇宙万物都严格而丝丝入扣地有序运转的伟大图景，叫怀旧的人们痴痴想念的古典时代。真的，大概就差一步了，也许，很快我们就可以在管风琴的伴奏中吟唱弥尔顿那神圣而不朽的句子：

昔有乐土，岁月其徂。
有子不忠，天赫斯怒。
彷徨放逐，维罪之故。
一人皈依，众人得赎。
今我来思，咏彼之复。
此心坚忍，无入邪途。
孽愆尽洗，重归正路。
瞻彼伊甸，崛起荒芜。
（《复乐园》卷一，1-7）

只是贝尔似乎忘了一件事：威力强大的武器往往都是双刃剑。

饭后闲话：玻姆和麦卡锡时代

玻姆是美国科学家，但他的最大贡献却是在英国作出的，这还要归功于 40 年代末 50 年代初在美国兴起的麦卡锡主义（McCarthyism）。

麦卡锡主义是冷战的产物，其实质就是疯狂地反共与排外。在参议员麦卡锡（Joseph McCarthy）的煽风点火下，这股“红色恐惧”之风到达了最高潮。几乎每个人都被怀疑是苏联间谍，或者是阴谋推翻政府的敌对分子。玻姆在二战期间曾一度参与曼哈顿计划，但他没干什么实质性的工作，很快就退出了。战后他到普林斯顿教书，和爱因斯坦一起工作，这时他遭到臭名昭著的“非美活动调查委员会”（Un-American Activities Committee）的传唤，要求他对一些当年同在伯克利的同事的政治立场进行作证，玻姆愤然拒绝，并引用宪法第五修正案为自己辩护。

本来这件事也就过去了，但麦卡锡时代刚刚开始，恐慌迅即蔓延整个美国。两年后，玻姆因为拒绝回答委员会的提问而遭到审判，虽然他被宣判无罪，但是普林斯顿却不肯为他续签合同，哪怕爱因斯坦请求他作为助手留下也无济于事。玻姆终于离开美国，他先后去了巴西和以色列，最后在伦敦大学的 Birkbeck 学院安顿下来。在那里他发展出了他的隐函数理论。

麦卡锡时代是一个疯狂和耻辱的时代，2000 多万人接受了所谓的“忠诚审查”。上至乔治·马歇尔将军，中至查理·卓别林，下至无数平民百姓都受到巨大的冲击。人们神经质地寻找所谓共产主义者，就像中世纪的欧洲疯狂地抓女巫一样。在学界，近百名教授因为“观点”问题离开了岗位，有华裔背景的如钱学森等遭到审查，著名的量子化学大师鲍林被怀疑是美共特务。越来越多的人被传唤去为同事的政治立场作证，这里面芸芸众生象，有如同玻姆一般断然拒绝的，也有些人的举动出乎意料。最著名的可能就算是奥本海默一案了，奥本海默是曼哈顿计划的领导人，连他都被怀疑对国家“不忠诚”似乎匪夷所思。所有的物理学家都站在他这一边，然而爱德华·泰勒（Edward Teller）让整个物理界几乎不敢相信自己的耳朵。这位匈牙利出生的物理学家（他还是杨振宁的导师）说，虽然他不怎么觉得奥本海默会做出不利于国家的事情来，但是“如果让公共事务掌握在别人的手上，我个人会感觉更安全些的。”奥本海默的忠诚虽然最后没有被责难，但他的安全许可证被没收了，绝密材料不再送到他手上。虽然有人（如惠勒）对泰勒表示同情，但整个科学界几乎不曾原谅过他。

泰勒还是氢弹的大力鼓吹者和实际设计者之一（他被称为“氢弹之父”），他试图阻止《禁止地上核试验条约》的签署，他还向里根兜售了“星球大战”计划（SDI Defence）。他去年（2003 年）9 月去世了，享年 95 岁。卡尔·萨根在《魔鬼出没的世界》一书里，曾把他拉出来作为科学家应当为自己的观点负责的典型例子。

泰勒自己当然有自己的理由，他认为氢弹的制造实际上使得人类社会“更安全”。作为我们来说，也许只能衷心地希望科学本身不要受到政治的过多干涉，虽然这也许只是一个乌托邦式的梦想，但我们仍然如此祝愿。

11-2

玻尔还是爱因斯坦？那就是个问题。

物理学家们终于行动起来，准备以实践为检验真理的唯一标准，确实实地探求一下，究竟世界符合两位科学巨人中哪一位的描述。玻尔和爱因斯坦的争论本来也只像是哲学上的一种空谈，泡利有一次对波恩说，和爱因斯坦争论量子论的本质就像以前人们争论一个针尖上能坐多少个天使一般虚无飘渺，但现在已经不同，我们的手里现在有了贝尔不等式。两个粒子究竟是乖乖地臣服于经典上帝的这条神圣禁令，还是它们将以一种量子革命式的躁动蔑视任何桎梏，突破这条看起来庄严而不可侵犯的规则？如今我们终于可以把它付诸实践，一切都等待着命运之神最终的判决。

1969年，Clauser等人改进了玻姆的EPR模型，使其更容易实施。随即人们在伯克利，哈佛和德州进行了一系列初步的实验，也许出乎贝尔的意料之外，除了一个实验外，所有的实验都模糊地指向量子论的预言结果。但是，最初的实验都是不严密的，和EPR的原型相去甚远，人们使原子辐射出的光子对通过偏振器，但技术的限制使得在所有的情况下，我们只能获得单一的+的结果，而不是+和-，所以要获得EPR的原始推论仍然要靠间接推理。而且当时使用的光源往往只能产生弱信号。

随着技术的进步，特别是激光技术的进步，更为精确严密的实验有了可能。进入80年代，法国奥赛理论与应用光学研究所（Institut d'Optique Théorique et Appliquée, Orsay Cédex）里的一群科学家准备第一次在精确的意义上对EPR作出检验，领导这个小组的是阿莱恩·阿斯派克特（Alain Aspect）。

法国人用钙原子作为光子对的来源，他们把钙原子激发到一个很高的量子态，当它落回到未激发态时，就释放出能量，也就是一对光子。实际使用的是一束钙原子，但是可以用激光来聚焦，使它们精确地激发，这样就产生了一个强信号源。阿斯派克特等人使两个光子飞出相隔约12米远，这样即使信号以光速在它们之间传播，也要花上40纳秒（ns）的时间。光子经过一道闸门进入一对偏振器，但这个闸门也可以改变方向，引导它们去向两个不同偏振方向的偏振器。如果两个偏振器的方向是相同的，那么要么两个光子都通过，要么都不通过，如果方向不同，那么理论上说（按照爱因斯坦的世界观），其相关性必须符合贝尔不等式。为了确保两个光子之间完全没有信息的交流，科学家们急速地转换闸门的位置，平均10ns就改变一次方向，这比双方之间光速来往的时间都要短许多，光子不可能知道对方是否通过了那里的偏振器。作为对比，我们也考察两边都不放偏振器，以及只有一边放置偏振器的情况，以消除实验中的系统误差。

那么，现在要做的事情，就是记录两个光子实际的协作程度。如果它符合贝尔不等式，则爱因斯坦的信念就得到了救赎，世界回复到独立可靠，客观实在的地位上来。反之，则我们仍然必须认真地对待玻尔那看上去似乎神秘莫测的量子观念。

时间是1982年，暮夏和初秋之交。七月流火，九月授衣，在时尚之都巴黎，人们似乎已经在忙着揣摩今年的秋冬季将会流行什么样式的时装。在酒吧里，体育迷们还在为国家队魂断西班牙世界杯而扼腕不已。那一年，在普拉蒂尼率领下的，被认为是历史上最强的那届国家队在一场经典赛事中惊心动魄地击败了巴西，却终于在点球上败给了西德人。高贵的绅士们在沙龙里畅谈天下大势，议论着老冤家英国人是如何在马岛把阿根廷摆布得服服帖帖。在卢浮宫和奥赛博物馆，一如既往地挤满了来自世界各地的艺术爱好者，塞纳河缓缓流过市中心，倒映着艾菲尔铁塔和巴黎圣母院的影子，也倒映出路边风琴手们的清澈眼神。

只是，有多少人知道，在不远处的奥赛光学研究所，一对对奇妙的光子正从钙原子中被激发出来，冲向那些命运交关的偏振器；我们的世界，正在接受一场终极的考验，向我们揭开她那隐藏在神秘面纱后面的真实面目呢？

如果爱因斯坦和玻尔神灵不昧，或许他们也在天国中注视着这次实验的结果吧？要是真的有上帝的话，他老人家又在干什么呢？也许，连他也不得不把这一切交给命运来安排，用一个黄金的天平和两个代表命运的砝码来决定这个世界本性的归属，就如同当年阿喀琉斯和赫克托耳在特洛伊城下那场传奇的决斗。

一对，两对，三对……数据逐渐积累起来了。1万2千秒，也就是3个多小时后，结果出来了。科学家们都长出了一口气。

爱因斯坦输了！实验结果和量子论的预言完全符合，而相对爱因斯坦的预测却偏离了5个标准方差——这已经足够决定一切。贝尔不等式这把双刃剑的确威力强大，但它斩断的却不是量子论的辉光，而是反过来击碎了爱因斯坦所执着信守的那个梦想！

阿斯派克特等人的报告于当年12月发表在《物理评论快报》(Physics Review Letters)上，科学界最初的反应出奇地沉默。大家都知道这个结果的重要意义，然而似乎都不知道该说什么才好。

爱因斯坦输了？这意味着什么？难道这个世界真的比我们所能想象的更为神秘和奇妙，以致于我们那可怜的常识终于要在它的面前破碎得七零八落？这个世界不依赖于你也不依赖于我，它就是“在那里存在着”，这不是明摆着的事情吗？为什么站在这样一个基本假设上所推导出来的结论和实验结果之间有着无法弥补的鸿沟？是上帝疯了，还是你我疯了？

全世界的人们都试图重复阿斯派克特的实验，而且新的手段也开始不断地被引入，实验模型越来越靠近爱因斯坦当年那个最原始的EPR设想。马里兰和罗切斯特的科学家们使用了紫外光，以研究观测所得到的连续的，而非离散的输出相关性。在英国的Malvern，人们用光纤引导两个纠缠的光子，使它们分离4公里以上，而在日内瓦，这一距离达到了数十公里。即使在这样的距离上，贝尔不等式仍然遭到无情的突破。

另外，按照贝尔原来的设想，我们应该不让光子对“事先知道”观测方向是哪些，也就是说，为了确保它们能够对它们而言不可预测的事件进行某种似乎不可思议的超距的合作（按照量子力学的预测），我们应该在它们飞行的路上才作出随机的观测方向的安排。在阿斯派克特实验里，我们看到他们以10ns的速度来转换闸门，然而他们所能够使两光子分离的距离12米还是显得太短，不太保险。1998年，奥地利因斯布鲁克(Innsbruck)大学的科学家们让光子飞出相距400米，这样他们就有了1.3微秒的时间来完成偏振器的随机安排。这次时间上绰绰有余，其结果是如此地不容置疑：爱因斯坦这次输得更惨——30个标准方差！

1990年，Greenberger, Horne 和 Zeilinger 等人向人们展示了，就算不用到贝尔不等式，我们也有更好的方法来彰显量子力学和一个“经典理论”（定域的隐变量理论）之间的尖锐冲突，这就是著名的GHZ测试（以三人名字的首字母命名），它牵涉到三个或更多光子的纠缠。2000年，潘建伟、Bouwmeester、Daniell 等人在Nature杂志上报道，他们的实验结果再次否决了定域实在，也就是爱因斯坦信念的可能性——8个标准方差！

2001年，Rowe 等人描述了更加精密的Be⁺离子捕获实验。2003年，Pittman 和 Franson 报道了产生于两个独立源的光子对于贝尔不等式的违反；而Hasegawa 等人更是在单中子的干涉测量中发现了突破类贝尔关系的结果。

在世界各地的实验室里，粒子们都顽强地保持着一种微妙而神奇的联系。仿佛存心要炫耀它们的能力般地，它们一再地嘲笑经典世界给它们定下的所谓不可突破的束缚，一次又一次把那个被宣称是不可侵犯的教条踩在脚下。这一现象变得如此地不容置疑，在量子信息领域已经变成了测试两个量子比特是否仍然处在纠缠状态的一种常规方法（有一个好处是可以知道你的信息有否被人中途窃听！）。

尽管我们也许会在将来做出更多更精密的实验，但总体来看，在EPR中贝尔不等式的突破是一个无可辩驳的事实。

或许在未来，新的实验会把我们目前的结论全部推翻，让世界恢复到经典的面目中去，但从目前来看，这种可能性是微乎其微的。

不知道爱因斯坦如果活到今天，他会对此发表什么样的看法？也许他会说一些灵活的话。我们似乎听到在遥远的天国，他和玻尔仍在重复那段经典的对白：

爱因斯坦：玻尔，亲爱的上帝不掷骰子！

玻尔：爱因斯坦，别去指挥上帝应该怎么做！

现在，就让我们狂妄一回，以一种尼采式的姿态来宣布：

爱因斯坦的上帝已经死了。

11-3

阿斯派克特在 1982 年的实验（准确地说，一系列实验）是 20 世纪物理史上影响最为深远的实验之一，它的意义甚至可以和 1886 年的迈克尔逊-莫雷实验相提并论。但是，相比迈克尔逊的那个让所有的人都瞠目结舌的实验来说，阿斯派克特所得到的结果却在“意料之中”。大多数人们一早便预计到，量子论的胜利是不在话下的。量子论自 1927 年创立以来，到那时为止已经经历了 50 多年的风风雨雨，它在每一个领域都显示出了如此强大的力量，没有任何实验结果能够对它提出哪怕一点点的质疑。最伟大的物理学家（如爱因斯坦和薛定谔）向它猛烈开火，试图把它从根本上颠覆掉，可是它的灿烂光辉却反而显得更加耀眼和悦目。从实用的角度来说，量子论是有史以来最成功的理论，它不但远超相对论和麦克斯韦电磁理论，甚至超越了牛顿的经典力学！量子论是从风雨飘摇的乱世成长起来的，久经革命考验的战士，它的气质在风刀霜剑的严相逼拷之下被磨砺得更加坚韧而不可战胜。的确，没有多少人会想象，这样一个理论会被一个不起眼的实验轻易地打倒在地，从此翻不了身。阿斯派克特实验的成功，只不过是量子论所经受的又一个考验（虽然是最严格的考验），给它那身已经品尝过无数胜利的戎装上又添上一枚荣耀的勋章罢了。现在我们知道，它即使在如此苛刻的条件下，也仍然是成功的。是的，不出所料！这一消息并没有给人们的情感上带来巨大的冲击，引起一种轰动效应。

但是，它的确把物理学家们逼到了一种尴尬的地步。本来，人们在世界究竟是否实实在在这种问题上通常乐于奉行一种鸵鸟政策，能闭口不谈的就尽量不去讨论。量子论只要管用就可以了嘛，干吗非要刨根问底地去追究它背后的哲学意义到底是什么样的呢？虽然有爱因斯坦之类的人在为它担忧，但大部分科学家还是觉得无所谓的。不过现在，阿斯派克特终于逼着人们要摊牌了：一味地缩头缩脑是没用的，人们必须面对这样一个事实：实验否决了经典图景的可能性！

爱因斯坦的梦想如同泡沫般破碎在无情的数据面前，我们再也回不去那个温暖舒适的安乐窝中，而必须面对风雨交加的严酷现实。我们必须再一次审视我们的常识，追问一下它到底有多可靠，在多大程度上会给我们带来误导。对于贝尔来说，他所发现的不等式却最终背叛了他的理想，不仅没有把世界拉回经典图像中来，更反过来把它推向了绝路。阿斯派克特实验之后，我们必须说服自己相信这样一件事情：

定域的隐变量理论是不存在的！

换句话说，我们的世界不可能如同爱因斯坦所梦想的那样，既是定域的（没有超光速信号的传播），又是实在的（存在一个客观独立的世界，可以为隐变量所确定地描述）。定域实在性（local realism）从我们的宇宙中被实验排除了出去，现在我们必须作出艰难的选择：要么放弃定域性，要么放弃实在性。

如果我们放弃实在性，那就回到量子论的老路上来，承认在我们观测之前，两个粒子不存在于“客观实在”之内。它们不具有通常意义上的物理属性（如自旋），只有当观测了以后，这种属性才变得有意义。在 EPR 实验中，不到最后关

头，我们的两个处于纠缠态粒子都必须被看成一个不可分割的整体，那时在现实中只有“一个粒子”（当然是叠加着的），而没有“两个粒子”。所谓两个粒子，只有当观测后才成为实实在在的东西（波函数坍缩了）。当然，在做出了这样一个令人痛心的让步后，我们还是可以按照自己的口味不同来选择：究竟是更进一步，彻底打垮决定论，也就是保留哥本哈根解释；还是在一个高层次的角度上，保留决定论，也即采纳多宇宙解释！需要说明的是，MWI 究竟算不算一个定域的(local)理论，各人之间的说法还是不尽相同的。除去 Stapp 这样的反对者不谈，甚至在它的支持者（比如 Deutsch, Tegmark 或者 Zeh）中，其口径也不是统一的。不过这也许只是一个定义和用词的问题，因为量子纠缠本身或许就可以定义为某种非定域的物理过程（Zeh, Found. of Physics Letters 13, 2000, p22），但大家都同意，MWI 肯定不是一个定域实在的理论，而且超光速的信号传递在其内部也是不存在的。关键在于，根据 MWI，每次我们进行观测都在“现实”中产生了不止一个结果（事实上，是所有可能的结果）！这和爱因斯坦所默认的那个传统的“现实”是很不一样的。

这样一来，那个在心理上让人觉得牢固可靠的世界就崩塌了（或者，“坍缩”了？）。不管上帝掷不掷骰子，他给我们建造的都不是一幢在一个绝对的外部世界严格独立的大厦。它的每一面墙壁，每一块地板，每一道楼梯……都和在其内部进行的种种活动密切相关，不管这种活动是不是包含了有智能（意识）的观测者。这幢大楼非但不是铁板一块，相反，它的每一层楼都以某种特定的奇妙方式纠缠在一起，以致于分居在顶楼和底楼的住客仍然保持着一种心有灵犀的感应。

但是，如果你忍受不了这一切，我们也可以走另一条路，那就是说，不惜任何代价，先保住世界的实在性再说。当然，这样一来就必须放弃定域性。我们仍然有可能建立一个隐变量理论，如果容忍某种超光速的信号在其体系中来回，则它还是可以很好地说明我们观测到的一切。比如在 EPR 中，天际两头的两个电子仍然可以通过一种超光速的瞬时通信来确保它们之间进行成功的合作。事实上，玻姆的体系就很好地在阿斯派克特实验之后仍然存活，因为他的“量子势”的确暗含着这样的超距作用。

可是要是这样的话，我们也许并不会觉得日子好过多少！超光速的信号？老大，那意味着什么？想一想爱因斯坦对此会怎么说吧，超光速意味着获得了回到过去的的能力！这样一来，我们将陷入甚至比不确定更加棘手和叫人迷惑的困境，比如，想象那些科幻小说中著名的场景：你回到过去杀死了尚处在襁褓中的你，那会产生什么样的逻辑后果呢？虽然玻姆也许可以用高超的数学手段向我们展示，尽管存在着这种所谓超光速的非定域关联，他的隐函数理论仍然可以禁止我们在实际中做到这样的信号传递：因为大致上来说，我们无法做到精确地“控制”量子现象，所以在现实的实验中，我们将在统计的意义上得到和相对论的预言相一致的观测极限。也就是说，虽然在一个深层次的意义上存在着超光速的信号，但我们却无法刻意与有效地去利用它们来制造逻辑怪圈。不过无论如何，对于这种敏感问题，我们应当非常小心才是。放弃定域性，并不比放弃实在性来得让我们舒服！

阿斯派克特实验结果出来之后，BBC 的广播制作人朱里安·布朗（Julian Brown）和纽卡斯尔大学的物理学教授保罗·戴维斯（Paul Davies，他如今在澳大利亚的 Macquarie 大学，他同时也是当代最负盛名的科普作家之一）决定调查一下科学界对这个重要的实验究竟会做出什么样的反应。他们邀请 8 位在量子论领域最有名望的专家作了访谈，征求对方对于量子力学和阿斯派克特实验的看法。这些访谈记录最后被汇集起来，编成一本书，于 1986 年由剑桥出版社出版，书名叫做《原子中的幽灵》（The Ghost in the Atom）。

阅读这些访谈记录真是给人一种异常奇妙的体验和感受。你会看到最杰出的专家们是如何各持己见，在同一个问题上抱有极为不同，甚至截然对立的看法。阿斯派克特本人肯定地说，他的实验从根本上排除了定域实在的可能，他不太欣赏超光速的说法，而是对现有的量子力学表示了同情。贝尔虽然承认实验结果并没有出乎意料，但他仍然决不接受掷骰子的上帝。他依然坚定地相信，量子论是一种权益之计，他想象量子论终究会在有一天被更为复杂的实验证明是错误的。贝尔愿意以抛弃定域性为代价来换取客观实在，他甚至设想复活“以太”的概念来达到这一点。惠勒的观点有点暧昧，他承认一度支持埃弗莱特的多宇宙解释，但接着又说因为它所带来的形而上学的累赘，他已经改变了观点。惠勒讨论了玻尔的图像，意识参予的可能性以及他自己的延迟实验和参予性宇宙，他仍然对于精神在其中的作用表现得饶有兴趣。

鲁道夫·佩尔斯（Rudolf Peierls）的态度简明爽快：“我首先反对使用‘哥本哈根解释’这个词。”他说，“因为，这听上

去像是说量子力学有好几种可能的解释一样。其实只存在一种解释：只有一种你能够理解量子力学的方法（也就是哥本哈根的观点！）。”这位曾在海森堡和泡利手下学习过的物理学家仍然流连于革命时代那波澜壮阔的观念，把波函数的坍缩认为是一种唯一合理的物理解释。大卫·德义奇也毫不含糊地向人们推销多宇宙的观点，他针对奥卡姆剃刀对于“无法沟通的宇宙的存在”提出的诘问时说，MWI 是最为简单的解释。相对于种种比如“意识”这样稀奇古怪的概念来说，多宇宙的假设实际上是最廉价的！他甚至描述了一种“超脑”实验，认为可以让一个人实际地感受到多宇宙的存在！接下来是玻姆，他坦然地准备接受放弃物理中的定域性，而继续维持实在性。“对于爱因斯坦来说，确实有许多事情按照他所预料的方式发生。”玻姆说，“但是，他不可能在每一件事情上都是正确的！”在玻姆看来，狭义相对论也许可以看成是一种普遍情况的一种近似，正如牛顿力学是相对论在低速情况下的一种近似那样。作为玻姆的合作者之一，巴西尔·海利（Basil Hiley）也强调了隐函数理论的作用。而约翰·惠勒（John Taylor）则描述了另一种完全不同的解释，也就是所谓的“系综”解释（the ensemble interpretation）。系综解释持有的是一种非常特别的统计式的观点，也就是说，物理量只对于平均状况才有意义，对于单个电子来说，是没有意义的，它无法定义！我们无法回答单个系统，比如一个电子通过了哪条缝这样的问题，而只能给出一个平均统计！我们在史话的后面再来详细地介绍系综解释。

在这样一种大杂烩式的争论中，阿斯派克特实验似乎给我们的未来蒙上了一层更加扑朔迷离的影子。爱因斯坦有一次说：“虽然上帝神秘莫测，但他却没有恶意。”但这样一位慈祥的上帝似乎已经离我们远去了，留给我们一个难以理解的奇怪世界，以及无穷无尽的争吵。我们在隐函数这条道路上的探索也快接近尽头了，关于玻姆的理论，也许仍然有许多人对它表示足够的同情，比如 John Gribbin 在他的名作《寻找薛定谔的猫》（In Search of Schrodinger's Cat）中还把自己描述成一个多宇宙的支持者，而在 10 年后的《薛定谔的猫以及对现实的寻求》（Schrodinger's Kittens and the Search for Reality）一书中，他对 MWI 的热情已经减退，而对玻姆理论表示出了谨慎的乐观。我们不清楚，也许玻姆理论是对的，但我们并没有足够可靠的证据来说服我们自己相信这一点。除了玻姆的隐函数理论之外，还有另一种隐函数理论，它由 Edward Nelson 所发明，大致来说，它认为粒子按照某种特定的规则在空间中实际地弥漫开去（有点像薛定谔的观点），类似波一般地确定地发展。我们打算过多地深入探讨这些观点，我们所不满的是，这些和爱因斯坦的理想相去甚远！为了保有实在性而放弃掉定域性，也许是一件饮鸩止渴的事情。我们不敢说光速绝对地不可超越，只是要推翻相对论，现在似乎还不大是时候，毕竟相对论也是一个经得起考验的伟大理论。

我们沿着这条路走来，但是它当初许诺给我们的那个美好蓝图，那个爱因斯坦式的理想却在实验的打击下终于破产。也许我们至少还保有实在性，但这不足以吸引我们中的许多人，让他们付出更多的努力和代价而继续前进。阿斯派克特实验严酷地将我们的憧憬粉碎，它并没有证明量子论是对的（它只是支持了量子论的预言，正如我们讨论过的那样，没什么理论可以被“证明”是对的），但它无疑证明了爱因斯坦的世界观是错的！事实上，无论量子论是错是对，我们都已经不可能追回传说中的那个定域实在的理想国，而这，也使我们丧失了沿着该方向继续前进的很大一部分动力。就让那些孜孜不倦的探索者继续前进，而我们还是退回到原来的地方，再继续苦苦追寻，看看有没有柳暗花明的一天。

饭后闲话：超光速

EPR 背后是不是真的隐藏着超光速我们仍然不能确定，至少它表面上看起来似乎是一种类似的效应。不过，我们不能利用它实际地传送信息，这和爱因斯坦的狭义相对论并非矛盾。

假如有人想利用这种量子纠缠效应，试图以超光速从地球传送某个消息去到半人马座 α 星（南门二，它的一颗伴星是离我们地球最近的恒星，也即比邻星），他是注定要失败的。假设某个未来时代，某个野心家驾驶一艘宇宙飞船来到两地连线的中点上，然后使一个粒子分裂，两个子粒子分别飞向两个目标。他事先约定，假如半人马星上观测到粒子是“左旋”，则表示地球上政变成功，反之，如是“右旋”则表示失败。这样的通讯建立在量子论的这个预测上：也就是地球上观测到的粒子的状态会“瞬间”影响到遥远的半人马星上另一个粒子的状态。但事到临头他却犯难了：假设他成功了，他如何确保他在地球上一定观测到一个“右旋”粒子，以保证半人马那边收到“左旋”的信息呢？他没法做到这点，因为观测结果是不确定的，他没法控制！他最多说，当他做出一个随机的观测，发现地球上的粒子是“右旋”的时候，那时他可以有把

握地，100%地预言遥远的半人马那里一定收到“左”的信号，虽然理论上说两地相隔非常遥远，讯息还来不及传递过来。如果他想利用贝尔不等式，他也必须知道，在那一边采用了什么观测手段，而这必须通过通常的方法来获取。这一切并不违反相对论，你无法利用这种“超光速”制造出信息在逻辑上的自我矛盾来（例如回到过去杀死你自己之类的）。

在这种原理上的量子传输（teleportation）事实上已经实现。我国的潘建伟教授在此领域多有建树。

2000年，王力军，Kuzmich 等人在 Nature 上报了另一种“超光速”（Nature V406），它牵涉到在特定介质中使得光脉冲的群速度超过真空中的光速，这本身也并不违反相对论，也就是说，它并不违反严格的因果律，结果无法“回到过去”去影响原因。同样，它也无法携带实际的信息。

其实我们的史话一早已经讨论过，德布罗意那“相波”的速度 c^2/v 就比光速要快，但只要不携带能量和信息，它就不违背相对论。相对论并非有些人所想象的那样已被推翻，相反，它仍然是我们所能依赖的最可靠的基石之一。

11-4

这已经是我们第三次在精疲力竭之下无功而返了。隐变量所给出的承诺固然美好，可是最终的兑现却是大打折扣的，这未免教人丧气。虽然还有玻姆在那里热切地召唤，但为了得到一个决定性的理论，我们付出的代价是不是太大了点？这仍然是很值得琢磨的事情，同时也使得我们不敢轻易地投下赌注，义无反顾地沿着这样的方向走下去。

如果量子论注定了不能是决定论的，那么我们除了推导出类似“坍缩”之类的概念以外，还可以做些什么假设呢？

有一种功利而实用主义的看法，是把量子论看作一种纯统计的理论，它无法对单个系统作出任何预测，它所推导出的一切结果，都是一个统计上的概念！也就是说，在量子论看来，我们的世界中不存在什么“单个”（individual）的事件，每一个预测，都只能是平均式的，针对“整个集合”（ensemble）的，这也就是“系综解释”（the ensemble interpretation）一词的来源。

大多数系综论者都喜欢把这个概念的源头上推到爱因斯坦，比如 John Taylor，或者加拿大 McGill 大学的 B. C. Sanctuary。爱因斯坦曾经说过：“任何试图把量子论的描述看作是对于‘单个系统’的完备描述的做法都会使它成为极不自然的理论解释。但只要接受这样的理解方式，也即（量子论的）描述只能针对系统的‘全集’，而非单个个体，上述的困难就马上不存在了。”这个论述成为了系综解释的思想源泉（见于 Max Jammer《量子力学的哲学》一书）。

嗯，怎么又是爱因斯坦？我们还记忆犹新的是，隐变量不是也把他拉出来作为感召和口号吗？或许爱因斯坦的声望太隆，任何解释都希望从他那里取得权威性，不过无论如何，从这一点来说，系综和隐变量实际上是有着相同的文化背景的。但是它们之间不同的是，隐变量在作出“量子论只不过是统计解释”这样的论断后，仍然怀着满腔热情去寻找隐藏在它背后那个更为终极的理论，试图把我们所看不见的隐变量找出来以最终实现物理世界所梦想的最高目标：理解和预测自然。它那锐意进取的精神固然是可敬的，但正如我们已经看到的那样，在现实中遭到了严重的困难和阻挠，不得不为此放弃许多东西。

相比隐变量那勇敢的冲锋，系综解释选择固本培元，以退为进的战略。在它看来，量子论是一个足够伟大的理论，它已经界定了这个世界可理解的范畴。的确，量子论给我们留下了一些盲点，一些我们所不能把握的东西，比如我们没法准确地同时得到一个电子的位置和动量，这叫一些持完美主义的人们觉得坐立不宁，寝食难安。但系综主义者说：“不要徒劳地去探索那未知的领域了，因为实际上不存在这样的领域！我们的世界本质上就是统计性质的，没有一个物理理论可以描述‘单个’的事件，事实上，在我们的宇宙中，只有‘系综’，或者说‘事件的全集’才是有物理意义的。”

这是什么意思呢？我们还是用大家都熟悉的老例子，双缝前的电子来说明问题。当电子通过双缝后，假设我们没有

刻意地去观察它，那么按照量子论，它应该有一个确定而唯一的，按照时间和薛定谔方程发展的态矢量：

$$|\text{电子}\rangle = |\text{穿过左缝}\rangle + |\text{穿过右缝}\rangle$$

按照标准哥本哈根解释，这意味着单个电子必须同时处在 $|\text{左}\rangle$ 和 $|\text{右}\rangle$ 两个态的叠加之中，电子没有一个确定的位置，它同时又在这里又在那里！按照 MWI，这是一种两个世界的叠加。按照隐变量，所谓的叠加都是胡扯，量子论的这种数学形式是靠不住的，假如我们考虑了不可见的隐变量，我们就能确实地知道，电子究竟通过了左边还是右边。那么，系综解释对此又有何高见呢？

它所持的是一种外交式的圆滑态度：量子论的数学形式经得起时间考验，是一定要保留的。但“叠加”什么的明显违背常识，是不对的。反过来，一味地急功冒进，甚至搞出什么不可观察的隐变量，这也太过火了，更不能当真。再怎么讲，实验揭示给我们的结果是纯随机性质的，没人可以否认。

那么，我们应该怎么办呢？

系综解释说：我们应当知足，相信理论告诉我们的已经是这个世界的本质：它本就是统计性的！所以，徒劳地去设计隐变量是没有用的，因为实验已经告诉我们定域的隐变量理论是没有的，而且实验也告诉我们对同样的系统的观测不会每次都给出确定的结果。但是，我们也不能相信所谓的“叠加”是一种实际上的存在，电子不可能又通过左边又通过右边！我们的结论应该是：对于电子的态矢量，它永远都只代表系统“全集”的统计值，也就是一种平均情况！

什么叫只代表“全集”呢？换句话说，当我们写下：

$$|\text{电子}\rangle = 1/\text{SQRT}(2) [|\text{穿过左缝}\rangle + |\text{穿过右缝}\rangle]$$

这样的式子时（ $1/\text{SQRT}(2)$ 代表根号 2 分之 1，我们假设两种可能相等，所以系数的平方，也就是概率之和等于 1），我们所指的并不是“一个电子”的运动情况，而永远是无限个电子在相同情况下的一个统计平均！这个式子只描述了当无穷多个电子在相同的初状态下通过双缝（或者，一个电子无穷次地在同样的情况下通过双缝）时会出现的结果。根据量子论，世界并非决定论的，也就是说，哪怕我们让两个电子在完全相同的状态下通过双缝，观测到的结果也不一定每次都一样，而是有多种可能。而量子论的数学所能告诉我们的，正是所有这些可能的“系综”，也就是统计预期！

如此一来，当我们说“电子=左+右”的时候，意思就并非指一个单独的电子同时处于左和右两个态，而只是在经典概率的概念上指出它有 50%的可能通过左，而 50%的可能通过右罢了。当我们“准备”这样一个实验的时候，量子论便能够给出它的系综，在一个统计的意义上告诉我们实验的结果。

态矢量只代表系统的系综！嗯，听上去蛮容易理解的，似乎皆大欢喜。可是这样一来，量子论也就变成一个统计学的理论了，好吧，当许多电子穿过双缝时，我们知道有 50%通过了左边，50%通过了右边，可现在我们关心的是单个电子！单个电子是如何通过双缝并与自己发生干涉，最后在荧屏上打出一个组成干涉图纹的一点的呢？我们想听听系综解释对此有何高见。

但要命的是，它对此什么都没说！在它看来，所谓“单个电子通过了哪里”之类的问题，是没有物理意义的！当 John Taylor 被问道，他是否根本没有想去描述单个系统中究竟发生了什么的的时候，他甚至说，这是不被允许的。量子物理所给出的只是统计性，that's all，没有别的了。如果这个世界能够被我们用数学方法去理解的话，那就是在一种统计的意义上说的，我们不自量力地想去追寻更多，那只不过是自讨苦吃。单个电子的轨迹，那是一个没有物理定义的概念，正如“时间被创造前 1 秒”，“比光速更快 1 倍”，或者“绝对零度低 1 度”这样的名词，虽然没有语法上的障碍阻止我们提出这样的问题，但它们在物理上却是没什么意思的。和哥本哈根派不同的是，玻尔等人假设每个电子都实际地按照波函数发散开来，而

系综解释则是简单地把这个问题踢出了理论框架中去，来个眼不见为净：现在不必为“坍缩”操心了，谈论单个电子是没有意义的事情！

不过，这实在是太掩耳盗铃了。好吧，量子论只给出系综，可是我们对于物理理论的要求毕竟要比这样的统计报告要高那么一点啊。假如我去找占卜师算命，想知道我的寿限是多少，她却只告诉我：这个城市平均寿命是 70 岁，那对我来说似乎没有很大的用处啊，我还不如去找保险公司！更可恨的是，她居然对我说，你一个人的寿命是没什么意义的，有意义的只是千千万万个你的寿命的“系综”！

系综解释是一种非常保守和现实主义的解释，它保留了现有量子论的全部数学形式，因为它们已经被实践所充分证明。但在令人目眩的哲学领域，它却试图靠耍小聪明而逃避那些形而上的探讨，用划定理论适用界限这样的方法来把自己封闭在一个刀枪不入的外壳中。是的，如果我们采纳系综主义，那么的确在纯理论方面说，我们的一切问题都解决了：没有什么坍缩，电子永远只是粒子（波性只能用来描述粒子的“全集”），不确定原理也只是被看成一个统计极限，而不理会单个电子到底能不能同时拥有动量和位置（这个问题“没有意义”）。但是，这样似乎有点自欺欺人的味道，把搞不清楚的问题划为“没有意义”也许是方便的，但的确是这样的问题使得科学变得迷人！每个人都知道，当许多电子通过双缝时产生了干涉图纹，可我们更感兴趣的还是当单个电子通过时究竟发生了什么，而不是简单地转过头不去面对！

Taylor 在访谈中的确被问道，这样的做法不是一个当“逃兵”的遁词吗？他非常精明地回答说：“我认为你应当问一问，如果陷进去是否比逃之夭夭确实会惹出更多的麻烦。”系综主义者持有的是极致的实用主义，他们炮轰隐变量和多宇宙解释，因为后两者都带来了许多形而上学的“麻烦”。只要我们充分利用现有的体系，搞出一个又不违反实验结果，又能在逻辑上自洽的体系，那不就足够了吗？系综解释的精神，就是尽可能少地避免“麻烦”，绝不引入让人头痛的假设，比如多宇宙或者坍缩之类的。

但是，我们还是不能满足于这样的关起门来然后自称所有的问题都已经解决的做法。或许，是因为我们血液中的热情还没有冷却，或许，是因为我们仍然年少轻狂，对于这个宇宙还怀有深深的激动和无尽的好奇。我们并不畏惧进入更为幽深和神秘的峡谷和森林，去探究那事实的真相。哪怕注定要被一些更加恼人和挥之不去的古怪精灵所缠绕，我们还是不可以放弃了前进的希望和动力，因为那是我们最宝贵的财富。

接下来我们还要去看看两条新的道路，虽然它们都新辟不久，坎坷颠簸，行进艰难，但沿途那奇峰连天，枯松倒挂，瀑布飞湍，冰崖怪石的绝景一定不会令你失望。

11-5

我们已经厌倦了光子究竟通过了哪条狭缝这样的问题，管它通过了哪条，这和我们又有什么关系呢？一个小小的光子是如此不起眼，它的世界和我们的世界相去霄壤，根本无法联系在一起。在大多数情况下，我们甚至根本没法看见单个的光子（有人做过实验，肉眼看见单个光子是有可能的，但机率极低，而且它的波长必须严格地落在视网膜杆状细胞最敏感的那个波段），在这样的情况下，大众对于探究单个光子究竟是“幽灵”还是“实在”无疑持有无所谓的态度，甚至觉得这是一种杞人忧天的探索。

真正引起人们担忧的，还是那个当初因为薛定谔而留下的后遗症：从微观到宏观的转换。如果光子又是粒子又是波，那么猫为什么不是又死而又活着？如果电子同时又在这里又在那里，那么为什么桌子安稳地呆在它原来的地方，没有扩散到整间屋子中去？如果量子效应的基本属性是叠加，为什么日常世界中不存在这样的叠加，或者，我们为什么从未见过这种情况？

我们已经听取了足够多耐心而不厌其烦的解释：猫的确又死又活，只不过在我们观测的时候“坍缩”了；有两只猫，它们在一个宇宙中活着，在另一个宇宙中死去；猫从未又死又活，它的死活由看不见的隐变量决定；单个猫的死活是无

意义的事件，我们只能描述无穷只猫组成的“全集”……诸如此类的答案。也许你已经对其中的某一种感到满意，但仍有许多人并不知足：一定还有更好，更可靠的答案。为了得到它，我们仍然需要不断地去追寻，去开拓新的道路，哪怕那里本来是荒芜一片，荆棘丛生。毕竟世上本没有路，走的人多了才成为路。

现在让我们跟着一些开拓者小心翼翼地考察一条新辟的道路，和当年扬帆远航的哥伦布一样，他们也是意大利人。这些开拓者的名字刻在路口的纪念碑上：Ghirardi, Rimini 和 Weber，下面是落成日期：1986 年 7 月。为了纪念这些先行者，我们顺理成章地把这条道路以他们的首字母命名，称为 GRW 大道。

这个思路的最初设想可以回溯到 70 年代的 Philip Pearle：哥本哈根派的人物无疑是伟大和有洞见的，但他们始终没能给出“坍缩”这一物理过程的机制，而且对于“观测者”的主观依赖也太重了些，最后搞出一个无法收拾的“意识”不说，还有堕落为唯心论的嫌疑。是否能够略微修改薛定谔方程，使它可以对“坍缩”有一个让人满意的解释呢？

1986 年 7 月 15 日，我们提到的那 3 位科学家在《物理评论》杂志上发表了一篇论文，题为《微观和宏观系统的统一动力学》(Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems)，从而开创了 GRW 理论。GRW 的主要假定是，任何系统，不管是微观还是宏观的，都不可能在严格的意义上孤立，也就是和外界毫不相干。它们总是和环境发生着种种交流，为一些随机 (stochastic) 的过程所影响，这些随机的物理过程——不管它们实质上到底是什么——会随机地造成某些微观系统，比如一个电子的位置，从一个弥漫的叠加状态变为在空间中比较精确的定域 (实际上就是哥本哈根口中的“坍缩”)，尽管对于单个粒子来说，这种过程发生的可能性是如此之低——按照他们原本的估计，平均要等上 10^{16} 秒，也就是近 10 亿年才会发生一次。所以从整体上看，微观系统基本上处于叠加状态是不假的，但这种定域过程的确偶尔发生，我们把这称为一个“自发的定域过程” (spontaneous localization)。GRW 有时候也称为“自发定域理论”。

关键是，虽然对于单个粒子来说要等上如此漫长的时间才能迎来一次自发过程，可是对于一个宏观系统来说可就未必了。拿薛定谔那只可怜的猫来说，一只猫由大约 10^{27} 个粒子组成，虽然每个粒子平均要等上几亿年才有一次自发定域，但对像猫这样大的系统，每秒必定有成千上万的粒子经历了这种过程。

Ghirardi 等人把薛定谔方程换成了所谓的密度矩阵方程，然后做了复杂的计算，看看这样的自发定域过程会对整个系统造成什么样的影响。他们发现，因为整个系统中的粒子实际上都是互相纠缠在一起的，少数几个粒子的自发定域会非常迅速地影响到整个体系，就像推倒了一块骨牌然后造成了大规模的多米诺效应。最后的结果是，整个宏观系统会在极短的时间里完成一次整体上的自发定域。如果一个粒子平均要花上 10 亿年时间，那么对于一个含有 1 摩尔粒子的系统来说 (数量级在 10^{23} 个)，它只要 0.1 微秒就会发生定域，使得自己的位置从弥漫开来变成精确地出现在某个地点。这里面既不要“观测者”，也不牵涉到“意识”，它只是基于随机过程！

如果真的是这样，那么当决定薛定谔猫的生死的那一刻来临时，它的确经历了死/活的叠加！只不过这种叠加只维持了非常短，非常短的时间，然后马上“自发地”精确化，变成了日常意义上的，单纯的非死即活。因为时间很短，我们没法感觉到这一叠加过程！这听上去的确不错，我们有了一个统一的理论，可以一视同仁地解释微观上的量子叠加和宏观上物体的不可叠加性。

但是，GRW 自身也仍然面临着严重的困难，这条大道并不是那样顺畅的。他们的论文发表当年，海德堡大学的 E.Joos 就向《物理评论》递交了关于这个理论的评论，而这个评论也在次年发表，对 GRW 提出了置疑。自那时起，对 GRW 的疑问声一直很大，虽然有的人非常喜欢它，但是从未在物理学家中变成主流。怀疑的理由有许多是相当技术化的，对于我们史话的读者，我只想在最肤浅的层次上稍微提一些。

GRW 的计算是完全基于随机过程的，而并不引入类如“观测使得波函数坍缩”之类的假设。他们在这里所假设的“自发”过程，虽然其概念和“坍缩”类似，实际上是指一个粒子的位置从一个非常不精确的分布变成一个比较精确的分布，而不是完全确定的位置！换句话说，不管坍缩前还是坍缩后，粒子的位置始终是一种不确定的分布，必须为统计曲线 (高

斯钟形曲线)所描述。所谓坍缩,只不过是它从一个非常矮平的曲线变成一个非常尖锐的曲线罢了。在哥本哈根解释中,只要一观测,系统的位置就从不确定变成完全确定了,而 GRW 虽然不需要“观测者”,但在它的框架里面没有什么东西是实际上确定的,只有“非常精确”,“比较精确”,“非常不精确”之类的区别。比如说当我盯着你看的时候,你并没有一个完全确定的位置,虽然组成你的大部分物质(粒子)都聚集在你所站的那个地方,但真正描述你的还是一个钟形线(虽然是非常尖锐的钟形线)!我只能说,“绝大部分的你”在你所站的那个地方,而组成你的另外的那“一小撮”(虽然是极少极少的一小撮)却仍然弥漫在空间中,充斥着整个屋子,甚至一直延伸到宇宙的尽头!

也就是说,在任何时候,“你”都填满了整个宇宙,只不过“大部分”的你聚集在某个地方而已。作为一个宏观物体的好处是,明显的量子叠加可以在很短的时间内完成自发定域,但这只是意味着大多数粒子聚集到了某个地方,总有一小部分的粒子仍然留在无穷的空间中。单纯地从逻辑上讲,这也没什么不妥,谁知道你是不是真有小到无可觉察的一部分弥漫在空间中呢?但这毕竟违反了常识!如果必定要违反常识,那我们干脆承认猫又死又活,似乎也不见得糟糕多少。

GRW 还抛弃了能量守恒(当然,按照相对论,其实是质能守恒)。自发的坍缩使得这样的守恒实际上不成立,但破坏是那样微小,所需等待的时间是那样漫长,使得人们根本不注意到它。抛弃能量守恒在许多人看来是无法容忍的行为。我们还记得,当年玻尔的 BKS 理论遭到了爱因斯坦和泡利多么严厉的抨击。

还有,如果自发坍缩的时间是和组成系统的粒子数量成反比的,也就是说组成一个系统的粒子越少,其位置精确化所要求的平均时间越长,那么当我们描述一些非常小的探测装置时,这个理论的预测似乎就不太妙了。比如要探测一个光子的位置,我们不必动用庞大而复杂的仪器,而可以用非常简单的感光剂来做到。如果好好安排,我们完全可以只用到数十亿个粒子(主要是银离子)来完成这个任务。按照哥本哈根,这无疑也是一次“观测”,可以立刻使光子的波函数坍缩而得到一个确定的位置,但如果用 GRW 的方法来计算,这样小的一个系统必须等上平均差不多一年才会产生一次“自发”的定域。

Roland Omnes 后来提到, Ghirardi 在私人的谈话中承认了这一困难。但他争辩说,就算在光子使银离子感光这一过程中牵涉到的粒子数目不足以使系统足够快地完成自发定域,我们谁都无法意识到这一点!如果作为观测者的我们不去观测这个实验的结果,谁知道呢,说不定光子真的需要等上一年来得到精确的位置。可是一旦我们去观察实验结果,这就把我们自己的大脑也牵涉进整个系统中来了。关键是,我们的大脑足够“大”(有没有意识倒不重要),足够大的物体便使得光子迅速地得到了一个相对精确的定位!

推而广之,因为我们长着一个大脑袋,所以不管我们看什么,都不会出现位置模糊的量子现象。要是我们拿复杂的仪器去测量,那么当然,测量的时候对象就马上变得精确了。即使仪器非常简单细小,测量以后对象仍有可能保持在模糊状态,它也会在我们观测结果时因为拥有众多粒子的“大脑”的介入而迅速定域。我们是注定无法直接感觉到任何量子效应了,不知道一个足够小的病毒能否争取到足够长的时间来感觉到“光子又在这里又在那里”的奇妙景象(如果它能够感觉的话!)?

最后,薛定谔方程是线性的,而 GRW 用密度矩阵方程将它取而代之以后,实际上把整个理论体系变成了非线性的!这实际上会使它作出一些和标准量子论不同的预言,而它们可以用实验来检验(只要我们的技术手段更加精确一些)!可是,标准量子论在实践中是如此成功,它的辉煌是如此灿烂,以致任何想和它在实践上比高低的企图都显得前途不太美妙。我们已经目睹了定域隐变量理论的惨死,不知 GRW 能否有更好的运气?另一位量子论专家,因斯布鲁克大学的 Zeilinger(提出 GHZ 检验的那个)在 2000 年为 Nature 杂志撰写的庆祝量子论诞生 100 周年的文章中大胆地预测,将来的实验会进一步证实标准量子论的预言,把非线性的理论排除出去,就像当年排除掉定域隐变量理论一样。

OK,我们将来再来为 GRW 的终极命运而担心,我们现在只是关心它的生存现状。GRW 保留了类似“坍缩”的概念,试图在此基础上解释微观到宏观的转换。从技术上讲它是成功的,避免了“观测者”的出现,但它没有解决坍缩理论的基本难题,也就是坍缩本身是什么样的机制?再加上我们已经提到的种种困难,使得它并没有吸引到大部分的物理学家来

支持它。不过，GRW 不太流行的另一个重要原因，恐怕是很快就出现了另一种解释，可以做到 GRW 所能做到的一切。虽然同样稀奇古怪，但它却不具备 GRW 的基本缺点。这就是我们马上就要去观光的另一条道路：退相干历史 (Decoherent Histories)。这也是我们的漫长旅途中所重点考察的最后一条道路了。

第十二章 新探险

12-1

1953 年，年轻，但是多才多艺的物理学家穆雷·盖尔曼 (Murray Gell-Mann) 离开普林斯顿，到芝加哥大学担任讲师。那时的芝加哥，仍然笼罩在恩里科·费米的光辉之下，自从这位科学巨匠在 1938 年因为对于核物理理论的杰出贡献而拿到诺贝尔奖之后，已经过去了近 16 年。盖尔曼也许不会想到，再过 16 年，相同的荣誉就会落在自己身上。

虽然已是功成名就，但费米仍然抱着宽厚随和的态度，愿意和所有的人讨论科学问题。在核物理迅猛发展的那个年代，量子论作为它的基础，已经被奉为神圣而不可侵犯的经典，但费米却总是有着一肚子的怀疑，他不止一次地问盖尔曼：

既然量子论是正确的，那么叠加性必然是一种普遍现象。可是，为什么火星有着一确定的轨道，而不是从轨道上向外散开去呢？

自然，答案在哥本哈根派的锦囊中是唾手可得：火星之所以不散开去，是因为有人在“观察”它，或者说有人在看着它。每看一次，它的波函数就坍缩了。但无论费米还是盖尔曼，都觉得这个答案太无聊和愚蠢，必定有一种更好的解释。

可惜在费米的有生之年，他都没能得到更好的答案。他很快于 1954 年去世，而盖尔曼则于次年又转投加州理工，在那里开创属于他的伟大事业。加州理工的好学生源源不断，哈特尔 (James B Hartle) 就是其中一个。60 年代，他在盖尔曼手下攻读博士学位，对量子宇宙学进行了充分的研究和思考，有一个思想逐渐在他的脑海中成型。那个时候，费因曼的路径积分方法已经被创立了 20 多年，而到了 70 年代，正如我们在史话的前面所提起过的那样，一种新的理论——退相干理论在 Zurek 和 Zeh 等人的努力下也被建立起来了。进入 80 年代，埃弗莱特的多宇宙解释在物理学界死灰复燃，并迅速引起了众人的兴趣……一切外部条件都逐渐成熟，等 1984 年，格里菲斯 (Robert Griffiths) 发表了她的论文之后，退相干历史 (简称 DH) 解释便正式瓜熟蒂落了。

我们还记得埃弗莱特的 MWI：宇宙在薛定谔方程的演化中被投影到多个“世界”中去，在每个世界中产生不同的结果。这样一来，在宇宙的发展史上，就逐渐产生越来越多的“世界”。历史只有一个，但世界有很多个！

当哈特尔和盖尔曼读到格里菲斯关于“历史”的论文之后，他们突然之间恍然大悟。他们开始叫嚷：“不对！事实和埃弗莱特的假定正好相反：世界只有一个，但历史有很多个！”

提起“历史” (History) 这个词，我们脑海中首先联想到的恐怕就是诸如古埃及、巴比伦、希腊罗马、唐宋元明清之类的概念。历史学是研究过去的学问。但在物理上，过去、现在、未来并不是分得很清楚的，至少理论中没有什么特征可以让我们明确地区分这些状态。站在物理的角度谈“历史”，我们只把它定义成一个系统所经历的一段时间，以及它在这段时间内所经历的状态变化。比如我们讨论封闭在一个盒子里的一堆粒子的“历史”，则我们可以预计它们将按照热力学第二定律逐渐地扩散开来，并最终达到最大的热辐射平衡状态为止。当然，也有可能在其中会形成一个黑洞并与剩下的热辐射相平衡，由于量子涨落和霍金蒸发，系统很有可能在这两个平衡态之间不停地摇摆，但不管怎么样，对应于某一个特定的时刻，我们的系统将有一个特定的态，把它们连起来，就是我们所说的这个系统的“历史”。

我们要时刻记住，在量子力学中一切都是离散而非连续的，所以当我们讨论“一段时间”的时候，我们所说的实际上是一个包含了所有时刻的集合，从 t_0 , t_1 , t_2 ，一直到 t_n 。所以我们说的“历史”，实际上就是指，对应于时刻 t_k 来说，系统有相应的

态 A_k 。

我们还是以广大人民群众喜闻乐见的比喻形式来说明问题。想象一支足球队参加某联赛，联赛一共要进行 n 轮。那么，这支球队的“历史”无非就是：对应于第 k 轮联赛（时刻 k ），如果我们进行观测，则得到这场比赛的结果 A_k （ A_k 可以是 1:0, 2:1, 3:3..... 等等）。如果完整地把这个球队的“历史”写出来，则大概是这个样子：

1:2, 2:3, 1:1, 4:1, 2:0, 0:0, 1:3.....

为了简便起见，我们现在仅仅考察一场比赛的情况。一场比赛所有可能的“历史”的总数，理论上说是无穷多的，当然在现实里，比分一般不会太高。如果比赛尚未进行，或者至少，我们尚不知道其结果，那么对于每一种“历史”我们就只能估计它发生的可能性。在实际中，即使是概率也经常很难算准（尽管参考博彩公司的赔率或者浏览一些赌波网站或许能提供某些帮助，但它们有时候是相当误导的），但我们在此讨论的是理论问题，因此我们就假定通过计算，关于任何一种历史我们都能够得到一个准确的概率。比方说，1:0 获胜这样一种“历史”发生的可能性是 10%，1:2 落败则有 20%..... 等等。

说了这么多，这些有什么用呢？切莫心急，很快就见分晓。

到现在为止，因为我们处理的都还是经典概率，所以它们是“可加”的！也就是说，如果我们有两种历史 a 和 b ，它们发生的概率分别是 P_a 和 P_b ，则“ a 或者 b ”发生的概率就是 $P_a + P_b$ 。拿我们的例子来说，如果我们想问：“净胜 2 球的可能性是多少？”，那么它必然等于所有“净胜两球”的历史概率的总和，也就是 $P(2:0) + P(3:1) + P(4:2) + \dots$ 这看起来似乎是天经地义。

但让我们回到量子论中来。稀奇的是，在量子论里，这样的加法并不总是能够实现！拿我们已经讨论得口干舌燥的那个实验来说，如果“电子通过左缝”是一种历史，“电子通过右缝”是另一种历史，那么“电子通过左缝或者通过右缝”的可能性是多少呢？我们必须把它放到所谓的“密度矩阵” D 中去计算，把它们排列成表格！

在这个表格中，呆在坐标（左，左）上的那个值就是“通过左缝”这个历史的概率。呆在（右，右）上的，则无疑是“通过右缝”的概率。但等等，我们还有两个多余的东西， D （左，右）和 D （右，左）！这两个是什么东西？它们不是任何概率，而表明了“左”和“右”两种历史之间的交叉干涉！要命的是，计算结果往往显示这些干涉项不为 0。

换句话说，“通过左缝”和“通过右缝”这两种历史不是独立自主的，而是互相纠缠在一起，它们之间有干涉项。当我们计算“电子通过左缝或者通过右缝”这样一种情况的时候，我们得到的并非一个传统的概率，干脆地说，这样一个“联合历史”是没有概率的！这也就是为什么在双缝实验中，我们不能说“电子要么通过左缝，要么通过右缝”的原因，它必定同时通过了双缝，因为这两种历史是“相干”的！

回到我们的足球比喻，在一场“量子联赛”中，所有可能的历史都是相干的，1:0 这种历史和 2:0 这种历史互相干涉，所以它们的概率没有可加性！也就是说，如果 1:0 的可能性是 10%，2:0 的可能性是 15%，那么“1:0 或者 2:0”的可能性却不是 25%，而是某种模糊的东西，它无法被赋予一个概率！

这听上去可真不美妙，如果这些概率不能相加，那么赌球的人或者买足球彩票的人一定都不知所措，没法合理地投入资金了。如果不能计算概率，那我们还能做什么呢？但是且莫着急，因为奇妙的事情马上就要发生了：虽然我们无法预测“1:0 或者 2:0”的概率是多少，然而我们却的确可以预言“胜或者平”的概率是多少！这都是因为“退相干”机制的存在！

魔术的秘密在这里：当我们不关心一场比赛的具体比分，而只关心其胜负关系的时候，我们实际上忽略了许多信息。比如说，当我们讨论一种历史是“胜，胜，平，负，胜，负.....”，而不是具体的比分的时候，我们实际上构建了一种“粗略的”历史。在每一轮联赛中，我们观察到的态 A_k 都包含了无数种更加精细的态。例如当我们说第二轮球队“胜”的时候，其中包括了 1:0, 2:1, 2:0, 3:1..... 所有可以归纳为“胜”的具体赛果。在术语中，我们把每一种具体的可能比分称为“精粒历史”（fine-grained

history)，而把类似“胜”，“负”这样的历史称为“粗粒历史”（coarse-grained history）。

再一次为了简便起见，我们仅仅考察一场比赛的情况。对于单单一场比赛来说，它的“粗粒历史”无非有 3 种：胜，平，负。如果“胜”的可能性是 30%， “平”的可能性是 40%，那么“非胜即平”，也就是“不败”的可能性是多少呢？大家对我们上面的讨论还记忆犹新，可能会开始担忧，因为量子论或许不能给出一个经典的概率来，但这次不同了！这一次，量子论给出了一个类似经典概率的答案：“不败”的概率 = 30 + 40 = 70%！

这是为什么呢？原来，当我们计算“胜”和“平”之间的关系时，我们实际上计算了所有包含在它们之中的“精粒历史”之间的关系！如果我们把“胜”和“平”放到矩阵中去计算，我们的确也会得到干涉项如（胜，平），但这个干涉项是什么呢？它是所有组成两种粗粒历史的精粒历史的干涉之和！也就是说，它包括了“1:0 和 0:0 之间的干涉”，“1:0 和 1:1 之间的干涉”，“2:0 和 1:1 之间的干涉”……等等。总之，每一对可能的干涉都被计算在内了，我们惊奇地发现，所有这些干涉加在一起，正好抵消了个干净。当最后的结果出来时，“胜”和“平”之间的干涉项即使没有完全消失，也已经变得小到足以忽略不计。“胜”和“平”两种粗粒历史不再相干，它们“退相干”了！

在量子力学中，我们具体可以采用所谓的“路径积分”（path integral）的办法，构造出一个“退相干函数”来计算所有的这些历史。我们史话的前面已经略微提起过路径积分，它是鼎鼎有名的美国物理学家费因曼在 1942 年发表的一种量子计算方法，费因曼本人后来也为此与人共同分享了 1965 年的诺贝尔物理学奖。路径积分是一种对于整个时间和空间求和的办法，当粒子从 A 地运动到 B 地，我们把它的轨迹表达为所有可能的空间和所有可能的时间的叠加！我们只关心它的初始状态和最终状态，而忽略它的中间状态，对于这些我们不关心的状态，我们就把它在每一种可能的路径上遍历求和，精妙的是，最后这些路径往往会自相抵消掉。

在量子足球场上发生的是同样的事情：我们只关心比赛的胜负结果，而不关心更加细微的事情例如具体的比分。当我们忽略具体比分的时候，事实上就对于每一种可能的比分（历史）进行了遍历求和。当所有的精粒历史被加遍了以后，它们之间的干涉往往会完全抵消，或者至少，几乎完全抵消。这个时候，经典概率就又回到桌面上来，两个粗粒历史的概率又变得可加了，量子论终于又可以管用了！我们也许分不清一场比赛究竟是 1:0 还是 2:0，但我们无疑可以分清一场比赛究竟是赢了还是平了！因为这两种历史之间不再相干！

关键在于，我们必须构建起足够“粗粒”的历史。这就像我传给你两张数字照片，分别是珍妮弗·洛佩兹和珍妮弗·安妮斯顿的特写，然后问你，你觉得两人谁更漂亮。假如你把这些照片放到最大最大，你看见的很可能只是些颜色各异的色块，两张照片对你来说似乎也没什么大的分别。只有把分辨率调得足够低或者你退开足够远的距离，把这些色块都模糊化，你才能看见整个构图，从而有效地区分这两张照片的不同，进而作出比较。总之，只有当足够“粗粒”的时候，两张照片才能被区分开来，而我们的“历史”也是如此！如果两个历史的“颗粒太细”，以至于它们之间互相干涉，我们就无法把它们区分开来，比如我们无法区分“电子通过了左缝”和“电子通过了右缝”两种历史，它们同时发生着！但如果历史的粒子够“粗”，则我们便能够有效地分开两种历史，它们之间退相干了！

当我们观测了电子的行为，并得到最终结果后，我们实际上就构建了一种“粗粒历史”。我们可以把它归结成两种：“我们观测到粒子在左”以及“我们观测到粒子在右”。为什么说它们是粗粒历史呢？因为我们忽略的东西实在太多了。我们现在只关心我们观测到电子在哪个位置，而不关心我们站在实验室的哪个角落，今天吃了拉面还是汉堡还是寿司，更不关心当我们进行观测的时候，空气中有多少灰尘沾在我们身上，窗户里射进了多少光子与我们发生了相互作用……从理论上讲，每一种不同的情况都应该对应于一种特定的历史，比如“吃了拉面的我们观察到电子在左”和“吃了汉堡的我们观察到电子在左”其实是两种不同的历史。“观察到电子在左并同时被 1 亿个光子打中”与“观察到电子在左并同时被 1 亿零 1 个光子打中”也是两种不同的历史，但我们并不关心这些，而只是把它们简并到“我们观察到电子在左”这个类别里去，因此我们实际上构建了一个非常粗粒的历史。

现在，当我们计算“我们观测到电子在左”和“我们观测到电子在右”两个历史之间的干涉时，实际上就对太多的事情做了遍历求和。我们遍历了“吃了汉堡的你”，“吃了寿司的你”，“吃了拉面的你”……的不同命运。我们遍历了在这期间打到你身上的

每一个光子，我们遍历了你和宇宙尽头的每一个电子所发生的相互作用……如果说“我们观测电子的位置”是一个系统，组成这个系统的有 n 个粒子，在这其中，有 m 个粒子的状态实际上决定了我们到底观测到电子在左还是在右。那么，除去这 m 个粒子之外，每一个粒子的命运都在计算中被加遍了。在时间上来说，除了实际观测的那一刻，每一个时刻——不管过去还是未来——所有粒子的状态也都被加遍了。在所有这些计算都完成了之后，在每一个方向上的干涉也就几乎相等了，它们将从结果中被抵消掉。最后，“我们观测到电子在左”和“我们观测到电子在右”两个粗粒历史退相干了，它们之间不再互相联系，而我们只能感觉到其中的某一种！

各位可能会觉得这听起来像一个魔幻故事，但这的确是最近非常流行的一种关于量子论的解释！1984 年格里菲斯为它开拓了道路，而很快到了 1991 年，哈特尔就开始对它进行扩充和完善。不久盖尔曼和欧姆内斯（Roland Omnés）也加入到这一行列中来，这些杰出的物理学家很快把它变成了一个洋洋洒洒的体系。我们还是有必要进一步地考察这个思想，从而对量子论的内涵获取更深的领悟。

12-2

按照退相干历史（DH）的解释，假如我们把宇宙的历史分得足够精细，那么实际上每时每刻都有许许多多的精粒历史在“同时发生”（相干）。比如没有观测时，电子显然就同时经历着“通过左缝”和“通过右缝”两种历史。但一般来说，我们对于过分精细的历史没有兴趣，我们只关心我们所能观测到的粗粒历史的情况。因为互相脱散（退相干）的缘故，这些历史之间失去了联系，只有一种能够被我们感觉到。

按照历史颗粒的粗细，我们可以创建一棵“历史树”。还是拿我们的量子联赛来说，一个球队在联赛中的历史，最粗可以分到什么程度呢？也许我们可以把它仅仅分成两种：“得到联赛冠军”和“没有得到联赛冠军”。在这个极粗的层面上，我们只具体关心有否获得冠军，别的一概不理，它们都将在计算中被加遍。但是我们也可以继续“精确”下去，比如在“得到冠军”这个分支上，还可以继续按照胜率再区分成“夺冠并且胜率超过 50%”和“夺冠但胜率不超过 50%”两个分支。类似地我们可以一直分下去，具体到总共获胜了几场，具体到每场的胜负……一直具体到每场的详细比分为止。当然在现实中我们仍可以继续“精粒化”，具体到谁进了球，球场来了多少观众，其中多少人穿了红衣服，球场一共长了几根草之类。但在这里我们假设，一场球最详细的信息就是具体的比分，没有更加详细的了。这样一来，我们的历史树分到具体的比分就无法再继续分下去，这最底下的一层就是“树叶”，也称为“最精粒历史”（maximally fine-grained histories）。

对于两片树叶来讲，它们通常是互相相干的。我们无法明确地区分 1:0 获胜和 2:0 获胜这两种历史，因此也无法用传统的概率去计算它们。但我们可以通过适当的粗粒化来构建符合常识的那些历史，比如我们可以区分“胜”，“平”和“负”这三大类历史，因为它们之间已经失去了干涉，退相干了。如此一来，我们就可以用传统的经典概率来计算这些历史，这就形成了“一族”退相干历史（a decoherent family of histories），只有在同一族里，我们才能运用通常的理性逻辑来处理它们之间的概率关系。有的时候，我们也不说“退相干”，而把它叫做“一致历史”（consistent histories），DH 的创建人之一格里菲斯就爱用这个词，因此“退相干历史”也常常被称为“一致历史”解释，更加通俗一点，也可以称为“多历史”（many histories）理论。

一般来说，在历史树上越接近根部（往上），粗粒化就越厉害，其干涉也就越小。当然，并非所有的粗粒历史之间都没有干涉，可以被赋予传统概率，具体地要符合某种“一致条件”（consistency condition），而这些条件可以由数学严格地推导出来。

现在让我们考虑薛定谔猫的情况：当那个决定命运的原子衰变时，就这个原子本身来说，它的确经历着衰变/不衰变两种可能的精粒历史。原子本身只是单个粒子，我们忽略的东西并不多。但一旦猫被拖入这个剧情之中，我们的历史剧本换成了猫死/猫活两种，情况就不同了！无论是“猫死”还是“猫活”都是非常模糊的陈述，描述一只猫具体要用到 10^{27} 个粒子，当我们说“猫活”的时候，我们忽略了这只猫与外界的一切作用，比如它如何呼吸，如何与外界进行物质和能量交换……等等。就算是“猫死”，它身上的 n 个粒子也仍然要和外界发生相互作用。换句话说，“猫活”和“猫死”其实是两大类历史的总和，就像“胜”是“1:0”，“2:0”，“2:1”……等历史的总和一样。当我们计算“猫死”和“猫活”之间的干涉时，我们其实穷尽了这两大类历史下的每一对精粒历史之间的干涉，而它们绝大多数都最终抵消掉了。“猫死”和“猫活”之间那千丝万缕的联系于是被切断，它们退相干，最终只有其中

的一个真正发生！如果从密度矩阵的角度来看问题，则其表现为除了矩阵对角线上的那些经典概率之外，别的干涉项都迅速消减为 0：矩阵“对角化”了！而这里面既没有自发的随机定域，也没有外部的“观测者”，更没有看不见的隐变量！

如果 DH 解释是正确的，那么我们每时每刻其实都经历着多重的历史，世界上的每一个粒子，事实上都处在所有可能历史的叠加中！但一旦涉及到宏观物体，我们所能够观察和描述的则无非是一些粗粒化的历史，当细节被抹去时，这些历史便互相退相干，永久地失去了联系。比方说如果最终猫还活着，那么“猫死”这个分支就从历史树上被排除了，按照奥卡姆剃刀，我们不妨说这些历史已经不存在于宇宙之中。

嗯，虽然听起来古怪，但它至少可以自圆其说，不是吗？粗粒化的方法看起来可能让人困惑，但其实却并没有那么大惊小怪，我们事实上经常有意无意地用到这些办法。比如在中学里我们计算地球和太阳之间的引力，我们把两个星球“粗粒化”为两个质点。实际上地球和太阳是两个庞大的球体，但以质心代替所有的点，而忽略它们的具体位置之后，我们实际上已经不知不觉地加遍了两个球体内部每一对质点之间的吸引力。在 DH 解释中，我们所做的只不过更加复杂一点罢了。

从数学上说，DH 是定义得很好的一个理论，而从哲学的雅致观点来看，其支持者也颇为得意地宣称它是一种假设最少，而最能体现“物理真实”的理论。但是，DH 的日子也并不像宣扬的那样好过，对其最猛烈的攻击来自我们在上一章提到过的，GRW 理论的创立者之一 GianCarlo Ghirardi。自从 DH 理论创立以来，这位意大利人和其同事至少在各类物理期刊上发表了 5 篇攻击退相干历史解释的论文。Ghirardi 敏锐地指出，DH 解释并不比传统的哥本哈根解释好到哪里去！

正如我们已经为大家所描述过的那样，在 DH 解释的框架内我们定义了一系列的“粗粒”的历史，当这些历史符合所谓的“一致条件”时，它们就形成了一个互相之间退相干的历史族（family）。比如在我国的联赛中，针对某一场具体的比赛，“胜”，“平”，“负”就是一个合法的历史族，在它们之间只有一个能够发生，因为它们互相之间都已经几乎没有联系。但是，在数学上利用同样的手法，我们也可以定义一些另外的历史族，它们同样合法！比如我们并不一定关注胜负关系，而可以考虑另外的方面比如进球数。现在我们进行另一种粗粒化，把比赛结果区分为“没有进球”，“进了一个球”，“进了两个球”以及“进了两个以上的球”。从数学上看，这 4 种历史同样符合“一致条件”，它们构成了另一个完好的退相干历史族！

现在，当我们观测了一场比赛，所得到的结果就取决于所选择的历史族。对于同一场比赛，我们可能观测到“胜”，但换一个角度，也可能观测到“进了两个球”。当然，它们之间并不矛盾，但如果我们仔细地考虑一下，在“现实中”真正发生了什么，这仍然叫我们困惑。

当我们观测到“胜”的时候，我们假设在其属下所有的精粒历史都在发生，比如 1:0, 2:1, 2:0, 3:0……所有的历史都发生了，只不过我们观测不到具体的精细结果，也对它们并不感兴趣。可对于同样一场比赛，我们也可能观测到“进了两个球”，这时候我们的假设其实是，所有进了两个球的历史都发生了。比如 2:0, 2:1, 2:2, 2:3……

现在我们考虑某种特定的精粒历史，比如说 1:0 这样一个历史。虽然我们从来不会实际观测到这样一个历史，但这并不妨碍我们去问：1:0 的历史究竟发生了没有？当观测结果是“胜”的时候，它显然发生了；而当观测结果是“进了两个球”的时候，它却显然没有发生！可是，我们描述的却是同一场比赛！

DH 的本意是推翻教科书上的哥本哈根解释，把观测者从理论中赶出去，还物理世界以一个客观实在的解释。也就是说，所有的物理属性都是超越于你我的观察之外独立存在的，它不因为任何主观事物而改变。但现在 DH 似乎是哑巴吃黄连——有苦说不出。“1:0 的历史究竟是否为真”这样一个物理描述，看来的确要取决于历史族的选择，而不是“客观存在”的！这似乎和玻尔他们是殊途同归：宇宙中没有纯粹的客观的物理属性，所有的属性都只能和具体的观察手段连起来讲！

但 DH 的支持者辩护说，任何理性的逻辑推理（reasoning），都只能用在同一个退相干家族中，而不能跨家族使用。比如当我们在“胜，平，负”这样一族历史中得到了“1:0 的精粒历史发生了”这样一个结论后，我们绝不能把它带到另一族历史（比如“没进球，进 1 球，进 2 球，进 2 球以上”）中去，并与其相互比较。他们把这总结成所谓的“同族原则”（single family rule），并宣称这是量子论中最重要的原则。

这一点先放在一边不论，DH 的另一个难题是，在理论中实际上存在着种类繁多的“退相干族”，而我们在现实中观察到的却只有一个！还是拿我们的量子联赛来说，就单单一场比赛而言，我们在前面定义了一个退相干族，也就是“胜，平，负”。这一族中包含了 3 大种粗粒历史，它们之间都互相退相干。这看上去一点都不错，但问题是，并不只有“胜，平，负”这样的分法是可能的，还有无穷种其他的分法，其中的大部分甚至是千奇百怪，不符合常识的，但理论并没有解释我们为何观测到的不是这些另外的分类！

比方说，我们从理论上定义 3 种历史：“又胜又平”，“又胜又负”，“又平又负”，这 3 种历史在数学上同样构成一个合法并且完好的退相干族：它们的概率可以经典相加，你无论观测到其中的哪一种，就无法再观测到另外的两种。但显然在实际中，一场比赛不可能“又胜又负”，那么 DH 就欠我们一个解释，它必须说明为什么在现实中的比赛是分成“胜，平，负”的，而不是“又胜又平”之类，虽然它们在数学上并没有太大的不同！

在这个问题上，DH 的辩护者也许会说，理论只有义务解释现实的运作，而没有义务解释现实的存在！我们是从现实出发去建立理论，而不是从理论出发去建立现实！好比说“1 头牛加 1 头牛等于 2 头牛”和“1 头斯芬克斯加 1 头斯芬克斯等于 2 头斯芬克斯”在数学上都是成立的，但数学没有义务解释为什么在现实世界中，实际可供我们相加的只有牛，而没有斯芬克斯这样的怪兽。在这一点上实证主义者和柏拉图主义者往往会产生尖锐的冲突，一个突出的例子是我们在后面将会略微讨论到的超弦理论。弦论用 10 个维度来解释我们的世界，其中 6 个维度是蜷缩的，但它没有说明为什么是 6 个维度蜷缩，而不是 5 个或者 8 个维度，这使它受到了一些尖锐的诘问。但实证主义者常常会对这样的穷追猛打感到奇怪：因为只有假设 6 个维度蜷缩才能解释我们观测到的现实世界（现实世界是 4 维的），这就够了嘛，这不就是所有的理由吗？哪还来的那么多刨根问底呢？

不过 DH 的支持者如果护定这样一种实证主义立场的话，他们也许暂时忽略了建立这个理论的初衷，也就是摆脱玻尔和海森堡的哥本哈根解释——那可是最彻底的实证主义！不管怎么说，在这上面 DH 的态度是有些尴尬的，而有关量子力学的大辩论也仍在进行之中，我们仍然无法确定究竟谁的看法是真正正确的。量子魔术在困扰了我们超过 100 年之后，仍然拒绝把它最深刻的秘密展示在世人面前。也许，这一秘密，将终究成为永久的谜题。

饭后闲话：时间之矢

我们生活在一个 4 维的世界中，其中 3 维是空间，1 维是时间。时间是一个很奇妙的东西，它似乎和另 3 维空间有着非常大的不同，最关键的一点是，它似乎是有方向性的！拿空间来说，各个方向没有什么区别，你可以朝左走，也可以向右走，但在时间上，你只能从“过去”向“未来”移动，而无法反过来！虽然有太多的科幻故事讲述人们如何回到过去，但在现实中，这从来也没有发生过，而且很可能永远不会发生！这样猜测的理由还是基于某种类人择原理的东西：假如理论上可以回到过去，那么虽然我们不行，未来的人却可以，但从未见到他们“回来”我们这个时代。所以很有可能的是，未来任何时代的人们都无法做到让时钟反方向转动，它是理论上无法做到的！

这看起来很正常，无法逆着时间箭头运动，这似乎天经地义。但在物理上，这却是令人困惑的，因为在理论中，似乎没有什么特征可以显示出时间有一个特别的方向。不论是牛顿还是爱因斯坦的理论，它们都是时间对称的！中学老师告诉你 t_0 时刻的状态，你就可以向“未来”前进，推出 t_n 时刻，但也可以反过来向“过去”前进，推出 $-t_n$ 时刻。理论没有告诉我们为什么时间只能向 t_n 移动，而不可以反过来向 $-t_n$ 移动！事实上，在基本层面上，不管时间是正着走还是倒着走，它都是符合物理定律的！但是，一旦脱离基本层面，上升到一个比较高的层次，时间之矢却神秘地出现了：假如我们不考虑单个粒子，而考虑许多粒子的组合，我们就发现一个强烈的方向。比如我们本身只能逐渐变老，而无法越来越年轻，杯子会打碎，但绝不会自动粘贴在一起。这些可以概括为一个非常强大的定律，即著名的热力学第二定律，它说，一个孤立体系的混乱程度总是不断增加的，它的量度称为“熵”。换句话说，熵总是在变大，时间的箭头指向熵变大的那个方向！

现在我们考察量子论。在本节我们讨论了 DH 解释，所有的“历史”都是定义得很好的，不管你什么时候去测量，这些历史

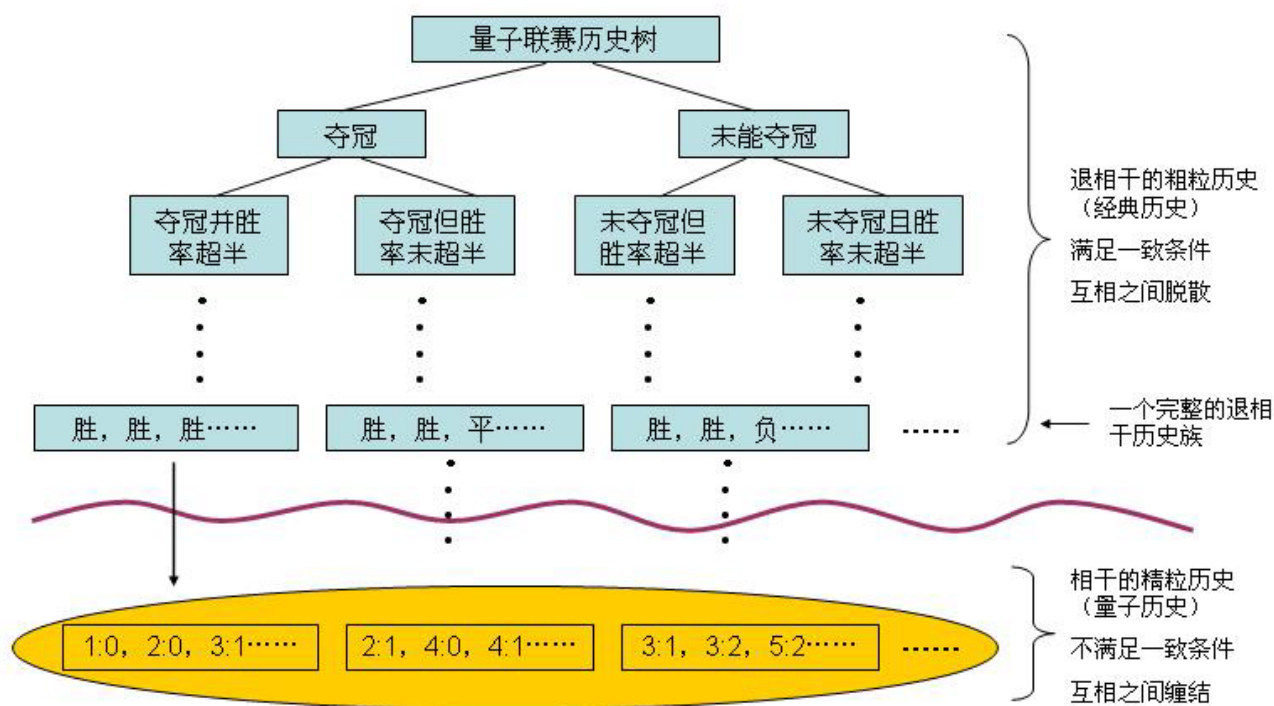
——从过去到未来——都已经在那里存在。我们可以问，当观测了 t_0 时刻后，历史们将会如何退相干，但同样合法的是，我们也可以观测 t_n 时刻，看“之前”的那些时刻如何退相干。实际上，当我们用路径积分把时间加遍的时候，我们仍然没有考虑过时间的方向问题，它在两个方向上都是没有区别的！再说，如果考察量子论的基本数学形式，那么薛定谔方程本身也仍然是时间对称的，唯一引起不对称的是哥本哈根所谓的“坍缩”，难道时间的“流逝”，其实等价于波函数不停的“坍缩”？然而 DH 是不承认这种坍缩的，或许，我们应当考虑的是历史树的裁剪？盖尔曼和哈特等人也试图从 DH 中建立起一个自发的时间箭头来，并将它运用到量子宇宙学中去。

我们先不去管 DH，如果仔细考虑“坍缩”，还会出现一个奇怪现象：假如我们一直观察系统，那么它的波函数必然“总是”在坍缩，薛定谔波函数从来就没有机会去发展和演化。这样，它必定一直停留在初始状态，看上去的效果相当于时间停滞了。也就是说，只要我们不停地观察，波函数就不演化，时间就会不动！这个佯谬叫做“量子芝诺效应”（quantum Zeno effect），我们在前面已经讨论过了芝诺的一个悖论，也就是阿喀琉斯追乌龟，他另有一个悖论是说，一支在空中飞行的箭，其实是不动的。为什么呢？因为在每一个瞬间，我们拍一张 snapshot，那么这支箭在那一刻必定是不动的，所以一支飞行的箭，它等于千千万万个“不动”的组合。问题是，每一个瞬间它都不动，连起来怎么可能变成“动”呢？所以飞行的箭必定是不动的！在我们的实验里也是一样，每一刻波函数（因为观察）都不发展，那么连在一起它怎么可能发展呢？所以它必定永不发展！

从哲学角度来说我们可以对芝诺进行精彩的分析，比如恩格斯漂亮地反驳说，每一刻的箭都处在不动与动的矛盾中，而真实的运动恰好是这种矛盾本身！不过我们不在意哲学探讨，只在乎实验证据。已经有相当多的实验证实，当观测频繁到一定程度时，量子体系的确表现出芝诺效应。这是不是说，如果我们一直盯着薛定谔的猫看，则它永远也不会死去呢？

时间的方向是一个饶有趣味的话题，它很可能牵涉到深刻的物理定律，比如对称性破缺的问题。在极早期宇宙的研究中，为了彻底弄明白时间之矢如何产生，我们也迫切需要一个好的量子引力理论，在后面我们会更详细地讲到这一点。我们只能向着未来，而不是过去前进，这的确是我们神奇的宇宙最不可思议的方面之一。

DH解释中的历史树



12-3

好了各位，到此为止，我们在量子世界的旅途已经接近尾声。我们已经浏览了绝大多数重要的风景点，探索了大部分先人走过的道路。但是，正如我们已经强烈地感受到的那样，对于每一条道路来说，虽然一路上都是峰回路转，奇境叠出，但越到后来却都变得那样地崎岖不平，难以前进。虽说“入之愈深，其进愈难，而其见愈奇”，但精神和体力上的巨大疲惫到底打击了

我们的信心，阻止了我们在任何一条道上顽强地冲向终点。

当一次又一次地从不同的道路上徒劳而返之后，我们突然发现，自己已经处在一个巨大的迷宫中央。在我们的身边，曲折的道路如同蛛网一般地辐射开来，每一条都通向一个幽深的不可捉摸的未来。我已经带领大家去探讨了哥本哈根、多宇宙、隐变量、系综、GRW、退相干历史等 6 条道路，但要告诉各位的是，仍然还有非常多的偏僻的小道，我们并没有提及。比如有人认为当进行了一次“观测”之后，宇宙没有分裂，只有我们大脑的状态（或者说“精神”）分裂了！这称为“多精神解释”（many-minds interpretation），它名副其实地算得上一一种精神分裂症！还有人认为，在量子层面上我们必须放弃通常的逻辑（布尔逻辑），而改用一种“量子逻辑”来陈述！另一些人不那么激烈，他们觉得不必放弃通常的逻辑，但是通常的“概率”概念则必须修改，我们必须引入“复”的概率，也就是说概率并不是通常的 0 到 1，而是必须描述为复数！华盛顿大学的物理学家克拉默（John G Cramer）建立了一种非定域的“交易模型”（The transactional model），而他在牛津的同行彭罗斯则认为波函数的缩减和引力有关。彭罗斯宣称只要空间的曲率大于一个引力子的尺度，量子线性叠加规则就将失效，这里面还牵涉到量子引力的复杂情况诸如物质在跌入黑洞时如何损失了信息……等等，诸如此类。即便是我们已经描述过的那些解释，我们的史话所做的也只是挂一漏万，只能给各位提供一点最基本的概念。事实上，每一种解释都已经衍生出无数个变种，它们打着各自的旗号，都在不遗余力地向世人推销自己，这已经把我们搞得头晕脑胀，不知所措了。现在，我们就像是被困在克里特岛迷宫中的那位忒修斯（Theseus），还在茫然而不停地摸索，苦苦等待着阿里阿德涅（Ariadne）——我们那位可爱的女郎——把那个指引方向，命运攸关的线团扔到我们手中。

1997 年，在马里兰大学巴尔的摩分校（UMBC）召开了一次关于量子力学的研讨会。有人在与会者中间做了一次问卷调查，统计究竟他们相信哪一种关于量子论的解释。结果是这样的：哥本哈根解释 13 票，多宇宙 8 票，玻姆的隐变量 4 票，退相干历史 4 票，自发定域理论（如 GRW）1 票，还有 18 票都是说还没有想好，或者是相信上述之外的某种解释。到了 1999 年，在剑桥牛顿研究所举行的一次量子计算会议上，又作了一次类似的调查，这次哥本哈根 4 票，修订过的运动学理论（它们对薛定谔方程进行修正，比如 GRW）4 票，玻姆 2 票，而多世界（MWI）和多历史（DH）加起来（它们都属于那种认为“没有坍塌存在”的理论）得到了令人惊奇的 30 票。但更加令人惊奇的是，竟然有 50 票之多承认自己尚无法作出抉择。在宇宙学家和量子引力专家中，MWI 受欢迎的程度要高一些，据统计有 58% 的人认为多世界是正确的理论，而只有 18% 明确地认为它不正确。但其实许多人对于各种“解释”究竟说了什么是搞不太清楚的，比如人们往往弄不明白多世界和多历史到底差别在哪里，或许，它们本来就没有明确的分界线。就算是相信哥本哈根的人，他们互相之间也会发生严重的分歧，甚至关于它到底是不是一个决定论的解释也会造成争吵。量子论仍然处在一个战国纷争的时代，玻尔，海森堡，爱因斯坦，薛定谔……他们的背影虽然已经离我们远去，但他们当年曾战斗过的这片战场上仍然硝烟弥漫，他们不同的信念仍然支撑着新一代的物理学家，激励着人们为了那个神圣的目标而继续奋战。

想想也真是讽刺，量子力学作为 20 世纪物理史上最重要的成就之一，到今天为止它的基本数学形式已经被创立了将近整整 80 年。它在每一个领域内都取得了巨大的成功，以致和相对论一起成为了支撑物理学的两大支柱。80 年！任何一种事物如果经历了这样一段长时间的考验后仍然屹立不倒，这已经足够把它变成不朽的经典。岁月将把它磨砺成一个完美的成熟的体系，留给人们的只剩下深深的崇敬和无限的唏嘘，慨叹自己为何不能生于乱世，提三尺剑立不世功名，参予到这个伟大工作中去。但量子论是如此地与众不同，即使在它被创立了 80 年之后，它仍然没有被最后完成！人们仍在为了它而争吵不休，为如何“解释”它而闹得焦头烂额，这在物理史上可是前所未有的事情！想想牛顿力学，想想相对论，从来没有人为了如何“解释”它们而操心过，对比之下，这更加凸现出量子论那独一无二的神秘气质。

人们的确有理由感到奇怪，为什么在如此漫长的岁月过去之后，我们不但没有对量子论了解得更清楚，反而越来越感觉到它的奇特和不可思议。最杰出的量子论专家们各执一词，人人都声称只有他的理解才是正确的，而别人都错了。量子谜题已经成为物理学中一个最神秘和不可捉摸的部位，Zeilinger 有一次说：“我做实验的唯一目的，就是给别的物理学家看看，量子论究竟有多奇怪。”到目前为止，我们手里已经攥下了超过一打的所谓“解释”，而且它的数目仍然有望不断地增加。很明显，在这些花样繁多的提议中间，除了一种以外，绝大多数都是错误的。甚至很可能，到目前为止所有的解释都是错误的，但这却并没有妨碍物理学家们把它们创造出来！我们只能说，物理学家的想象力和创造力是非凡的，但这也引起了我们深深的忧虑：到底在多大程度上，物理理论如同人们所骄傲地宣称的那样，是对于大自然的深刻“发现”，而不属于物理学家们杰出的智力“发明”？

但从另外一方面看，我们对于量子论本身的确没有什么好挑剔的。它的成功是如此巨大，以致于我们除了咋舌之外，根本就来不及对它的奇特之处有过多的评头论足。从它被创立之初，它就挟着雷霆万钧的力量横扫整个物理学，把每个角落都塑造得焕然一新。或许就像狄更斯说的那样，这是最坏的时代，但也是最好的时代。

量子论的基本形式只是一个大的框架，它描述了单个粒子如何运动。但要描述在高能情况下，多粒子之间的相互作用时，我们就必定要涉及到场的作用，这就需要如同当年普朗克把能量成功地量子化一样，把麦克斯韦的电磁场也进行大刀阔斧的量子化——建立量子场论（quantum field theory）。这个过程是一个同样令人激动的宏伟故事，如果铺展开来叙述，势必又是一篇规模庞大的史话，因此我们只是在这里极简单地作一些描述。这一工作由狄拉克开始，经由约尔当、海森堡、泡利和维格纳的发展，很快人们就认识到：原来所有粒子都是弥漫在空间中的某种场，这些场有着不同的能量形态，而当能量最低时，这就是我们通常说的“真空”。因此真空其实只不过是粒子的一种不同形态（基态）而已，任何粒子都可以从中被创造出来，也可以互相湮灭。狄拉克的方程预言了所谓的“反物质”的存在，任何受过足够科普熏陶的读者对此都应该耳熟能详：比如一个正常的氢原子由带正电的质子和带负电的电子组成，但在一个“反氢原子”中，质子却带着负电，而电子带着正电！当一个原子和一个“反原子”相遇，它们就轰隆一声放出大量的能量辐射，然后双方同时消失得无影无踪，其关系就符合 20 世纪最有名的那个物理方程： $E=mc^2$ ！

最早的“反电子”由加州理工的安德森（Carl Anderson）于 1932 年在研究宇宙射线的时候发现。它的意义是如此重要，以致于仅仅过了 4 年，诺贝尔奖评委会就罕见地授予他这一科学界的最高荣誉。

但是，虽然关于辐射场的量子化理论在某些问题是成功的，但麻烦很快就到来了。1947 年，在《物理评论》上刊登了有关兰姆移位和电子磁矩的实验结果，这和现有的理论发生了微小的偏差，于是人们决定利用微扰办法来重新计算准确的值。但是，算来算去，人们惊奇地发现，当他们想尽可能地追求准确，而加入所有的微扰项之后，最后的结果却适得其反，它总是发散为无穷大！

这可真是让人沮丧的结果，理论算出了无穷大，总归是一件荒谬的事情。为了消除这个无穷大，无数的物理学家们进行了艰苦卓绝，不屈不挠的斗争。这个阴影是如此难以驱散，如附骨之蛆一般地叫人头痛，以至于在一段时间里把物理学变成了一个让人无比厌憎的学科。最后的解决方案是日本物理学家朝永振一郎、美国人施温格（Julian S Schwinger）和戴森（Freeman Dyson），还有那位传奇的费因曼所分别独立完成的，被称为“重正化”（renormalization）方法，具体的技术细节我们就不用理会了。虽然认为重正化牵强而不令人信服科学家大有人在，但是采用这种手段把无穷大从理论中赶走之后，剩下的结果其准确程度令人吃惊得瞠目结舌：处理电子的量子电动力学（QED）在经过重正化的修正之后，在电子磁矩的计算中竟然一直与实验值符合到小数点之后第 11 位！亘古以来都没有哪个理论能够做到这样教人咋舌的事情。

实际上，量子电动力学常常被称作人类有史以来“最为精确的物理理论”，如果不是实验值经过反复测算，这样高精度的数据实在是让人怀疑是不是存心伪造的。但巨大的胜利使得一切怀疑都最终迎刃而解，QED 也最终作为量子场论一个最为悠久和成功的分支而为人们熟知。虽然最近彭罗斯声称说，由于对赫尔斯-泰勒脉冲星系统的观测已经积累起了如此确凿的关于引力波存在的证明，这实际上使得广义相对论的精确度已经和实验吻合到 10 的负 14 次方，因此超越了 QED（赫尔斯和泰勒获得了 1993 年诺贝尔物理学奖）。但无论如何，量子场论的成功是无人可以否认的。朝永振一郎，施温格和费因曼也分享了 1965 年的诺贝尔物理学奖。

抛开量子场论的胜利不谈，量子论在物理界的几乎每一个角落都激起激动人心的浪花，引发一连串美丽的涟漪。它深入固体物理之中，使我们对于固体机械和热性质的认识产生了翻天覆地的变化，更打开了通向凝聚态物理这一崭新世界的门户。在它的指引下，我们才真正认识了电流的传导，使得对于半导体的研究成为可能，而最终带领我们走向微电子学的建立。它驾临分子物理领域，成功地解释了化学键和轨道杂化，从而开创了量子化学学科。如今我们关于化学的几乎一切知识，都建立在这个基础之上。而材料科学在插上了量子论的双翼之后，才真正展翅飞翔起来，开始深刻地影响社会的方方面面。在量子论的指引下，我们认识了超导和超流，我们掌握了激光技术，我们造出了晶体管和集成电路，为一整个新时代的来临真正做好了准

备。量子论让我们得以一探原子内部那最为精细的奥秘，我们不但更加深刻地理解了电子和原子核之间的作用和关系，还进一步拆开原子核，领略到了大自然那更为令人惊叹的神奇。在浩瀚的星空之中，我们必须借助量子论才能把握恒星的命运会何去何从：当它们的燃料耗尽之后，它们会不可避免地向内坍缩，这时支撑起它们最后骨架的就是源自泡利不相容原理的一种简并压力。当电子简并压力足够抵挡坍缩时，恒星就演化为白矮星。要是电子被征服，而要靠中子出来抵抗时，恒星就变为中子星。最后，如果一切防线都被突破，那么它就不可避免地坍缩成一个黑洞。但即使黑洞也不是完全“黑”的，如果充分考虑量子不确定因素的影响，黑洞其实也会产生辐射而逐渐消失，这就是以其鼎鼎大名的发现者史蒂芬·霍金而命名的“霍金蒸发”过程。

当物质落入黑洞的时候，它所包含的信息被完全吞噬了。因为按照定义，没什么能再从黑洞中逃出来，所以这些信息其实是永久地丧失了。这样一来，我们的决定论再一次遭到毁灭性的打击：现在，即使是预测概率的薛定谔波函数本身，我们都无法确定地预测！因为宇宙波函数需要掌握所有物质的信息，而这些信息却不断地被黑洞所吞没。霍金对此说了一句同样有名的话：“上帝不但掷骰子，他还把骰子掷到我们看不见的地方去！”这个看不见的地方就是黑洞奇点。不过由于蒸发过程的发现，黑洞是否在蒸发后又把这些信息重新“吐”出来呢？在这点上人们依旧争论不休，它关系到我们的宇宙和骰子之间那深刻的内在关系。

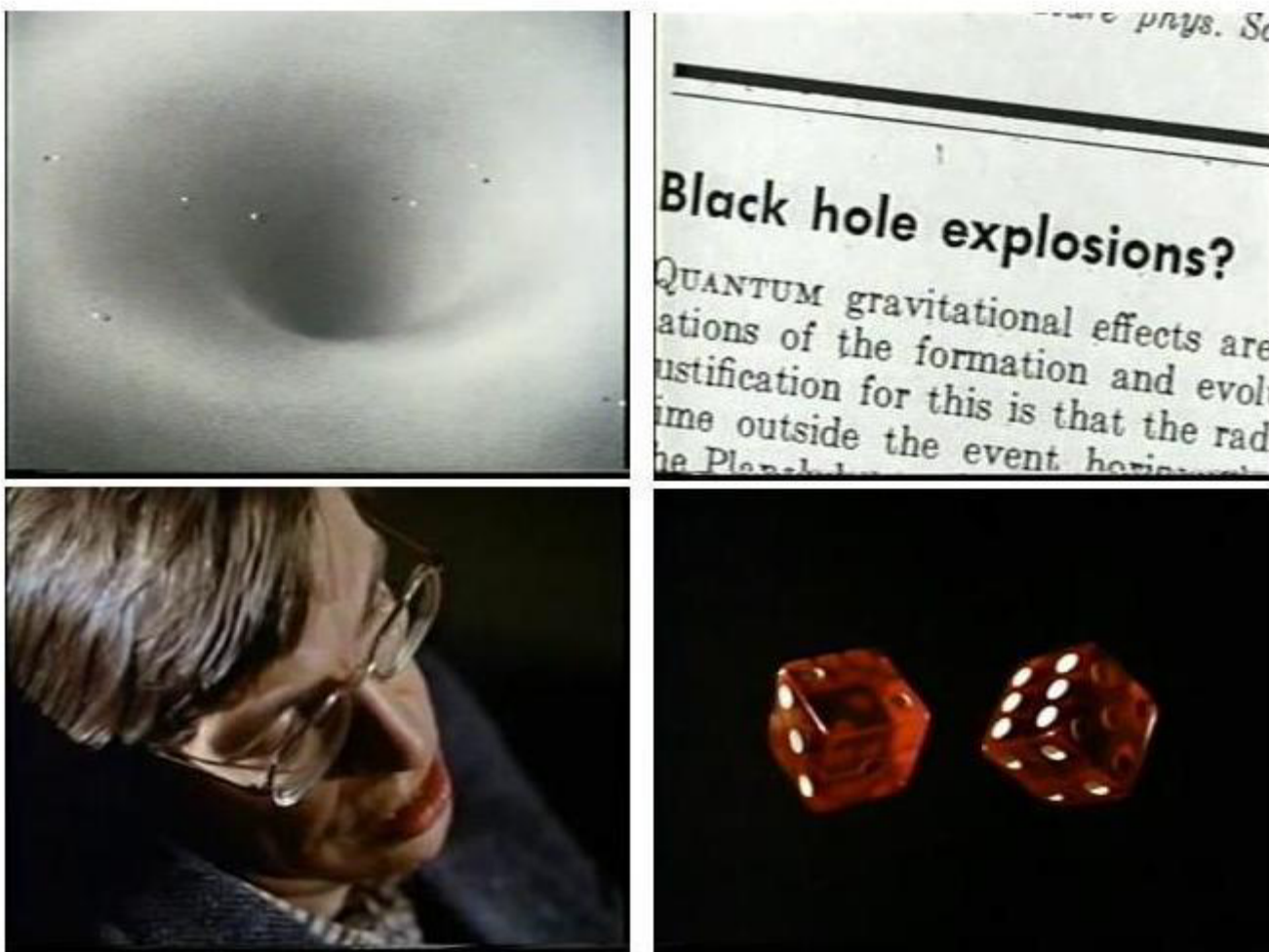
最后，很有可能，我们对于宇宙终极命运的理解也离不开量子论。大爆炸的最初发生了什么？是否存在奇点？在奇点处物理定律是否失效？因为在宇宙极早期，引力场是如此之强，以致量子效应不能忽略，我们必须采取有效的量子引力方法来处理。在采用了费因曼的路径积分手段之后，哈特尔（就是提出 DH 的那个）和霍金提出了著名的“无边界假设”：宇宙的起点并没有一个明确的边界，时间并不是一条从一点开始的射线，相反，它是复数的！时间就像我们地球的表面，并没有一个地方可以称之为“起点”。为了更好地理解这些问题，我们迫切地需要全新的量子宇宙学，需要量子论和相对论进一步强强联手，在史话的后面我们还会讲到这个事情。

量子论的出现彻底改变了世界的面貌，它比史上任何一种理论都引发了更多的技术革命。核能、计算机技术、新材料、能源技术、信息技术……这些都在根本上和量子论密切相关。牵强一点说，如果没有足够的关于弱相互作用力和晶体衍射的知识，DNA 的双螺旋结构也就不会被发现，分子生物学也就无法建立，也就没有如今这般火热的生物技术革命。再牵强一点说，没有量子力学，也就没有欧洲粒子物理中心（CERN），而没有 CERN，也就没有互联网的 www 服务，更没有划时代的网络革命，各位也就很可能看不到我们的史话，呵呵。

如果要评选 20 世纪最为深刻地影响了人类社会的事件，那么可以毫不夸张地说，这既不是两次世界大战，也不是共产主义运动的兴衰，也不是联合国的成立，或者女权运动，殖民主义的没落，人类探索太空……等等。它应该被授予量子力学及其相关理论的创立和发展。量子论深入我们生活的每一个角落，它的影响无处不在，触手可得。许多人喜欢比较 20 世纪齐名的两大物理发现相对论和量子论究竟谁更“伟大”，从一个普遍的意义来说这样的比较是毫无意义的，所谓“伟大”往往不具有可比性，正如人们无聊地争论李白还是杜甫，莫扎特还是贝多芬，汉朝还是罗马，贝利还是马拉多纳，Beatles 还是滚石，阿甘还是肖申克……但仅仅从实用性的角度而言，我们可以毫不犹豫地得出结论说：是的，量子论比相对论更加“有用”。

也许我们仍然不能从哲学意义上去真正理解量子论，但它的进步意义依旧无可限量。虽然我们有时候还会偶尔怀念经典时代，怀念那些因果关系一丝不苟，宇宙的本质简单易懂的日子，但这也已经更多地是一种怀旧情绪而已。正如电影《乱世佳人》的开头不无深情地说：“曾经有一片属于骑士和棉花园的土地叫做老南方。在这个美丽的世界里，绅士们最后一次风度翩翩地行礼，骑士们最后一次和漂亮的女伴们同行，人们最后一次见到主人和他们的奴隶。而如今这已经是一个只能从书本中去寻找的旧梦，一个随风飘逝的文明。”虽然有这样的伤感，但人们依然还是会歌颂北方扬基们最后的胜利，因为我们从他们那里得到更大的力量，更多的热情，还有对于未来更执着的信心。

BBC的纪录片《时间简史》的一些截图。这一段的旁白就是霍金那著名的语录：“看起来爱因斯坦犯了双重错误。量子力学显示，上帝不仅掷骰子，他有时候还把骰子掷到我们看不见的地方去。”



12-4

但量子论的道路仍未走到尽头，虽然它已经负担了太多的光荣和疑惑，但命运仍然注定了它要继续影响物理学的将来。在经历了无数的风雨之后，这一次，它面对的是一个前所未有强大的对手，也是最后的终极挑战——广义相对论。

标准的薛定谔方程是非相对论化的，在它之中并没有考虑到光速的上限。而这一工作最终由狄拉克完成，最后完成的量子场论实际上是量子力学和狭义相对论的联合产物。当我们仅仅考虑电磁场的时候，我们得到的是量子电动力学，它可以处理电磁力的作用。大家在中学里都知道电磁力：同性相斥，异性相吸，量子电动力学认为，这个力的本质是两个粒子之间不停地交换光子的结果。两个电子互相靠近并最终因为电磁力而弹开，这其中发生了什么呢？原来两个电子不停地在交换光子。想象两个溜冰场上的人，他们不停地把一只皮球抛来抛去，从一个人的手中扔到另一个人那里，这样一来他们必定离得越来越远，似乎他们之间有一种斥力一样。在电磁作用力中，这个皮球就是光子！那么同性相吸是怎么回事呢？你可以想象成两个人背靠背站立，并不停地把球扔到对方面对的墙壁上再反弹到对方手里。这样就似乎有一种吸力使两人紧紧靠在一起。

但是，当处理到原子核内部的事务时，我们面对的就不再是电磁作用力了！比如说一个氦原子核，它由两个质子和两个中子组成。中子不带电，倒也没有什么，可两个质子却都带着正电！如果说同性相斥，那么它们应该互相弹开，而怎么可能保持在一起呢？这显然不是万有引力互相吸引的结果，在如此小的质子之间，引力微弱得基本可以忽略不计，必定有一种更为强大的核力，比电磁力更强大，才可以把它们拉在一起不致分开。这种力叫做强相互作用力。

聪明的各位也许已经猜到了，既然有“强”相互作用力，必定相对地还有一种“弱”相互作用力，事实正是如此。弱作用力就是造成许多不稳定的粒子衰变的原因。这样一来，我们的宇宙中就总共有着4种相互作用力：引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力。它们各自为政，互不管辖，遵守着不同的理论规则。

但所有这些力的本质是什么呢？是不是也如同电磁力那样，是因为交换粒子而形成的？日本物理学家汤川秀树——他或许是日本最著名的科学家——预言如此。在强相互作用力中，汤川认为这是因为核子交换一种新粒子——介子（meson）而形成的。他所预言的介子不久就为安德森等人所发现，不过那却是一种不同的介子，现在称为 μ 子，它和汤川理论无关。汤川所预言的那种介子现在称为 π 子，它最终在 1947 年为英国人鲍威尔（Cecil Frank Powell）在研究宇宙射线时所发现。汤川获得了 1949 年的诺贝尔物理学奖，而鲍威尔获得了 1950 年的。对于强相互作用力的研究仍在继续，人们把那些感受强相互作用力的核子称为“强子”，比如质子、中子等。1964 年，我们的盖尔曼提出，所有的强子都可以进一步分割，这就是如今家喻户晓的“夸克”模型。每个质子或中子都由 3 个夸克组成，每种夸克既有不同的“味道”，更有不同的“颜色”，在此基础上人们发明了所谓的“量子色动力学”（QCD），来描述。夸克之间同样通过交换粒子来维持作用力，这种被交换的粒子称为“胶子”（gluon）。各位也许已经有些头晕脑胀，我们就不进一步描述了。再说详细描述基本粒子的模型需要太多的笔墨，引进太多的概念，但我们的史话所留下的篇幅已经不多，所以只能这样简单地一笔带过。如果想更好地了解有关知识，盖尔曼曾写过一本通俗的读物《夸克与美洲豹》，而伟大的阿西莫夫（Isaac Asimov）则有更多精彩的论述，虽然时代已经不同，但许多作品却仍然并不过时！

强相互作用是交换介子，那么弱相互作用呢？汤川秀树同样预言它必定也交换某种粒子，这种粒子被称为“中间玻色子”。与强作用力所不同的是，弱相互作用力的理论形式看上去同电磁作用力非常相似，这使得人们开始怀疑，这两种力实际上是不是就是同一种东西，只不过在不同的环境中表现得不尽相同而已？特别是当李政道与杨振宁提出了弱作用下宇称不守恒之后，这一怀疑愈加强烈。终于到了 60 年代，统一弱相互作用力和电磁力的工作由美国人格拉肖（Sheldon Glashow）、温伯格（Steven Weinberg）和巴基斯坦人萨拉姆（Aldus Salam）所完成，他们的成果被称为“弱电统一理论”，3 人最终为此得到了 1979 年的诺贝尔奖。该理论所预言的 3 种中间玻色子（ W^+ ， W^- 和 Z^0 ）到了 80 年代被实验所全部发现，更加证实了它的正确性。

物理学家们现在开始大大地兴奋起来了：既然电磁力和弱作用力已经被证明是同一种东西，可以被一个相同的理论所描述，那么我们又有什么理由不去相信，所有的 4 种力其实都是同一种东西呢？所有的物理学家都相信，上帝——大自然的创造者——他老人家是爱好简单的，他不会把我们的世界搞得复杂不堪，让人摇头叹气，他必定按照某一种标准的模式创造了这个宇宙！而我们要做的工作，就是把上帝所依据的这个蓝图找出来。这蓝图必定只有一份，而所有的物理现象，物理力都被涵盖在这个设计之中！如果模仿《独立宣言》中那著名的句子，物理学家完全愿意宣称：

我们认为这是不言而喻的事实：每一种力都是被相同地创造的。

We hold the truth to be self-evident, that all forces are created equal.

是啊，要是真有那么一个理论，它可以描述所有的 4 种力，进而可以描述所有的物理现象，那该是怎样一幅壮观的场面啊！那样一来，整个自然，整个物理就又重新归于统一之中，就像史诗中所描写的那个传奇的黄金时代与伟大的经典帝国，任何人都无法抗拒这样一种诱人的景象，仿佛一个新的伟大时代就在眼前。戎马已备，戈矛已修，浩浩荡荡的大军终于就要出发，去追寻那个失落已久的统一之梦。

现在，弱作用力和电磁力已经被合并了，下一个目标是强相互作用力，正如我们已经介绍的那样，这块地域目前为止被量子色动力学所统治着。但幸运地是，虽然兵锋指处，形势紧张严峻，大战一触即发，但两国的君主却多少有点血缘关系，这给和平统一留下了余地：它们都是在量子场论的统一框架下完成的。1954 年，杨振宁和米尔斯建立了规范场论，而吸取了对称性破缺的思想之后，这使得理论中的某些没有质量的粒子可以自发地获得质量。正因为如此，中间玻色子和光子才得以被格拉肖等人包含在同一个框架内。而反观量子色动力学，它本身就是模仿量子电动力学所建立的，连名字都模仿自后者！所不同的是光子不带电荷，但胶子却带着“颜色”荷，但如果充分地考虑自发对称破缺的规范场，将理论扩充为更大的单群，把胶子也拉进统一中来并非不可能。这样的理论被骄傲地称为“大统一理论”（Grand Unified Theory, GUT），它后来发展出了多个变种，但不管怎样，其目标是一致的，那就是统一弱相互作用力、强相互作用力和电磁力 3 种力，把它们合并在一起，包含到同一个理论中去。不同的大统一理论预言了一些不同的物理现象，比如质子可能会衰变，比如存在着磁单极子，或者奇异弦，但可惜的是，到目前为止这些现象都还没有得到确凿的证实。退一步来说，由于理论中一些关键的部分比如希格斯玻色子的假设到目前为止都尚未在实验中发现，甚至我们连粒子的标准模型也不能 100% 地肯定正确。但无论如何，大统一理论是非常有前途的理论，

人们也有理由相信它终将达到它的目标。

可是，虽然号称“大统一”，这样的称号却依旧是名不副实的。就算大统一理论得到了证实，天下却仍未统一，四海仍未一靖。人们怎么可以遗漏了那块辽阔的沃土——引力呢？GUT 即使登基，他的权力仍旧是不完整的，对于引力，他仍旧鞭长莫及。天无二日民无二君，雄心勃勃的物理学家们早就把眼光放到了引力身上，即使他们事实上连强作用力也仍未最终征服。正可谓尚未得陇，便已望蜀。

引力在宇宙中是一片独一无二的区域，它和其他 3 种力似乎有着本质的不同。电磁力有时候互相吸引，有时候互相排斥，但引力却总是吸引的！这使它可以在大尺度上累加起来。当我们考察原子的时候，引力可以忽略不计，但一旦我们的眼光放到恒星、星云、星系这样的尺度上，引力便取代别的力成了主导因素。想要把引力包含进统一的体系中来是格外困难的，如果说电磁力、强作用力和弱作用力还勉强算同文同种，引力则傲然不群，独来独往。何况，我们并没有资格在它面前咆哮说天兵已至，为何还不服王化云云，因为它的统治者有着同样高贵的血统和深厚的渊源：这里的国王是爱因斯坦伟大的广义相对论，其前身则是煌煌的牛顿力学！

物理学到了这个地步，只剩下了最后一个分歧，但也很可能是最难以调和和统一的分歧。量子场论虽然争取到了狭义相对论的合作，但它还是难以征服引力：广义相对论拒绝与它联手统治整个世界，它更乐于在引力这片保留地上独立地呼风唤雨。从深层次的角度上说，这里凸现了量子论和相对论的内在矛盾，这两个 20 世纪的伟大物理理论之间必定要经历一场艰难和痛苦的融合，才能孕育出最后那个众望所归的王者，完成“普天之下，莫非王土”的宏愿。

物理学家有一个梦想，一个深深植根于整个自然的梦想。他们梦想有一天，深壑弥合，高山夷平，荆棘变沃土，歧路变通衢。他们梦想造物主的光辉最终被揭示，而众生得以一起朝觐这一终极的奥秘。而要实现这个梦想，就需要把量子论和相对论真正地结合到一起，从而创造一个量子引力理论。它可以解释一切的力，进而阐释一切的物理现象。这样的理论是上帝造物的终极蓝图，它讲述了这个自然最深刻的秘密。只有这样的理论，才真正有资格称得上“大统一”，不过既然大统一的名字已经被 GUT 所占用了，人们给这种终极理论取了另外一个名字：万能理论（Theory of Everything, TOE）。

爱因斯坦在他的晚年就曾经试图去实现这个梦想，在普林斯顿的那些日子里，他的主要精力都放在如何去完成统一场论上（虽然他还并不清楚强力和弱力这两个王国的存在）。但是，爱因斯坦的战略思想却是从广义相对论出发去攻打电磁力，这样的进攻被证明是极为艰难而伤亡惨重的：不仅边界上崇山峻岭，有着无法克服的数学困难，而且对方居高临下，地形易守难攻，占尽了便宜。虽然爱因斯坦执着不懈地一再努力，但整整 30 年，直到他去世为止，仍然没能获得任何进展。今天看来，这个失败是不可避免的，广义相对论和量子论之间有一条深深的不可逾越的鸿沟，而爱因斯坦的旧式军队是绝无可能跨越这个障碍的。但在另一面，爱因斯坦所不喜欢的量子论迅猛地发展起来，正如我们描述的那样，它的力量很快就超出了人们所能想象的极限。这一次，以量子论为主导，统一是否能够被真正完成了呢？

历史上产生了不少量子引力理论，但我们只想极为简单地描述一个。它近来大红大紫，声名远扬，时髦无比，倘若谁不知道它简直就不好意思出来混。大家一定都明白我说的是超弦（Superstring）理论，许多读者迫使我相信，如果不在最后提一下它，那么我们的史话简直就是一肚子不合时宜。

饭后闲话：霍金打赌

1999 年，霍金在一次演讲中说，他愿意以 1 赔 1，赌一个万能理论会在 20 年内出现。现在是不是真的有人和他打这个赌我暂时不得而知，不过霍金好打赌是出了名的，咱们今天就来闲话几句打赌的话题。

我们所知的霍金打的最早的一个赌或许是他和两个幼年时的伙伴所打的：他们赌今后他们之间是不是会有人出人头地。霍金出名后，还常常和当初的伙伴开玩笑说，因为他打赢了，所以对方欠他一块糖。

霍金 33 岁时，第一次就科学问题打赌，之后便一发不可收拾。今天我们所熟知的最有名的几个科学赌局，几乎都同他有关。或者也是因为霍金太出名，太容易被媒体炒作渲染的缘故吧。

1974 年，黑洞的热潮在物理学界内方兴未艾。人们已经不太怀疑黑洞是一个物理真实，但在天文观测上仍没有找到一个确实的实体。不过已经有几个天体非常可疑，其中一个叫做天鹅座 X-1，如果你小时候阅读过 80 年代的一些科普书籍，你会对这个名字耳熟能详。霍金对这个天体的身份表示怀疑，他和加州理工的物理学家索恩（Kip Thorne）立下字据，以 1 年的《阁楼》（Penthouse）杂志赌索恩 4 年的《私家侦探》（Private Eye）。大家也许会对霍金这样的大科学家竟然下这样的赌注而感到惊奇（Penthouse 大家想必都知道，是和 Playboy 齐名的男性杂志，不过最近倒闭了），呵呵，不过饮食男女人之大欲，反正他就是这样赌的。今天大家都已经知道，宇宙中的黑洞多如牛毛，天鹅 X-1 的身份更是不用怀疑。1990 年霍金到南加州大学演讲，当时索恩人在莫斯科，于是霍金大张旗鼓地闯入索恩的办公室，把当年的赌据翻出来印上拇指印表示认输。

霍金后来真的给索恩订了一年的《阁楼》，索恩家里的女性成员对此是有意见的。但那倒也不是对于《阁楼》有什么反感，在美国这种开放社会这不算什么。反对的原因来自女权主义：她们坚持索恩应该赌一份适合 both 男女阅读的杂志。当年索恩还曾赢了钱德拉塞卡的《花花公子》，出于同样的理由换成了《听众》。

霍金输了这个场子很是不甘，1 年后便又找上索恩，同时还有索恩的同事，加州理工的另一位物理学家普雷斯基（John Preskill），赌宇宙中不可能存在裸奇点，负者为对方提供能够包裹“裸体”的衣服。这次霍金不到 4 个月就发现自己还是要输：黑洞在经过霍金蒸发后的确可能保留一个裸奇点！但霍金在文字上要赖，声称由于量子过程而产生的裸奇点并不是赌约上描述的那个由于广义相对论而形成的裸奇点，而且那个证明也是不严格的，所以不算。

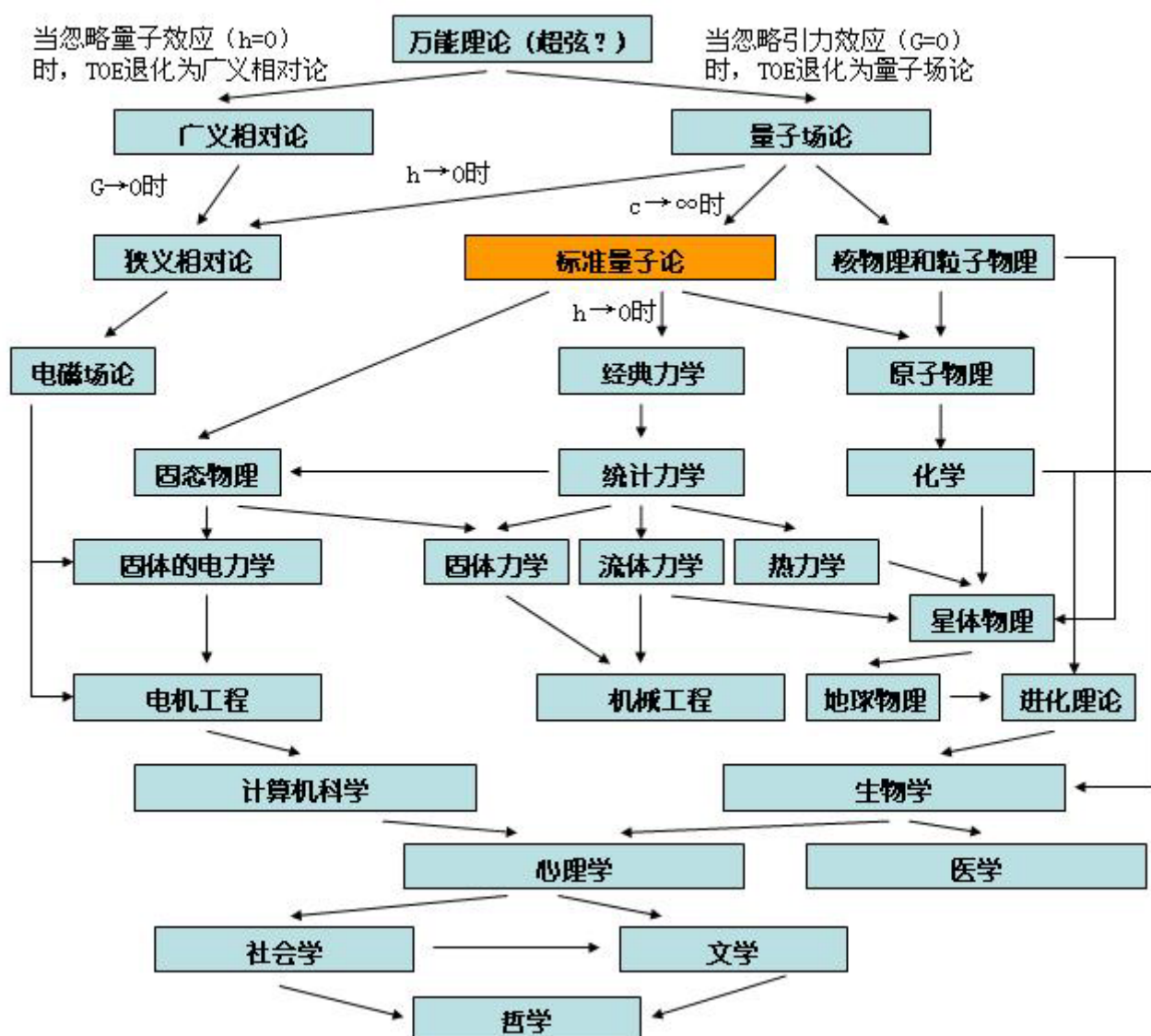
逃得了初一逃不过十五，1997 年德州大学的科学家用超级计算机证明了，当黑洞坍缩时，在非常特别的条件下裸奇点在理论上是可以存在的！霍金终于认输，给他的对手各买了一件 T 恤衫。但他还是不服气的，他另立赌约，赌虽然在非常特别的条件下存在裸奇点，但在一般情况下它是被禁止的！而且霍金在 T 恤上写的字更是不依不饶：大自然讨厌裸露！

霍金在索恩那里吃了几次亏了，这次不知是否能翻盘。当然索恩也不是常赌不败的，他曾经和苏联人泽尔多维奇（Zel'dovich）在黑洞辐射的问题上打赌，结果输了一瓶上好的名牌威士忌。有时候霍金和索恩还会联手，比如在黑洞蒸发后是否吐出当初吃掉的信息这一问题上。霍金和索恩赌它不会，而普雷斯基赌它会，赌注是“信息”本身——胜利者将得到一本百科全书！这个问题迄无定论，不过从最近发展的势头来看，霍金又有输的危险。今年（2004 年）初，俄亥俄州立大学的科学家用弦论更为明确地证明了，黑洞很可能将吐出信息！

2000 年，霍金又和密歇根大学的凯恩（Gordon Kane）赌 100 美元，说在芝加哥附近的费米实验室里不可能发现所谓的“希格斯玻色子”（这是英国物理学家希格斯于 1964 年预言的一种有重要理论意义的粒子，但至今尚未证实）。后来他又和欧洲的一些粒子物理学家赌，说日内瓦的欧洲粒子物理实验室里也不可能发现希格斯子。这次霍金算是赢了，至今仍然没有找到希格斯子的踪迹。不过霍金对于这个假设的嘲笑态度使得许多粒子物理学家十分恼火，甚至上升为宇宙物理学家和粒子物理学家之间的一种矛盾。希格斯本人于 2002 年在报上发表了言词尖刻的评论，说霍金因为名气大，所以人们总是不加判断地相信他说的东西。这也引起了一场不大不小的风波。

在科学问题上打赌的风气由来已久，而根据 2002 年 Nature 杂志上的一篇文章（Nature 420, p354），目前在科学的各个领域内各种各样的赌局也是五花八门。这也算是科学另一面的趣味和魅力吧？不知将来是否会有人以此为题材，写出又一篇类似《80 天环游地球》的精彩小说呢？

我们的理论结构 (参考自Tegmark&Wheeler2000, 略有改动)



12-5

在统一广义相对论和量子论的漫漫征途中，物理学家一开始采用的是较为温和的办法。他们试图采用老的战术，也就是在征讨强、弱作用力和电磁力时用过的那些行之有效的手段，把它同样用在引力的身上。在相对论里，引力被描述为由于时空弯曲而造成的几何效应，而正如我们所看到的，量子场论把基本的力看成是交换粒子的作用，比如电磁力是交换光子，强相互作用力是交换胶子……等等。那么，引力莫非也是交换某种粒子的结果？在还没见到这个粒子之前，人们已经为它取好了名字，就叫“引力子”（graviton）。根据预测，它应该是一种自旋为 2，没有质量的玻色子。

可是，要是把所谓引力子和光子等一视同仁地处理，人们马上就发现他们注定要遭到失败。在量子场论内部，无论我们如何耍弄小聪明，也没法叫引力子乖乖地听话：计算结果必定导致无穷的发散项，无穷大！我们还记得，在量子场论创建的早期，物理学家是怎样地被这个无穷大的幽灵所折磨的，而现在情况甚至更糟：就算运用重正化方法，我们也没法把它从理论中赶跑。在这场战争中我们初战告负，现在一切温和的统一之路都被切断，量子论和广义相对论互相怒目而视，作了最后的割席决裂，我们终于认识到，它们是互不相容的，没法叫它们正常地结合在一起！物理学的前途顿时又笼罩在一片阴影之中，相对论的支持者固然不忿气，拥护量子论的人们也有些踌躇不前：要是横下心强攻的话，结局说不定比当年的爱因斯坦更惨，但要是战略退却，物理学岂不是从此陷入分裂而不可自拔？

新希望出现在 1968 年，但却是由一个极为偶然的线索开始的：它本来根本和引力毫无关系。那一年，CERN 的意大利物理学家维尼基亚诺（Gabriel Veneziano）随手翻阅一本数学书，在上面找到了一个叫做“欧拉 β 函数”的东西。维尼基亚诺顺手把它运用到所谓“雷吉轨迹”（Regge trajectory）的问题上面，作了一些计算，结果惊讶地发现，这个欧拉早于 1771 年就出于纯数学

原因而研究过的函数，它竟然能够很好地描述核子中许多强相对作用力的效应！

维尼基亚诺没有预见到后来发生的变故，他也并不知道他打开的是怎样一扇大门，事实上，他很有可能无意中做了一件使我们超越了时代的事情。威顿（Edward Witten）后来常常说，超弦本来是属于 21 世纪的科学，我们得以在 20 世纪就发明并研究它，其实是历史上非常幸运的偶然。

维尼基亚诺模型不久后被 3 个人几乎同时注意到，他们是芝加哥大学的南部阳一郎，耶希华大学（Yeshiva Univ）的萨斯金（Leonard Susskind）和玻尔研究所的尼尔森（Holger Nielsen）。三人分别证明了，这个模型在描述粒子的时候，它等效于描述一根一维的“弦”！这可是非常稀奇的结果，在量子场论中，任何基本粒子向来被看成一个没有长度也没有宽度的小点，怎么会变成了一根弦呢？

虽然这个结果出人意料，但加州理工的施瓦茨（John Schwarz）仍然与当时正在那里访问的法国物理学家谢尔克（Joel Scherk）合作，研究了理论的一些性质。他们把这种弦当作束缚夸克的纽带，也就是说，夸克是绑在弦的两端的，这使得它们永远也不能单独从核中被分割出来。这听上去不错，但是他们计算到最后发现了一些古怪的东西。比如说，理论要求一个自旋为 2 的零质量粒子，但这个粒子却在核子家谱中找不到位置（你可以想象一下，如果某位化学家找到了一种无法安插进周期表里的元素，他将会如何抓狂？）。还有，理论还预言了一种比光速还要快的粒子，也即所谓的“快子”（tachyon）。大家可能会首先想到这违反相对论，但严格地说，在相对论中快子可以存在，只要它的速度永远不降到光速以下！真正的麻烦在于，如果这种快子被引入量子场论，那么真空就不再是场的最低能量态了，也就是说，连真空也会变得不稳定，它必将衰变成别的东西！这显然是胡说八道。

更令人无法理解的是，如果弦论想要自圆其说，它就必须要求我们的时空是 26 维的！平常的时空我们都容易理解：它有 3 维空间，外加 1 维时间，那多出来的 22 维又是干什么的？这种引入多维空间的理论以前也曾经出现过，如果大家还记得在我们的史话中曾经小小地出过一次场的，玻尔在哥本哈根的助手克莱恩（Oskar Klein），也许会想起他曾经把“第五维”的思想引入薛定谔方程。克莱恩从量子的角度出发，而在他之前，爱因斯坦的忠实追随者，德国数学家卡鲁扎（Theodor Kaluza）从相对论的角度也作出了同样的尝试。后来人们把这种理论统称为卡鲁扎-克莱恩理论（Kaluza-Klein Theory，或 KK 理论）。但这些理论最终都胎死腹中。的确很难想象，如何才能让大众相信，我们其实生活在一个超过 4 维的空间中呢？

最后，量子色动力学（QCD）的兴起使得弦论失去了最后一点吸引力。正如我们在前面所述，QCD 成功地攻占了强相互作用力，并占山为王，得到了大多数物理学家的认同。在这样的内外交困中，最初的弦论很快就众叛亲离，被冷落到了角落中去。

在弦论最惨淡的日子里，只有施瓦茨和谢尔克两个人坚持不懈地沿着这条道路前进。1971 年，施瓦茨和雷蒙（Pierre Ramond）等人合作，把原来需要 26 维的弦论简化为只需要 10 维。这里面初步引入了所谓“超对称”的思想，每个玻色子都对应于一个相应的费米子（玻色子是自旋为整数的粒子，如光子。而费米子的自旋则为半整数，如电子。粗略地说，费米子是构成“物质”的粒子，而玻色子则是承载“作用力”的粒子）。与超对称的联盟使得弦论获得了前所未有的力量，使它可以同时处理费米子，更重要的是，这使得理论中的一些难题（如快子）消失了，它在引力方面的光明前景也逐渐显现出来。可惜的是，在弦论刚看到一线曙光的时候，谢尔克出师未捷身先死，他患有严重的糖尿病，于 1980 年不幸去世。施瓦茨不得不转向伦敦玛丽皇后学院的迈克尔·格林（Michael Green），两人最终完成了超对称和弦论的结合。他们惊讶地发现，这个理论一下子犹如脱胎换骨，完成了一次强大的升级。现在，老的“弦论”已经死去了，新生的是威力无比的“超弦”理论，这个“超”的新头衔，是“超对称”册封给它的无上荣耀。

当把他们的模型用于引力的时候，施瓦茨和格林狂喜得能听见自己的心跳声。老的弦论所预言的那个自旋 2 质量 0 的粒子虽然在强子中找不到位置，但它却符合相对论！事实上，它就是传说中的“引力子”！在与超对称同盟后，新生的超弦活生生地吞并了另一支很有前途的军队，即所谓的“超引力理论”。现在，谢天谢地，在计算引力的时候，无穷大不再出现了！计算结果有限而且有意义！引力的国防军整天警惕地防卫粒子的进攻，但当我们不再把粒子当作一个点，而是看成一条弦的时候，我们

就得以瞒天过海，暗渡陈仓，绕过那条苦心布置的无穷大防线，从而第一次深入到引力王国的纵深地带。超弦的本意是处理强作用力，但现在它的注意力完全转向了引力：天哪，要是能征服引力，别的还在话下吗？

关于引力的计算完成于 1982 年前后，到了 1984 年，施瓦茨和格林打了一场关键的胜仗，使得超弦惊动整个物理界：他们解决了所谓的“反常”问题。本来在超弦中有无穷多种的对称性可供选择，但施瓦茨和格林经过仔细检查后发现，只有在极其有限的对称形态中，理论才得以消除这些反常而得以自洽。这样就使得我们能够认真地考察那几种特定的超弦理论，而不必同时对付无穷多的可能性。更妙的是，筛选下来的那些群正好可以包容现有的规范场理论，还有粒子的标准模型！伟大的胜利！

“第一次超弦革命”由此爆发了，前不久还对超弦不屑一顾，极其冷落的物理界忽然像着了魔似的，倾注出罕见的热情和关注。成百上千的人们争先恐后，前仆后继地投身于这一领域，以致于后来格罗斯（David Gross）说：“在我的经历中，还从未见过对一个理论有过如此的狂热。”短短 3 年内，超弦完成了一次极为漂亮的帝国反击战，将当年遭受的压抑之愤一吐为快。在这期间，像爱德华·威顿，还有以格罗斯为首的“普林斯顿超弦四重奏”小组都作出了极其重要的贡献，不过我们没法详细描述了。网上关于超弦的资料繁多，如果有兴趣的读者可以参考这个详细的资料索引：

<http://arxiv.org/abs/hep-th/0311044>

第一次革命过后，我们得到了这样一个图像：任何粒子其实都不是传统意义上的点，而是开放或者闭合（头尾相接而成环）的弦。当它们以不同的方式振动时，就分别对应于自然界中的不同粒子（电子、光子……包括引力子！）。我们仍然生活在一个 10 维的空间里，但是有 6 个维度是紧紧蜷缩起来的，所以我们平时觉察不到它。想象一根水管，如果你从很远的地方看它，它细得就像一条线，只有 1 维的结构。但当真把它放大来看，你会发现它是有横截面的！这第 2 个维度被卷曲了起来，以致于粗看之下分辨不出。在超弦的图像里，我们的世界也是如此，有 6 个维度出于某种原因收缩得非常紧，以致粗看上去宇宙仅仅是 4 维的（3 维空间加 1 维时间）。但如果把时空放大到所谓“普朗克空间”的尺度上（大约 10^{-33} 厘米），这时候我们会发现，原本当作是时空中一个“点”的东西，其实竟然是一个 6 维的“小球”！这 6 个卷曲的维度不停地扰动，从而造成了全部的量子不确定性！

这次革命使得超弦声名大振，隐然成为众望所归的万能理论候选人。当然，也有少数物理学家仍然对此抱有怀疑态度，比如格拉肖，费因曼。霍金对此也不怎么热情。大家或许还记得我们在前面描述过，在阿斯派克特实验后，BBC 的布朗和纽卡斯尔大学的戴维斯对几位量子论的专家做了专门访谈。现在，当超弦热在物理界方兴未艾之际，这两位仁兄也没有闲着，他们再次出马，邀请了 9 位在弦论和量子场论方面最杰出的专家到 BBC 做了访谈节目。这些记录后来同样被集合在一起，于 1988 年以《超弦：万能理论？》为名，由剑桥出版社出版。阅读这些记录可以发现，专家们虽然吵得不像量子论那样厉害，但其中的分歧仍是明显的。费因曼甚至以一种饱经沧桑的态度说，他年轻时注意到许多老人迂腐地抵制新思想（比如爱因斯坦抵制量子论），但当他自己也成为一个老人时，他竟然也身不由己地做起同样的事情，因为一些新思想确实古怪——比如弦论就是！

人们自然而然地问，为什么有 6 个维度是蜷缩起来的？这 6 个维度有何不同之处？为什么不是 5 个或者 8 个维度蜷缩？这种蜷缩的拓扑性质是怎样的？有没有办法证明它？因为弦的尺度是如此之小（普朗克空间），所以人们缺乏必要的技术手段用实验去直接认识它，而且弦论的计算是如此繁难，不用说解方程，就连方程本身我们都无法确定，而只有采用近似法！更糟糕的是，当第一次革命过去后，人们虽然大浪淘沙，筛除掉了大量的可能的对称，却仍有 5 种超弦理论被保留了下来，每一种理论都采用 10 维时空，也都能自圆其说。这 5 种理论究竟哪一种才是正确的？人们一鼓作气冲到这里，却发现自己被困住了。弦论的热潮很快消退，许多人又回到自己的本职领域中去，第一次革命尘埃落定。

一直要到 90 年代中期，超弦才再次从沉睡中苏醒过来，完成一次绝地反攻。这次唤醒它的是爱德华·威顿。在 1995 年南加州大学召开的超弦年会上，威顿让所有的人都吃惊不小，他证明了，不同耦合常数的弦论在本质上其实是相同的！我们只能用微扰法处理弱耦合的理论，也就是说，耦合常数很小，在这样的情况下 5 种弦论看起来相当不同。但是，假如我们逐渐放大耦合常数，它们应当是一个大理论的 5 个不同的变种！特别是，当耦合常数被放大时，出现了一个新的维度——第 11 维！这就像一张纸只有 2 维，但你把许多纸叠在一起，就出现了一个新的维度——高度！

换句话说，存在着一个更为基本的理论，现有的 5 种超弦理论都是它在不同情况的极限，它们是互相包容的！这就像那个著名的寓言——盲人摸象。有人摸到鼻子，有人摸到耳朵，有人摸到尾巴，虽然这些人的感觉非常不同，但他们摸到的却是同一头象——只不过每个人都摸到了一部分而已！格林（Brian Greene）在 1999 年的《优雅的宇宙》中举了一个相当搞笑的例子，我们把它发挥一下：想象一个热带雨林中的土著喜欢水，却从未见过冰，与此相反，一个爱斯基摩人喜欢冰，但因为他生活的地方太寒冷，从未见过液态的水的样子（无疑现实中的爱斯基摩人见过水，但我们可以进一步想象他生活在土星的光环上，那就不错了），两人某天在沙漠中见面，为各自的爱好吵得不可开交。但奇妙的事情发生了：在沙漠炎热的白天，爱斯基摩人的冰融化成了水！而在寒冷的夜晚，水又重新冻结成了冰！两人终于意识到，原来他们喜欢的其实是同一样东西，只不过在不同的条件下形态不同罢了。

这样一来，5 种超弦就都被包容在一个统一的图像中，物理学家们终于可以松一口气。这个统一的理论被称为“M 理论”。就像没人知道为啥 007 电影中的那个博士发明家叫做“Q”（扮演他的老演员于 1999 年车祸去世了，在此纪念一下），也没人知道这个“M”确切代表什么意思，或许发明者的本意是指“母亲”（Mother），说明它是 5 种超弦的母理论，但也有人认为是“神秘”（Mystery），或者“矩阵”（Matrix），或者“膜”（Membrane）。有些中国人喜欢称其为“摸论”，意指“盲人摸象”！

在 M 理论中，时空变成了 11 维，由此可以衍生出所有 5 种 10 维的超弦论来。事实上，由于多了一维，我们另有一个超引力的变种，因此一共是 6 个衍生品！这时候我们再考察时空的基本结构，会发现它并非只能是 1 维的弦，而同样可能是 0 维的点，2 维的膜，或者 3 维的泡泡，或者 4 维的……我想不出 4 维的名头。实际上，这个基本结构可能是任意维数的——从 0 维一直到 9 维都有可能！M 理论的古怪，比起超弦还要有过之而无不及。

不管超弦还是 M 理论，它们都刚刚起步，还有更长的路要走。虽然异常复杂，但是超弦/M 理论仍然取得了一定的成功，甚至它得以解释黑洞熵的问题——1996 年，施特罗明格（Strominger）和瓦法（Vafa）的论文为此开辟了道路。在那之前不久的一次讲演中，霍金还挖苦说：“弦理论迄今为止的表现相当悲惨：它甚至不能描述太阳结构，更不用说黑洞了。”不过他最终还是改变了看法而加入弦论的潮流中来。M 理论是“第二次超弦革命”的一部分，如今这次革命的硝烟也已经散尽，超弦又进入一个蛰伏期。PBS 后来在格林的书的基础上做了有关超弦的电视节目，在公众中引起了相当的热潮。或许不久就会有第三次第四次超弦革命，从而最终完成物理学的统一，我们谁也无法预见。

值得注意的是，自弦论以来，我们开始注意到，似乎量子论的结构才是更为基本的。以往人们喜欢先用经典手段确定理论的大框架，然后在细节上做量子论的修正，这可以称为“自大而小”的方法。但在弦论里，必须首先引进量子论，然后才导出大尺度上的时空结构！人们开始认识到，也许“自小而大”才是根本的解释宇宙的方法。如今大多数弦论家都认为，量子论在其中扮演了关键的角色，量子结构不用被改正。而广义相对论的路子却很可能是错误的，虽然它的几何结构极为美妙，但只能委屈它退到推论的地位——而不是基本的基础假设！许多人相信，只有更进一步地依赖量子的力量，超弦才会有一个比较光明的未来。我们的量子虽然是那样的古怪，但神赋予它无与伦比的力量，将整个宇宙都控制在它的光辉之下。

尾声

我们的史话终于到了尽头。量子论在奇妙的气氛中诞生，在乱世中艰难地成长起来，与一些伟大的对手展开过激烈的交战。它建筑起经天纬地的巨构，却也曾在其中迷失方向而茫然徘徊不已。它至今使我们深深困扰，却又担负着我们最虔诚和最宝贵的愿望和梦想。它最终的归宿是什么？超弦？M 理论？我们仍不清楚，但我们深信会出现一个量子引力理论，把整个物理学最终统一起来，把宇宙终极的奥秘骄傲地谱写在人类的历史之中。

在新世纪的开始，物理学终于又一次走到了决定命运的关头。我们似乎又站在一个大时代的前沿，光辉的前景令我们怦然心动，激动又慌乱，几乎不敢去想象那是怎样一个伟大的景象。最终的统一似乎已经触手可及，甚至已经听得到它的脉搏和心跳。历史似乎在冥冥中峰回路转，兜了一个大圈后又回到 100 多年前，回到经典物理一统天下时那似曾相识的场景。但这次的意义甚至更伟大：当年的牛顿力学和麦克斯韦电磁论虽然彼此相容，但它们毕竟是两个不同形式的理论！从这个意义上说，庞

大的经典帝国最多是一个结合得比较紧密的邦联。但这次不同了，那个传说中的万能理论，它能够用同一个方程去描述宇宙间所有的现象，在所有的领域中，它都实现了直接而有效的统治。这是有史以来第一次，我们有可能完成真正意义上的彻底统一，把所有的大权都集于一身，从而开创一个真正磅礴的帝国时代。

人们似乎已经看到了天空中，金色的光辉再一次闪耀起来，神圣的诗篇再一次被吟诵，回响在宇宙的每一个角落。当这个日子到来的时候，物理学将再一次到达它的巅峰，登上宇宙的极顶。极目眺望，众山皆小，一切都在脚下。虽然很清楚历史上这样的神话最终归于破灭，霍金仍然忍不住在《时间简史》里说：“在谨慎乐观的基础上，我仍然相信，我们可能已经接近于探索自然的终极定律的终点。”

但是，统一以后呢？是不是一切都大功告成了？物理学是不是又走到了它的尽头，再没有更多的发现可以作出了？我们的后代是不是将再一次陷入无事可做的境地，除了修正几个常数在小数点后若干位的值而已？或者，在未来的某一天，地平线上又会出现小小的乌云，带来又一场迅猛的狂风暴雨，把我们的知识体系再一次砸烂，并引发新的革命？历史是不是这样一种永无止境的轮回，大自然是不是永远也不肯向我们展现它最终的秘密，而我们的探索，是不是永远也没有终点？

这一切都没有答案，我们只能义无反顾地沿着这条道路继续前进。或许历史终究是一场轮回，但在每一次的轮回中，我们毕竟都获得了更为伟大的发现。科学在不停地检讨自己，但这种谦卑的审视和自我否定不但没有削弱它的光荣，反而使它获得了永恒的力量，也不断地增强着我们对于它的信心。人类居住在太阳系中的一颗小小行星上，他们的文明不过万年的历史，现代科学创立不过 300 年，但他们的智慧贯穿整个时空，从最小的量子到最大的宇宙尺度，从大爆炸的那一刻到时间的终点，从最近的白矮星到最远的宇宙视界，没有什么可以阻挡我们探寻的步伐。这一切，都来自于我们对于成功的信念，对于科学的依赖，以及对于神奇的自然那永无休止的好奇。

我衷心地希望各位在这次的量子旅程中获得了一些非凡的体验，也许它带来困惑，但它毕竟指向希望。我必须在这里和各位告别，但量子论的路仍然没有走完，它仍然处在迷宫之中，前途漫漫，还有无数未知的秘密有待发掘，我们仍然必须努力去上下求索。这剩下的旅程，必须由各位独立去完成，因为前面尚没有路，它要靠我们亲手去开辟出来。

也许有一天，你的名字也会成为量子历史的一部分，被镌刻在路边的纪念碑上，再一次召唤后来的过路人对于一段伟大时光的深切怀念。谁又知道呢？

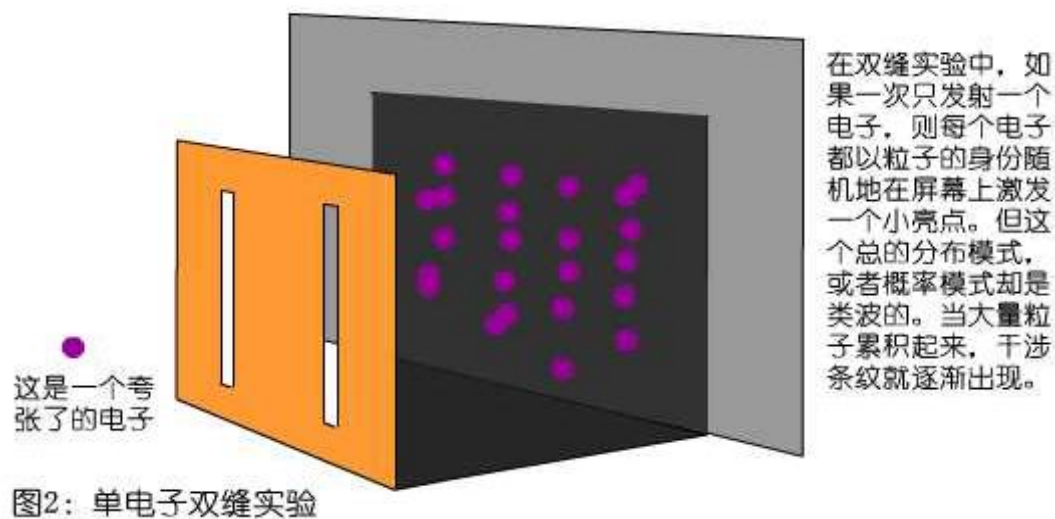
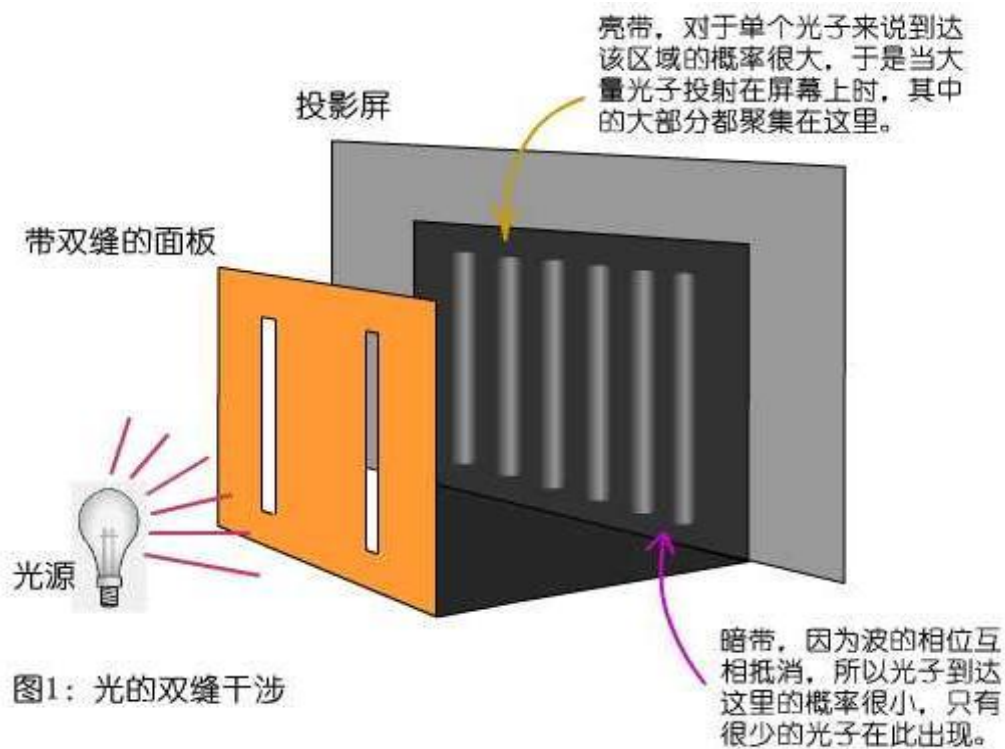
附录

关于双缝干涉

首先我讲得很清楚了，薛定谔的波是几率波，不是实实在在的波。从单电子双缝实验中就可以了解得很明白。霍金讲得没错，每个电子必定同时经过了两道狭缝，不然就无法干涉。但干涉的只是它的“几率”，它最后还是必定以一个小点出现，只不过这个小点出现的概率分布严格地按照薛定谔方程展开。在干涉互相抵消，波函数强度为 0 的地方，不是一个电子消失了，而是它不可能出现在那里。

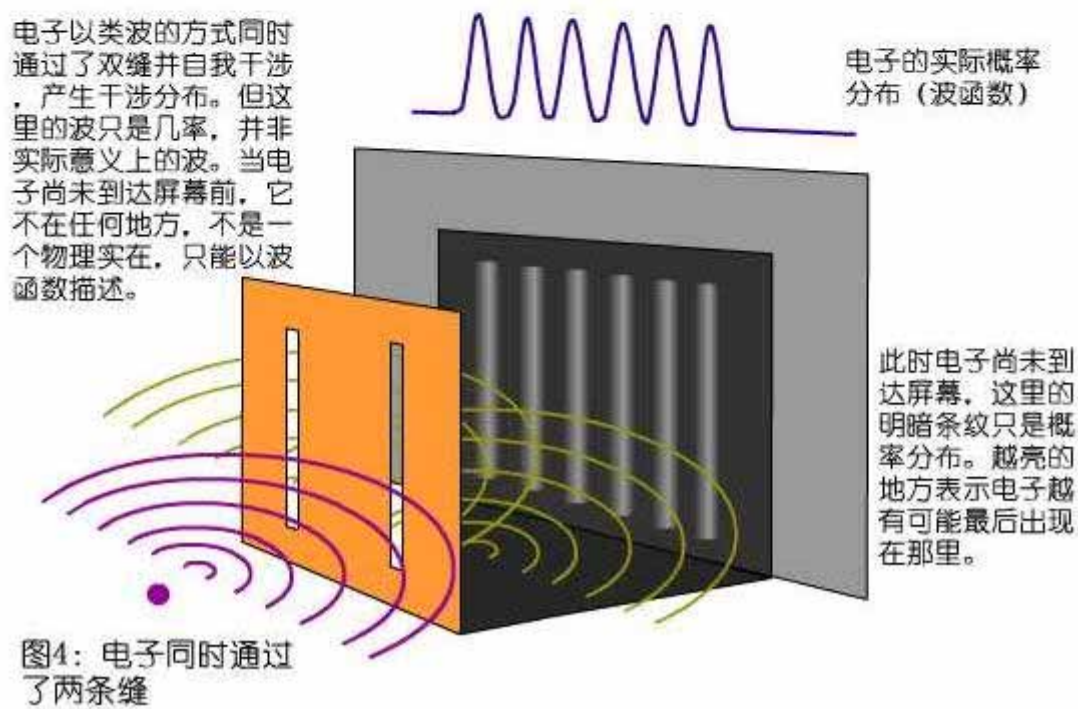
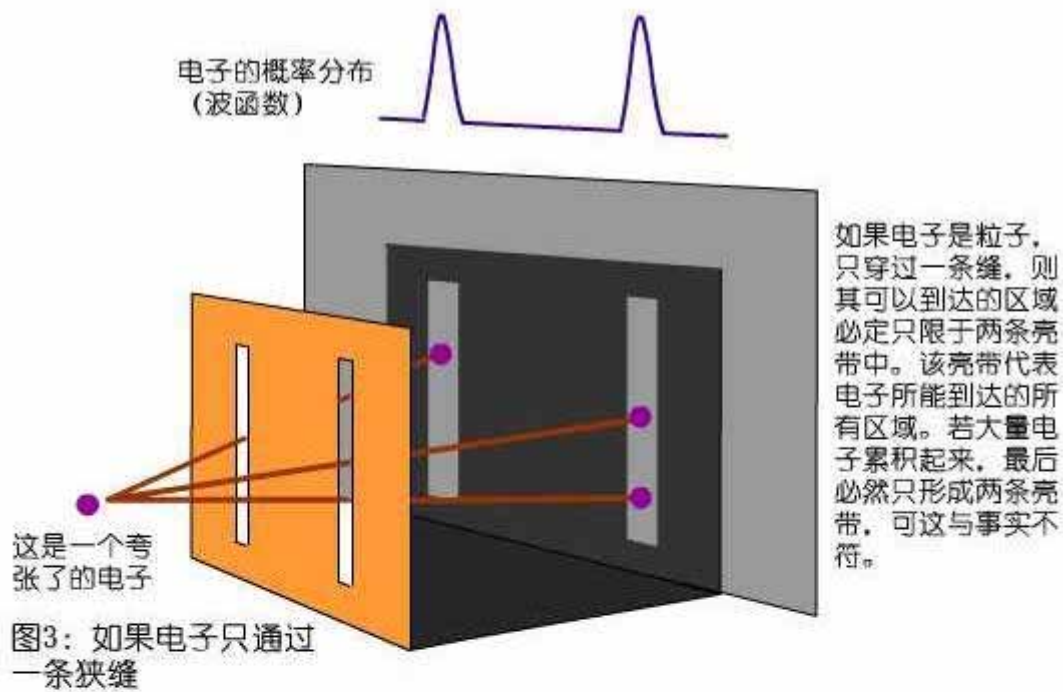
关于猫，我也讲得很明白了，在没有观测之前，系统严格地按照波函数发展，所有的可能都是叠加的！电子同时经过了左/右狭缝，猫同时是活的和死的！只有当观测了（按照哥本哈根解释），波函数才坍缩，电子/猫随机地选择一个状态。

关键还是弄明白双缝的问题。下面是我的一系列图示：



以下是图 3 和图 4。

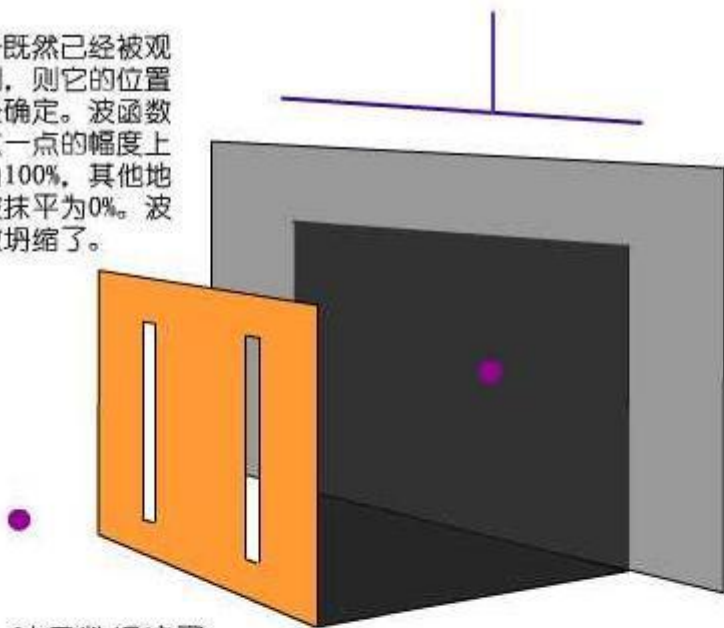
电子若没有同时通过双缝，就不可能干涉。我们已经讨论过，即时地开/闭任一条狭缝都可以对电子的行为造成决定性的影响。



以下是图 5 和图 6。

重申一下：单个电子只能激发单个亮点，单个电子不会产生整个干涉图案。但这个亮点虽然是随机出现的，它的随机分布模式却是按照波函数决定的。当我们观测电子的位置时，它就是个粒子（小点），当我们不观测它的位置时，它就是波（几率波，自我干涉）。

电子既然已经被观测到，则它的位置已经确定。波函数在这一点的高度上升为100%，其他地方被抹平为0%。波函数坍缩了。



电子最终到达，在屏幕上激发出一个小亮点。其位置是按照前图中的波函数来随机选择的。在这个结果中它出现在屏幕中央的亮带区域，如果电子只通过一条缝，没有发生干涉，如图3所示，它不可能出现在这里。假如我们关闭一条狭缝或者在缝上装探测器，则干涉被破坏，它也不可能出现在这里。

图5：波函数坍缩了

单个电子怎么能够同时通过两条狭缝呢？正如惠勒的龙一样，我们对中间发生的事情是没有资格去猜测的。这里是另一个关于量子论的著名比喻：谁也不知道滑雪员是如何完成这个奇迹般的动作的，可他的确做到了！



这本来是一幅著名的漫画，但我找不到原图了。这个是我自己拼凑的，意思到了就行。

图6：滑雪员

关于延迟实验

这个实验的基本思路是，用涂着半镀银的反射镜来代替双缝。一个光子有一半可能通过反射镜，一半可能被反射，这是一个量子随机过程，跟它选择双缝还是单缝本质上是一样的。把反射镜和光子入射途径摆成45度角，那么它一半可能直飞，另一半可能被反射成90度角。但是，我们可以通过另外的全反射镜，把这两条分开的岔路再交汇到一起。在终点观察光子飞来的方向，我们可以确定它究竟是沿着哪一条道路飞来的。

但是，我们也可以在终点处再插入一块呈45度角的半镀银反射镜，这又会造成光子的自我干涉。如果我们仔细安排位相，我们完全可以使得在一个方向上的光子呈反相而相互抵消，而在一个确定的方向输出。这样的话我们每次都得到一个确定的结果（就像每次都得到一个特定的干涉条纹一样），根据量子派的说法，此时光子必定同时沿着两条途径而来！

总而言之，如果我们不在终点处插入半反射镜，光子就沿着某一条道路而来，反之它就同时经过两条道路。现在的问题是，是不是要在终点处插入反射镜，这可以在光子实际通过了第一块反射镜，已经快要到达终点时才决定。我们可以在事情发生后再来决定它应该怎样发生！如果说我们是这出好戏的导演的话，那么我们的光子在其中究竟扮演了什么角色，这可以等电影拍完以后再由我们决定！

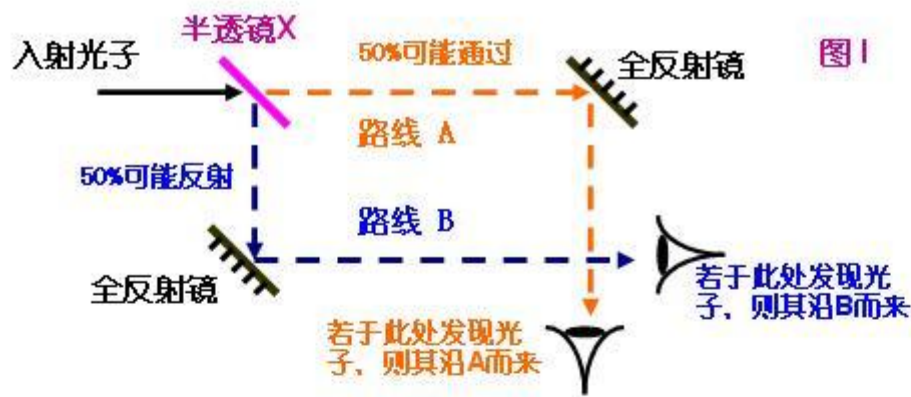


图 I

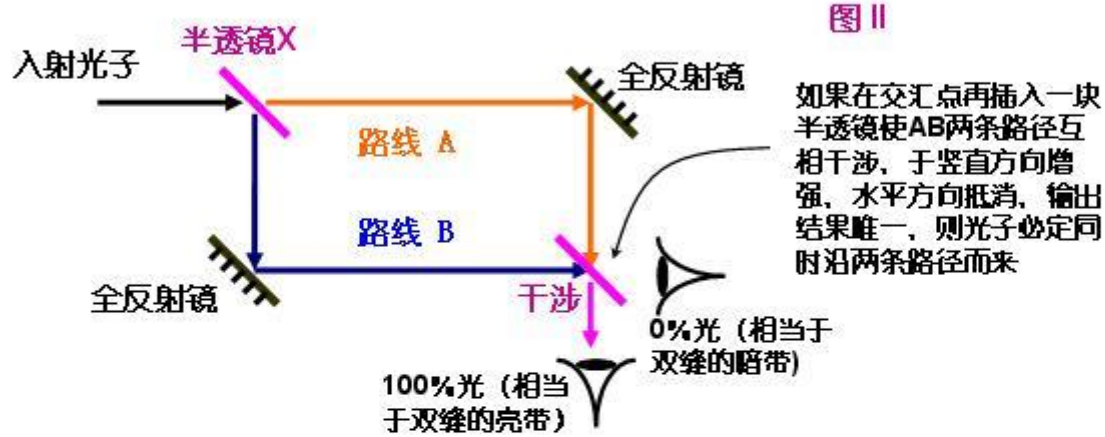


图 II



图 III

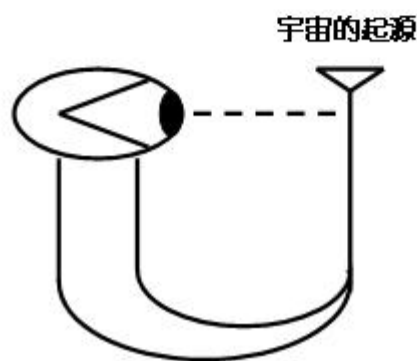


图 IV

这幅图原画是惠勒, 说明宇宙在它的后期“自我观察”（并创造？）了它的起源。宇宙是一个自指的系统。

临摹自John Gribbin 的名作 In Search of Schrodinger's Cat (Black Swan 1997, p212)

量子力学发展大事记

- 1690 年, 惠更斯出版《光论》, 波动说被正式提出
- 1704 年, 牛顿出版《光学》, 微粒说成为主导
- 1807 年, 杨整理了光方面的工作, 提出了双缝干涉实验, 波动说再一次登上舞台
- 1819 年, 菲涅尔证明光是一种横波
- 1856—1865, 麦克斯韦建立电磁学, 光被解释为电磁波的一种
- 1885 年, 巴尔末提出了氢原子光谱的经验公式
- 1887 年, 赫兹证实了麦克斯韦电磁理论, 但他同时也发现了光电效应现象
- 1893 年, 黑体辐射的维恩公式被提出
- 1896 年, 贝克勒耳发现了放射性

1896 年，发现了光谱的塞曼效应

1897 年，J.J.汤姆逊发现了电子

1900 年，普朗克提出了量子概念，以解决黑体问题

1905 年，爱因斯坦提出了光量子的概念，解释了光电效应

1910 年， α 粒子散射实验

1911 年，超导现象被发现

1913 年，玻尔原子模型被提出

1915 年，索末菲修改了玻尔模型，引入相对论，解释了塞曼效应和斯塔克效应

1918 年，玻尔的对立原理成型

1922 年，斯特恩-格拉赫实验

1923 年，康普顿完成了 X 射线散射实验，光的粒子性被证实

1923 年，德布罗意提出物质波的概念

1924 年，玻色-爱因斯坦统计被提出

1925 年，泡利提出不相容原理

1925 年，戴维逊和革末证实了电子的波动性

1925 年，海森堡创立了矩阵力学，量子力学被建立

1925 年，狄拉克提出 q 数

1925 年，乌仑贝克和古德施密特发现了电子自旋

1926 年，薛定谔创立了波动力学

1926 年，波动力学和矩阵力学被证明等价

1926 年，费米-狄拉克统计

1927 年，G.P.汤姆逊证实了电子的波动性

1927 年，海森堡提出不确定性原理

1927 年，波恩作出了波函数的概率解释

1927 年，科莫会议和第五届索尔维会议召开，互补原理成型

1928 年，狄拉克提出了相对论化的电子波动方程，量子电动力学走出第一步

1930 年，第 6 届索尔维会议召开，爱因斯坦提出光箱实验

1932 年，反电子被发现

1932 年，查德威克发现中子

1935 年，爱因斯坦提出 EPR 思维实验

1935 年，薛定谔提出猫佯谬

1935 年，汤川秀树预言了介子

1938 年，超流现象被发现

1942 年，费米建成第一个可控核反应堆

1942 年，费因曼提出路径积分方法

1945 年，第一颗原子弹爆炸

1947 年，第一个晶体管

1948 年，重正化理论成熟，量子电动力学被彻底建立

1952 年，玻姆提出导波隐变量理论

1954 年，杨-米尔斯规范场，后来发展出量子色动力学

1956 年，李政道和杨振宁提出弱作用下宇称不守恒，不久被吴健雄用实验证实

1957 年，埃弗莱特提出多世界解释

1960 年，激光技术被发明

1963 年，盖尔曼等提出夸克模型

1964 年，贝尔提出贝尔不等式

1964 年，CP 对称性破缺被发现
1968 年，维尼亚诺模型建立，导致了弦论的出现
1970 年，退相干理论被建立
1973 年，弱电统一理论被建立
1973 年，核磁共振技术被发明
1974 年，大统一理论被提出
1975 年， τ 子被发现
1979 年，惠勒提出延迟实验
1982 年，阿斯派克特实验，定域隐变量理论被排除
1983 年，Z0 中间玻色子被发现，弱电统一理论被证实
1984 年，第一次超弦革命
1984 年，格里芬斯提出退相干历史解释，后被哈特尔等人发扬
1986 年，GRW 模型被提出
1993 年，量子传输理论开始起步
1995 年，顶夸克被发现
1995 年，玻色-爱因斯坦凝聚在实验室被做出
1995 年，第二次超弦革命开始

后记

这个有关量子论的系列自去年开始动笔，其间因为各种原因（包括本人不可思议的懒惰），写写停停，到最后完成时用了正好差不多一年时间。最需要感谢的是读者们异乎寻常的热情和支持，不然我很可能半途而废。

我最初构想的规模只是一篇 4, 5 万字的极简介绍，不料逐渐收不住笔，最后完成的时候在我的 WORD 里已经超过 200 页，25 万字，当时真是不敢想象。这不是专业的科普，事实上，我更注重的是历史方面而不是科学方面，不过读者可以在其中获得一个基本的量子论的科学概念。我努力使它成为极通俗的读物，事实上，我仅仅假定读者具有初中的数学水平和一点点高中物理知识（如果你具有以上水平但仍看不懂某些内容，那一定是我写作的问题^_^）。即使是对数理完全不通，我也希望你从中得到一点启示。但不可避免地，运用日常化的语言会使一些描述显得牵强附会，不符合物理上的概念。所以再次强调，这不是专业的科普，如果想获得对量子论更好更准确的认识，各位还是参考一些专业书籍。上帝是数学家，唯一能够描述宇宙的语言是数学！我们的史话也非专业的科学史，它仅仅是供各位茶余饭后消遣的读物而已，如果有人竟然凭借这个系列而证明了某些“伟大理论”，那我可受宠若惊，担当不起。其实，我和各位一样是门外汉，只要各位能够和我共同分享一些由量子论带来的激动和惊奇，我便已经心满意足。

这个系列是本人业余时间在网上完成的，一来水平问题，二来毕竟业余时间有限，所以无疑存在为数众多的 bugs。虽然我努力使描述符合历史与事实（一般来说，除了一些明显的虚构情节外，本文中的历史场景都是有依据的），但有些地方确实没能查阅更多的资料以进一步核实（比如我曾经想啃完那 6 本大块头的量子力学发展史，不过最终还是留下一些没看完）。我已经发现了一些错误之处，在将来的修订中会改正过来，也希望各位指出更多的地方。另外，由于写了很长时间，所以没有很好地规划，比如第 4 章只写了 4 节，而有些重要的方面却忘了描写，或者没法插进现有的叙事结构中去。比如玻色-爱因斯坦统计，斯特恩-格拉赫实验，量子加密术，等等。现在这个只是初稿，其中有些章节很罗嗦，有些地方枯燥无味，有些比喻莫名其妙，还有一些名词翻译的问题，以及一些东拼西凑的痕迹，修订的时候我会试图解决这些问题，并配上一些插图。

我有意使文字风格靠近同龄人的语境，也就是 7, 80 年代的风格。这是一种取巧的办法，因为这是网上的主要人口，不过我很高兴它带有一些网络特色。为了追求可读性，在不改变基本事实的前提下，我有的时候做了一点文字上的夸张（比如历史上的玻尔-爱因斯坦之争很可能没有我所描写得那样戏剧化），我为此表示抱歉，也希望这不会损害读者对我的信心。这篇文字主要还是在网上流行（因为有人辛苦转贴，所以它似乎流传很广），有些读者很希望它可以出版，也许修订后有人真的愿意

出版它，不过由于本人的效率低下，这一天似乎还遥遥无期，呵呵。

关于本文任何的意见，比如知识错误，信息过时，文字风格，遗漏与补充，哲学观与讨论，都可以发信到 castor_v_pollux@yahoo.com，我很乐意听取各位的意见，也算是网络文字的一种互动形式。

最后，把这篇文章送给那个女孩，以回赠她曾经送给我的那些可爱笑容。

CAPO

2004.5

主要参考资料：

I. 书（中文名的是中译本，没有出版社的是网上版）：

The Historical Development of Quantum Theory I-VI, Jagdish Mehra&Helmut Rechenberg, Springer 1982-
最详尽和权威的量子力学发展史，共6大册，有大量的资料

An Introduction to Quantum Theory, Keith Hannabuss, Oxford 1997
不错的量子力学教科书

Quantum Theory, David Bohm, Constable 1951
玻姆经典的量子力学教科书

The Strange Story of the Quantum, Banesh Hoffmann, Dover 1959
霍夫曼的经典量子科普，虽然年代久远，但对我们的史话借鉴颇多

100 Years of Planck's Quantum, Ian Duck&E.C.G. Sundarshan, World Scientific 2000
量子百年回顾，收集了量子发展史上的经典论文

Beyond the Quantum, Michael Talbot, Bantam Books 1988
关于量子思想和发展史的评述

The Construction of Modern Science, R.S. Westfall, Cambridge 1977
介绍早期近代科学的发展，可以找到光学和力学的发展史

Never at Rest, R.S. Westfall, Cambridge 1980
牛顿的标准传记，着重参考他发展光学的历史

The Newton Handbook, Gerek Gjersten, Routledge&Kegan Paul 1986
关于牛顿的细节琐事，可以找到有关他的名言的资料

The Man Who Knew Too Much, Stephen Inwood, MacMilan 2002
最新的胡克传记，参考了胡克的有关事迹

Thomas Young, Natural Philosopher, Alexander Wood, Cambridge 1954
杨的标准传记

Niels Bohr: Gentle Genius of Denmark, Spangenburg&Moser, Facts on File 1995

最新的玻尔传记

Niels Bohr: The Man, His Science & The World They Changed, Ruth Moore, Knopf 1966

老的玻尔标准传记，简洁精悍

Niels Bohr's Times: in Physics, Philosophy and Polity, Abraham Pais, Oxford 1991

派斯的关于玻尔的书，在一些问题上补充价值

Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg, David Cassidy, Freeman 1992

海森堡的标准传记，着重参考矩阵力学和不确定原理的创立过程

Niels Bohr: A Centenary Volume, French & Kennedy, Harvard 1985

关于玻尔的有关回忆和资料，哥本哈根研究所的故事

尼尔斯·玻尔哲学文选，戈革译

戈革先生是公认的玻尔专家，强烈推荐，可领略玻尔的博大思想

物理学与哲学, Heisenber, 范岱年译

网上的海森堡的译作，可参考关于哥本哈根解释

Schrodinger: Life and Thought, Walter Moore, Cambridge 1989

薛定谔的标准传记，着重参考波动力学的创立过程

Dirac: A Scientific Biography, Helge Kragh, Cambridge 1990

狄拉克的标准传记

爱因斯坦传，聂运伟

我手里反而没有爱因斯坦的合适资料，这个是网上流行的爱因斯坦传

In Search of Schrodinger's Cat, John Gribbin, Wildwood House 1984

Gribbin 的名著，一本量子力学极简史

Schrodinger's Kittens and the Search for Reality, John Gribbin, Weidenfeld&Nicolson 1995

上一本的续作，介绍了一些新的发展

Copenhagen, Michael Frayn, Methuen 1998

《哥本哈根》一剧的剧本

Heisenberg and the Nazi Atomic Bomb Project, Paul Rose, UC Berkeley 1998

Hitler's Uranium Club, Jeremy Bernstein, AIP 1996

以上两本是关于海森堡和德国原子弹计划的详尽历史分析

The Emperor's New Mind, Roger Penrose, Oxford 1989

彭罗斯关于计算机人工智能和精神的名著。其中也讨论了量子论，量子引力等问题。

Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics, J.S. Bell, Cambridge 1987

贝尔的论文集

The Ghost in the Atom, P.Davis&J.Brown, Cambridge 1986

BBC 在阿斯派克特实验后对于量子专家们的访谈记录

The Metaphysics of Quantum Theory, Henry Krips, Oxford 1987

量子论的形而上学讨论，有包括 Stapp 在内的主要不同见解者的介绍

The Philosophy of Quantum Mechanics, Richard Healey, Cambridge 1989

关于量子哲学的讨论

The Interpretation of Quantum Mechanics, Roland Omnès, Princeton 1994

Omnès 的量子教科书，有各种量子解释的全面介绍和讨论，主要有退相干历史的说明

The Fabric of Reality, David Deutsch, Allen Lane 1997

德义奇的通俗著作，可找到量子计算机和多宇宙的详尽介绍

The Quark and the Jaguar, Murray Gell-Mann, Freeman 1994

盖尔曼的通俗作品，可以找到退相干历史的通俗解释

时间简史 (A Brief History of Time), S.Hawking, 许明贤、吴忠超译

大家都熟悉的名作。可参考关于打赌的某些片断，以及一些量子引力问题

Black Holes and Time Warps, Kip Thorne, W.W.Norton 1994

主要讲黑洞问题，但可找到霍金打赌的一些片断

时间之箭 (The Arrow of Time), P.Coveney&R. Highfield

这个是的网上中译本，主要讲时间之矢的问题，有量子论的一般介绍

Superstrings, A Theory of Everything? P.Davis&J.Brown, Cambridge 1988

BBC 对于超弦专家们的访谈记录

The Elegant Universe, Brian Greene, W.W. Norton 1999

畅销的介绍弦论的新科普书

20 世纪物理学史, 魏凤文&申先甲, 江西教育出版社 1994

不错的 20 世纪物理史简介，参考量子场论的发展

物理学思想史, 杨仲耆&申先甲, 湖南教育出版社 1993

一本物理学通史

波普尔文集

网上有相当全的波普尔文集，可以参考他对于量子论的看法

II. 文章

D. Cassidy, Phys. Today July 2000, p28

有关海森堡 1941 年在哥本哈根同玻尔的会面

Max Tegmark, Fortschr. Phys. 46 p855

Tegmark 宣传 MWI 的文章

Aspect et al, Phys. Rev. Lett. 49 p91

阿斯派克特的实验报告

A. Aspect, Nature 398 p189

阿斯派克特亲自写的关于贝尔不等式实验的简史

Anton Zeilinger, Nature 408 p639

Tegmark&Wheeler, Scientific American Feb 2001, p68

以上两篇是量子论百年的回顾和展望

Yurke&Stoler, Phys. Rev. Lett. 68, p1251

Jennewein et al, Phys. Rev. Lett. 88, 017903

Aerts et al, Found. Phys. 30, p1387

Rowe et al, Nature 409, p791

Z.Zhao et al, Phys. Rev. Lett. 90 207901

Hasegawa et al, oai:arXiv.org:quant-ph/0311121

Pittman&Franson, Physical Review 90 240401

一些关于贝尔不等式和量子通讯实验的报告

J.W.Pan et al, Nature 403 p515

潘建伟等人关于 GHZ 测试的报告

Ghirardi, Rimini&Weber, Phys. Rev. D34, 470

GRW 模型

Wojciech H. Zurek, Rev. Mod. Phys. 75 p715

Wojciech H. Zurek, Phys. Today 44 p36

Zurek 关于退相干理论的全面介绍

R.B. Griffiths, Phys. Lett. A 265 p12

退相干历史的介绍

Ghirardi, Phys.Lett. A265 p153

Bassi&Ghirardi, J.Statist.Phys. 98 p457

Bassi&Ghirardi, Phys.Lett. A257 p247

Ghirardi 等人对于 DH 解释的质疑

Jim Giles, Nature 420, p354

科学家打赌的文章

III. 网页

许多参考过的网页不记得地址了，不过我一般尽量引用比较可靠的资料。以下是一些经常光顾的网页地址，可能有遗漏。

<http://www.nbi.dk>

玻尔研究所的官方网站

http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page

维基百科

<http://arxiv.org/>

康奈尔大学的电子论文数据库

各大科学杂志的主页，比如 <http://www.nature.com>, <http://www.sciencemag.org>, <http://www.aip.org/pt>, <http://www.sciam.com> 等等

<http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/~history/index.html>

圣安德鲁大学的科学家传记网页

<http://www.nobel.se/>

诺贝尔奖电子博物馆

<http://www.fortunecity.com/emachines/e11/86/qphil.html>

量子哲学与物理实在

<http://www.quantumphil.org/>

有关量子纠缠和量子哲学的网站

<http://home.earthlink.net/~johnfblanton/physics/epr.htm>

EPR 与物理实在

<http://www-physics.lbl.gov/~stapp/stappfiles.html>

斯塔普的网页，有各种关于量子论和量子意识的文章

<http://www.hep.upenn.edu/~max/everett/>

埃弗莱特的网上传记

<http://www.hedweb.com/everett/everett.htm>

多世界解释 FAQ

<http://superstringtheory.com/>

号称官方的超弦网站