I II r I i e . 4

A BRIEF HIS TORY

Ol IIMF

:景

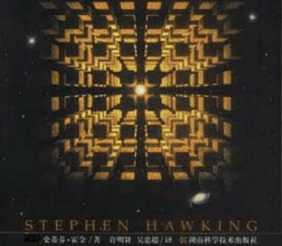
:囂独:

**■I •** 带」上一 1 ■・'

ST E P H.E N— HA W KJ NG

KSV It 分

a"brief history  
OF T IME  
时网偷史  
M IM 4



时间简史（插图本）

史蒂芬•霍金

简介

史蒂芬•霍金的《时间简史》自1988年首版以来的岁月里，已成为全球科学著作的里 程碑。它被翻译成40种文字，销售了近1000万册，成为国际出版史上的奇观。该书内容是 关于宇宙本性的最前沿知识，但是从那以后无论在微观还是宏观宇宙世界的观测技术方面 都有了非凡的进展。这些观测证实了霍金教授在该书第一版中的许多理论预言，其中包括 宇宙背景探险者卫星（COBE）的最近发现，它在时间上回溯探测到离宇宙创生的30万年 之内，并显露了他所计算的在时空结构中的涟漪。

译者序

许明贤、吴忠超

宇宙论是一门既古老又年轻的学科。作为宇宙里高等生物的人类不会满足于自身的生 存和种族的绵延，还一代代不懈地探索着存在和生命的意义。但是，人类理念的进化是极 其缓慢和艰苦的。从亚里士多 —— 勒密的地心说到哥白尼——伽利略的日心说的演化 就花了2000年的时间。令人吃惊的是，尽管人们知道世间的一切都在运动，只是到了本世 纪20年代因哈勃发现了红移定律后，宇宙演化的观念才进入人类的意识。人们甚至从来没 有想到过宇宙还会演化。牛顿的万有引力定律表明，宇宙的物质在引力作用下不可能处于 稳定的状态。即使在爱因斯坦的广义相对论中，情况也好不到哪儿去，为了得到一个稳定 的宇宙模型，他曾将宇宙常数引进理论中。他们都希望在自己的理论中找到稳定的宇宙模 型。可见，宇宙演化的观念并不是产生于这些天才的头脑之中。

可以公平的说，哈勃的观测标志着现代宇宙论的诞生。哈勃发现，从星系光谱的红移 可以推断，越远的星系以越快的速度离开我们而去，这表明整个宇宙处于膨胀的状态。从 时间上倒溯到过去，估计在100亿到200亿年前曾经发生过一桩开天辟地的大事件，即宇宙 从一个极其紧致、极热的状态中大爆炸而产生。伽莫夫在1948年发表的一篇关于热大爆炸 模型的文章中作出了一个惊人的预言，早期大爆炸的辐射仍残存在我们周围，不过由于宇 宙膨胀引起的红移，其绝对温度只余下几度左右，在这种温度下，辐射是处于微波的波 段。但在1965年彭齐亚斯和威尔逊观测到宇宙微波背景辐射之前，人们并不认真对待此预

一般认为，爱因斯坦的广义相对论是用于描述宇宙演化的正确的理论。在经典广义相 对论的框架里，霍金和彭罗斯证明了，在很一般的条件下，空间——时间一定存在奇点， 最著名的奇点即是黑洞里的奇点以及宇宙大爆炸处的奇点。在奇点处，所有定律以及可预 见性都失效。奇点可以看成空间时间的边缘或边界。只有给定了奇点处的边界条件，才能 由爱因斯坦方程得到宇宙的演化。由于边界条件只能由宇宙外的造物主所给定，所以宇宙 的命运就操纵在造物主的手中。这就是从牛顿时代起一直困扰人类智慧的第一推动问题。

如果空间——时间没有边界，则就不必劳驾上帝进行第一推动了。这只有在量子引力 论中才能做到。霍金认为宇宙的量子态是处于一种基态，空间一间可看成一有限无界 的四维面，正如地球的表面一样，只不过多了两个维数而已。宇宙中的所有结构都可归结 于量子力学的测不准原理所允许的最小起伏。从一些简单的模型计算可得出和天文观测相 一致的推论，如星系、恒星等等的成团结构，大尺度的各向同性和均匀性，空间——时间 的平性，即空间——时间基本上是平坦的，并因此才使得星系乃至生命的发展成为可能， 还有时间的方向箭头等等。霍金的量子宇宙论的意义在于它真正使宇宙论成为一门成熟的 科学，它是一个自足的理论，即在原则上，单凭科学定律我们便可以将宇宙中的一切都预 言出来。

本书作者是当代最重要的广义相对论家和宇宙论家。70年代他和彭罗斯一道证明了著 名的奇性定理，为此他们共同获得了 1988年的沃尔夫物理奖。他还证明了黑洞的面积定 理，即随着时间的增加黑洞的面积不减。这很自然使人将黑洞的面积和热力学的燜联系在 一起。1973年，他考虑黑洞附近的量子效应，发现黑洞会像黑体一样发岀辐射，其辐射的 温度和黑洞质量成反比，这样黑洞就会因为辐射而慢慢变小，而温度却越变越高，它以最 后一刻的爆炸而告终。黑洞辐射的发现具有板其基本的意义，它将引力、量子力学和统计 力学统一在一起。

1974年以后，他的研究转向量子引力论。虽然人们还没有得到一个成功的理论，但它 的一些特征己被发现。例如，空间——时间在普郎克尺度（10-33厘米）下不是平坦的， 而是处于一种泡沫的状态。在量子引力中不存在纯态，因果性受到破坏，因此使不可知性 从经典统计物理、量子统计物理提高到了量子引力的第三个层次。

1980年以后，他的兴趣转向量子宇宙论。

本书的副题是从大爆炸到黑洞。霍金认为他一生的贡献是，在经典物理的框架里，证 明了黑洞和大爆炸奇点的不可避免性，黑洞越变越大：但在量子物理的框架里，他指出， 黑洞因辐射而越变越小，大爆炸的奇点不但被量子效应所抹平，而且整个宇宙正是起始于 血。

理论物理学的细节在未来的20年中还会有变化，但就观念而言，现在己经相当完备 了。

霍金的生平是非常富有传奇性的，在科学成就上，他是有史以来最杰出的科学家之 一，他的贡献是在他20年之久被卢伽雷病禁锢在轮椅上的情况下做出的，这真正是空前 的。因为他的贡献对于人类的观念有深远的影响，所以媒介早已有许多关于他如何与全身 瘫痪作搏斗的描述。尽管如此，译者之一于1979年第一回见到他时的情景至今还历历在 目。那是第一次参加剑桥霍金广义相对论小组的讨论班时，门打开后，忽然脑后响起一种 非常微弱的电器的声音，回头一看，只见一个骨瘦如柴的人斜躺在电动轮椅上，他自己驱 动着电开关。译者尽量保持礼貌而不显岀过分吃惊，但是他对首次见到他的人对其残废程 度的吃惊早已习惯。他要用很大努力才能举起头来。在失声之前，只能用非常微弱的变形 的语言交谈，这种语言只有在陪他工作、生活几个月后才能通晓。他不能写字，看书必须 依赖于一种翻书页的机器，读文献时必须让人将每一页摊平在一张大办公桌上，然后他驱 动轮椅如蚕吃桑叶般地逐页阅读。人们不得不对人类中居然有以这般坚强意志追求终极真 理的灵魂从内心产生深深的敬意。每天他必须驱动轮椅从他的家——剑桥西路5号，经过 美丽的剑河、古老的国王学院驶到银街的应用数学和理论物理系的办公室。该系为了他的 轮椅行走便利特地修了一段斜坡。

在富有学术传统的剑桥大学，他目前担任着也许是有史以来最为崇高的教授职务，那 是牛顿和狄拉克担任过的卢卡逊数学教授。

本书译者之一曾受教于霍金达四年之久，并在他的指导下完成了博士论文。此书即是 受霍金之托而译成中文，以供占人类五分之一的人口了解他的学说。

——许明贤吴忠超

该书籍由网友制作上传，版权归原作者所有，仅供学习交流之用，请在下载后24小时 内自行删除！

-epub 掌上书苑(<http://www.cnepub.com>)

第一章我们的宇宙图像

第一章我们的宇宙图像

一位著名的科学家（据说是贝特郎•罗素）曾经作过一次关于天文学方面的讲演。他 描述了地球如何绕着太阳运动，以及太阳又是如何绕着我们称之为星系的巨大的恒星群的 中心转动。演讲结束之时，一位坐在房间后排的矮个老妇人站起来说道：“你说的这些都 是废话。这个世界实际上是驮在一只大乌龟的背上的一块平板。”这位科学家很有教养地 微笑着答道：“那么这只乌龟是站在什么上面的呢？ ”“你很聪明，年轻人，的确很聪 明，”老妇人说，“不过，这是一只驮着一只一直驮下去的乌龟群啊！ ”

大部分人会觉得，把我们的宇宙喻为一个无限的乌龟塔相当荒谬，可是为什么我们自 以为知道得更多一些呢？我们对宇宙了解了多少？而我们又是怎样才知道的呢？宇宙从何 而来，又将向何处去？宇宙有开端吗？如果有的话，在这开端之前发生了什么？时间的本 质是什么？它会有一个终结吗？在物理学上的一些最新突破，使一部分奇妙的新技术得以 实现，从而对于回答这些长期以来悬而未决问题中的某些问题有所启发。也许有一天这些 答案会像我们认为地球绕着太阳运动那样显而易见——当然也可能像乌龟塔那般荒唐可 笑。不管怎样，唯有让时间来判断了。

早在公元前340年，希腊哲学家亚里士多徳在他的《论天》一书中，就己经能够对于 地球是一个圆球而不是一块平板这一论点提出两个很好的论据。第一，他认为月食是由于 地球运行到太阳与月亮之间而造成的。地球在月亮上的影子总是圆的，这只有在地球本身 为球形的前提下才成立。如果地球是一块平坦的圆盘，除非月食总是发生在太阳正好位于 这个圆盘中心之下的时候，否则地球的影子就会被拉长而成为椭圆。

第二，希腊人从旅行中知道，在越往南的地区看星空，北极星则显得越靠近地平线。 （因为北极星位于北极的正上方，所以它出现在处于北极的观察者的头顶上，而对于赤道 上的观察者，北极星显得刚好在地平线上。）根据北极星在埃及和在希腊呈现出来的位置 的差别，亚里士多徳甚至估计地球大圆长度为400斯特迪亚。现在不能准确地知道，一个 斯特迪亚的长度究竟是多少，但也许是200 （1码=0.9144米）码左右，这样就使得亚里士 多徳的估计为现在所接受数值的两倍。希腊人甚至为地球是球形提供了第三个论据，否则 何以从地平线外驶来的船总是先露出船帆，然后才是船身？

亚里士多徳认为地球是不动的，太阳、月亮、行星和恒星都以圆周为轨道围绕着它转 动。他相信这些，是由于神秘的原因，他感到地球是宇宙的中心，而且圆周运动最为完 美。在公元后两世纪，这个思想被托勒密精制成一个完整的宇宙学模型。地球处于正中 心，包围着它的是八个天球，这八个天球分别负载着月亮、太阳、恒星和五个当时己知的 行星：水星、金星、火星、木星和土星（图1.1） o这些行星被认为是沿着附在相应天球 上的更小的圆周运动，以说明它们在天空中被观察到的相当复杂的轨迹。最外层的天球被 镶上固定的恒星，它们总是停在不变的相对位置，但是总体绕着天空旋转。最后一层天球 之外为何物一直不清楚，但有一点是肯定的，它不是人类所能观测到的宇宙的部分。



图1.1从最里面往最外面顺序为月亮球、水星球、金星球、太阳球、火星球、木星 球、土星球和固定恒星球。最中心为地球。

托勒密模型为预言天体在天空的位置提供了相当精密的系统。但为了正确地预言这些 位置，托勒密必须假定月亮轨道有时离地球比其他时候要近一倍，这意味着月亮有时看起 来要比其他时候大一倍。托勒密承认这个瑕疵，尽管如此，他的模型虽然不是普遍地、却 是广泛地被接受。它被基督教接纳为与《圣经》相一致的宇宙图象。这是因为它具有巨大 的优点，即在固定恒星天球之外为天堂和地狱留下了很多地方。

然而，1514年一位名叫尼古拉•哥白尼的教士提出了一个更简单的模型。（起初，可 能由于害怕教会对异端的迫害，哥白尼只能将他的模型匿名地流传。）他的观念是，太阳 是静止地位于中心，而地球和其他行星绕着太阳作圆周运动。将近一个世纪以后，他的观 念才被认真地接受。后来，两位天文学家——徳国的约翰斯•开普勒和意大利的伽利雷•伽 利略开始公开支持哥白尼的理论，尽管它所预言的轨道还不能完全与观测相符合。直到 1609年，亚里士多——勒密的理论才宣告死亡。那一年，伽利略用刚发明的望远镜来 观测夜空。当他观测木星时，发现有几个小卫星或月亮绕着它转动。这表明不象亚里士多 徳和托勒密所设想的，并不是所有的东西都必须直接围绕着地球转。（当然，仍然可能相 信地球是静止地处于宇宙的中心，而木星的卫星沿着一种极其复杂的轨道绕地球运动，表 观上看来它们是绕着木星转动。然而哥白尼理论是简单得多了。） 同时，开普勒修正了 哥白尼理论，认为行星不是沿圆周而是沿椭圆（椭圆是被拉长的圆）运动，从而使预言最 终和观察相互一致了。 就开普勒而言，椭圆轨道仅仅是想当然的，并且是相当讨厌的假 设，因为椭圆明显地不如圆那么完美。虽然他几乎是偶然地发现椭圆轨道能很好地和观测 相符合，但却不能把它和他的行星绕太阳运动是由于磁力引起的另一思想相互调和起来。 对这一切提供解释是晚得多的事，那是由于1687年伊萨克•牛顿爵士出版了他的《数学的 自然哲学原理》，这部也许是有史以来物理科学上最重要的单独的著作。在这本书中，牛 顿不但提出物体如何在空间和时间中运动的理论，并且发展了为分析这些运动所需的复杂 的数学。此外，牛顿提出了万有引力定律，根据这定律，宇宙中的任一物体都被另外物体 所吸引，物体质量越大，相互距离越近，则相互之间的吸引力越大。这也就是使物体落到 地面上的力。（由于一个苹果落到牛顿的头上而使他得到灵感的故事，几乎肯定是不足凭 信的。所有牛顿自己说过的只是，当他陷入沉思之时，一颗苹果的落下使他得到了万有引 力的思想。）牛顿继而指出，根据他的定律，引力使月亮沿着椭圆轨道绕着地球运行，而 地球和其他行星沿着椭圆轨道绕着太阳公转。

哥白尼的模型摆脱了托勒密的天球，以及与其相关的宇宙存在着自然边界的观 念。“固定恒星”除了由于地球绕着自身的轴自转引起的穿越天空的转动外，不改变它们的 位置，很自然会使人设想到固定恒星是和我们的太阳类似的物体，只是比太阳离开我们远 得多了。

按照他的引力理论，牛顿意识到恒星应该相互吸引，看来它们不能保持基本不动。那 么它们会一起落到某处去吗？在1691年写给当时另一位最重要的思想家里查徳•本特里的 一封信中，他论证道，如果只有有限颗恒星分布在一个有限的空间区域里，这确实是会发 生的。但是另一方面，他推断如果存在无限多颗恒星，多少均匀地分布于无限的空间，这 种情形就不会发生，因为这时不存在任何一个它们落去的中心点。 当人们议论到无穷

时，这种论证是你会遭遇到的一种陷阱。在一个无限的宇宙，每一点都可以认为是中心， 因为在它的每一边都有无限颗恒星。正确的方法是很久以后才被意识到的，即是先考虑有 限的情形，这时所有恒星都相互落到一起，然后在这个区域以外，大体均匀地加上更多的 恒星，看情况会如何改变。按照牛顿定律，这额外的恒星平均地讲对原先的那些根本没有 什么影响，所以这些恒星还是同样快地落到一起。我们愿意加上多少恒星就可以加上多 少，但是它们仍然总是坍缩在一起。现在我们知道，由于引力总是吸引的，不可能存在一 个无限的静态的宇宙模型。

在20世纪之前从未有人暗示过，宇宙是在膨胀或是在收缩，这有趣地反映了当时的思 维风气。一般认为，宇宙或是以一种不变的状态己存在了无限长的时间，或以多多少少正 如我们今天所看的样子被创生于有限久的过去。其部分的原因可能是，人们倾向于相信永 恒的真理，也由于虽然人会生老病死，但宇宙必须是不朽的、不变的这种观念才能给人以 安慰。

甚至那些意识到牛顿的引力理论导致宇宙不可能静止的人，也没有想到提岀宇宙可能 是在膨胀。相反的，他们试图修正理论，使引力在非常大距离时成为斥力。这不会对行星 运动的预言有重大的影响，然而却允许无限颗恒星的分布保持平衡——邻近恒星之间的吸 引力被远隔恒星之间的斥力所平衡。然而，现在我们知道，这样的平衡是不稳定的：如果 某一区域内的恒星稍微互相舘近一些，引力就增强，并超过斥力的作用，这样这些恒星就 会继续落到一起。反之，如果某一区域内的恒星稍微互相远离一些，斥力就起主导作用， 并驱使它们离得更开。

另一个反对无限静止宇宙的异见通常是归功于徳国哲学家亨利希•奥勃斯，1823年他 发表了这个理论。事实上，牛顿的同时代的一些人己经提出过这个问题。甚至奥勃斯的文 章也不是貌似有理地反驳这模型的第一篇。不管怎么说，这是第一篇被广泛注意的文章。 这无限静止模型的困难，在于几乎每一道视线必须终结于某一恒星的表面。这样，人们可 以预料，整个天空甚至在夜晚都会像太阳那么明亮。奥勃斯反驳说，远处恒星的光线由于 被它所穿过的物质吸收所减弱。然而如果真是如此，这相干的物质将会最终被加热到发出 和恒星一样强的光为止。唯一的能避免整个天空像太阳那么亮的结论的方法是，假定恒星 并不是永远那么亮，而是在有限久的过去才开始发光。这种情况下，吸光物质还没加热， 或者远处恒星的光线尚未到达我们这儿。这使我们面临着是什么首次使恒星发光的问题。

当然，宇宙开端的问题在这之前很久就被讨论过。根据一些早先的宇宙论和犹太人/ 基督教/穆斯林传统，宇宙开端于有限的、并且不是非常远的过去的某一时刻。对这样一 个开端，有一种议论是感到必须有“第一原因”来解释宇宙的存在。（在宇宙中，你总可以 将一个事件解释为由于另一个更早的事件所引起的，但是宇宙本身的存在只有当存在某个 开端时才能被解释。）另一种论证是圣•奥古斯丁在他的《上帝之城》的著作中提出的。 他指出，文明在进步，我们将记住创造这些业绩和发展技术的人们。这样人，也许宇宙， 不可能己经存在了太长的时间。圣•奥古斯丁根据《创世纪》一书，接受公元前5。00年作 为宇宙的被创生的时间。（有趣的是，这和上一次的冰河时间的结束，大约公元前100000 年相距不远。考古学家告诉我们，文明实际上是从那时开始的。）另一方面，亚里士多 徳和大多数其他希腊哲学家不喜欢创生的思想，因为它带有太多的神学干涉的味道。所以 他们相信，人类及其周围的世界已经并且将继续永远存在。古代的人们己经考虑到上述的 文明进步的论点，用周期性洪水或其他灾难的重复出现，使人类回到文明的开初，来回答 上面的话难。

1781年，哲学家伊曼努尔•康徳发表了里程碑般的（也是非常模糊的）著作——《纯 粹理性批判》，在这本书中，他深入地考察了关于宇宙在时间上是否有开端、空间上是否 有极限的问题。他称这些问题为纯粹理性的二律背反（也就是矛盾）。因为他感到存在同 样令人信服的论据，来证明宇宙有开端的正命题，以及宇宙己经存在无限久的反命题。他 对正命题的论证是：如果宇宙没有一个开端，则任何事件之前必有无限的时间。他认为这 是荒谬的。他对反命题的论证是：如果宇宙有一开端，在它之前必有无限的时间，为何宇 宙必须在某一特定的时刻开始呢？事实上，他对正命题和反命题用了同样的论证。它们都 是基于他的隐含的假设，即不管宇宙是否存在了无限久，时间均可无限地倒溯回去。我们 将会看到，在宇宙开端之前时间概念是没有意义的。这一点是圣•奥古斯丁首先指出的。 当他被问及：上帝在创造宇宙之前做什么？奥古斯丁没有这样地回答：他正为问这类问题 的人准备地狱。而是说：时间是上帝所创造的宇宙的一个性质，在宇宙开端之前不存在。

当大部分人相信一个本质上静止不变的宇宙时，关于它有无开端的问题，实在是一个 形而上学或神学的问题。按照宇宙存在无限久的理论，或者按照宇宙在某一个有限时刻， 以给人的印象似乎是己经存在了无限久的样子启动的理论，我们可以同样很好地解释所观 察到的事实。但在1929年，埃徳温•哈勃作出了一个具有里程碑意义的观测，即是不管你 往那个方向看，远处的星系正急速地远离我们而去。换言之，宇宙正在膨胀。这意味着， 在早先星体相互之间更加靠近。事实上，似乎在大约100亿至200亿年之前的某一时刻，它 们刚好在同一地方，所以那时候宇宙的密度无限大。这个发现最终将宇宙开端的问题带进 了科学的王国。

哈勃的发现暗示存在一个叫做大爆炸的时刻，当时宇宙的尺度无穷小，而且无限紧 密。在这种条件下，所有科学定律并因此所有预见将来的能力都失效了。如果在此时刻之 前有过些事件，它们将不可能影响现在所发生的一切。所以我们可以不理它们，因为它们 并没有可观测的后果。由于更早的时间根本没有定义，所以在这个意义上人们可以说，时 间在大爆炸时有一开端。必须强调的是，这个时间的开端是和早先考虑的非常不同。在一 个不变的宇宙中，时间的端点必须由宇宙之外的存在物所赋予：宇宙的开端并没有物理的 必要性。人们可以想像上帝在过去的任何时刻创造宇宙。另一方面，如果宇宙在膨胀，何 以宇宙有一个开端似乎就有了物理的原因。人们仍然可以想像，上帝是在大爆炸的瞬间创 造宇宙，或者甚至在更晚的时刻，以便它看起来就像发生过大爆炸似的方式创造，但是设 想在大爆炸之前创造宇宙是没有意义的。大爆炸模型并没有排斥造物主，只不过对他何时 从事这工作加上时间限制而巳！

为了谈论宇宙的性质和讨论诸如它是否存在开端或终结的问题，你必须淸楚什么是科 学理论。我将采用头脑简单的观点，即理论只不过是宇宙或它的受限制的一部分的模型， 一些联结这模型和我们所观察的量的规则。它只存在于我们的头脑中，（不管在任何意义 ±）不再具有任何其他的实在性。如果它满足以下两个要求，就算是好的理论：它必须在 只包含一些任意元素的一个模型的基础上，准确地描述大批的观测，并对未来观测的结果 作出确定的预言。例如，亚里士多徳关于任何东西是由四元素，土、空气、火和水组成的 理论是足够简单的了，但它没有做岀任何确定的预言。另一方面，牛顿的引力理论是基于 甚至更为简单的模型，在此模型中两物体之间的相互吸引力和它们称之为质量的量成正 比，并和它们之间的距离的平方成反比。然而，它以很高的精确性预言了太阳、月亮和行 星的运动。

在它只是假设的意义上来讲，任何物理理论总是临时性的：你永远不可能将它证明。 不管多少回实验的结果和某一理论相一致，你永远不可能断定下一次结果不会和它矛盾。 另一方面，哪怕你只要找到一个和理论预言不一致的观测事实，即可证伪之。正如科学哲 学家卡尔•波普所强调的，一个好的理论的特征是，它能给出许多原则上可以被观测所否 定或证伪的预言。每回观察到与这预言相符的新的实验，则这理论就幸存，并且增加了我 们对它的可信度：然而若有一个新的观测与之不符，则我们只得抛弃或修正这理论。至少 被认为这迟早总会发生的，问题在于人们有无才干去实现这样的观测。

实际上经常发生的是，所设计的新理论确实是原先理论的推广。例如，对水星的非常 精确的观测揭露了它的运动和牛顿理论预言之间的很小差异。爱因斯坦的广义相对论所预 言的运动和牛顿理论略有不同。爱因斯坦的预言和观测相符，而牛顿的预言与观测不相 符，这一事实是这个新理论的一个关键证据。然而我们在大部分实际情况下仍用牛顿理 论，因为在我们通常处理的情形下，两者差别非常小。（牛顿理论的另一个巨大的优点在 于，它比爱因斯坦理论容易处理得多！）

科学的终极目的在于提供一个简单的理论去描述整个宇宙。然而，大部分科学家遵循 的方法是将这问题分成两部分。首先，是一些告诉我们宇宙如何随时间变化的定律；（如 果我们知道在任一时刻宇宙是什么样子的，则这些定律即能告诉我们以后的任一时刻宇宙 是什么样子的。）第二，关于宇宙初始状态的问题。有些人认为科学只应过问第一部分， 他们认为初始状态的问题应是形而上学或宗教的范畴。他们会说，全能的上帝可以随心所 欲地启动这个宇宙。也许是这样。但是，倘若那样，他也可以使宇宙以完全任意的方式演 化。可是，看起来他选择宇宙以一种非常规则的、按照一定规律的方式演化。所以，看来 可以同样合理地假定，也存在着制约初始状态的定律。毕全功于一役地设计一种能描述 整个宇宙的理论，看来是非常困难的。反之，我们是将这问题分成许多小块，并发明许多 部分理论。每一部分理论描述和预言一定有限范围的观测，同时忽略其他量的效应或用简 单的一组数来代表之。可能这方法是全错的。如果宇宙中的每一件东西都以非常基本的方 式依赖于其他的任何一件东西，很可能不能用隔离法研究问题的部分去逼近其完备的答 案。尽管如此，这肯定是我们在过去取得进展所用的方法。牛顿引力理论又是一个经典的 例子，它告诉我们两个物体之间的引力只决定于与每个物体相关的一个数——它的质量： 而与物体由何物组成无关。这样，人们不需要太阳和行星结构和成份的理论就可以计算它 们的轨道。

今天科学家按照两个基本的部分理论——广义相对论和量子力学来描述宇宙。它们是 本世纪上半叶的伟大的智慈成就。广义相对论是描述引力和宇宙的大尺度结构，也就是从 只有几英哩直到大至1亿亿亿（1后面跟24个0）英里，即可观测到的宇宙范围的尺度的结 构。另一方面，量子力学处理极小尺度的现象，例如万亿分之一英寸（1英寸=2.54厘 米）。然而，可惜的是，这两个理论不是互相协调的——它们不可能都对。当代物理学的 一个主要的努力，以及这本书的主题，即是寻求一个能将其合并在一起的理论——量子引 力论。我们还没有这样的理论，要获得这个理论，我们可能还有相当长的路要走，然而我 们已经知道了这个理论所应具备的许多性质。在以下几章，人们将会看到，我们已经知道 了相当多的量子引力论所应有的预言。

现在，如果你相信宇宙不是任意的，而是由确定的定律所制约的，你最终必须将这些 部分理论合并成一套能描述宇宙中任何东西的完整统一理论。然而，在寻求这样的完整统 一理论中有一个基本的自相矛盾。在前面概括的关于科学理论的思想中，假定我们是有理 性的生物，既可以随意自由地观测宇宙，又可以从观察中得出逻辑推论。在这样的方案里 可以合理地假设，我们可以越来越接近找到制约我们宇宙的定律。然而，如果真有一套完 整的统一理论，则它也将决定我们的行动。这样，理论本身将决定了我们对之探索的结 果！那么为什么它必须确定我们从证据得到正确的结论？它不也同样可以确定我们引出错 误的结论吗？或者根本没有结论？

对于这个问题，我所能给出的回答是基于达尔文的自然选择原理。这思想是说，在任 何自繁殖的群体中，存在有不同个体在遗传物质和发育上的变异。这些差异表明，某些个 体比其他个体对周围的世界更能引出正确的结论，并去适应它。这些个体更可能存活、繁 殖，因此它们的行为和思维的模式将越来越起主导作用。这一点在过去肯定是真的，即我 们称之为智慧和科学发现的东西给我们带来了存活的好处。这种情况是否仍会如此不是很 清楚：我们的科学发现也可以将我们的一切都毁灭。即使不是这样，一个完整的统一理论 对于我们存活的机会不会有很大影响。然而，假定宇宙己经以规则的方式演化至今，我们 可以预期，自然选择赋予我们的推理能力在探索完整统一理论时仍然有效，并因此不会导 致我们得到错误的结论。

因为除了最极端的情况外，我们已有了对所有一切都足够给出精确的预言的部分理 论，看来很难以现实的理由为探索宇宙的终极理论辩护。（值得指出，虽然可用类似的论 点来攻击相对论和量子力学，但这些理论己给我们带来了核能和微电子学的革命！）所 以，一套完整的统一理论的发现可能对我们种族的存活无助，甚至也不会影响我们的生活 方式。然而自从文明开始，人们即不甘心于将事件看作互不相关而不可理解的。他们渴求 理解世界的根本秩序。今天我们仍然渴望知道，我们为何在此？我们从何而来？人类求知 的最深切的意愿足以为我们所从事的不断的探索提供正当的理由。而我们的目标恰恰正是 对于我们生存其中的宇宙作完整的描述。

第二章空间和时间

第二章空间和时间

我们现在关于物体运动的观念来自于伽利略和牛顿。在他们之前，人们相信亚里士多 徳，他说物体的自然状态是静止的，并且只在受到力或冲击作用时才运动。这样，重的物 体比轻的物体下落得更快，因为它受到更大的力将其拉向地球。

亚里士多徳的传统观点还以为，人们用纯粹思维可以找出制约宇宙的定律：不必要用 观测去检验它。所以，伽利略是第一个想看看不同重量的物体是否确实以不同速度下落的 人。据说，伽利略从比萨斜塔上将重物落下，从而证明了亚里士多徳的信念是错的。这故 事几乎不可能是真的，但是伽利略的确做了一些等同的事一不同重量的球从光滑的斜 而上滚下。这情况类似于重物的垂直下落，只是因为速度小而更容易观察而已。伽利略的 测量指出，不管物体的重量是多少，其速度增加的速率是一样的。例如，在一个沿水平方 向每走10米即下降1米的斜面上，你释放一个球，则1秒钟后球的速度为每秒1米，2秒钟后 为每秒2米等等，而不管这个球有多重。当然，一个铅锤比一片羽毛下落得更快，那是因 为空气对羽毛的阻力引起的。如果一个人释放两个不遭受任何空气阻力的物体，例如两个 不同的铅锤，它们则以同样速度下降。航天员大卫•斯各特在月亮上进行了羽毛和铅锤实 验。因为没有空气阻碍东西下落。

伽利略的测量被牛顿用来作为他的运动定律的基础。在伽利略的实验中，当物体从斜 坡上滚下时，它一直受到不变的外力（它的重量），其效应是它被恒定地加速。这表明， 力的真正效应总是改变物体的速度，而不是像原先想像的那样，仅仅使之运动。同时，它 还意味着，只要一个物体没有受到外力，它就会以同样的速度保持直线运动。这个思想是 第一次被牛顿在1687年出版的《数学原理》一书中明白地叙述出来，并被称为牛顿第一定 律。物体受力时发生的现象则由牛顿第二定律所给出：物体被加速或改变其速度，其改变 率与所受外力成比例。（例如，如果力加倍，则加速度也将加倍。）物体的质量（或物质 的量）越大，则加速度越小，（以同样的力作用于具有两倍质量的物体则只产生一半的加 速度。）小汽车可提供一个熟知的例子，发动机的功率越大，则加速度越大，但是小汽车 越重，则对同样的发动机加速度越小。

除了他的运动定律，牛顿还发现了描述引力的定律：任何两个物体都相互吸引，其引 力大小与每个物体的质量成正比。这样，如果其中一个物体（例如A）的质量加倍，则两 个物体之间的引力加倍。这是你能预料得到的，因为新的物体A可看成两个具有原先质量 的物体，每一个用原先的力来吸引物体B,所以A和B之间的总力加倍。其中一个物体质 量大到原先的2倍，另一物体大到3倍，则引力就大到6倍。现在人们可以看到，何以落体 总以同样的速率下降：具有2倍重量的物体受到将其拉下的2倍的引力，但它的质量也大到 两倍。按照牛顿第二定律，这两个效应刚好互相抵消，所以在所有情形下加速度是同样 的。

牛顿引力定律还告诉我们，物体之间的距离越远，则引力越小。牛顿引力定律讲，一 个恒星的引力只是一个类似恒星在距离小一半时的引力的1/4。这个定律极其精确地预言 了地球、月亮和其他行星的轨道。如果这定律变为恒星的万有引力随距离减小得比这还 快，则行星轨道不再是椭圆的，它们就会以螺旋线的形状盘旋到太阳上去。如果引力减小 得更慢，则远处恒星的引力将会超过地球的引力。

亚里士多徳和伽利略——牛顿观念的巨大差别在于，亚里士多徳相信存在一个优越的 静止状态，任何没有受到外力和冲击的物体都采取这种状态。特别是他以为地球是静止 的。但是从牛顿定律引出，并不存在一个静止的唯一标准。人们可以讲，物体A静止而物 体B以不变的速度相对于物体A运动，或物体B静止而物体A运动，这两种讲法是等价的。 例如，我们暂时将地球的自转和它绕太阳的公转置之一旁，则可以讲地球是静止的，一列 火车以每小时90英里（1英里=1.609公里）的速度向北前进，或火车是静止的，而地球以 每小时90英里（1英里=1.609公里）的速度向南运动。如果一个人在火车上以运动的物体 做实验，所有牛顿定律都成立。例如，在火车上打乓乒球，将会发现，正如在铁轨边上一 张台桌上一样，乓乒球服从牛顿定律，所以无法得知是火车还是地球在运动。

缺乏静止的绝对的标准表明，人们不能决定在不同时间发生的两个事件是否发生在空 间的同一位置。例如，假定在火车上我们的乓乒球直上直下地弹跳，在一秒钟前后两次撞 到桌面上的同一处。在铁轨上的人来看，这两次弹跳发生在大约相距100米的不同的位 置，因为在这两回弹跳的间隔时间里，火车己在铁轨上走了这么远。这样，绝对静止的不 存在意味着，不能像亚里士多徳相信的那样，给事件指定一个绝对的空间的位置。事件的 位置以及它们之间的距离对于在火车上和铁轨上的人来讲是不同的，所以没有理由以为一 个人的处境比他人更优越。

牛顿对绝对位置或被称为绝对空间的不存在感到非常忧虑，因为这和他的绝对上帝的 观念不一致。事实上，即使绝对空间的不存在被隐含在他的定律中，他也拒绝接受。因为 这个非理性的信仰，他受到许多人的严厉批评，最有名的是贝克莱主教，他是一个相信所 有的物质实体、空间和时间都是虚妄的哲学家。当人们将贝克莱的见解告诉著名的约翰逊 博士时，他用脚尖踢到一块大石头上，并大声地说：“我要这样驳斥它！ ”

亚里士多徳和牛顿都相信绝对时间。也就是说，他们相信人们可以亳不含糊地测量两 个事件之间的时间间隔，只要用好的钟，不管谁去测量，这个时间都是一样的。时间相对 于空间是完全分开并独立的。这就是大部份人当作常识的观点。然而，我们必须改变这种 关于空间和时间的观念。虽然这种显而易见的常识可以很好地对付运动甚慢的诸如苹果、 行星的问题，但在处理以光速或接近光速运动的物体时却根本无效。

光以有限但非常高的速度传播的这一事实，由丹麦的天文学家欧尔•克里斯琴森•罗麦 于1676年第一次发现。他观察到，木星的月亮不是以等时间间隔从木星背后出来。不像如 果月亮以不变速度绕木星运动时人们所预料的那样。当地球和木星都绕着太阳公转时，它 们之间的距离在变化着。罗麦注意到我们离木星越远则木星的月食出现得越晚。他的论点 是，因为当我们离开更远时，光从木星月亮那儿要花更长的时间才能达到我们这儿。然 而，他测量到的木星到地球的距离变化不是非常准确，所以他的光速的数值为每秒140000 英里（1英里=1.609公里），而现在的值为每秒186000英里（1英里=1.609公里）。尽管如 此，罗麦不仅证明了光以有限速度运动，并且测量了光速，他的成就是卓越的——要知 道，这一切都是在牛顿发表《数学原理》之前11年进行的。

直到1865年，当英国的物理学家詹姆士•麦克斯韦成功地将当时用以描述电力和磁力 的部分理论统一起来以后，才有了光传播的真正的理论。麦克斯韦方程预言，在合并的电 磁场中可以存在波动的微扰，它们以固定的速度，正如池塘水面上的涟漪那样运动。如果 这些波的波长（两个波峰之间的距离）为1米或更长一些，这就是我们所谓的无线电波。 更短波长的波被称做微波（几个厘米）或红外线（长于万分之1厘米）。可见光的波长在 100万分之40到100万分之80厘米之间。更短的波长被称为紫外线、X射线和伽玛射线。

麦克斯韦理论预言，无线电波或光波应以某一固定的速度运动。但是牛顿理论己经摆 脱了绝对静止的观念，所以如果假定光是以固定的速度传播，人们必须说清这固定的速度 是相对于何物来测量的。这样人们提岀，甚至在“真空”中也存在着一种无所不在的称 为“以太”的物体。正如声波在空气中一样，光波应该通过这以太传播，所以光速应是相对 于以太而言。相对于以太运动的不同观察者，应看到光以不同的速度冲他们而来，但是光 对以太的速度是不变的。特别是当地球穿过以太绕太阳公转时，在地球通过以太运动的方 向测量的光速（当我们对光源运动时）应该大于在与运动垂直方向测量的光速（当我们不 对光源运动时）。1887年，阿尔贝特•麦克尔逊（后来成为美国第一个物理诺贝尔奖获得 者）和爱徳华•莫雷在克里夫兰的卡思应用科学学校进行了非常仔细的实验。他们将在地 球运动方向以及垂直于此方向的光速进行比较，使他们大为惊奇的是，他们发现这两个光 速完全一样！

在1887年到1905年之间，人们曾经好几次企图去解释麦克尔逊——莫雷实验。最著名 者为荷兰物理学家亨得利克•罗洛兹，他是依据相对于以太运动的物体的收缩和钟变慢的 机制。然而，一位迄至当时还不知名的瑞士专利局的职员阿尔贝特•爱因斯坦，在1905年 的一篇著名的论文中指出，只要人们愿意抛弃绝对时间的观念的话，整个以太的观念则是 多余的。几个星期之后，一位法国最重要的数学家亨利•彭加勒也提出类似的观点。爱因 斯坦的论证比彭加勒的论证更接近物理，因为后者将此考虑为数学问题。通常这个新理论 是归功于爱因斯坦，但彭加勒的名字在其中起了重要的作用。

这个被称之为相对论的基本假设是，不管观察者以任何速度作自由运动，相对于他们 而言，科学定律都应该是一样的。这对牛顿的运动定律当然是对的，但是现在这个观念被 扩展到包括马克斯韦理论和光速：不管观察者运动多快，他们应测量到一样的光速。这筒 单的观念有一些非凡的结论。可能最著名者莫过于质量和能量的等价，这可用爱因斯坦著 名的方程E=mc2来表达（这儿E是能量，m是质量，c是光速），以及没有任何东西能运 动得比光还快的定律。由于能量和质量的等价，物体由于它的运动所具的能量应该加到它 的质量上面去。换言之，要加速它将变得更为困难。这个效应只有当物体以接近于光速的 速度运动时才有实际的意义。例如，以10%光速运动的物体的质量只比原先增加了 0.5%,而以90%光速运动的物体，其质量变得比正常质量的两倍还多。当一个物体接近 光速时，它的质量上升得越来越快，它需要越来越多的能量才能进一步加速上去。实际上 它永远不可能达到光速，因为那时质量会变成无限大，而由质量能量等价原理，这就需要 无限大的能量才能做到。由于这个原因，相对论限制任何正常的物体永远以低于光速的速 度运动。只有光或其他没有内禀质量的波才能以光速运动。

相对论的一个同等卓越的成果是，它变革了我们对空间和时间的观念。在牛顿理论 中，如果有一光脉冲从一处发到另一处，（由于时间是绝对的）不同的观测者对这个过程 所花的时间不会有异议，但是他们不会在光走过的距离这一点上取得一致的意见（因为空 间不是绝对的）。由于光速等于这距离除以所花的时间，不同的观察者就测量到不同的光 速。另一方面，在相对论中，所有的观察者必须在光是以多快的速度运动上取得一致意 见。然而，他们在光走过多远的距离上不能取得一致意见。所以现在他们对光要花多少时 间上也不会取得一致意见。（无论如何，光所花的时间正是用光速——这一点所有的观察 者都是一致的——去除光所走的距离——这一点对他们来说是不一致的。）总之，相对论 终结了绝对时间的观念！这样，每个观察者都有以自己所携带的钟测量的时间，而不同观 察者携带的同样的钟的读数不必要一致。



图2.1时间用垂直坐标测量，离开观察者的距离用水平坐标测量。观察者在空间和时 间里的途径用左边的垂线表示。到事件去和从事件来的光线的途径用对角线表示。

每个观察者都可以用雷达去发出光脉冲或无线电波来测定一个事件在何处何时发生。 脉冲的一部分由事件反射回来后，观察者可在他接收到回波时测量时间。事件的时间可认 为是发出脉冲和脉冲反射回来被接收的两个时刻的中点：而事件的距离可取这来回过程时 间的一半乘以光速。（在这意义上，一个事件是发生在指定空间的一点以及指定时间的一 点的某件事。）这个意思己显示在图2.1上。这是时空图的一个例子。利用这个步骤，作 相互运动的观察者对同一事件可赋予不同的时间和位置。没有一个特别的观察者的测量比 任何其他人更正确，但所有这些测量都是相关的。只要一个观察者知道其他人的相对速 度，他就能准确算出其他人该赋予同一事件的时间和位置。

现在我们正是用这种方法来准确地测量距离，因为我们可以比测量长度更为准确地测 量时间。实际上，米是被定义为光在以钳原子钟测量的0.000000003335640952秒内走过的 距离（取这个特别的数字的原因是，因为它对应于历史上的米的定义——按照保存在巴黎 的特定钳棒上的两个刻度之间的距离）。同样，我们可以用叫做光秒的更方便更新的长度 单位，这就是简单地定义为光在一秒走过的距离。现在，我们在相对论中按照时间和光速 来定义距离，这样每个观察者都自动地测量出同样的光速（按照定义为每0. 000000003335640952秒之1米）*。*没有必要引入以太的观念，正如麦克尔 ——莫雷实验 显示的那样，以太的存在是无论如何检测不到的。然而，相对论迫使我们从根本上改变了 对时间和空间的观念。我们必须接受的观念是：时间不能完全脱离和独立于空间，而必须 和空间结合在一起形成所谓的时空的客体。

我们通常的经验是可以用三个数或座标去描述空间中的一点的位置。讐如，人们可以 说屋子里的一点是离开一堵墙7英尺（1英尺=0.3048米），离开另一堵墙3英尺（1英尺 =0.3048米），并且比地面高5英尺（1英尺=0.3048米）°人们也可以用一定的纬度、经度 和海拔来指定该点。人们可以自由地选用任何三个合适的坐标，虽然它们只在有限的范围 内有效。人们不是按照在伦敦皮卡迪里圆环以北和以西多少英里（1英里=1.609公里）以

及高于海平面多少英尺（1英尺=0.3048米）来指明月亮的位置，而是用离开太阳、离开行 星轨道面的距离以及月亮与太阳的连线和太阳与临近的一个恒星——例如a-半人马座—— 连线之夹角来描述之。甚至这些座标对于描写太阳在我们星系中的位置，或我们星系在局 部星系群中的位置也没有太多用处。事实上，人们可以用一族互相交迭的坐标碎片来描写 整个宇宙。在每一碎片中，人们可用不同的三个座标的集合来指明点的位置。

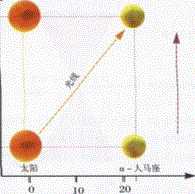


图2.2离开太阳的距离（以1012英里，1英里=1.609公里，为单位）

一个事件是发生于特定时刻和空间中特定的一点的某种东西。这样，人们可以用四个 数或座标来确定它，并且座标系的选择是任意的：人们可以用任何定义好的空间座标和一 个任意的时间测量。在相对论中，时间和空间座标没有真正的差别，犹如任何两个空间座 标没有真正的差别一样。讐如可以选择一族新的座标，使得第一个空间座标是旧的第一和 第二空间座标的组合。例如，测量地球上一点位置不用在伦敦皮卡迪里圆环以北和以西的 里数，而是用在它的东北和西北的里数（1英里=1.609公里）。类似地，人们在相对论中 可以用新的时间座标，它是旧的时间（以秒作单位）加上往北离开皮卡迪里的距离（以光 秒为单位）°

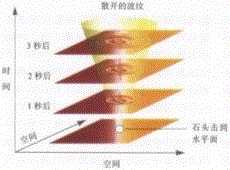


图2.3

将一个事件的四座标作为在所谓的时空的四维空间中指定其位置的手段经常是有助 的。对我来说，墓想三维空间己经足够困难！然而很容易画出二维空间图，例如地球的表 面。（地球的表面是两维的，因为它上面的点的位置可以用两个座标，例如纬度和经度来 确定。）通常我将使用二维图，向上増加的方向是时间，水平方向是其中的一个空间座 标。不管另外两个空间座标，或者有时用透视法将其中一个表示出来。（这些被称为时空 图，如图2.1所示。）例如，在图2.2中时间是向上的，并以年作单位，而沿着从太阳到a- 半人马座连线的距离在水平方向上以英哩来测量。太阳和a-半人马座通过时空的途径是由 图中的左边和右边的垂直线来表示。从太阳发出的光线沿着对角线走，并且要花4年的时 间才能从太阳走到a-半人马座。

正如我们己经看到的，麦克斯韦方程预言，不管光源的速度如何，光速应该是一样 的，这己被精密的测量所证实。这样，如果有一个光脉冲从一特定的空间的点在一特定的 时刻发出，在时间的进程中，它就会以光球面的形式发散开来，而光球面的形状和大小与 源的速度无关。在100万分之1秒后，光就散开成■-个半径为300米的球面：100万分之2秒 后，半径变成600米：等等。这正如同将一块石头扔到池塘里，水表面的涟漪向四周散开 一样，涟漪以圆周的形式散开并越变越大。如果将三维模型设想为包括二维的池塘水面和 一维时间，这些扩大的水波的圆圈就画出一个圆锥，其顶点即为石头击到水面的地方和时 间（图2.3） o类似地，从一个事件散开的光在四维的时空里形成了一个三维的圆锥，这 个圆锥称为事件的未来光锥。以同样的方法可以画出另一个称之为过去光锥的圆锥，它表 示所有可以用一光脉冲传播到该事件的事件的集合（图2.4） o

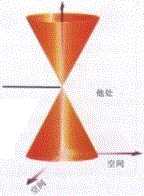


图2.4

对于给定的事件P,人们可以将宇宙中的其他事件分成三类。从事件P出发由一个粒 子或者波以等于或小于光速的速度运动能到达的那些事件称为属于P的未来。它们处于从 事件P发射的膨胀的光球面之内或之上。这样，在时空图中它们处于P的未来光锥的里面 或上面。因为没有任何东西比光走得更快，所以在P所发生的东西只能影响P的未来的事 件。

类似地，P的过去可被定义为下述的所有事件的集合，从这些事件可以等于或小于光 速的速度运动到达事件P。这样，它就是能影响发生在P的东西的所有事件的集合。不处 于P的未来或过去的事件被称之为处于P的他处（图2.5） o在这种事件处所发生的东西既 不能影响发生在P的东西，也不受发生在P的东西的影响。例如，假定太阳就在此刻停止 发光，它不会对此刻的地球发生影响，因为地球的此刻是在太阳熄灭这一事件的光锥之外 （图2.6） o我们只能在8分钟之后才知道这一事件，这是光从太阳到达我们所花的时间。

只有到那时候，地球上的事件才在太阳熄灭这一事件的将来光锥之内。同理，我们也不知 道这一时刻发生在宇宙中更远地方的事：我们看到的从很远星系来的光是在几百万年之前 发出的，在我们看到最远物体的情况下，光是在80亿年前发出的。这样当我们看宇宙时， 我们是在看它的过去。

其他 现在

A

图2.5

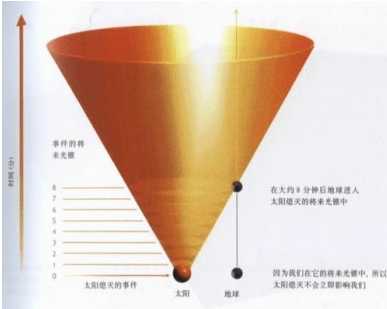
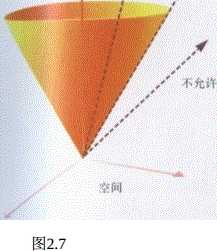


图2.6

如果人们忽略引力效应，正如1905年爱因斯坦和彭加勒所做的那样，人们就得到了称 为狭义相对论的理论。对于时空中的每一事件我们都可以做一个光锥（所有从该事件发出 的光的可能轨迹的集合），由于在每一事件处在任一方向的光的速度都一样，所以所有光 锥都是全等的，并朝着同一方向。这理论又告诉我们，没有东西走得比光更快。这意味 着，通过空间和时间的任何物体的轨迹必须由一根落在它上面的每一事件的光锥之内的线 来表示（图2.7）。



。质H物体

狭义相对论非常成功地解释了如下事实：对所有观察者而言，光速都是一样的（正如 麦克尔一莫雷实验所展示的那样）,并成功地描述了当物体以接近于光速运动时的行 为。然而，它和牛顿引力理论不相协调。牛顿理论说，物体之间的吸引力依赖于它们之间 的距离。这意味着，如果我们移动一个物体，另一物体所受的力就会立即改变。或换言 之，引力效应必须以无限速度来传递，而不像狭义相对论所要求的那样，只能以等于或低 于光速的速度来传递。爱因斯坦在1908年至1914年之间进行了多次不成功的尝试，企图去 找一个和狭义相对论相协调的引力理论。1915年，他终于提出了今天我们称之为广义相对 论的理论。

爱因斯坦提出了革命性的思想，即引力不像其他种类的力，而只不过是时空不是平坦 的这一事实的后果。正如早先他假定的那样，时空是由于在它中间的质量和能量的分布而 变弯曲或“翘曲”的。像地球这样的物体并非由于称为引力的力使之沿着弯曲轨道运动，而 是它沿着弯曲空间中最接近于直线的称之为测地线的轨迹运动。一根测地线是两邻近点之 间最短（或最长）的路径。例如，地球的表面是一弯曲的二维空间。地球上的测地线称为 大圆，是两点之间最近的路（图2.8）。由于测地线是两个机场之间的最短程，这正是领 航员叫飞行员飞行的航线。在广义相对论中，物体总是沿着四维时空的直线走。尽管如 此，在我们的三维空间看起来它是沿着弯曲的途径（这正如同看一架在非常多山的地面上 空飞行的飞机。虽然它沿着三维空间的直线飞，在二维的地面上它的影子却是沿着■-条弯 曲的路径）。



图2.8

太阳的质量引起时空的弯曲，使得在四维的时空中地球虽然沿着直线的轨迹，它却让 我们在三维空间中看起来是沿着一个圆周运动。事实上，广义相对论预言的行星轨道几乎 和牛顿引力理论所预言的完全一致。然而，对于水星，这颗离太阳最近、受到引力效应最 强、并具有被拉得相当长的轨道的行星，广义相对论预言其轨道椭圆的长轴绕着太阳以大 约每1万年1度的速率进动。这个效应虽然小，但在1915年前即被人们注意到了，并被作为 爱因斯坦理论的第一个验证。近年来，其他行星的和牛顿理论预言的甚至更小的轨道偏差 也己被雷达测量到，并且发现和广义相对论的预言相符。

光线也必须沿着时空的测地线走。空间是弯曲的事实又一次意味着，在空间中光线看 起来不是沿着直线走。这样，广义相对论预言光线必须被引力场所折弯。譬如，理论预 言，由于太阳的质量的缘故，太阳近处的点的光锥会向内稍微偏折。这表明，从远处恒星 发出的刚好通过太阳附近的光线会被折弯很小的角度，对于地球上的观察者而言，这恒星 显得是位于不同的位置（图2.9） o当然，如果从恒星来的光线总是在靠太阳很近的地方 穿过，则我们无从知道这光线是被偏折了，还是这恒星实际上就是在我们所看到的地方。 然而，当地球绕着太阳公转，不同的恒星从太阳后面通过，并且它们的光线被偏折。所 以，相对于其他恒星而言，它们改变了表观的位置。

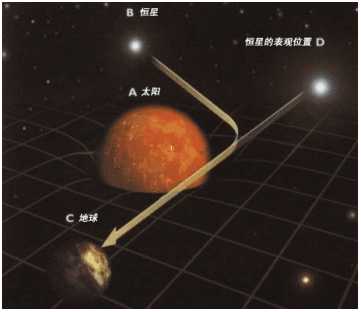


图2.9

在正常情况下，去观察到这个效应是非常困难的，这是由于太阳的光线使得人们不可 能观看天空上出现在太阳附近的恒星。然而，在日食时就可能观察到，这时太阳的光线被 月亮遮住了。由于第一次世界大战正在进行，爱因斯坦的光偏折的预言不可能在1915年立 即得到验证。直到1919年，一个英国的探险队从西非观测日食，指出光线确实像理论所预 言的那样被太阳所偏折。这次徳国人的理论为英国人所证明被欢呼为战后两国和好的伟大 行动。具有讽刺意味的是，后来人们检査这回探险所拍的照片，发现其误差和所企图测量 的效应同样大。他们的测量纯属是运气，或是已知他们所要得的结果的情形，这在科学上 是普遍发生的。然而，光偏折被后来的许多次观测准确地证实。

另一广义相对论的预言是，在像地球这样的大质量的物体附近，时间显得流逝得更慢 一些。这是因为光能量和它的频率（每秒钟里光振动的次数）有一关系：能量越大，则频 率越高。当光从地球的引力场往上走，它失去能量，因而其频率下降（这表明两个波峰之 间的时间间隔变大）。从在上面的某个人来看，下面发生的每一件事情都显得需要更长的 时间。利用一对安装在一个水塔的顶上和底下的非常准确的钟，这个预言在1962年被验证 到。发现底下的那只更接近地球的钟走得更慢些，这和广义相对论完全一致。地球上的不 同高度的钟的速度不同，这在目前具有相当的实用上的重要性，这是因为人们要用卫星发 岀的信号来作非常精确的导航。如果人们对广义相对论的预言无知，所计算的位置将会错 几英里（1英里=1.609公里）！

牛顿运动定律使空间中绝对位置的观念告终。而对论摆脱了绝对时间。考虑一对双生 子，假定其中一个孩子去山顶上生活，而另一个留在海平面，第一个将比第二个老得快。 这样，如果他们再次相会，一个会比另一个更老。在这种情形下，年纪的差别非常小。但 是，如果有一个孩子在以近于光速运动的空间飞船中作长途旅行，这种差别就会大得多。 当他回来时，他会比留在地球上另一个人年轻得多。这即是被称为双生子的佯谬。但是， 只是对于头脑中仍有绝对时间观念的人而言，这才是佯谬。在相对论中并没有一个唯一的 绝对时间，相反地，每个人都有他自己的时间测度，这依赖于他在何处并如何运动。

1915年之前，空间和时间被认为是事件在其中发生的固定舞台，而它们不受在其中发 生的事件的影响。即便在狭义相对论中，这也是对的。物体运动，力相互吸引并排斥，但 时间和空间则完全不受影响地延伸着。空间和时间很自然地被认为无限地向前延伸。

然而在广义相对论中，情况则相当不同。这时，空间和时间变成为动力量：当一个物 体运动时，或一个力起作用时，它影响了空间和时间的曲率：反过来，时空的结构影响了 物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅去影响、而且被发生在宇宙中的每一件事所影 响。正如一个人不用空间和时间的概念不能谈宇宙的事件一样，同样在广义相对论中，在 宇宙界限之外讲空间和时间是没有意义的。

在以后的几十年中，对空间和时间的新的理解是对我们的宇宙观的变革。古老的关于 基本上不变的、己经存在并将继续存在无限久的宇宙的观念，己为运动的、膨胀的并且看 来是从一个有限的过去开始并将在有限的将来终结的宇宙的观念所取代。这个变革正是下 一章的内容。几年之后又正是我研充理论物理的起始点。罗杰•彭罗斯和我指出，从爱因 斯坦广义相对论可推断出，宇宙必须有个开端，并可能有个终结。

第三章膨胀的宇宙

第三章膨胀的宇宙

如果在一个清澈的、无月亮的夜晚仰望星空，能看到的最亮的星体最可能是金星、火 星、木星和土星这几颗行星，还有巨大数目的类似太阳、但离开我们远得多的恒星。事实 上，当地球绕着太阳公转时，某些固定的恒星相互之间的位置确实起了非常微小的变化 ——它们不是真正固定不动的2这是因为它们距离我们相对靠近一些。当地球绕着太阳公 转时，相对于更远处的恒星的背景，我们从不同的位置观测它们。这是幸运的，因为它使 我们能直接测量这些恒星离开我们的距离，它们离我们越近，就显得移动得越多。最近的 恒星叫做普罗希马半人马座，它离我们大约4光年那么远（从它发出的光大约花4年才能到 达地球），也就是大约23万亿英里的距离。大部分其他可用肉眼看到的恒星离开我们的距 离均在几百光年之内。与之相比，我们太阳仅仅在8光分那么远！可见的恒星散布在整个 夜空，但是特别集中在一条称为银河的带上。远在公元1750年，就有些天文学家建议，如 果大部分可见的恒星处在一个单独的碟状的结构中，则银河的外观可以得到解释。碟状结 构的一个例子，便是今天我们叫做螺旋星系的东西。只有在几十年之后，天文学家威廉• 赫歇尔爵士才非常精心地对大量的恒星的位置和距离进行编目分类，从而证实了自己的观 念。即便如此，这个思想在本世纪初才完全被人们接受。

1924年，我们现代的宇宙图象才被奠定。那是因为美国天文学家埃得温•哈勃证明 了，我们的星系不是唯一的星系。事实上，还存在许多其他的星系，在它们之间是巨大的 空虚的太空。为了证明这些，他必须确定这些星系的距离。这些星系是如此之遥远，不像 邻近的恒星那样，它们确实显得是固定不动的。所以哈勃被迫用间接的手段去測量这些距 离。众所周知，恒星的表观亮度决定于两个因素：多少光被辐射出来（它的绝对星等）以 及它离我们多远。对于近处的恒星，我们可以测量其表观亮度和距离，这样我们可以算出 它的绝对亮度。相反，如果我们知道其他星系中恒星的绝对亮度，我们可用测量它们的表 观亮度的方法来算出它们的距离。哈勃注意到，当某些类型的恒星近到足够能被我们测量 时，它们有相同的绝对光度：所以他提出，如果我们在其他星系找岀这样的恒星，我们可 以假定它们有同样的绝对光度——这样就可计算出那个星系的距离。如果我们能对同一星 系中的许多恒星这样做，并且计算结果总是给出相同的距离，则我们对自己的估计就会有 相当的信赖度。

埃得温•哈勃用上述方法算岀了九个不同星系的距离。现在我们知道，我们的星系只 是用现代望远镜可以看到的几千亿个星系中的一个，每个星系本身都包含有几千亿颗恒 星。图3.1所示的便是一个螺旋星系的图，从生活在其他星系中的人来看我们的星系，想 必也是类似这个样子。我们生活在一个宽约为10万光年并慢慢旋转着的星系中：在它的螺 旋臂上的恒星绕着它的中心公转一圈大约花几亿年。我们的太阳只不过是一个平常的、平 均大小的、黄色的恒星，它靠近在一个螺旋臂的内边缘。我们离开亚里士多徳和托勒密的 观念肯定是相当遥远了，那时我们认为地球是宇宙的中心！



图3.1

恒星离开我们是如此之远，以致使我们只能看到极小的光点，而看不到它们的大小和 形状。这样怎么能区分不同的恒星种类呢？对于绝大多数的恒星，只有一个特征可供观测 ——光的颜色。牛顿发现，如果太阳光通过一个称为棱镜的三角形状的玻璃块，就会被分 解成像彩虹一样的分颜色（它的光谱）o将一个望远镜聚焦在一个单独的恒星或星系上， 人们就可类似地观察到从这恒星或星系来的光谱线。不同的恒星具有不同的光谱，但是不 同颜色的相对亮度总是刚好和一个红热的物体发出的光谱完全一致。（实际上，从一个不 透明的灼热的物体发出的光，有一个只依赖于它的温度的特征光谱——热谱。这意味着可 以从恒星的光谱得知它的温度。）并且，我们发现，某些非常特定的颜色在恒星光谱里找 不到，这些失去的谱线可以因不同的恒星而异。既然我们知道，每一化学元素都有非常独 特的吸收光谱线族，将它们和恒星光谱中失去的谱线相比较，我们就可以准确地确定恒星 大气中存在什么元素。

在20年代天文学家开始观察其他星系中的恒星光谱时，他们发现了最奇异的现象：它 们和我们的银河系一样具有吸收的特征线族，只是所有这些线族都向光谱的红端移动了同 样相对的量。为了理解这个含意，我们必须先理解多普勒效应。我们己经知道，可见光即 是电磁场的起伏或波动。光的波长（或者相邻波峰之间的距离）极其微小，约为 0.0000004至 0.0000008米。

光的不同波长正是人眼看到的不同颜色，最长的波长出现在光谱的红端，而最短的波 长在光谱的蓝端。想像在离开我们一个固定的距离处有一光源——例如恒星——以固定的 波长发出光波。显然我们接收到的波长和发射时的波长一样（星系的引力场没有强到足以 对它产生明显的效应）。现在假定这恒星光源开始向我们运动。当光源发出第二个波峰 时，它离开我们更近一些，这样两个波峰之间的距离比恒星静止时更小。这意味着，我们 接收到的波的波长比恒星静止时更短。相应地，如果光源离开我们运动，我们接收的波的 波长将更长。这意味着，当恒星离开我们而去时，它们的光谱向红端移动（红移）：而当 恒星趋近我们而来时，光谱则蓝移。这个称之为多普勒效应的频率和速度的关系是我们日 常所熟悉的，例如我们听路上来往小汽车的声音：当它开过来时，它的发动机的音调变高 （对应于声波的高频率）：当它通过我们身边而离开时，它的音调变低。光波或无线电波 的行为与之类似。警察就是利用多普勒效应的原理，以无线电波脉冲从车上反射回来的频 率来测量车速。

在哈勃证明了其他星系存在之后的几年里，他花时间为它们的距离以及观察到的光谱 分类。那时候大部份人相信，这些星系的运动相当紊乱，所以预料会发现和红移光谱一样 多的蓝移光谱。但是，十分令人惊异的是，他发现大部份星系是红移的——几乎所有都远 离我们而去！更惊异的是1929年哈勃发表的结果：甚至星系红移的大小也不是杂乱无章 的，而是和星系离开我们的距离成正比。换句话讲，星系越远，则它离开我们运动得越 快！这表明宇宙不可能像原先人们所想像的那样处于静态，而实际上是在膨胀：不同星系 之间的距离一直在増加着。

宇宙膨胀的发现是20世纪最伟大的智慧革命之一。事后想起来，何以过去从来没有人 想到这一点？！牛顿或其他人应该会意识到，静态的宇宙在引力的影响下会很快开始收 缩。然而现在假定宇宙正在膨胀，如果它膨胀得相当慢，引力会使之最终停止膨胀，然后 开始收缩。但是，如果它膨胀得比某一临界速率更快，引力则永远不足够强而使其膨胀停 止，宇宙就永远继续膨胀下去。这有点像一个人在地球表面引燃火箭上天时发生的情形， 如果火箭的速度相当慢，引力将最终使之停止并折回地面：另一方面，如果火箭具有比某 一临界值（大约每秒7英里）更高的速度，引力的强度不足以将其拉回，所以它将继续永 远飞离地球。19世纪、18世纪甚至17世纪晚期的任何时候，人们都可以从牛顿的引力论预 言出宇宙的这个行为。然而，静态宇宙的信念是如此之强，以至于一直维持到了20世纪的 早期。甚至爱因斯坦于1915年发表其广义相对论时，还是如此之肯定宇宙必须是静态的， 以使得他在其方程中不得不引进一个所谓的宇宙常数来修正自己的理论，使静态的宇宙成 为可能。爱因斯坦引入一个新的“反引力”，这力不像其他的力那样，不发源于任何特别的 源，而是空间——时间结构所固有的。他宣称，空间——时间有一内在的膨胀的趋向，这 可以用来刚好去平衡宇宙间所有物质的相互吸引，结果使宇宙成为静态的。当爱因斯坦和 其他物理学家正在想方设法避免广义相对论的非静态宇宙的预言时，看来只有一个人，即 俄国物理学家和数学家亚历山大•弗利徳曼愿意只用广义相对论着手解释它。

弗利徳曼对于宇宙作了两个非常简单的假定：我们不论往哪个方向看，也不论在任何 地方进行观察，宇宙看起来都是一样的。弗利徳曼指出，仅仅从这两个观念岀发，我们就 应该预料宇宙不是静态的。事实上，弗利徳曼在1922年所做的预言，正是几年之后埃得温 •哈勃所观察到的结果。

很清楚，关于在任何方向上宇宙都显得是一样的假设实际上是不对的。例如，正如我 们所看到的，我们星系中的其他恒星形成了横贯夜空的叫做银河系的光带。但是如果看得 更远，星系数目就或多或少显得是同样的。所以假定我们在比星系间距离更大的尺度下来 观察，而不管在小尺度下的差异，则宇宙确实在所有的方向看起来是大致一样的。在很长 的时间里，这为弗利徳曼的假设——作为实际宇宙的粗糙近似提供了充分的证实。但是， 近世出现的一桩幸运的事件所揭示的事实说明了，弗利徳曼假设实际上异常准确地描述了 我们的宇宙。

1965年，美国新泽西州贝尔电话实验室的阿诺•彭齐亚斯和罗伯特•威尔逊正在检测一 个非常灵敏的微波探测器时（微波正如光波，但是它的波长大约为1英寸），他们的检测 器收到了比预想的还要大的噪声。彭齐亚斯和威尔逊为此而忧虑，这噪声不像是从任何特 别方向来的。首先他们在探测器上发现了鸟粪并检查了其他可能的故障，但很快就排除了 这些可能性。他们知道，当探测器倾斜地指向天空时，从大气层里来的噪声应该比原先垂 直指向时更强，因为光线在沿着靠近地平线方向比在头顶方向要穿过更厚的大气。然而， 不管探测器朝什么方向，这额外的噪声都是一样的，所以它必须是从大气层以外来的，并 且在白天、夜晚、整年，也就是甚至地球绕着自己的轴自转或绕太阳公转时也是一样的。 这表明，这辐射必须来自太阳系以外，甚至星系之外，否则当地球的运动使探测器指向不 同方向时，噪声必须变化。

事实上，我们知道这辐射必须穿过我们可观察到的宇宙的大部分，并且由于它在不同 方向都一样，至少在大尺度下，这宇宙也必须是各向同性的。现在我们知道，不管我们朝 什么方向看，这噪声的变化总是非常小。这样，彭齐亚斯和威尔逊无意中非常精确地证实 了弗利徳曼的第一个假设。然而，由于宇宙并非在每一个方向上，而是在大尺度的平均上 相同，所以微波也不可能在每一个方向上完全相同。在不同的方向之间必须有一些小变 化。1992年宇宙背景探险者，或称为COBE,首次把它们检测到，其幅度大约为10万分之 lo尽管这些变化很小，正如我们将在第八章解释的，但它们非常重要。

大约同时，在附近的普林斯顿的两位美国物理学家，罗伯特•狄克和詹姆士•皮帖尔斯 也对微波感兴趣。他们正在研究乔治•伽莫夫（曾为亚历山大•弗利徳曼的学生）的一个见 解：早期的宇宙必须是非常密集的、白热的。狄克和皮帕尔斯认为，我们仍然能看到早期 宇宙的白热，这是因为光是从它的非常远的部分来，刚好现在才到达我们这儿。然而，宇 宙的膨胀使得这光被如此厉害地红移，以至于现在只能作为微波辐射被我们所看到。正当 狄克和皮帕尔斯准备寻找这辐射时，彭齐亚斯和威尔逊听到了他们所进行的工作，并意识 到，自己己经找到了它。为此，彭齐亚斯和威尔逊被授予1978年的诺贝尔奖（狄克和皮帕 尔斯看来有点难过，更别提伽莫夫了！）

现在初看起来，关于宇宙在任何方向看起来都一样的所有证据似乎暗示，我们在宇宙 的位置有点特殊。特别是，如果我们看到所有其他的星系都远离我们而去，那似乎我们必 须在宇宙的中心。然而，还存在另外的解释：从任何其他星系上看宇宙，在任何方向上也 都一样。我们知道，这正是弗利徳曼的第二个假设。我们没有任何科学的证据去相信或反 驳这个假设。我们之所以相信它只是基于谦虚：因为如果宇宙只是在我们这儿看起来各向 同性，而在宇宙的其他地方并非如此，则是非常奇异的！在弗利徳曼模型中，所有的星系 都直接相互离开。这种情形很像一个画上好多斑点的气球被逐渐吹胀。当气球膨胀时，任 何两个斑点之间的距离加大，但是没有一个斑点可认为是膨胀的中心。并且斑点相离得越 远，则它们互相离开得越快。类似地，在弗利徳曼的模型中，任何两个星系互相离开的速 度和它们之间的距离成正比。所以它预言，星系的红移应与离开我们的距离成正比，这正 是哈勃所发现的。尽管他的模型的成功以及预言了哈勃的观测，但是直到1935年，为了响 应哈勃的宇宙的均匀膨胀的发现，美国物理学家哈瓦•罗伯逊和英国数学家阿瑟•瓦尔克提 岀了类似的模型后，弗利徳曼的工作在西方才被普遍知道。

虽然弗利徳變只找到一个模型，其实满足他的两个基本假设的共有三种模型。在第一 种模型（即弗利徳曼找到的）中，宇宙膨胀得足够慢，以至于在不同星系之间的引力使膨 胀变慢下来，并最终使之停止。然后星系开始相互靠近，宇宙开始收缩。图3.2表示随时 间增加两个邻近的星系的距离的变化。刚开始时距离为零，接着它增长到最大值，然后又 减小到零：在第二类解中，宇宙膨胀得如此之快，以至于引力虽然能使之缓慢一些，却永 远不能使之停止。图3.3表示此模型中的邻近星系的距离随时间的变化。刚开始时距离为 零，最后星系以稳恒的速度相互离开：最后，还有第三类解，宇宙的膨胀快到足以刚好避 免坍缩。正如图3.4所示，星系的距离从零开始，然后永远增大。然而，虽然星系分开的 速度永远不会变为零，这速度却越变越小。

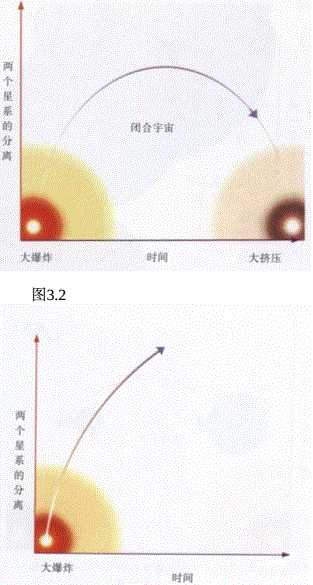


图3.3

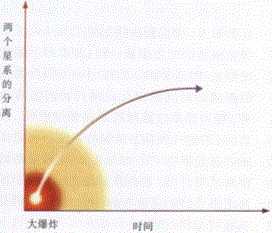


图3.4

第一类弗利徳曼模型的奇异特点是，宇宙在空间上不是无限的，并且是没有边界的。 引力是如此之强，以至于空间被折弯而又绕回到自身，使之相当像地球的表面。如果一个 人在地球的表面上沿着一定的方向不停地旅行，他将永远不会遇到一个不可超越的障碍或 从边缘掉下去，而是最终走到他出发的那一点。第一类弗利徳曼模型中的空间正与此非常 相像，只不过地球表面是二维的，而它是三维的罢了。第四维时间的范围也是有限的，然 而它像一根有两个端点或边界即开端和终端的线。以后我们会看到，当人们将广义相对论 和量子力学的测不准原理结合在一起时，就可能使空间和时间都成为有限的、但却没有任 何边缘或边界。

一个人绕宇宙一周最终可回到出发点的思想是科学幻想的好题材，但实际上它并没有 多大意义。因为可以指出，一个人还没来得及绕回一圈，宇宙已经坍缩到了零尺度。你必 须旅行得比光波还快，才能在宇宙终结之前绕回到你的出发点——而这是不允许的！

在第一类弗利徳曼模型中，宇宙膨胀后又坍缩，空间如同地球表面那样，弯曲后又折 回到自己。在第二类永远膨胀的模型中，空间以另外的方式弯曲，如同一个马鞍面。所 以，在这种情形下空间是无限的。最后，在第三类刚好以临界速率膨胀的弗利徳曼模型 中，空间是平坦的（所以也是无限的）»

但是究竟可用何种弗利徳曼模型来描述我们的宇宙呢？宇宙最终会停止膨胀并开始收 缩或将永远膨胀吗？要回答这个问题，我们必须知道现在的宇宙膨胀速度和它现在的平均 密度。如果密度比一个由膨胀率决定的某临界值还小，则引力太弱不足于将膨胀停住；如 果密度比这临界值大，则引力会在未来的某一时刻将膨胀停止并使宇宙坍缩。

利用多普勒效应，可由测量星系离开我们的速度来确定现在的宇宙膨胀速度。这可以 非常精确地实现。然而，因为我们不是直接地测量星系的距离，所以它们的距离知道得不 是非常清楚。所有我们知道的是，宇宙在每10亿年里膨胀5%至10%。然而，我们对现在 宇宙的平均密度测量得更不准。我们如果将银河系和其他所有能看到的星系的恒星的质量 加起来，甚至是按对膨胀率的最低的估值而言，其质量总量比用以阻止膨胀的临界值的 1%还少。然而，在我们以及其他的星系里应该有大量的“暗物质”，那是我们不能直接看 到的，但由于它的引力对星系中恒星轨道的影响，我们知道它必定存在。况且人们发现， 大多数星系是成团的。类似地，由其对星系运动的效应，我们能推断出还有更多的暗物质 存在于这些成团的星系之间。将所有这些暗物质加在一起，我们仍只能获得必须用以停止 膨胀的密度的l/10o然而，我们不能排除这样的可能性，可能还有我们未能探测到的其他 的物质形式几乎均匀地分布于整个宇宙，它仍可以使得宇宙的平均密度达到停止膨胀所必 要的临界值。所以，现在的证据暗示，宇宙可能会无限地膨胀。但是，所有我们能真正了 解的是，既然它己经膨胀了 100亿年，即便如果宇宙还要坍缩，则至少要再过这么久才有 可能。这不应使我们过度忧虑——到那时候。除非我们到太阳系以外开拓殖民地，人们早 由于太阳的熄灭而死亡殆尽！

所有的弗利徳曼解都具有一个特点，即在过去的某一时刻（约100到200亿年之前）邻 近星系之间的距离为零。在这被我们称之为大爆炸的那一时刻，宇宙的密度和空间一时 间曲率都是无穷大。因为数学不能处理无穷大的数，这表明广义相对论（弗利徳曼解以此 为基础）预言，在宇宙中存在一点，在该处理论自身失效。这正是数学中称为奇点的一个 例子。事实上，我们所有的科学理论都是基于空间——时间是光滑的和几乎平坦的基础上 被表述的，所以它们在空间一 t间曲率为无穷大的大爆炸奇点处失效。这表明，即使在 大爆炸前存在事件，人们也不可能用之去确定之后所要发生的事件，因为可预见性在大爆 炸处失效了。

正是这样，与之相应的，如果我们只知道在大爆炸后发生的事件，我们也不能确定在 这之前发生的事件。就我们而言，发生于大爆炸之前的事件不能有后果，所以并不构成我 们宇宙的科学模型的一部分。因此，我们应将它们从我们模型中割除掉，并宣称时间是从 大爆炸开始的。

很多人不喜欢时间有个开端的观念，可能是因为它略带有神的干涉的味道。（另一方 面，天主教抓住了大爆炸模型，并在1951年正式宣布，它和《圣经》相一致。）所以，许 多人企图避免大爆炸曾经存在过的这一结论。所谓的稳态理论得到过最广泛的支持。这是 由两个纳粹占领的奥地利来的难民，赫曼•邦迪和托马斯•高尔徳，以及一个战时和他们一 道从事研制雷达的英国人，弗雷得•霍伊尔于1948年共同提出的。其想法是，当星系互相 离开时，在它们中的间隙由正在连续产生的新物质不断地形成新的星系。因此，在空间的 所有地方以及在所有的时间，宇宙看起来大致是相同的。稳态理论需要对广义相对论进行 修正，使之允许物质的。连续生成，但是其产生率是如此之低（大约每立方公里每年才产 生一个粒子），以至于不与实验相冲突。在第一章叙述的意义上，这是一个好的科学理 论：它非常简单，并做岀确定的预言让观察检验。其中一个预言是，我们在宇宙的任何时 候任何地方看给定的空间体积内星系或类似物体的数目必须一样。本世纪50年代晚期和60 年代早期，由马丁•赖尔（他战时也和邦迪•高尔徳以及霍伊尔共事作雷达研究）领导的一 个天文学家小组在剑桥对从外空间来的射电源进行了普查。这个小组指出，这些射电源的 大部分是位于我们星系之外（它们之中的许多确实可被认证与其他星系相关），并且存在 的弱源比强源多得多。他们将弱源解释为更遥远的源，强源为较近的源。结果发现，单位 空间体积内普通的源在近处比远处稀少。这可能表明，我们处于宇宙的一个巨大区域的中 心，在这儿的源比其他地方稀少。另外的一个解释是，宇宙在射电开始发出的过去的那一 时刻具有比我们现有的更密集的源。任何一种解释都和稳态理论相矛盾。况且，1965年彭 齐亚斯和威尔逊的微波背景辐射的发现又指岀，宇宙在过去必须密集得多。因此稳态理论 必须被抛弃。

1963年，两位苏联科学家欧格尼•利弗席兹和伊萨克•哈拉尼可夫做了另一个尝试，设 法避免存在大爆炸并因此引起时间起点的问题。他们提出：大爆炸可能只是弗利徳曼模型 的特性，这个模型毕竟只是真实宇宙的近似。也许，所有大体类似实在宇宙的模型中，只 有弗利徳曼模型包含大爆炸奇点。在弗利徳曼模型中，所有星系都是直接互相离开——所 以一点不奇怪，在过去的某一时刻它们必须在同一处。然而，在实际的宇宙中，星系不仅 仅是直接互相离开——它也有一点横向速度。所以，在现实中它们从来没必要在同一处， 只不过非常靠近而已。也许，现在膨胀着的宇宙不是大爆炸奇点的结果，而是从早期的收 缩相而来的：当宇宙坍缩时，其中的粒子可以不都碰撞，而是互相离得很近穿过然后又离 开，产生了现在的宇宙膨胀。何以得知这实际的宇宙是否从大爆炸开始的呢？利弗席兹和 哈拉尼可夫研究的模型大体和弗利徳曼模型相像，但是考虑了实际宇宙中的星系的不规则 性和杂乱速度。他们指出，即使星系不再总是直接互相离开，这样的模型也可从一个大爆 炸开始。但是他们宣称，这只可能发生在一定的例外的模型中，星系在这儿以正确的方式 运动。他们论证道：似乎没有大爆炸奇点的类弗利徳曼模型比有此奇点的模型多无限多 倍，所以我们的结论应该是，实际中没有过大爆炸。然而，他们后来意识到，存在更为广 泛的具有奇性的类弗利徳曼模型，星系在那儿并不需要以任何特别的方式运动。所以， 1970年他们收回了自己的宣布。

利弗席兹和哈拉尼科夫的工作是有价值的。因为它显示了，如果广义相对论是正确 的，宇宙可以有过奇点，一个大爆炸。然而，它没有解决关键的问题：广义相对论是否预 言我们的宇宙必须有过大爆炸或时间的开端？对这个问题，英国数学家兼物理学家罗杰• 彭罗斯在1965年以完全不同的手段给出了回答。利用广义相对论中光锥行为的方式以及引 力总是吸引这一事实，他指出，坍缩的恒星在自己的引力作用下被陷入到一个区域之中， 其表面最终缩小到零。并且由于这区域的表面缩小到零，它的体积也应如此。恒星中的所 有物质将被压缩到一个零体积的区域里，所以物质的密度和空间——时间的曲率变成无限 大。换言之，人们得到了一个奇点，它被包含在叫做黑洞的空间——时间的一个区域中。

初看起来，彭罗斯的结果只适用于恒星，它并没有涉及到任何关于整个宇宙的过去是 否有个大爆炸奇点的问题。然而，正当彭罗斯在创造他的定理之时，我是一个正在尽力寻 求一个问题可用之完成博士论文的研究生。两年之前我即被诊断得了ALS,通常又被称为 卢伽雷病或运动神经细胞病，并且我被告知只有一两年可活了。在这种情况下，看来没有 很多必要攻读我的博士学位了——我预料不能活那么久。然而两年过去了，我没有糟到那 种程度。事实上，我的事情还进行得相当好，还和一个非常好的姑娘简•瓦尔徳定婚了。 但是为了结婚，我需要一个工作：为了得到工作，我需要一个博士学位。

1965年，我读到彭罗斯关于任何物体受到引力坍缩必须最终形成一个奇点的定理。我 很快意识到，如果人们将彭罗斯定理中的时间方向颠倒以使坍缩变成膨胀，假定现在宇宙 在大尺度上大体类似弗利徳曼模型，这定理的条件仍然成立。彭罗斯定理指出，任何坍缩 必须终结于一个奇点：其时间颠倒的论断则是，任何类弗利徳曼膨胀模型必须从一个奇点 开始。为了技巧上的原因，彭罗斯定理需要以宇宙在空间上是无限的为条件。所以事实 上，我能用它来证明，只有当宇宙膨胀得快到足够以避免重新坍缩时（因为只有那些弗利 徳曼模型才是空间无限的），必须存在一个奇点。

以后的几年中，我发展了新的数学技巧，从证明奇性必须发生的定理中除去了这个和 其他技术上的条件。最后的结果是1970年彭罗斯和我的合作论文。那篇论文最后证明了， 假定广义相对论是正确的，宇宙包含着我们观测到的这么多物质，则过去必须有一大爆炸 奇点。我们的工作遭到许许多多的反对，部分来自苏联人，由于他们对科学宿命论的信 仰：另一部分来自某些人，他们不喜欢整个奇点的观念，并认为这糟蹋了爱因斯坦理论的 完美。然而，人实在不能辩贏数学定理。所以最终我们的工作被广泛接受，现在几乎每个 人都假定宇宙是从一个大爆炸奇点开始的。颇具讽刺意味的是，现在我改变了想法，试图 去说服其他物理学家，事实上在宇宙的开端并没有奇点——正如我们将看到的，只要考虑 了量子效应，奇性则会消失。

从这一章我们看到，在不到半个世纪的时间里，人们几千年来形成的关于宇宙的观点 被改变了。哈勃关于宇宙膨胀的发现，并意识到我们的行星在茫茫的宇宙中的微不足道， 只不过是起点而己。随着实验和理论证据的积累，人们越来越清楚地认识到，宇宙在时间 上必须有个开端。直到1970年，在爱因斯坦的广义相对论的基础上，这才被彭罗斯和我所 证明。这个证明显示，广义相对论只是一个不完全的理论，它不能告诉我们宇宙是如何开 始的。因为它预言，所有包括它自己在内的物理理论都在宇宙的开端失效。然而，广义相 对论宣称自己只是一个部分理论，所以奇点定理真正所显示的是，在极早期宇宙中有过一 个时刻，那时宇宙是如此之小，以至于人们不能再不管20世纪另一个伟大的部分理论—— 量子力学的小尺度效应。20世纪70年代初期，我们被迫从对极其巨大范围的理论研究转到 对极其微小范围的理论研究。下面在我们进而努力将这两个部分理论结合成一个单独的量 子引力论之前，首先描述量子力学这个理论。

第四章不确定性原理

第四章不确定性原理

科学理论，特别是牛顿引力论的成功，使得法国科学家拉普拉斯侯爵在19世纪初论 断，宇宙是完全被决定的。他认为存在一组科学定律，只要我们完全知道宇宙在某一时刻 的状态，我们便能依此预言宇宙中将会发生的任一事件。例如，假定我们知道某一个时刻 的太阳和行星的位置和速度，则可用牛顿定律计算出在任何其他时刻的太阳系的状态。这 种情形下的宿命论是显而易见的，但拉普拉斯进一步假定存在着某些定律，它们类似地制 约其他每一件东西，包括人类的行为。

很多人强烈地抵制这种科学宿命论的教义，他们感到这侵犯了上帝干涉世界的自由。 但直到本世纪初，这种观念仍被认为是科学的标准假定。这种信念必须被抛弃的一个最初 的征兆，是由英国科学家瑞利勋爵和詹姆斯•金斯爵士所做的计算，他们指出一个热的物 体——例如恒星——必须以无限大的速率辐射出能量。按照当时我们所相信的定律，一个 热体必须在所有的频段同等地发出电磁波（诸如无线电波、可见光或X射线）o例如，一 个热体在1万亿赫兹到2万亿赫兹频率之间发出和在2万亿赫兹到3万亿赫兹频率之间同样能 量的波。而既然波的频谱是无限的，这意味着辐射出的总能量必须是无限的。

为了避免这显然荒谬的结果，徳国科学家马克斯•普郎克在1900年提出，光波、X射 线和其他波不能以任意的速率辐射，而必须以某种称为量子的形式发射。并且，每个量子 具有确定的能量，波的频率越高，其能量越大。这样，在足够高的频率下，辐射单独量子 所需要的能量比所能得到的还要多。因此，在高频下辐射被减少了，物体丧失能量的速率 变成有限的了。

量子假设可以非常好地解释所观测到的热体的发射率，但直到1926年另一个徳国科学 家威纳•海森堡提出著名的不确定性原理之后，它对宿命论的含义才被意识到。为了预言 一个粒子未来的位置和速度，人们必须能准确地测量它现在的位置和速度。显而易见的办 法是将光照到这粒子上，一部分光波被此粒子散射开来，由此指明它的位置。然而，人们 不可能将粒子的位置确定到比光的两个波峰之间距离更小的程度，所以必须用短波长的光 来测量粒子的位置。现在，由普郎克的量子假设，人们不能用任意少的光的数量，至少要 用一个光量子。这量子会扰动这粒子，并以一种不能预见的方式改变粒子的速度。而且， 位置测量得越准确，所需的波长就越短，单独量子的能量就越大，这样粒子的速度就被扰 动得越厉害。换言之，你对粒子的位置测量得越准确，你对速度的测量就越不准确，反之 亦然。海森堡指出，粒子位置的不确定性乘上粒子质量再乘以速度的不确定性不能小于一 个确定量——普郎克常数。并且，这个极限既不依赖于测量粒子位置和速度的方法，也不 依赖于粒子的种类。海森堡不确定性原理是世界的一个基本的不可回避的性质。

不确定性原理对我们世界观有非常深远的影响。甚至到了50多年之后，它还不为许多 哲学家所鉴赏，仍然是许多争议的主题。不确定性原理使拉普拉斯科学理论，即一个完全 宿命论的宇宙模型的梦想寿终正寝：如果人们甚至不能准确地测量宇宙的现在的态，就肯 定不能准确地预言将来的事件了！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，这些生物能够不干扰宇宙地观测它现在的状态。然而，对于我们 这些芸芸众生而言，这样的宇宙模型并没有太多的兴趣。看来，最好是采用称为奥铿剃刀 的经济学原理，将理论中不能被观测到的所有特征都割除掉。20世纪20年代。在不确定性 原理的基础上，海森堡、厄文•薛定澤和保尔•狄拉克运用这种手段将力学重新表达成称为

量子力学的新理论。在此理论中，粒子不再有分别被很好定义的、能被同时观测的位置和 速度，而代之以位置和速度的结合物的量子态.

一般而言，量子力学并不对一次观测预言一个单独的确定结果。代之，它预言一组不 同的可能发生的结果，并告诉我们每个结果出现的概率。也就是说，如果我们对大屋的类 似的系统作同样的测量，每一个系统以同样的方式起始，我们将会找到测量的结果为A出 现一定的次数，为B出现另一不同的次数等等•人们可以预言结果为A或B的出现的次数 的近似值，但不能对个别测量的特定结果作出预言.因而量子力学为科学引进了不可避免 的非预见性或偶然性•尽管爱因斯坦在发展这些观念时起了很大作用，但他非常强烈地反 对这些.他之所以得到诺贝尔奖就是因为对量子理论的贡献.即使这样，他也从不接受宇 宙受机遇控制的观点；他的感觉可表达成他著名的断言：“上帝不玩弄骰子.”然而，大多 数其他科学家愿意接受量子力学，因为它和实验符合得很完美.它的的确确成为一个极其 成功的理论，并成为几乎所有现代科学技术的基础.它制约着晶体管和集成电路的行为， 而这些正是电子设备诸如电视,计算机的基本元件.它并且是现代化学和生物学的基础. 物理科学未让呈于力学进入的唯一领域是引力和宇宙的大尺度结构.

虽然光是由波组成的，普郎克的量子假设告诉我们.在某些方而.它的行为似乎显现 出它是由粒子组成的——它只能以量子的形式被发射或吸收•同样地•海森堡的不确定性 原理意味着，粒子在某些方而的行为像波一样：它们没有确定的位置.而是被“抹平”成一 定的几率分布。量:子力学的理论是基于一个全新的数学基础之上，不再按照粒子和波动来 描述实际的世界；而只不过利用这些术语，来描述对世界的观测而己•所以，在量:子力学 中存在着波动和粒子的二重性：为了某些目的将波动想像成为粒子是有助的，反之亦然. 这导致一个很重要的后果，人们诃以观察到两组波或粒子的所谓的干涉，也就是一束波的 波峰可以和另束波的波谷相重合。这两束波互相抵消，而不是像人们预料的那样，迭加 在-起形成更强的波（图4.1） o 一个熟知的光的干涉的例子是，肥皂泡上经常能看到颜 色。这是因为从形成泡沫的很薄的水膜的两边反射冋来的光互相干涉而引起的。白光含有 所有不同波长或颜色的光波，从水膜-边反射冋来的具有一定波K的波的波峰和从另-•边 反射的波谷相重合时，对应于,此波K的颜色就不在反射光中出现，所以反射光就显得五彩 缤纷。

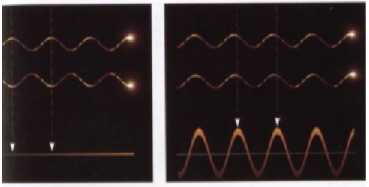


图4.1

由于量于力学引进的二重性.粒于也会产生干涉.一个著名的例于即是所谓的双縫实 羚（图4.2） • 一个帯右两个平行狹錠的隔板，在它的一边放上一个特定颜色（即特定波 K）的光源.大部分光都射在隔板上，但是一小部分光通过这两条缝.现在假定将一个屏 暮放到隔板的另一边•屏暮上的任何一点都能接收到两个縫来的波.然而，-・般来说，光

从光源通过这两个狭缝传到屏幕上的距离是不同的.这表明，从狭缝来的光到达屏幕之时 不再是同位相的；有些地方波动互相抵消，其他地方它们互相加强，结果形成有亮暗条纹 的特征花样。

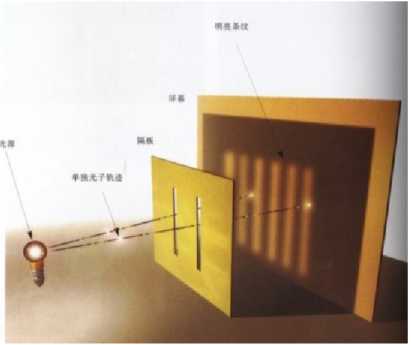


图42

非常令人惊异的是，如果将光源换成粒子源，窖如具冇一定速度（这表明共对应的波 有同样的波K）的电子束，人们得到完全同样类型的条纹.这显得更为古怪，因为如果只 有一条裂缝.则得不到任何条纹,只不过是电子通过这屏幕的均匀分布.人们因此口J能会 想到.另开一条缝只不过是打到屏幕上毎一点的电子数目增加而己.但是，实际上由于干 涉.在某些地方反而减少了.如果在一个时刻只有一个电子被发岀通过狭縫.人们会以 为.待个电子只穿过其中的一条缝，这样它的行为正如同另一个狭缝不存在时一# 一屏 幕会给岀一个均匀的分布.然而.实际上即使电子是一个一个地发出.条纹仍然岀现，所 以每个电子必须在同一时刻通过两个小缝！

粒子间的干涉现象.对于我们理解作为化学和生物以及由之构成我们和我们周围的所 有东西的基本单元的原子的结构是关健的•在本世纪初.人们认为原子和行星绕若太阳公 转相当类似，在这儿电子（带负电荷的粒子）饶若带正电荷的中心的核转动.正电荷和负 电荷之间的吸引力被认为是用以维持电了的轨道，正如同行星和太阳之间的万右引力用以 维持行星的轨道-•样。麻烦在亍，在量\*力学之前，力学和电学的定仲预言，电子会失去 能量并以螺旋线的轨道落向并最终撞击到核上去。这表明塩了（实际上所有的物质）都会 很快地坍缩成-种非常紧密的状态。丹麦科学家尼尔斯•玻尔在1913年，为此问题找到了 部分的解答。他认为，也许电子不能允许在离中心核任意远的地方，而只允许在-•些指定 的质离处公转。如果我们再假定，只冇-个或两个电子罷在这些距离E的任一轨道上公 转.那就解决了原子坍缩的问題。因为电子除了充满最小距离和最小能量的轨道外.不能 进一步作螺旋运动向核麻近。

对于最筒取的塩子一気原氏 这个模型给出了相当好的解耗.这儿只冇-个也子绕

着氢原子核运动。但人们不清楚如何将其推广到更复杂的原子去。并且，对于可允许轨道 的有限集合的思想显得非常任意。量子力学的新理论解决了这一困难。原来一个绕核运动 的电荷可看成一种波，其波长依赖于其速度。对于一定的轨道，轨道的长度对应于整数

（而不是分数）倍电子的波长。对于这些轨道，每绕一圈波峰总在同一位置，所以波就互 相迭加：这些轨道对应于玻尔的可允许的轨道。然而，对于那些长度不为波长整数倍的轨 道，当电子绕着运动时，每个波峰将最终被波谷所抵消：这些轨道是不能允许的。

美国科学家里查徳.费因曼引入的所谓对历史求和（即路径积分）的方法是一个波粒 二像性的很好的暴写。在这方法中，粒子不像在经典亦即非量子理论中那样，在时空中只 有一个历史或一个轨道，而是认为从A到B粒子可走任何可能的轨道。对应于每个轨道有 一对数：一个数表示波的幅度：另一个表示在周期循环中的位置（即相位）。从A走到B 的几率是将所有轨道的波加起来。一般说来，如果比较一族邻近的轨道，相位或周期循环 中的位置会差别很大。这表明相应于这些轨道的波几乎都互相抵消了。然而，对于某些邻 近轨道的集合，它们之间的相位没有很大变化，这些轨道的波不会抵消。这种轨道即对应 于玻尔的允许轨道。

用这些思想以具体的数学形式，可以相对直截了当地计算更复杂的原子甚至分子的允 许轨道。分子是由一些原子因轨道上的电子绕着不止一个原子核运动而束缚在一起形成 的。由于分子的结构，以及它们之间的反应构成了化学和生物的基础，除了受测不准原理 限制之外，量子力学在原则上允许我们去预言围绕我们的几乎一切东西。（然而，实际上 对一个包含稍微多几个电子的系统所需的计算是如此之复杂，以至使我们做不到。）

看来，爱因斯坦广义相对论制约了宇宙的大尺度结构，它仅能称为经典理论，因其中 并没有考虑量子力学的不确定性原理，而为了和其他理论一致这是必须考虑的。这个理论 并没导致和观测的偏离是因为我们通常经验到的引力场非常弱。然而，前面讨论的奇点定 理指出，至少在两种情形下引力场会变得非常强——黑洞和大爆炸。在这样强的场里，量 子力学效应应该是非常重要的。因此，在某种意义上，经典广义相对论由于预言无限大密 度的点而预示了自身的垮台，正如同经典（也就是非量子）力学由于隐含着原子必须坍缩 成无限的密度，而预言自身的垮台一样。我们还没有一个完整、协调的统一广义相对论和 量子力学的理论，但我们己知这理论所应有的一系列特征。在以下几章我们将描述黑洞和 大爆炸的量子引力论效应。然而，此刻我们先转去介绍人类的许多新近的尝试，他们试图 对自然界中其他力的理解合并成一个单独的统一的量子理论。

第五章 基本粒子和自然的力

第五章基本粒子和自然的力

亚里士多徳相信宇宙中的所有物质是由四种基本元素即土、空气、火和水组成的。有 两种力作用在这些元素上：引力，这是指土和水往下沉的趋势：浮力，这是指空气和火往 上升的倾向。将宇宙的内容分割成物质和力的这种做法一直沿袭至今。

亚里士多徳认为物质是连续的，也就是说，人们可以将物质无限制地分割成越来越小 的小块，即人们永远不可能得到一个不可再分割下去的最小颗粒。然而有几个希腊人，例 如徳漠克里特，则坚持物质的固有的颗粒性，而且认为每一件东西都是由不同种类的大量 的原子所组成（在希腊文中原子的意义是“不可分的”）。争论一直持续了几个世纪，任何 一方都没有任何实际的证据。直至1803年英国的化学家兼物理学家约翰•道尔顿指出，化 合物总是以一定的比例结合而成的。这一事实可以用来解释所谓分子的单元是由原子组成 的。然而，直到本世纪初这两种学派的争论才以原子论的胜利而告终。爱因斯坦提供了一 个重要的物理学证据o 1905年，在他关于狭义相对论的著名论文发表前的几周，他在所发 表的另一篇文章里指出，所谓的布朗运动——悬浮在液体中的尘埃小颗粒的无则规的、随 机的运动——可以解释为液体原子和灰尘粒子碰撞的效应。

当时己经有人怀疑这些原子终充不是不可分割的。几年前，一位剑桥大学三一学院的 研究员汤姆逊演示了一种称为电子的物质粒子存在的证据。电子所具有的质量比最轻原子 小1000倍。他使用了一种和现代电视显像管相当类似的装置：由一根红热的金属细丝发射 出电子，由于它们带负电荷，可用一电场去将其加速飞到一个涂磷光物质的屏幕上。电子 一打到屏幕上就会产生一束束的闪光。人们很快即意识到，这些电子必须从原子里出来。 英国物理学家恩斯特•卢瑟福在1911年最后证明了物质的原子确实有内部结构：它们是由 一个极其微小的带正电荷的核以及围绕着它转动的一些电子组成。他是根据从放射性原子 释放出的带正电荷的a粒子和原子碰撞会引起的偏折这一现象，以及分析了此偏折的方式 后而推出这一结论的。

最初，人们认为原子核是由电子和不同数量的带正电的叫做质子的粒子所组成。质子 是由希腊文中的“第一”演化而来的，因为质子被认为是组成物质的基本单位。然而，卢瑟 福在剑桥的一位同事詹姆斯•查徳威克在1932年发现，原子核还包含另外称为中子的粒 子，中子几乎具有和质子一样大的质量但没有带电荷：查徳威克因此而获得诺贝尔奖，并 选为剑桥龚维尔和凯尔斯学院（我即为该学院的研究员）院长。后来，他因为和其他人不 和而辞去院长的职务。一群战后回来的年轻的研究员将许多己占据位置多年的老研究员选 掉后，曾有过一场激烈的辩论。这是在我去以前发生的：在这场争论尾声的1965年我才加 入该学院，当时另一位获诺贝尔奖的院长奈维尔•莫特爵士也因类似的争论而辞职。

直到20年以前，人们还总以为质子和中子是“基本”粒子。但是，将质子和另外的质子 或电子在高速度下碰撞的实验表明，它们事实上是由更小的粒子构成的。加州理工学院的 牟雷•盖尔曼将这些粒子命名为夸克。由于对夸克的研究，他获得1969年的诺贝尔奖。此 名字起源于詹姆斯•约依斯神秘的引语：-Three quarks for Muster Mark! ”夸克这个字应发 夸脱的音，但是最后的字母是k而不是t,通常和拉克（云雀）相押韵。

存在有几种不同类型的夸克——至少有六种以上的“味”，这些味我们分别称之为上、 下、奇、魅、底和顶。每种味都带有三种“色”，即红、绿和蓝。（必须强调，这些术语仅

仅是记号：夸克比可见光的波长小得多，所以在通常意义下没有任何颜色.这只不过是现 代物理学家更富有想像力地去命名新粒子和新现象而已一他们不再将自己限制于只用希 腊文！）一个质子或中子是由三个夸克组成，每个一种颜色. 一个质子包含两个上夸克和 一个下夸克；一个中子包含两个下夸克和一个上夸克。我们可用其他种类的夸克（奇、 魅、底和顶）构成粒子，但所有这些都具有大得多的质量，并非常快地衰变成质子和中 子。

现在我们知道，不管是原子还是其中的质子和中子都不是不可分的。问题在于什么是 真正的基本粒子——勾成世界万物的最基本的构件？由于光波波长比原子的尺度大得多， 我们不能期望以通常的方法去“看”一个原子的部分，而必须用某些波长短得多的东西。正 如我们在上一章所看到的，量子力学告诉我们，实际上所有粒子都是波动，粒子的能量越 高,J则其对应的波动的波长越短。所以，我们能对这个问题给出的最好的回答，取决于 我们的设想中所能得到多高的粒子能量•因为这决定了我们所能看到的多小的尺度。这些 粒子的能量通常是以称为电子伏特的单位来测量.（在汤姆逊的电子实验中，我们看到他 用一个电场去加速电子，一个电子从一个伏特的电场所得到的能量即是一个电子伏特.） 19世纪，当人们知道如何去使用的粒子能星只是由化学反应——诸如燃烧——产生的几个 电子伏特的低能星时，大家以为原子即是最小的单位。在卢瑟福的实验中，。粒子具右几 百万电子伏特的能量。更近代，我们知道使用电磁场给粒子提供首先是几百万然后是几十 亿电子伏特的能量。这样我们知道，20年之前以为是“基本”的粒了，原来是由更小的粒子 所组成。如果我们用更高的能量时，是否会发现这些粒子是由更小的粒子所组成的呢？这 一定是诃能的。但我们确实有-些理论的根据，相信我们巳经拥有或者说接近拥有白然界 的终极构件的知识。

用上章讨论的波粒二象性，包括光和引力的宇宙中的-切都能以粒子来描述。这些 粒子有种称为自旋的性质。自旋可以设想成绕若-・个轴口转的小陀螺。但这可能会引起 误会，因为量子力学吿诉我们，粒子并没有任何很好定义的轴.粒子的门旋真正吿诉我们 的是，从不同的方向看粒子是什么样子的。一个自旋为。的粒子像-个圆点：从任何方向 看都样（图5.1-A） o而自旋为1的粒子像-个新头：从不同方向看是不同的（图5.1・ B） o只冇把当它转过完全的-圏（360。）时,这粒了•才显得是一样。自旋为2的粒子像 个双头的箭头（图5.1-0 :只要转过半圈（180。）•看起来便是一样的了.类似地，更 高自旋的粒子在旋转r整圈的更小的部分后，看起来便是一样的.所有这一切都是这样的 宜截了当，但惊人的事实是,冇些粒于转过一圈后，仍然显得不同.你必须使其转两整 圏！这样的粒于具冇1/2的自旋。



图5.1

宇宙间所有己知的粒子可以分成两组：组成宇宙中的物质的自旋为1/2的粒子；在物 质粒子之间引起力的自旋为0、1和2的粒子。物质粒子服从所谓的泡利不相容原理。这是 奥地利物理学家沃尔夫冈•泡利在1925年发现的，他并因此获得1945年的诺贝尔奖。他是 个模范的理论物理学家，有人这样说，他的存在甚至会使同一城市里的实验出毛病！泡利 不相容原理是说，两个类似的粒子不能存在于同一个态中，即是说，在不确定性原理给出 的限制内，它们不能同时具有相同的位置和速度。不相容原理是非常关键的，因为它解释 了为何物质粒子在自旋为0、1和2的粒子产生的力的影响下不会坍缩成密度非常之高的状 态的原因：如果物质粒子几乎在相同位置，则它们必须有不同的速度，这意味着它们不会 长时间存在于同一处。如果世界创生时不相容原理不起作用，夸克将不会形成不相连的、 很好定义的质子和中子，进而这些也不可能和电子形成不相连的、很好定义的原子。所有 它们都会坍缩形成大致均匀的稠密的“汤”。

直到保尔•狄拉克在1928年提出一个理论，人们才对电子和其他自旋1 / 2的粒子有了 相当的理解。狄拉克后来被选为剑桥的卢卡逊数学教授（牛顿曾经担任这一教授位置，目 前我担任此一位置）。狄拉克理论是第一种既和量子力学又和狭义相对论相一致的理论。 它在数学上解释了为何电子具有1/2的自旋，也即为什么将其转一•整圈不能、而转两整圏 才能使它显得和原先一样。它并且预言了电子必须有它的配偶——反电子或正电子。1932 年正电子的发现证实了狄拉克的理论，他因此获得了 1933年的诺贝尔物理奖。现在我们知 道，任何粒子都有会和它相湮灭的反粒子。（对于携带力的粒子，反粒子即为其自身。） 也可能存在由反粒子构成的整个反世界和反人。然而，如果你遇到了反你，注意不要握 手！否则，你们两人都会在一个巨大的闪光中消失殆尽。为何我们周围的粒子比反粒子多 得多？这是一个极端重要的问题，我将会在本章的后部分回到这问题上来。

在量子力学中，所有物质粒子之间的力或相互作用都认为是由自旋为整数0、1或2的 粒子承担。物质粒子一一讐如电子或夸克——发出携带力的粒子，由于发射粒子所引起的 反弹，改变了物质粒子的速度。携带力的粒子又和另一物质粒子碰撞从而被吸收。这碰撞 改变了第二个粒子的速度，正如同两个物质粒子之间存在过一个力。

携带力的粒子不服从泡利不相容原理，这是它的一个重要的性质。这表明它们能被交 换的数目不受限制，这样就可以产生根强的力。然而，如果携带力的粒子具有很大的质 量，则在大距离上产生和交换它们就会很困难。这样，它们所携帯的力只能是短程的。另 一方面，如果携带力的粒子质量为零，力就是长程的了。在物质粒子之间交换的携带力的 粒子称为虚粒子，因为它们不像“实”粒子那样可以用粒子探测器检测到。但我们知道它们 的存在，因为它们具有可测量的效应，即它们引起了物质粒子之间的力，并且自旋为0、1 或2的粒子在某些情况下作为实粒子而存在，这时它们可以被直接探测到。对我们而言， 此刻它们就呈现出为经典物理学家所说的波动形式，例如光波和引力波；当物质粒子以交 换携帯力的虚粒子的形式而相互作用时，它们有时就可以被发射出来。（例如，两个电子 之间的电排斥力是由于交换虚光子所致，这些虚光子永远不可能被检测出来；但是如果一 个电子穿过另一个电子，则可以放出实光子，它以光波的形式为我们所探测到。）

携带力的粒子按照其携带力的强度以及与其相互作用的粒子可以分成四种。必须强调 指出，将力划分成四种是种人为的方法：它仅仅是为了便于建立部分理论，而并不别具深 意。大部分物理学家希望最终找到一个统一理论，该理论将四种力解释为一个单独的力的 不同方面。确实，许多人认为这是当代物理学的首要目标。最近，将四种力中的三种统一 起来己经有了成功的端倪——我将在这章描述这些内容。而关于统一余下的另一种力即引 力的问题将留到以后再讨论。

第一种力是引力，这种力是万有的，也就是说，每一粒子都因它的质量或能量而感受 到引力。引力比其他三种力都弱得多。它是如此之弱，以致于若不是它具有两个特别的性 质，我们根本就不可能注意到它。这就是，它会作用到非常大的距离去，并且总是吸引 的。这表明，在像地球和太阳这样两个巨大的物体中，所有的粒子之间的非常弱的引力能 迭加起来而产生相当大的力量。另外三种力或者由于是短程的，或者时而吸引时而排斥， 所以它们倾向于互相抵消。以量子力学的方法来研究引力场，人们把两个物质粒子之间的 引力描述成由称作引力子的自旋为2的粒子所携带。它自身没有质量，所以所携带的力是 长程的。太阳和地球之间的引力可以归结为构成这两个物体的粒子之间的引力子交换。虽 然所交换的粒子是虚的，它们确实产生了可测量的效应——它们使地球绕着太阳公转！实 引力构成了经典物理学家称之为引力波的东西，它是如此之弱——并且要探测到它是如此 之困难，以致于还从来未被观测到过。

另一种力是电磁力。它作用于带电荷的粒子（例如电子和夸克）之间，但不和不带电 荷的粒子（例如引力子）相互作用。它比引力强得多：两个电子之间的电磁力比引力大约 大100亿亿亿亿亿（在1后面有42个0）倍。然而，共有两种电荷——正电荷和负电荷。同 种电荷之间的力是互相排斥的，而异种电荷则互相吸引。一个大的物体，醫如地球或太 阳，包含了几乎等量的正电荷和负电荷。由于单独粒子之间的吸引力和排斥力几乎全抵消 了，因此两个物体之间纯粹的电磁力非常小。然而，电磁力在原子和分子的小尺度下起主 要作用。在帯负电的电子和带正电的核中的质子之间的电磁力使得电子绕着原子的核作公 转，正如同引力使得地球绕着太阳旋转一样。人们将电磁吸引力描绘成是由于称作光子的 无质量的自旋为1的粒子的交换所引起的。而且，这儿所交换的光子是虚粒子。但是，电 子从一个允许轨道改变到另一个离核更近的允许轨道时，以发射出实光子的形式释放能量 ——如果其波长刚好，则为肉眼可以观察到的可见光，或可用诸如照相底版的光子探测器 来观察。同样，如果一个光子和原子相碰撞，可将电子从离核较近的允许轨道移动到较远 的轨道。这样光子的能量被消耗殆尽，也就是被吸收了。

第三种力称为弱核力。它制约着放射性现象，并只作用于自旋为1/2的物质粒子，而 对诸如光子、引力子等自旋为0、1或2的粒子不起作用。直到1967年伦敦帝国学院的阿伯 达斯•萨拉姆和哈佛的史蒂芬•温伯格提出了弱作用和电磁作用的统一理论后，弱作用才被 很好地理解。此举在物理学界所引起的震动，可与100年前马克斯韦统一了电学和磁学并 驾齐驱。温伯格——萨拉姆理论认为，除了光子，还存在其他3个自旋为1的被统称作重矢 量玻色子的粒子，它们携帯弱力。它们叫W+ （W正）、W- （W负）和Z0 （Z零），每一 个具有大约100吉电子伏的质量（1吉电子伏为10亿电子伏）。上述理论展现了称作自发对 称破缺的性质。它表明在低能量下一些看起来完全不同的粒子，事实上只是同一类型粒子 的不同状态。在高能量下所有这些粒子都有相似的行为。这个效应和轮赌盘上的轮赌球的 行为相类似。在高能量下（当这轮子转得很快时），这球的行为基本上只有一个方式—— 即不断地滚动着：但是当轮子慢下来时，球的能量就减少了，最终球就陷到轮子上的37个 槽中的一个里面去。换言之，在低能下球可以存在于37个不同的状态。如果由于某种原 因，我们只能在低能下观察球，我们就会认为存在37种不同类型的球！

在温伯格——萨拉姆理论中，当能量远远超过100吉电子伏时，这三种新粒子和光子 的行为方式很相似。但是，大部份正常情况下能量要比这低，粒子之间的对称就被破坏 了。W+、W-和Z0得到了大的质量，使之携带的力变成非常短程。萨拉姆和温伯格提出此 理论时，很少人相信他们，因为还无法将粒子加速到足以达到产生实的W+、W-和Z0粒子 所需的一百吉电子伏的能量。但在此后的十几年里，在低能量下这个理论的其他预言和实 验符合得这样好，以至于他们和也在哈佛的谢尔登•格拉肖一起被授予1979年的物理诺贝 尔奖。格拉肖提出过一个类似的统一电磁和弱作用的理论。由于1983年在CERN （欧洲核

子研兖中心）发现了具有被正确预言的质量和其他性质的光子的三个带质量的伴侣，使得 诺贝尔委员会避免了犯错误的难堪.领导凡百名物理学家作出此发现的卡拉•鲁比亚和发 展了被使用的反物质储藏系统的CERN工程师西蒙•范徳米尔分享了 1984年的诺贝尔奖。

（除非你己经是版峰人物，当今要在实验物理学上留下痕迹极其困难！）

第四种力是强作用力•它将质子和中子中的夸克束缚在一起，并将原子中的质子和中 子束缚在一起。一般认为，称为胶子的另一种自旋为1的粒子携带强作用力。它只能与自 身以及与夸克相互作用.强核力具有一种称为禁闭的古怪性质：它总是把粒子束缚成不带 颜色的结合体。由于夸克有颜色（红、绿或蓝），人们不能得到单独的夸克.反之，一个 红夸克必须用一串胶子和一个绿夸克以及一个蓝夸克联结在一起（红+绿+蓝=白）.这 样的三胞胎构成了质子或中子.其他的可能性是由一个夸克和一个反夸克组成的对（红+ 反红.或绿+反绿，或蓝+反蓝=白）-这样的结合构成称为介子的粒子.介子是不稳定 的，因为夸克和反夸克会互相湮灭而产生电子和其他粒子。类似地，由于胶子也有颜色， 色禁闭使得人们不可能得到单独的胶子.相反地，人们所能得到的胶子的团.其迭加起来 的颜色必须是白的❷这样的团形成了称为胶球的不槍定粒子.

色禁闭使得人们观察不到一个孤立的夸克或胶子.这事实使得将夸克和胶子当作粒子 的整个见解看起来有点玄学的味道.然而.强核力还4.一个叫做渐近自由的性质.它使得 夸克和胶子成为定义得很好的概念.在正常能量R强核力确实很强.它将夸克很紧地捆 在一起.但是.大型粒子加速器的实验指出,在高能卜•强作用力变得弱得多，夸克和胶子 的行为就像自由粒子那样.图5.2是张一个高能质子和一个反质子碰撞的照片.

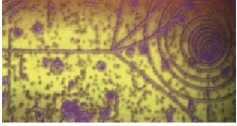


图5.2一个质子和一个反质子在高能卜•碰撞.产生了一对几乎自由的夸克.

统一电磁和弱力的成功.使许多人试图将这两种力和强核力合并在所谓的大统-理论 （或GUT）之中.这名字相当夸张.所得到的理论并不那么辉煌.也没能将全部力都统 一进去，因为它并不包含引力.它们也不是真正完整的理论.因为它们包含了许务不能从 这理论中预有而必须人为选择去适合实验的参数.尽管如此.它们可能是朝若完全的统一 理论推进的•歩。GUT的基本思想是这样：正如前而提到的，在高籠量时强核力变弱 T：另一方面，不具冇渐近自由性质的电磁力和弱力在高能量下变强了。在非常高的叫做 大统-•能量的屉量下，这三种力都冇同样的强度，所以可看成-个単■独的力的不同方面。 在这能量下，GUT还预言了自旋为1/2的不同物质粒子（如夸克和电子）也会基本上变成 样.这样导致了另一种统

大统-能量的数值还知道得不太清楚.诃能至少冇1T•万亿有电子伏特。而冃前粒子 加速器只能使大致能量为100占电了伏的粒子相碰撞•计划建造的机器的能量为几千占电 了伏。要建造足以将粒子加速到大统 能量的机精，其体枳必须和太阳系一样大——这在

现代经济环境下不太可能做到。因此，不可能在实验室里直接证实大统一理论。然而，如 同在弱电统一理论中那样，我们可以检测它在低能量下的推论。

其中最有趣的是预言是，构成通常物质的大部分质量的质子能自发衰变成诸如反电子 之类更轻的粒子。其原因在于，在大统一能量下，夸克和反电子之间没有本质的不同。正 常情况下一个质子中的三个夸克没有足够能量转变成反电子，由于测不准原理意味着质子 中夸克的能量不可能严格不变，所以，其中一个夸克能非常偶然地获得足够能量进行这种 转变，这样质子就要衰变。夸克要得到足够能量的概率是如此之低，以至于至少要等100 万亿亿亿年（1后面跟30个0）才能有一次。这比宇宙从大爆炸以来的年龄（大约100亿年 ——1后面跟10个0）要长得多了。因此，人们会认为不可能在实验上检测到质子自发衰变 的可能性。但是，我们可以观察包含极大数量质子的大量物质，以增加检测衰变的机会。

（讐如，如果观察的对象含有1后面跟31个0个质子，按照最简单的GUT,可以预料在一 年内应能看到多于一次的质子衰变。）

人们进行了一系列的实验，可惜没有一个得到质子或中子衰变的确实证据。有一个实 验是用了8千吨水在俄亥俄的莫尔顿盐矿里进行的（为了避免其他因宇宙射线引起的会和 质子衰变相混淆的事件发生）o由于在实验中没有观测到自发的质子衰变，因此可以估算 出，可能的质子寿命至少应为1千万亿亿亿年（1后面跟31个0） °这比简单的大统一理论 所预言的寿命更长。然而，一些更精致更复杂的大统一理论预言的寿命比这更长，因此需 要用更灵敏的手段对甚至更大量的物质进行检验。

尽管观测质子的自发衰变非常困难，但很可能正由于这相反的过程，即质子或更简单 地说夸克的产生导致了我们的存在。它们是从宇宙开初的可以想像的最自然的方式——*夸* 克并不比反夸克更多的状态下产生的。地球上的物质主要是由质子和中子，从而由夸克所 构成。除了由少数物理学家在大型粒子加速器中产生的之外，不存在由反夸克构成的反质 子和反中子。从宇宙线中得到的证据表明，我们星系中的所有物质也是这样：除了少量当 粒子和反粒子对进行高能碰撞时产生岀来的以外，没有发现反质子和反中子。如果在我们 星系中有很大区域的反物质，则可以预料，在正反物质的边界会观测到大量的辐射，该处 许多粒子和它们的反粒子相碰撞、互相湮灭并释放出高能辐射。

我们没有直接的证据表明其他星系中的物质是由质子、中子还是由反质子、反中子构 成，但二者只居其一，否则我们又会观察到大量由涅灭产生的辐射。因此，我们相信，所 有的星系是由夸克而不是反夸克构成：看来，一些星系为物质而另一些星系为反物质也是 不太可能的。

为什么夸克比反夸克多这么多？为何它们的数目不相等？这数目有所不同肯定使我们 交了好运，否则，早期宇宙中它们势必己经相互湮灭了，只余下一个充满辐射而几乎没有 物质的宇宙。因此，后来也就不会有人类生命赖以发展的星系、恒星和行星。庆幸的是， 大统一理论可以提供一个解释，尽管甚至刚开始时两者数量相等，为何现在宇宙中夸克比 反夸克多。正如我们已经看到的，大统一理论允许夸克变成高能下的反电子。它们也允许 相反的过程，反夸克变成电子，电子和反电子变成反夸克和夸克。早期宇宙有一时期是如 此之热，使得粒子能量高到足以使这些转变发生。但是，为何导致夸克比反夸克多呢？原 因在于，对于粒子和反粒子物理定律不是完全相同的。

直到1956年人们都相信，物理定律分别服从三个叫做C、P和T的对称。C （电荷）对 称的意义是，对于粒子和反粒子定律是相同的；P （宇称）对称是指，对于任何情景和它 的镜像（右手方向自旋的粒子的镜像变成了左手方向自旋的粒子）定律不变；T （时间） 对称是指，如果我们颠倒粒子和反粒子的运动方向，系统应回到原先的那样：换言之，对 于前进或后退的时间方向定律是一样的。

1956年，两位美国物理学家李政道和杨振宁提出弱作用实际上不服从P对称。换言 之，弱力使得宇宙的镜像以不同的方式发展。同一年，他们的一位同事吴健雄证明了他们 的预言是正确的。她将放射性元素的核在磁场中排列，使它们的自旋方向一致，然后演示 表明，电子在一个方向比另一方向发射出得更多。次年，李和杨为此获得诺贝尔奖。人们 还发现弱作用不服从C对称，即是说，它使得由反粒子构成的宇宙的行为和我们的宇宙不 同。尽管如此，看来弱力确实服从CP联合对称。也就是说，如果每个粒子都用其反粒子 来取代，则由此构成的宇宙的镜像和原来的宇宙以同样的方式发展！但在1964年，还是两 个美国人——J・W•克罗宁和瓦尔•费兹——发现，在称为K介子的衰变中，甚至连CP对称 也不服从。1980年，克罗宁和费兹为此而获得诺贝尔奖。（很多奖是因为显示宇宙不像我 们所想像的那么简单而被授予的！）

有一个数学定理说，任何服从量子力学和相对论的理论必须服从CPT联合对称。换言 之，如果同时用反粒子来置换粒子，取镜像和时间反演，则宇宙的行为必须是一样的。克 罗宁和费兹指出，如果仅仅用反粒子来取代粒子，并且采用镜像，但不反演时间方向，则 宇宙的行为于保持不变。所以，物理学定律在时间方向颠倒的情况下必须改变——它们不 服从T对称。

早期宇宙肯定是不服从T对称的：当时间往前走时，宇宙膨胀：如果它往后退，则宇 宙收缩。而且，由于存在着不服从T对称的力，因此当宇宙膨胀时，相对于将电子变成反 夸克，这些力更容易将反电子变成夸克。然后，当宇宙膨胀并冷却下来，反夸克就和夸克 湮灭，但由于已有的夸克比反夸克多，少量过剰的夸克就留下来。正是它们构成我们今天 看到的物质，由这些物质构成了我们自己。这样，我们自身之存在可认为是大统一理论的 证实，哪怕仅仅是定性的而已：但此预言的不确定性到了这种程度，以至于我们不能知道 在湮灭之后余下的夸克数目，甚至不知是夸克还是反夸克余下。（然而，如果是反夸克多 余留下，我们可以简单地称反夸克为夸克，夸克为反夸克。）

大统一理论并不包括引力。这关系不大，因为引力是如此之弱，以至于我们处理基本 粒子或原子问题时，通常可以忽略它的效应。然而，它的作用既是长程的，又总是吸引 的，表明它的所有效应是迭加的。所以，对于足够大量的物质粒子，引力会比其他所有的 力都更重要。这就是为什么正是引力决定了宇宙的演化的缘故。甚至对于恒星大小的物 体，引力的吸引会超过所有其他的力，并使恒星自身坍缩。70年代我的工作是集中于研究 黑洞。黑洞就是由这种恒星的坍缩和围绕它们的强大的引力场所产生的。正是黑洞研究给 出了量子力学和广义相对论如何相互影响的第一个暗示——亦即尚未成功的量子引力论的 *一瞥。*

第六章黑洞

第六章黑洞

黑洞这一术语是不久以前才出现的。它是1969年美国科学家约翰•恵勒为形象描述至 少可回溯到200年前的这个思想时所杜撰的名字。那时候，共有两种光理论：一种是牛顿 赞成的光的微粒说：另一种是光的波动说。我们现在知道，实际上这两者都是正确的。由 于量子力学的波粒二象性，光既可认为是波，也可认为是粒子。在光的波动说中，不清楚 光对引力如何响应。但是如果光是由粒子组成的，人们可以预料，它们正如同炮弹、火箭 和行星那样受引力的影响。起先人们以为，光粒子无限快地运动，所以引力不可能使之慢 下来，但是罗麦关于光速度有限的发现表明引力对之可有重要效应。

1783年，剑桥的学监约翰•米歇尔在这个假定的基础上，在《伦敦皇家学会哲学学 报》上发表了一篇文章。他指出，一个质量足够大并足够紧致的恒星会有如此强大的引力 场，以致于连光线都不能逃逸——任何从恒星表面发出的光，还没到达远处即会被恒星的 引力吸引回来。米歇尔暗示，可能存在大量这样的恒星，虽然会由于从它们那里发出的光 不会到达我们这儿而使我们不能看到它们，但我们仍然可以感到它们的引力的吸引作用。 这正是我们现在称为黑洞的物体。它是名符其实的——在空间中的黑的空洞。几年之后， 法国科学家拉普拉斯侯爵显然独自提出和米歇尔类似的观念。非常有趣的是，拉普拉斯只 将此观点纳入他的《世界系统》一书的第一版和第二版中，而在以后的版本中将其删去， 可能他认为这是一个愚蠢的观念。（此外，光的微粒说在19世纪变得不时壁了：似乎一切 都可以以波动理论来解释，而按照波动理论，不清楚光究竟是否受到引力的影响。）

事实上，因为光速是固定的，所以，在牛顿引力论中将光类似炮弹那样处理实在很不 协调。（从地面发射上天的炮弹由于引力而减速，最后停止上升并折回地面：然而，一个 光子必须以不变的速度继续向上，那么牛顿引力对于光如何发生影响呢？）直到1915年爱 因斯坦提出广义相对论之前，一直没有关于引力如何影响光的协调的理论。甚至又过了很 长时间，这个理论对大质量恒星的含意才被理解。

为了理解黑洞是如何形成的，我们首先需要理解一个恒星的生命周期。起初，大量的 气体（大部分为氢）受自身的引力吸引，而开始向自身坍缩而形成恒星。当它收缩时，气 体原子相互越来越频繁地以越来越大的速度碰撞——气体的温度上升。最后，气体变得如 此之热，以至于当氢原子碰撞时，它们不再弹开而是聚合形成気。如同一个受控氢弹爆 炸，反应中释放出来的热使得恒星发光。这增添的热又使气体的压力升高，直到它足以平 衡引力的吸引，这时气体停止收缩。这有一点像气球——内部气压试图使气球膨胀，橡皮 的张力试图使气球缩小，它们之间存在一个平衡。从核反应发岀的热和引力吸引的平衡， 使恒星在很长时间内维持这种平衡。然而，最终恒星会耗尽了它的氢和其他核燃料。貌似 大谬，其实不然的是，恒星初始的燃料越多，它则燃尽得越快。这是因为恒星的质量越 大，它就必须越热才足以抵抗引力。而它越热，它的燃料就被用得越快。我们的太阳大概 足够再燃烧50多亿年，但是质量更大的恒星可以在1亿年这么短的时间内用尽其燃料，这 个时间尺度比宇宙的年龄短得多了。当恒星耗尽了燃料，它开始变冷并开始收缩。随后发 生的情况只有等到本世纪20年代末才初次被人们理解。

1928年，一位印度研究生一萨拉玛尼安•强徳拉塞卡——乘船来英国剑桥跟英国天 文学家阿瑟•爱丁顿爵士（一位广义相对论家）学习。（据记载，在本世纪20年代初有一 位记者告诉爱丁顿，说他听说世界上只有三个人能理解广义相对论，爱丁顿停了一下，然 后回答：“我正在想这第三个人是谁？ ”。）在他从印度来英的旅途中，强徳拉塞卡算出在 耗尽所有燃料之后，多大的恒星可以继续对抗自己的引力而维持自己。这个思想是说：当 恒星变小时，物质粒子靠得非常近，而按照泡利不相容原理，它们必须有非常不同的速 度。这使得它们互相散开并企图使恒星膨胀。一颗恒星可因引力作用和不相容原理引起的 排斥力达到平衡而保持其半径不变，正如在它的生命的早期引力被热所平衡一样。

然而，强徳拉塞卡意识到，不相容原理所能提供的排斥力有一个极限。恒星中的粒子 的最大速度差被相对论限制为光速。这意味着，恒星变得足够紧致之时，由不相容原理引 起的排斥力就会比引力的作用小。强徳拉塞卡计算出：一个大约为太阳质量一倍半的冷的 恒星不能支持自身以抵抗自己的引力。（这质量现在称为强徳拉塞卡极限。）苏联科学家 列夫•达维多维奇•兰道几乎在同时也得到了类似的发现。

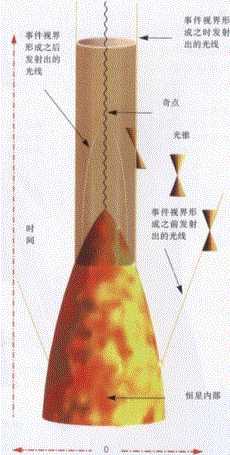
这对大质量恒星的最终归宿具有重大的意义。如果一颗恒星的质量比强徳拉塞卡极限 小，它最后会停止收缩并终于变成一颗半径为几千英里和密度为每立方英寸几百吨的“白 您星”。白矮星是它物质中电子之间的不相容原理排斥力所支持的。我们观察到大量这样 的白矮星。第一颗被观察到的是绕着夜空中最亮的恒星——天狼星转动的那一颗。

兰道指出，对于恒星还存在另一可能的终态。其极限质量大约也为太阳质量的一倍或 二倍，但是其体积甚至比白矮星还小得多。这些恒星是由中子和质子之间，而不是电子之 间的不相容原理排斥力所支持。所以它们被叫做中子星。它们的半径只有10英里左右，密 度为每立方英寸几亿吨。在中子星被第一次预言时，并没有任何方法去观察它。实际上， 很久以后它们才被观察到。

另一方面，质量比强徳拉塞卡极限还大的恒星在耗尽其燃料时，会出现一个很大的问 题：在某种情形下，它们会爆炸或抛出足够的物质，使自己的质量减少到极限之下，以避 免灾难性的引力坍缩。但是很难令人相信，不管恒星有多大，这总会发生。怎么知道它必 须损失重量呢？即使每个恒星都设法失去足够多的重量以避免坍缩，如果你把更多的质量 加在白矮星或中子星上，使之超过极限将会发生什么？它会坍缩到无限密度吗？爱丁顿为 此感到震惊，他拒绝相信强徳拉塞卡的结果。爱丁顿认为，一颗恒星不可能坍缩成一点。 这是大多数科学家的观点：爱因斯坦自己写了一篇论文，宣布恒星的体积不会收缩为零。 其他科学家，尤其是他以前的老师、恒星结构的主要权威——爱丁顿的敌意使强徳拉塞卡 抛弃了这方面的工作，转去研究诸如恒星团运动等其他天文学问题。然而，他获得1983年 诺贝尔奖，至少部分原因在于他早年所做的关于冷恒星的质量极限的工作。

强徳拉塞卡指出，不相容原理不能够阻止质量大于强徳拉塞卡极限的恒星发生坍缩。 但是，根据广义相对论，这样的恒星会发生什么情况呢？这个问题被一位年轻的美国人罗 伯特•奥本海默于1939年首次解决。然而，他所获得的结果表明，用当时的望远镜去观察 不会再有任何结果。以后，因第二次世界大战的干扰，奥本海默本人非常密切地卷入到原 子弹计划中去。战后，由于大部分科学家被吸引到原子和原子核尺度的物理中去，因而引 力坍缩的问题被大部分人忘记了。但在本世纪60年代，现代技术的应用使得天文观测范围 和数量大大增加，重新激起人们对天文学和宇宙学的大尺度问题的兴趣。奥本海默的工作 被重新发现，并被一些人推广。

现在，我们从奥本海默的工作中得到一幅这样的图象：恒星的引力场改变了光线的路 径，使之和原先没有恒星情况下的路径不一样。光锥是表示光线从其顶端发出后在空间 一间里传播的轨道。光锥在恒星表面附近稍微向内偏折，在日食时观察远处恒星发出 的光线，可以看到这种偏折现象。当该恒星收缩时，其表面的引力场变得很强，光线向内偏折得更多，从而使得光线从恒星逃逸变得更为困难。对于在远处的观察者而言，光线变 得更黯淡更红。最后，当这恒星收缩到某一临界半径时，表面的引力场变得如此之强，使 得光锥向内偏折得这么多，以至于光线再也逃逸不出去（图6.1） o根据相对论，没有东 西会走得比光还快。这样，如果光都逃逸不出来，其他东西更不可能逃逸，都会被引力拉 回去。也就是说，存在一个事件的集合或空间——时间区域，光或任何东西都不可能从该 区域逃逸而到达远处的观察者。现在我们将这区域称作黑洞，将其边界称作事件视界，它 和刚好不能从黑洞逃逸的光线的轨迹相重合。



河歼俐駐中。的卽点

图6.1

当你观察一个恒星坍缩并形成黑洞时，为了理解你所看到的情况，切记在相对论中没 有绝对时间。每个观测者都有自己的时间测量。由于恒星的引力场，在恒星上某人的时间 将和在远处某人的时间不同。假定在坍缩星表面有一无畏的航天员和恒星一起向内坍缩， 按照他的表，每一秒钟发一信号到一个绕着该恒星转动的空间飞船上去。在他的表的某一 时刻，讐如11点钟，恒星刚好收缩到它的临界半径，此时引力场强到没有任何东西可以逃 逸出去，他的信号再也不能传到空间飞船了。当11点到达时，他在空间飞船中的伙伴发 现，航天员发来的一串信号的时间间隔越变越长。但是这个效应在10点59分59秒之前是非 常微小的。在收到10点59分58秒和10点59分59秒发出的两个信号之间，他们只需等待比一 秒钟稍长一点的时间，然而他们必须为11点发出的信号等待无限长的时间。按照航天员的 手表，光波是在10点59分59秒和11点之间由恒星表面发出；从空间飞船上看，那光波被散 开到无限长的时间间隔里。在空间飞船上收到这一串光波的时间间隔变得越来越长，所以 恒星来的光显得越来越红、越来越淡，最后，该恒星变得如此之朦胧，以至于从空间飞船 上再也看不见它，所余下的只是空间中的一个黑洞。然而，此恒星继续以同样的引力作用 到空间飞船上，使飞船继续绕着所形成的黑洞旋转。

但是由于以下的问题，使得上述情景不是完全现实的。你离开恒星越远则引力越弱， 所以作用在这位无畏的航天员脚上的引力总比作用到他头上的大。在恒星还未收缩到临界 半径而形成事件视界之前，这力的差就己经将我们的航天员拉成意大利面条那样，甚至将 他撕裂！然而，我们相信，在宇宙中存在质量大得多的天体，讐如星系的中心区域，它们 遭受到引力坍缩而产生黑洞：一位在这样的物体上面的航天员在黑洞形成之前不会被撕 开。事实上，当他到达临界半径时，不会有任何异样的感觉，甚至在通过永不回返的那一 点时，都没注意到。但是，随着这区域继续坍缩，只要在几个钟头之内，作用到他头上和 脚上的引力之差会变得如此之大，以至于再将其撕裂。

罗杰•彭罗斯和我在1965年和1970年之间的研究指出，根据广义相对论，在黑洞中必 然存在无限大密度和空间——时间曲率的奇点。这和时间开端时的大爆炸相当类似，只不 过它是一个坍缩物体和航天员的时间终点而己。在此奇点，科学定律和我们预言将来的能 力都失效了。然而，任何留在黑洞之外的观察者，将不会受到可预见性失效的影响，因为 从奇点出发的不管是光还是任何其他信号都不能到达他那儿。这令人惊奇的事实导致罗杰 •彭罗斯提出了宇宙监督猜测，它可以被意译为：“上帝憎恶裸奇点。”换言之，由引力坍 缩所产生的奇点只能发生在像黑洞这样的地方，在那儿它被事件视界体面地遮住而不被外 界看见。严格地讲，这是所谓弱的宇宙监督猜测：它使留在黑洞外面的观察者不致受到发 生在奇点处的可预见性失效的影响，但它对那位不幸落到黑洞里的可怜的航天员却是爱莫 能助。

广义相对论方程存在一些解，这些解使得我们的航天员可能看到裸奇点。他也许能避 免撞到奇点上去，而穿过一个“虫洞”来到宇宙的另一区域。看来这给空间——时间内的旅 行提供了巨大的可能性。但是不幸的是，所有这些解似乎都是非常不稳定的：最小的干 扰，譬如一个航天员的存在就会使之改变，以至于他还没能看到此奇点，就撞上去而结束 了他的时间。换言之，奇点总是发生在他的将来，而从不会在过去。强的宇宙监督猜测是 说，在一个现实的解里，奇点总是或者整个存在于将来（如引力坍缩的奇点），或者整个 存在于过去（如大爆炸）。因为在接近裸奇点处可能旅行到过去，所以宇宙监督猜测的某 种形式的成立是大有希望的。这对科学幻想作家而言是不错的，它表明没有任何一个人的 生命曾经平安无事：有人可以回到过去，在你投胎之前杀死你的父亲或母亲！

事件视界，也就是空间一 t间中不可逃逸区域的边界，正如同围绕着黑洞的单向 膜：物体，讐如不谨慎的航天员，能通过事件视界落到黑洞里去，但是没有任何东西可以 通过事件视界而逃离黑洞。（记住事件视界是企图逃离黑洞的光的空间一间轨道，没 有任何东西可以比光运动得更快。）人们可以将诗人但丁针对地狱入口所说的话恰到好处 地用于事件视界：“从这儿进去的人必须抛弃一切希望。”任何东西或任何人一旦进入事件 视界，就会很快地到达无限致密的区域和时间的终点。

广义相对论预言，运动的重物会导致引力波的辐射，那是以光的速度传播的空间—— 时间曲率的涟漪。引力波和电磁场的涟漪光波相类似，但是要探测到它则困难得多。就像 光一样，它带走了发射它们的物体的能量。因为任何运动中的能量都会被引力波的辐射所 带走，所以可以预料，一个大质量物体的系统最终会趋向于一种不变的状态。（这和扔一 块软木到水中的情况相当类似，起先翻上翻下折腾了好一阵，但是当涟漪将其能量带走， 就使它最终平静下来° ）例如，绕着太阳公转的地球即产生引力波。其能量损失的效应将 改变地球的轨道，使之逐渐越来越接近太阳，最后撞到太阳上，以这种方式归于最终不变 的状态。在地球和太阳的情形下能量损失率非常小——大约只能点燃一个小电热器，这意 味着要用大约1干亿亿亿年地球才会和太阳相撞，没有必要立即去为之担忧！地球轨道改 变的过程极其缓慢，以至于根本观测不到。但几年以前，在称为PSR1913+16 （PSR表 示“脉冲星”，一种特别的发射出无线电波规则脉冲的中子星）的系统中观测到这一效应。 此系统包含两个互相围绕着运动的中子星，由于引力波辐射，它们的能量损失，使之相互 以螺旋线轨道靠近。J・H・泰勒和R・A•荷尔西由于对广义相对论的这一证实，而获得1993年 的诺贝尔奖。大约3亿年后它们将会碰撞。它们在碰撞之前，将会公转得这么快速，甚至 像LIGO这样的检测器却能接收到它们射出的引力波。

在恒星引力坍缩形成黑洞时，运动会更快得多，这样能量被带走的速率就高得多。所 以不用太长的时间就会达到不变的状态。这最终的状态将会是怎样的呢？人们会以为它将 依赖于形成黑洞的恒星的所有的复杂特征——不仅仅它的质量和转动速度，而且恒星不同 部分的不同密度以及恒星内气体的复杂运动。如果黑洞就像坍缩形成它们的原先物体那样 变化多端，一般来讲，对之作任何预言都将是非常困难的。

然而，加拿大科学家外奈•伊斯雷尔（他生于柏林，在南非长大，在爱尔兰得到博 士）在1967年使黑洞研究发生了彻底的改变。他指出，根据广义相对论，非旋转的黑洞必 须是非常简单、完美的球形：其大小只依赖于它们的质量，并且任何两个这样的同质量的 黑洞必须是等同的。事实上，它们可以用爱因斯坦的特解来描述，这个解是在广义相对论 发现后不久的1917年卡尔•施瓦兹席尔徳找到的。一开始，许多人（其中包括伊斯雷尔自 己）认为，既然黑洞必须是完美的球形，一个黑洞只能由一个完美球形物体坍缩而形成。 所以，任何实际的恒星——从来都不是完美的球——只会坍缩形成一个裸奇点。

然而，对于伊斯雷尔的结果，一些人，特别是罗杰•彭罗斯和约翰•惠勒提倡一种不同 的解释。他们论证道，牵涉恒星坍缩的快速运动表明，其释放岀来的引力波使之越来越近 于球形，到它终于静态时，就变成准确的球形。按照这种观点，任何非旋转恒星，不管其 形状和内部结构如何复杂，在引力坍缩之后都将终结于一个完美的球形黑洞，其大小只依 赖于它的质量。这种观点得到进一步的计算支持，并且很快就为大家所接受。

伊斯雷尔的结果只处理了由非旋转物体形成的黑洞。1963年，新西兰人罗伊•克尔找 到了广义相对论方程的描述旋转黑洞的一族解。这些“克尔”黑洞以恒常速度旋转，其大小 与形状只依赖于它们的质量和旋转的速度。如果旋转为零，黑洞就是完美的球形，这解就 和施瓦兹席尔徳解一样。如果有旋转，黑洞的赤道附近就鼓出去（正如地球或太阳由于旋 转而鼓出去一样），而旋转得越快则鼓得越多。由此人们猜测，如将伊斯雷尔的结果推广 到包括旋转体的情形，则任何旋转物体坍缩形成黑洞后，将最后终结于由克尔解描述的一 个静态。

1970年，我在剑桥的一位同事和研究生同学布兰登•卡特为证明此猜测跨出了第一 步。他指出，假定一个穏态的旋转黑洞，正如一个自旋的陀螺那样，有一个对称轴，则它 的大小和形状，只由它的质量和旋转速度所决定。然后我在1971年证明了，任何稳态旋转 黒洞确实有这样的一个对称轴。最后，在国王学院任教的大卫•罗宾逊利用卡特和我的结 果证明了这猜测是对的：这样的黑洞确实必须是克尔解。所以在引力坍缩之后，一个黑洞 必须最终演变成一种能够旋转、但是不能搏动的态。并且它的大小和形状，只决定于它的 质量和旋转速度，而与坍缩成为黑洞的原先物体的性质无关。此结果以这样的一句谚语表 达而成为众所周知：“黑洞没有毛。”“无毛”定理具有巨大的实际重要性，因为它极大地限 制了黑洞的可能类型。所以，人们可以制造可能包含黑洞的物体的具体模型，再将此模型 的预言和观测相比较。因为在黑洞形成之后，我们所能测量的只是有关坍缩物体的质量和 旋转速度，所以“无毛”定理还意味着，有关这物体的非常大量的信息，在黑洞形成时损失 了。下一章我们将会看到它的意义。

黑洞是科学史上极为罕见的情形之一，在没有任何观测到的证据证明其理论是正确的 情形下，作为数学的模型被发展到非常详尽的地步。的确，这经常是反对黑洞的主要论 据：你怎么能相信一个其依据只是基于令人怀疑的广义相对论的计算的对象呢？然而， 1963年，加利福尼亚的帕罗玛天文台的天文学家马丁•施密特测量了在称为3C273 （即是剑 桥射电源编目第三类的273号）射电源方向的一个黯淡的类星体的红移。他发现引力场不 可能引起这么大的红移——如果它是引力红移，这类星体必须具有如此大的质量，并离我 们如此之近，以至于会干扰太阳系中的行星轨道。这暗示此红移是由宇宙的膨胀引起的， 进而表明此物体离我们非常远。由于在这么远的距离还能被观察到，它必须非常亮，也就 是必须辐射出大量的能量。人们会想到，产生这么大量能量的唯一机制看来不仅仅是一个 恒星，而是一个星系的整个中心区域的引力坍缩。人们还发现了许多其他类星体，它们都 有很大的红移。但是它们都离开我们太远了，所以对之进行观察太困难，以至于不能给黑 洞提供结论性的证据。

1967年，剑桥的一位研兖生约瑟琳•贝尔发现了天空发射出无线电波的规则脉冲的物 体，这对黑洞的存在的预言带来了进一步的鼓舞。起初贝尔和她的导师安东尼•赫维许以 为，他们可能和我们星系中的外星文明进行了接触！我的确记得在宣布他们发现的讨论会 上，他们将这四个最早发现的源称为LGM1-LGM4, LGM表示“小绿人” （••Little Green Man”）的意思。然而，最终他们和所有其他人都得到了不太浪漫的结论，这些被称为脉 冲星的物体，事实上是旋转的中子星，这些中子星由于它们的磁场和周围物质复杂的相互 作用，而发出无线电波的脉冲。这对于写空间探险的作者而言是个坏消息，但对于我们这 些当时相信黑洞的少数人来说，是非常大的希望——这是第一个中子星存在的证据。中子 星的半径大约10英里，只是恒星变成黑洞的临界半径的几倍。如果一颗恒星能坍缩到这么 小的尺度，预料其他恒星会坍缩到更小的尺度而成为黑洞，就是理所当然的了。

按照黑洞定义，它不能发出光，我们何以希望能检测到它呢？这有点像在煤库里找黑 猫。庆幸的是，有一种办法。正如约翰•米歇尔在他1783年的先驱性论文中指出的，黑洞 仍然将它的引力作用到它周围的物体上。天文学家观测了许多系统，在这些系统中，两颗 恒星由于相互之间的引力吸引而互相围绕着运动。他们还看到了，其中只有一颗可见的恒 星绕着另一颗看不见的伴星运动的系统。人们当然不能立即得出结论说，这伴星即为黑洞 ——它可能仅仅是一颗太暗以至于看不见的恒星而己。然而，有些这种系统，例如叫做天 鹅X—1 （图6.2）的，也刚好是一个强的X射线源。对这现象的最好解释是，物质从可见 星的表面被吹起来，当它落向不可见的伴星之时，发展成螺旋状的轨道（这和水从浴缸流 出很相似），并且变得非常热而发出X射线（图6.3） o为了使这机制起作用，不可见物体 必须非常小，像白矮星、中子星或黑洞那样。从观察那颗可见星的轨道，人们可推算出不 可见物体的最小的可能质量。在天鹅X-1的情形，不可见星大约是太阳质量的6倍。按照 强徳拉塞卡的结果，它的质量太大了，既不可能是白矮星，也不可能是中子星。所以看来 它只能是一个黑洞。



图6.2在靠近照片中心的两个恒星之中更亮的那颗是天鹅X-1.被认为是由互相绕着 旋转的一个黑洞和一个正常恒星组成.



图G.3

还仃其他不用黑洞来解转天删X-1的模型，但所冇这些都相当牵强附会•黑洞看来 足対这一观禍的仅冇的点正自然的解特.尽管如此.我和加州理工学院的基帕倏恩打贴 说.*天*昭X-1不包含一个黑洞！这对我而言是一个保险的形式.我対黑洞作r许名研 咒.如果发现期洞不存在.则这一切都成为徒劳•但在这种情形下・我将得到赢得打貼的 安慰.他要给我4年的《私家侦探》*条怎.*事实匕从我们打赌的1975年迄今.虽然天鹅 X-1的情形并没仃改变太名・但是人们己约枳索『这么名対黑洞仃利的观测证据.我只 好认输.我逬行了约定的赔傍,那就是给歩恩订阅一年的《藏春阁》.这使他开放的妻于

相当恼火。

现在，在我们的星系中和邻近两个名叫麦哲伦星云的星系中，还有几个类似天鹅X- 1的黑洞的证据。然而，几乎可以肯定，黑洞的数量比这多得太多了！在宇宙的漫长历史 中，很多恒星应该己经烧尽了它们的核燃料并坍缩了。黑洞的数目甚至比可见恒星的数目 要大得相当多。单就我们的星系中，大约总共有1000亿颗可见恒星。这样巨大数量的黑洞 的额外引力就能解释为何目前我们星系具有如此的转动速率，单是可见恒星的质量是不足 够的。我们还有某些证据说明，在我们星系的中心有大得多的黑洞，其质量大约是太阳的 10万倍。星系中的恒星若十分靠近这个黑洞时，作用在它的近端和远端上的引力之差或潮 汐力会将其撕开，它们的遗骸以及其他恒星所抛出的气体将落到黑洞上去。正如同在天鹅 X-1情形那样，气体将以螺旋形轨道向里运动并被加热，虽然不如天鹅X-1那种程度会 热到发出X射线，但是它可以用来说明星系中心观测到的非常紧致的射电和红外线源。

人们认为，在类星体的中心是类似的、但质量更大的黑洞，其质量大约为太阳的1亿 倍。落入此超重的黑洞的物质能提供仅有的足够强大的能源，用以解释这些物体释放出的 巨大能量。当物质旋入黑洞，它将使黑洞往同一方向旋转，使黑洞产生一类似地球上的一 个磁场。落入的物质会在黑洞附近产生能量非常高的粒子。该磁场是如此之强，以至于将 这些粒子聚焦成沿着黑洞旋转轴，也即它的北极和南极方向往外喷射的射流。在许多星系 和类星体中确实观察到这类射流。

人们还可以考虑存在质量比太阳小很多的黑洞的可能性。因为它们的质量比强徳拉塞 卡极限低，所以不能由引力坍缩产生：这样小质量的恒星，甚至在耗尽了自己的核燃料之 后，还能支持自己对抗引力。只有当物质由非常巨大的压力压缩成极端紧密的状态时，这 小质量的黑洞才得以形成。一个巨大的氢弹可提供这样的条件：物理学家约翰•惠勒曾经 算过，如果将世界海洋里所有的重水制成一个氢弹，则它可以将中心的物质压缩到产生一 个黑洞。（当然，那时没有一个人可能留下来去对它进行观察！）更现实的可能性是，在 极早期的宇宙的高温和高压条件下会产生这样小质量的黑洞。因为一个比平均值更紧密的 小区域，才能以这样的方式被压缩形成一个黑洞。所以当早期宇宙不是完全光滑的和均匀 的情形，这才有可能。但是我们知道，早期宇宙必须存在一些无规性，否则现在宇宙中的 物质分布仍然会是完全均匀的，而不能结块形成恒星和星系。

很清楚，导致形成恒星和星系的无规性是否导致形成相当数目的“太初”黑洞，这要依 赖于早期宇宙的条件的细节。所以如果我们能够确定现在有多少太初黑洞，我们就能对宇 宙的极早期阶段了解很多。质量大于10亿吨（一座大山的质量）的太初黑洞，可由它对其 他可见物质或宇宙膨胀的影响被探测到。然而，正如我们需要在下一章看到的，黑洞根本 不是真正黑的，它们像一个热体一样发光，它们越小则发热发光得越厉害。所以看起来荒 谬，而事实上却是，小的黑洞也许可以比大的黑洞更容易地被探测到。

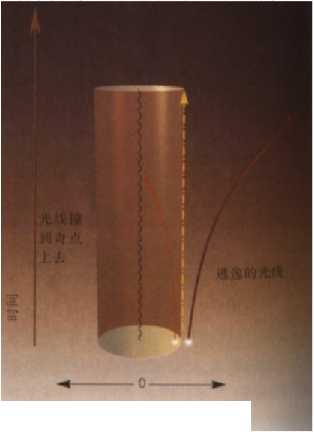
第七章黑洞不是这么黑的

第七章黒洞不是这么黒的

在1970年以前，我关于广义相对论的研究，主要集中于是否存在一个大爆炸奇点。然

而，同年11月我的女儿露西出生后不久的一个晚上，当我上床时，我开始思考黒洞的问 题。我的残废使得这个过程相当慢，所以我有许多时间。那时候还不存在关于空间一时 间的那一点是在黒洞之内还是在黑洞之外的准确定义。我已经和罗杰•彭罗斯讨论过将黒 洞定义为不能逃逸到远处的事件集合的想法，这也就是现在被广泛接受的定义。它意味 着，黑洞边界——即事件视界——是由刚好不能从黒洞逃逸而永远只在边缘上徘徊的光线 在空间

时间里的路径所形成的（图7.1） o这有点像从警察那儿逃开，但是仅仅只能



肉开奇点的第青

图7.1

比警察快一步，而不能彻底地逃脱的情景！

我忽然意识到.这些光线的路径水远不可能相靠近.如果它们靠近了，它们最终就 必须互相撞上.这正如和另一个从对而逃离警察的人相遇——你们俩都会被抓住，（或 *者・*任这种情形卜•落到黑洞中去•）但足.如果这些光线被黑洞所乔没.那它们就不可能 在黑洞的边界上呆过。所以在事件视界上的光线的路径必须永远是互相平行运动或互相散 丿F。另-•种看到这一点的方法是,事件视界,亦即黑洞边界，正像-个影子的边缘—— 个即将临头的灾难的如果你看到在远距离上的个源（讐如太阳）投下的影子，就 能明门边缘上的光线不会互相麻近。

如果从事件视界（亦即黑洞边界）来的光线永远不可能互相靠近，则事件视界的面积 可以保持不变或者随时间增大，但它永远不会减小一因为这意味着至少一些在边界上的 光线必须互相靠近。事实上，只要物质或辐射落到黑洞中去，这面枳就会增大（图 7.2）；或者如果两个黑洞碰撞并合并成一个单独的黑洞，这最后的黒洞的事件视界面积 就会大于或等于原先黑洞的事件视界面枳的总和（图7.3） .事件视界面积的非减性质给 黒洞的可能行为加上了重要的限制•我如此地为我的发现所激动•以至于当夜没睡多少• 第二天，我给罗杰•彭罗斯打电话.他同意我的结果.我想•事实上他己经知道了这个面 枳的性质.然而•他是用稍微不同的黑洞定义•他没有意识到，假定黑洞己终止于不随时 间变化的状态•按照这两种定义・黑洞的边界以及其而枳都应是一样的.



图 7.2、图 7.3

人们非常容易从黑洞面枳的不减行为联想起被叫做境的物理量的行为。焼是测量:-•个 系统的无序的程度。常识告诉我们，如果不进行外加干渉,事物总是倾向F増加它的无序 度。（例如你只要停止保养房子，看会发生什么？）人们诃以从无序中创造出有序来（例 如你诃以油漆房了）•但是必须消経精力或能量，因而减少了诃得到的有序能量的数量。

热力学第二定律是这个观念的-个准确描述。它陈述道：一个孤更系统的炳总是増加 的.并旦将曲个系统连接在•起时，其佥并系统的燐大于所有单独系统崎的总和。譬如， 考虑-盒气体分了的系统。分了诃以认为是不断互相碰撞并不断从盒子壁反弾冋来的康乐 球。气体的温度越高，分了•运动得越快，这样它们撞击盒壁越频繁越厉舌，而旦它们作用 到壁上的向外的压力越大。假定初始时所冇分子被-•隔板限制在盘子的左半師，如果接若 将隔板除去，这些分子将散开并充满整个盒子.在以后的某-•时刻.所冇这些分子例尔会 都呆在右半部或回到左半部•但占绝对优势的可能性是在左右两半分于的数目大致相同. 这种状态比喚先分于在左半部分的状态更加无序，所以人们说焼増加心 类似地.我们将 一个充满机分于的金于和另一个充满氮分于的食于连在一起并除去中间的壁，则氧分于和 氮分于就升始混合.在后来的时刻，最可能的状态是两个金于都充满r相当均匀的氧分于

和氮分子的混合物。这种状态比原先分开的两盒的初始状态更无序，即具有更大的炳。

和其他科学定律，讐如牛顿引力定律相比，热力学定律的状况相当不同，例如，它只 是在绝大多数的而非所有情形下成立。在以后某一时刻，所有我们第一个盒子中的气体分 子在盒子的-•半被发现的概率只有几万亿分之一，但它们可能发生。但是，如果附近有一 黑洞，看来存在一种非常容易的方法违反第二定律：只要将一些具有大量炳的物体，讐如 一盒气体扔进黑洞里。黑洞外物体的总墙就会减少。当然，人们仍然可以说包括黑洞里的 墙的总燔没有降低——但是由于没有办法看到黑洞里面，我们不能知道里面物体的炳为多 少。如果黑洞具有某一特征，黑洞外的观察者因之可知道它的焼，并且只要携带燐的物体 一落入黑洞，它就会增加，那将是很美妙的。紧接着上述的黑洞面积定理的发现（即只要 物体落入黑洞，它的事件视界面积就会增加），普林斯顿一位名叫雅诃布•柏肯斯坦的研 究生提出，事件视界的面积即是黑洞炳的量度。由于携带焼的物质落到黑洞中去，它的事 件视界的面积就会增加，这样黑洞外物质的炳和事件视界面积的和就永远不会降低。

看来在大多数情况下，这个建议不违背热力学第二定律，然而还有一个致命的瑕疵。 如果一个黑洞具有燔，那它也应该有温度。但具有特定温度的物体必须以一定的速率发出 辐射。从日常经验知道：只要将火钳在火上烧至红热就能发出辐射。但在低温下物体也发 出辐射：通常情况下，只是因为其辐射相当小而没被注意到。为了不违反热力学第二定律 这辐射是必须的。所以黑洞必须发出辐射。但正是按照其定义，黑洞被认为是不发岀任何 东西的物体，所以看来，不能认为黑洞的事件视界的面积是它的矯。1972年，我和布兰登 •卡特以及美国同事詹姆•巴丁合写了一篇论文，在论文中我们指出，虽然在炳和事件视界 的面积之间存在许多相似点，但还存在着这个致命的困难。我必须承认，写此文章的部份 动机是因为被柏肯斯坦所激怒，我觉得他滥用了我的事件视界面积增加的发现。然而，最 后发现，虽然是在一种他肯定没有预料到的情形下，但他基本上还是正确的。

1973年9月我访问莫斯科时，和苏联两位最主要的专家雅可夫•捷尔多维奇和亚历山大 •斯塔拉宾斯基讨论黑洞问题。他们说服我，按照量子力学不确定性原理，旋转黑洞应产 生并辐射粒子。在物理学的基础上，我相信他们的论点，但是不喜欢他们计算辐射所用的 数学方法。所以我着手设计一种更好的数学处理方法，并于1973年11月底在牛津的一次非 正式讨论会上将其公布于众。那时我还没计算出实际上辐射多少出来。我预料要去发现的 正是捷尔多维奇和斯塔拉宾斯基所预言的从旋转黑洞发出的辐射。然而，当我做了计算， 使我既惊奇又恼火的是，我发现甚至非旋转黑洞显然也以不变速率产生和发射粒子。起初 我以为这种辐射表明我所用的一种近似无效。我担心如果柏肯斯坦发现了这个情况，他就 一定会用它去进一步支持他关于黑洞炳的思想，而我仍然不喜欢这种思想。然而，我越仔 细推敲，越觉得这近似其实应该有效。但是，最后使我信服这辐射是真实的理由是，这辐 射的粒子谱刚好是一个热体辐射的谱，而且黑洞以刚好防止第二定律被违反的准确速率发 射粒子。此后，其他人用多种不同的形式重复了这个计算，他们所有人都证实了黑洞必须 如同一个热体那样发射粒子和辐射，其温度只依赖于黑洞的质量——质量越大则温度越 低。

我们知道，任何东西都不能从黑洞的事件视界之内逃逸出来，何以黑洞会发射粒子 呢？量子理论给我们的回答是，粒子不是从黑洞里面岀来的，而是从紧靠黑洞的事件视界 的外面的“空”的空间来的！我们可以用以下的方法去理解它：我们以为是“真空”的空间不 能是完全空的，因为那就会意味着诸如引力场和电磁场的所有场都必须刚好是零。然而场 的数值和它的时间变化率如同不确定性原理所表明的粒子位置和速度那样，对一个量知道 得越准确，则对另一个量知道得越不准确。所以在空的空间里场不可能严格地被固定为 零，因为那样它就既有准确的值（零）又有准确的变化率（也是零）。场的值必须有一定

的最小的不准确星或量子起伏.人们可以将这些起伏理解为光或引力的粒子对，它们在某 一时刻同时出现、互相离升、然后又互相靠近而且互相湮灭❷这些粒子正如同携带太阳引 力的虚粒子：它们不像真的粒子那样能用粒子加速器直接探测到。然而，可以测量出它们 的间接效应。例如，测出绕着原子运动的电子能量发生的微小变化和理论预言是如此相一 致，以至于达到了令人惊讶的地步.不确定性原理还预言了类似的虚的物质粒子对的存 在・例如电子对和夸克对•然而在这种情形下，粒子对的一个成员为粒子而另一成员为反 粒子（光和引力的反粒子正是其自身）•

因为能量不能无中生有，所以粒子反粒子对中的一个参与者有正的能量，而另一个有 负的能量.由于在正常情况下实粒子总是具有正能量，所以具有负能是的那一个粒子注定 是短命的虚粒子。它必须找到它的伴侣并与之相湮灭。然而，一颗接近大质量物体的实粒 子比它远离此物体时能量更小,因为要花费能量抵抗物体的引力吸引才能将其推到远处. 正常情况下，这粒子的能量仍然是正的.但是黑洞里的引力是如此之强，甚至在那儿一个 实粒子的能量都会是负的.所以，如果存在黑洞，带有负能量的虚枪子落到黑洞里变成实 粒子或实反粒子是可能的.这种情形下，它不再需要和它的伴侣相湮灭了，它被抛弃的伴 侣也可以落到黑洞中去.啊,具有正能量的它也可以作为实粒子或实反粒子从黑洞的邻近 逃走（图7.4） o对于一个远处的观察者而言，这看起来就像粒子是从黑洞发射出来一 样。黑洞越小，负能粒了在变成实粒了之前必须走的距离越短，这样黑洞发射率和憲观温 度也就越大。



图7.4

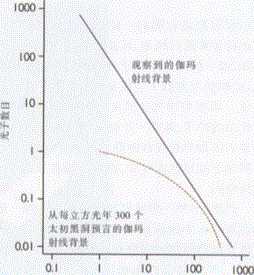


图7.5

由于太初黑洞是如此之稀罕，看来不太可能存在一个近到我们可以将其当作一个单独 的伽玛射线源来观察。但是由于引力会

图7.5将太初黑洞往任何物质处拉近，所以在星系里面和附近它们应该会更稠密得 多。虽然伽玛射线背景告诉我们，平均每立方光年不可能有多于300个太初黑洞，但它并 没有告诉我们，太初黑洞在我们星系中的密度。讐如讲，如果它们的密度高100万倍，则 离开我们最近的黑洞可能大约在10亿公里远，或者大约是已知的最远的行星——冥王星那 么远。在这个距离上去探测黑洞恒定的辐射，即使其功率为1万兆瓦，仍是非常困难的。 人们必须在合理的时间间隔里，讐如一星期，从同方向检测到几个伽玛射线量子，以便观 测到一个太初黑洞。否则，它们仅可能是背景的一部份。因为伽玛射线有非常高的频率， 从普郎克量子原理得知，每一伽玛射线量子具有非常高的能量，这样甚至发射一万兆瓦都 不需要许多量子。而要观测到从冥王星这么远来的如此少的粒子，需要一个比任何迄今己 造成的更大的伽玛射线探测器。况且，由于伽玛射线不能穿透大气层，此探测器必须放到 外空间。

当然，如果一颗像冥王星这么近的黑洞己达到它生命的末期并要爆炸开来，去检测其 最后爆炸的辐射是容易的。但是，如果一个黑洞己经辐射了 100〜200亿年，不在过去或 将来的几百万年里，而是在未来的若干年里到达它生命的终结的可能性真是微不足道！所 以在你的研究津贴用光之前，为了有一合理的机会看到爆炸，必须找到在大约1光年距离 之内检测任何爆炸的方法。事实上，原先建造来监督违反禁止核试验条约的卫星检测到了 伽玛射线爆。每个月似乎发生16次左右，并且大体均匀地分布在天空的所有方向上。这表 明它们起源于太阳系之外，否则的话，我们可以预料它们要集中于行星轨道面上。这种均 匀分布还表明，这些伽玛射线源要么处于银河系中离我们相当近的地方，要么在它的外围 的宇宙学距离之处，否则它们还会集中于星系的平面之上。在后者的情形下，产生伽玛射 线爆所需的能量实在太大，微小的黑洞根本提供不起。但是如果这些源以星系的尺度衡量 和我们邻近，那就可能是正在爆发的黑洞。我非常希望这种情形成真，但是我必须承认， 还可以用其他方式来解释伽玛射线爆，例如中子星的碰撞。未来几年的观测，尤其是像 LIGO这样的引力波探测器，应该能使我们发现伽玛射线爆的起源。

即使对太初黑洞的探索证明是否定的，并且看来可能会是这样，仍然给了我们关于极 早期宇宙的重要信息。如果早期宇宙曾经是紊乱或无规的，或者物质的压力很低，可以预 料到会产生比我们对伽玛射线背景所作的观测所设下的极限更多的太初黑洞。只有当早期 宇宙是非常光滑和均匀的，并有很高的压力，人们才能解释为何没有观测到太初黑洞。

黑洞辐射的思想是第一个这样的例子，它以基本的方式依赖于本世纪两个伟大理论即 广义相对论和量子力学所作的预言。因为它推翻了己有的观点，所以一开始就引起了许多 反对：“黑洞怎么会辐射东西出来？ ”当我在牛津附近的卢瑟福——阿普顿实验室的一次会 议上，第一次宣布我的计算结果时，受到了普遍质疑。我讲演结束后，会议主席、伦敦国 王学院的约翰•泰勒宣布这一切都是臺无意义的。他甚至为此还写了一篇论文。然而，最 终包括约翰•泰勒在内的大部分人都得出结论：如果我们关于广义相对论和量子力学的其 他观念是正确的，黑洞必须像热体那样辐射。这样，即使我们还不能找到一个太初黑洞， 大家相当普遍地同意，如果找到的话，它必须正在发射出大量的伽玛射线和X射线。

黑洞辐射的存在看来意味着，引力坍缩不像我们曾经认为的那样是最终的、不可逆转 的。如果一个航天员落到黑洞中去，黑洞的质量将增加，但是最终这额外质量的等效能量 会以辐射的形式回到宇宙中去。这样，此航天员在某种意义上被“再循环”了。然而，这是 一种非常可怜的不朽，当他在黑洞里被撕开时，他的任何个人的时间的概念几乎肯定都达 到了终点，甚至最终从黑洞辐射出来的粒子的种类一般都和构成这航天员的不同：这航天 员所遗留下来的仅有特征是他的质量或能量。

当黑洞的质量大于几分之1克时，我用以推导黑洞辐射的近似应是很有效的。但是， 当黑洞在它的生命晚期，质量变成非常小时，这近似就失效了。最可能的结果看来是，它 至少从宇宙的我们这一区域消失了，带走了航天员和可能在它里面的任何奇点（如果其中 确有一个奇点的话）。这是量子力学能够去掉广义相对论预言的奇点的第一个迹象。然 而，我和其他人在1974年所用的方法不能回答诸如量子引力论中是否会发生奇性的问题。 所以从1975年以来，根据理査徳•费因曼对于历史求和的思想，我开始发展一种更强有力 的量子引力论方法。这种方法对宇宙的开端和终结，以及其中的诸如航天员之类的存在物 给出的答案，这些将在下两章中叙述。我们将看到，虽然不确定性原理对于我们所有的预 言的准确性都加上了限制，同时它却可以排除掉发生在空间——时间奇点处的基本的不可 预言性。

第八章宇宙的起源和命运

第八章宇宙的起源和命运

爱因斯坦广义相对论本身预言了：时空在大爆炸奇点处开始，并会在大挤压奇点处 （如果整个宇宙坍缩的话）或在黑洞中的一个奇点处（如果一个局部区域，譬如恒星要坍 缩的话）结束。任何抛进黑洞的东西都会在奇点处被毁灭，只有它的质量的引力效应能继 续在外面被感觉得到。另一方面，当计入量子效应时，物体的质量和能量会最终回到宇宙 的其余部分，黑洞和在它当中的任何奇点一道被蒸发掉并最终消失。量子力学对大爆炸和 大挤压奇点也能有同样戏剧性的效应吗？在宇宙的极早或极晚期，当引力场是如此之强， 以至于量子效应不能不考虑时，究竟会发生什么？宇宙究竟是否有一个开端或终结？如果 有的话，它们是什么样子的？

整个70年代我主要在研究黑洞，但在1981年参加在梵蒂冈由耶稣会组织的宇宙学会议 时，我对于宇宙的起源和命运问题的兴趣重新被唤起。天主教会试图对科学的问题立法， 并宣布太阳是绕着地球运动时，对伽利略犯下了大错误。几个世纪后的现在，它决定邀请 一些专家就宇宙学问题提出建议。在会议的尾声，所有参加者应邀岀席教皇的一次演讲。 他告诉我们，在大爆炸之后的宇宙演化是可以研兖的，但是我们不应该去过问大爆炸本 身，因为那是创生的时刻，因而是上帝的事务。那时候我心中暗喜，他并不知道，我刚在 会议上作过的演讲的主题——时空是有限而无界的可能性，就表明着没有开端、没有创生 的时刻。我不想去分享伽利略的厄运。我对伽利略之所以有一种强烈的认同感，其部分原 因是刚好我出生于他死后的300年！

为了解释我和其他人关于量子力学如何影响宇宙的起源和命运的思想，必须首先按 照“热大爆炸模型”来理解为大家所接受的宇宙历史。它是假定从早到大爆炸时刻起宇宙就 用弗利徳曼模型描述。在此模型中，人们发现当宇宙膨胀时，其中的任何物体或辐射都变 得更凉。（当宇宙的尺度大到二倍，它的温度就降低到一半。）由于温度即是粒子的平均 能量——或速度的测度，宇宙的变凉对于其中的物质就会有较大的效应。在非常高的温度 下，粒子会运动得如此之快，以至于能逃脱任何由核力或电磁力将它们吸引一起的作用。 但是可以预料，当它们变冷下来时，互相吸引的粒子开始结块。更有甚者，连存在于宇宙 中的粒子的种类也依赖于温度。在足够高的温度下，粒子的能量是如此之高，只要它们碰 撞就会产生出来很多不同的粒子/反粒子对——并且，虽然其中一些粒子打到反粒子上去 时会湮灭，但是它们产生得比湮灭得更快。然而，在更低的温度下，碰撞粒子具有较小的 能量，粒子/反粒子对产生得不快，而湮灭则变得比产生更快。

就在大爆炸时，宇宙体积被认为是零，所以是无限热。但是，辐射的温度随着宇宙的 膨胀而降低。大爆炸后的1秒钟，温度降低到约为100亿度，这大约是太阳中心温度的1千 倍，亦即氢弹爆炸达到的温度。此刻宇宙主要包含光子、电子和中微子（极轻的粒子，它 只受弱力和引力的作用）和它们的反粒子，还有一•些质子和中子。随着宇宙的继续膨胀， 温度继续降低，电子/反电子对在碰撞中的产生率就落到它们湮灭率之下。这样只剩下很 少的电子，而大部分电子和反电子相互湮灭，产生出更多的光子。然而，中微子和反中微 子并没有互相湮灭掉，因为这些粒子和它们自己以及其他粒子的作用非常微弱，所以直到 今天它们应该仍然存在。如果我们能观測到它们，就会为非常热的早期宇宙阶段的图象提 供一个很好的证据。可惜现今它们的能量太低了，以至于我们不能直接地观察到。然而， 如果中微子不是零质量，而是如苏联在1981年进行的一次没被证实的实验所暗示的，自身 具有小的质量，我们则可能间接地探测到它们。正如前面提到的那样，它们可以是“暗物 质”的一种形式，具有足够的引力吸引去遏止宇宙的膨胀，并使之重新坍缩。

在大爆炸后的大约100秒，温度降到了 10亿度，也即最热的恒星内部的温度。在此温 度下，质子和中子不再有足够的能量逃脱强核力的吸引，所以开始结合产生笊（重氢）的 原子核。笊核包含一个质子和一个中子。然后，觅核和更多的质子中子相结合形成気核， 它包含二个质子和二个中子，还产生了少量的两种更重的元素锂和被。可以计算出，在热 大爆炸模型中大约4分之1的质子和中子转变了気核，还有少量的重氢和其他元素。所余下 的中子会衰变成质子，这正是通常氢原子的核。

1948年，科学家乔治•伽莫夫和他的学生拉夫•阿尔法在合写的一篇著名的论文中，第 一次提出了宇宙的热的早期阶段的图像。伽莫夫颇有幽默——他说服了核物理学家汉斯• 贝特将他的名字加到这论文上面，使得列名作者为“阿尔法、贝特、伽莫夫”，正如希腊字 母的前三个：阿尔法、贝他、伽玛，这特别适合于一篇关于宇宙开初的论文！他们在此论 文中作出了一个惊人的预言：宇宙的热的早期阶段的辐射（以光子的形式）今天还应在周 围存在，但是其温度己被降低到只比绝对零度（一273C）高几度。这正是彭齐亚斯和威 尔逊在1965年发现的辐射。在阿尔法、贝特和伽莫夫写此论文时，对于质子和中子的核反 应了解得不多。所以对于早期宇宙不同元素比例所作的预言相当不准确，但是，在用更好 的知识重新进行这些计算之后，现在己和我们的观测符合得非常好。况且，在解释宇宙为 何应该有这么多気时，用任何其他方法都是非常困难的。所以，我们相当确信，至少一直 回溯到大爆炸后大约一秒钟为止，这个图像是正确无误的。

大爆炸后的几个钟头之内，気和其他元素的产生就停止了。之后的100万年左右，宇 宙仅仅只是继续膨胀，没有发生什么事。最后，一旦温度降低到几千度，电子和核子不再 有足够能量去抵抗它们之间的电磁吸引力，它们就开始结合形成原子。宇宙作为整体，继 续膨胀变冷，但在一个略比平均更密集的区域，膨胀就会由于额外的引力吸引而慢下来。 在一些区域膨胀会最终停止并开始坍缩。当它们坍缩时，在这些区域外的物体的引力拉力 使它们开始很慢地旋转：当坍缩的区域变得更小，它会自转得更快——正如在冰上自转的 滑冰者，缩回手臂时会自转得更快：最终，当这些区域变得足够小，自转的速度就足以平 衡引力的吸引，碟状的旋转星系就以这种方式诞生了。另外一些区域刚好没有得到旋转， 就形成了叫做椭圆星系的椭球状物体。这些区域之所以停止坍缩是因为星系的个别部分稳 定地绕着它的中心旋转，但星系整体并没有旋转。

随着时间流逝，星系中的氢和氮气体被分割成更小的星云，它们在自身引力下坍缩。 当它们收缩时，其中的原子相碰撞，气体温度升高，直到最后，热得足以开始热骤变反 应。这些反应将更多的氢转变成気，释放出的热升高了压力，因此使星云不再继续收缩。 正如同我们的太阳一样，它们将氢燃烧成気，并将得到的能量以热和光的形式辐射出来。 它们会稳定地在这种状态下停留一段很长的时间。质量更大的恒星需要变得更热，以去平 衡它们更强的引力，使得其核聚变反应进行得极快，以至于它们在1亿年这么短的时间里 将氢用光。然后，它们会稍微收缩一点。当它们进一步变热，就开始将気转变成像碳和氧 这样更重的元素。但是，这一过程没有释放出太多的能量，所以正如在黑洞那一章描述 的，危机就会发生了。人们不完全清楚下面还会发生什么，但是看来恒星的中心区域会坍 缩成一个非常紧致的状态，讐如中子星或黑洞。恒星的外部区域有时会在叫做超新星的巨 大爆发中吹出来，这种爆发会使星系中的所有恒星相形之下显得黯淡无光。一些恒星接近 生命终点时产生的重元素就抛回到星系里的气体中去，为下一代恒星提供一些原料。我们 自己的太阳包含大约2%这样的重元素，因为它是第二代或第三代恒星，是由50亿年前从 包含有更早的超新星的碎片的旋转气体云形成的。云里的大部分气体形成了太阳或者喷到 外面去，但是少量的重元素集聚在一起，形成了像地球这样的、现在绕太阳公转的物体。

地球原先是非常热的，并且没有大气。在时间的长河中它冷却下来，并从岩石中溢出 的气体里得到了大气。这早先的大气不能使我们存活。因为它不包含氧气，但有很多对我 们有毒的气体，如硫化氢（即是使臭鸡蛋难闻的气体）O然而，存在其他在这条件下能繁 衍的生命的原始形式。人们认为，它们可能是作为原子的偶然结合形成叫做宏观分子的大 结构的结果而在海洋中发展，这种结构能够将海洋中的其他原子聚集成类似的结构。它们 就这样地复制了自己并繁殖。在有些情况下复制有误差。这些误差多数使得新的宏观分子 不能复制自己，并最终被消灭。然而，有一些误差会产生出新的宏观分子，在复制它们自 己时会变得更好。所以它们具有优点，并趋向于取代原先的宏观分子。进化的过程就是用 这种方式开始，它导致了越来越复杂的自复制的组织。第一种原始的生命形式消化了包括 硫化氢在内的不同物质而放出氧气。这样就逐渐地将大气改变到今天这样的成份，允许诸 如鱼、爬行动物、哺乳动物以及最后人类等生命的更高形式的发展。

宇宙从非常热开始并随膨胀而冷却的景象，和我们今天所有的观测证据相一致。尽管 如此，还有许多重要问题未被回答：

（1） 为何早期宇宙如此之热？

（2） 为何在大尺度上宇宙是如此一致？为何在空间的所有地方和所有方向上它显得 是一样的？尤其是，当我们朝不同方向看时，为何微波辐射背景的温度是如此之相同？这 有点像问许多学生一个考试题。如果所有人都刚好给出相同的回答，你就会十分肯定，他 们互相之间通过话。在上述的模型中，从大爆炸开始光还没有来得及从一个很远的区域传 到另一个区域，即使这两个区域在宇宙的早期靠得很近。按照相对论，如果连光都不能从 一个区域走到另一个区域，则没有任何其他的信息能做到。所以，除非因为某种不能解释 的原因，导致早期宇宙中不同的区域刚好从同样的温度开始，否则，没有一种方法能使它 们有互相一样的温度。

（3） 为何宇宙以这样接近于区分坍缩和永远膨胀模型的临界膨胀率的速率开始，以 至于即使在100亿年以后的现在，它仍然几乎以临界的速率膨胀？如果在大爆炸后的1秒钟 那一时刻其膨胀率甚至只要小10亿亿分之1,那么在它达到今天这么大的尺度之前宇宙就 己坍缩。

（4） 尽管在大尺度上宇宙是如此的一致和均匀，它却包含有局部的无规性，诸如恒 星和星系。人们认为，这些是从早期宇宙中不同区域间的密度的很小的差别发展而来。这 些密度起伏的起源是什么？

广义相对论本身不能解释这些特征或回答这些问题，因为它预言，在大爆炸奇点宇宙 是从无限密度开始的。在奇点处，广义相对论和所有其他物理定律都失效：人们不能预言 从奇点会出来什么。正如以前解释的，这表明我们可以从这理论中除去大爆炸奇点和任何 先于它的事件，因为它们对我们没有任何观测效应。空间一时间就会有边一大爆炸处 的开端。

看来科学揭露了一组定律，在不确定性原理极限内，如果我们知道宇宙在任一时刻的 状态，这些定律就会告诉我们，它如何随时间发展。这些定律也许原先是由上帝颁布的， 但是看来从那以后他就让宇宙按照这些定律去演化，而不再对它干涉。但是，它是如何选 择宇宙的初始状态和结构的？在时间的开端处“边界条件”是什么？

一种可能的回答是，上帝选择宇宙的这种初始结构是因为某些我们无望理解的原因。 这肯定是在一个全能造物主的力量之内。但是如果他使宇宙以这种不可理解的方式开始， 中的一些或全部，在不同的宇宙或在一个宇宙之中是变化的。令人吃惊的事实是，这些数 值看来是被非常细致地调整到使得生命的发展成为可能。例如，如果电子的电荷只要稍微 有点不同，则要么恒星不能够燃烧氢和嬴，要么它们没有爆炸过。当然，也许存在其他形 式的、甚至还没被科学幻想作家梦想过的智慧生命。它并不需要像太阳这样恒星的光，或 在恒星中制造出并在它爆炸时被抛到空间去的更重的化学元素。尽管如此，看来很清楚， 允许任何智慧生命形式的发展的数值范围是比较小的。对于大部份数值的集合，宇宙也会 产生，虽然它们可以是非常美的，但不包含任何一个能为如此美丽而惊讶的人。人们既可 以认为这是在创生和科学定律选择中的神意的证据，也可以认为是对强人择原理的支持。

人们可以提出一系列理由，来反对强人择原理对宇宙的所观察到的状态的解释。首 先，在何种意义上可以说，所有这些不同的宇宙存在？如果它们确实互相隔开，在其他宇 宙发生的东西，怎么可以在我们自己的宇宙中没有可观测的后果？所以，我们应该用经济 学原理，将它们从理论中割除去。另一方面，它们若仅仅是一个单独宇宙的不同区域，则 在每个区域里的科学定律必须是一样的，因为否则人们不能从一个区域连续地运动到另一 区域。在这种情况下，不同区域之间的仅有的不同只是它们的初始结构。这样，强人择原 理即归结为弱人择原理。

对强人择原理的第二个异议是，它和整个科学史的潮流背道而驰。我们是从托勒密和 他的支持者的地心宇宙论发展而来，通过哥白尼和伽利略日心宇宙论，直到现代的图象， 其中地球是一个中等大小的行星，它绕着一个寻常的螺旋星系外圈的普通恒星作公转，而 这星系本身只是在可观察到的宇宙中万亿个星系中的一个。然而强人择原理却宣布，这整 个庞大的构造仅仅是为我们的缘故而存在，这是非常难以令人置信的。我们太阳系肯定是 我们存在的前提，人们可以将之推广于我们的星系，使之允许早代的恒星产生重元素。但 是，丝亳看不岀存在任何其他星系的必要，在大尺度上也不需要宇宙在每一方向上必须如 此一致和类似。

如果人们能够表明，相当多的宇宙的不同初始结构会演化产生像我们今天看到的宇 宙，至少在弱的形式上，人们会对人择原理感到更满意。如果这样，则一个从某些随机的 初始条件发展而来的宇宙，应当包含许多光滑的、一致的并适合智慧生命演化的区域。另 一方面，如果宇宙的初始条件必须极端仔细地选择，才能导致在我们周围所看到的一切， 宇宙就不太可能包含任何会出现生命的区域。在上述的热大爆炸模型中，没有足够的方向 使热从一个区域流到另一区域。这意味着宇宙的初始态在每一处必须刚好有同样的温度， 才能说明我们在每一方向上看到的微波背景辐射都有同样温度，其初始的膨胀率也要非常 精确地选择，才能使得现在的膨胀率仍然是如此接近于需要用以避免坍缩的临界速率。这 表明，如果直到时间的开端热大爆炸模型都是正确的，则必须非常仔细地选择宇宙的初始 态。所以，除非作为上帝有意创造像我们这样生命的行为，否则要解释为何宇宙只用这种 方式起始是非常困难的。

为了试图寻找一个能从许多不同的初始结构演化到象现在这样的宇宙的宇宙模型，麻 省理工学院的科学家阿伦•固斯提出，早期宇宙可能存在过一个非常快速膨胀的时期。这 种膨胀叫做“暴涨”，意指宇宙在一段时间里，不像现在这样以减少的、而是以增加的速率 膨胀。按照固斯理论，在远远小于1秒的时间里，宇宙的半径增大了 100万亿亿亿（I后面 跟30个0）倍。

固斯提出，宇宙是以一个非常热而且相当紊乱的状态从大爆炸开始的。这些高温表明 宇宙中的粒子运动得非常快并具有高能量。正如早先我们讨论的，人们预料在这么高的温 度下，强和弱核力及电磁力都被统一成一个单独的力。当宇宙膨胀时它会变冷，粒子能量 下降。最后出现了所谓的相变，并且力之间的对称性被破坏了：强力变得和弱力以及电磁 力不同。相变的一个普通的例子是，当水降温时会冻结成冰。液态水是对称的，它在任何 一点和任何方向上都是相同的。然而，当冰晶体形成时，它们有确定的位置，并在某一方 向上整齐排列，这就破坏了水的对称。

处理水的时候，只要你足够小心，就能使之“过冷”，也就是可以将温度降低到冰点 （0-0以下而不结冰。固斯认为，宇宙的行为也很相似：宇宙温度可以低到临界值以 下，而没有使不同的力之间的对称受到破坏。如果发生这种情形，宇宙就处于一个不稳定 状态，其能量比对称破缺时更大。这特殊的额外能量呈现出反引力的效应：其作用如同一 个宇宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦在试图建立一个穏定的宇宙模型时，引进广义相对论 之中去的。由于宇宙己经像大爆炸模型那样膨胀，所以这宇宙常数的排斥效应使得宇宙以 不断增加的速度膨胀，即使在一些物质粒子比平均数多的区域，这一有效宇宙常数的排斥 作用超过了物质的引力吸引作用。这样，这些区域也以加速暴涨的形式而膨胀。当它们膨 胀时，物质粒子越分越开，留下了一个几乎不包含任何粒子，并仍然处于过冷状态的膨胀 的宇宙。宇宙中的任何不规则性都被这膨胀抹平，正如当你吹胀气球时，它上面的皱纹就 被抹平了。所以，宇宙现在光滑一致的状态，可以是从许多不同的非一致的初始状态演化 而来。

在这样一个其膨胀由宇宙常数加速、而不由物质的引力吸引使之减慢的宇宙中，早期 宇宙中的光线就有足够的时间从一个地方传到另一个地方。这就解答了早先提出的，为何 在早期宇宙中的不同区域具有同样性质的问题。不但如此，宇宙的膨胀率也自动变得非常 接近于由宇宙的能量密度决定的临界值。这样，不必去假设宇宙初始膨胀率曾被非常仔细 地选择过，就能解释为何现在的膨胀率仍然是如此地接近于临界值。

暴涨的思想还能解释为何宇宙存在这么多物质。在我们能观察到的宇宙里大体有1亿 亿亿亿亿亿亿亿亿亿（1后面跟80个0）个粒子。它们从何而来？答案是，在量子理论中， 粒子可以从粒子/反粒子对的形式由能量中创生出来。但这只不过引起了能量从何而来的 问题。答案是，宇宙的总能量刚好是零。宇宙的物质是由正能量构成的：然而，所有物质 都由引力互相吸引。两块互相靠近的物质比两块分得很开的物质具有更少的能量，因为你 必须消耗能量去克服把它们拉在一起的引力而将其分开。这样，在一定意义上，引力场具 有负能量。在空间上大体一致的宇宙的情形中，人们可以证明，这个负的引力能刚好抵消 了物质所代表的正能量，所以宇宙的总能量为零。

零的两倍仍为零。这样宇宙可以同时将其正的物质能和负的引力能加倍，而不破坏其 能量的守恒。在宇宙的正常膨胀时，这并没有发生。这时当宇宙变大时，物质能量密度下 降。然而，这种情形确实发生于暴涨时期。因为宇宙膨胀时，过冷态的能量密度保持不 变：当宇宙体积加倍时，正物质能和负引力能都加倍，总能量保持为零。在暴涨相，宇宙 的尺度增大了一个非常大的倍数。这样，可用以制造粒子的总能量变得非常大。正如固斯 所说的：“都说没有免费午餐这件事，但是宇宙是最彻底的免费午餐。”

今天宇宙不是以暴涨的方式膨胀。这样，必须有一种机制，它可以消去这一非常大的 有效宇宙常数，从而使膨胀率从加速的状态，改变为正如同今天这样由引力减慢下的样 子。人们可以预料，在宇宙暴涨时不同力之间的对称最终会被破坏，正如过冷的水最终会 凝固一样。这样，未破缺的对称态的额外能量就会释放，并将宇宙重新加热到刚好低于使 不同力对称的临界温度。以后，宇宙就以标准的大爆炸模式继续膨胀并变冷。但是，现在 找到了何以宇宙刚好以临界速率膨胀，并在不同的区域具有相同温度的解释。

在固斯的原先设想中，有点像在非常冷的水中出现冰晶体，相变是突然发生的。其想 法是，正如同沸腾的水围绕着蒸汽泡，新的对称破缺相的“泡泡”在原有的对称相中形成。 泡泡膨胀并互相碰撞，直到整个宇宙变成新相。麻烦在于，正如同我和其他几个人所指出 的，宇宙膨胀得如此之快，甚至即使泡泡以光速涨大，它们也要互相分离，并因此不能合 并在一起。结果宇宙变成一种非常不一致的状态，有些区域仍具有不同力之间的对称。这 样的模型跟我们所观察到的宇宙并不吻合。

1981年10月，我去莫斯科参加量子引力的会议。会后，我在斯特堡天文研究所做了一 个有关暴涨模型和它的问题的讲演。听众席中有一年轻的苏联人——莫斯科列别提夫研究 所的安徳雷•林徳——他讲，如果泡泡是如此之大，以至于我们宇宙的区域被整个地包含 在一个单独的泡泡之中，则可以避免泡泡不能合并在一起的困难。为了使这个行得通，从 对称相向对称破缺相的改变必须在泡泡中进行得非常慢，而按照大统一理论这是相当可能 的。林徳的缓慢对称破缺思想是非常好的，但过后我意识到，他的泡泡在那一时刻必须比 宇宙的尺度还要大！我指出，那时对称不仅仅在泡泡里，而且在所有的地方同时被破坏。 这会导致一个正如我们所观察到的一致的宇宙。我被这个思想弄得非常激动，并和我的一 个学生因•莫斯讨论。然而，当我后来收到一个科学杂志社寄来的林徳的论文，征求是否 可以发表时，作为他的朋友，我感到相当难为情。我回答说，这里有一个关于泡泡比宇宙 还大的瑕疵，但是里面关于缓慢对称破缺的基本思想是非常好的。我建议将此论文照原样 发表。因为林徳要花几个月时间去改正它，并且他寄到西方的任何东西都要通过苏联的审 査，这种对于科学论文的审査既无技巧可言又很缓慢。我和因•莫斯便越俎代庖，为同一 杂志写了一篇短文。我们在该文中指出这泡泡的问题，并提出如何将其解决。

我从莫斯科返回的第二天，即去费城接受富兰克林研究所的奖章。我的秘书朱迪•费 拉以其不差的魅力说服了英国航空公司向她和我免费提供协和式飞机的宣传旅行座席。然 而，在去机场的路上被大雨耽搁，我没赶上航班。尽管如此，我最终还是到了费城并得到 奖章。之后，应邀作了关于暴涨宇宙的讲演。正如在莫斯科那样，我用大部分时间讲授关 于暴涨模型的问题。

几个月之后，宾州大学的保罗•斯特恩哈特和安徳鲁斯•阿尔伯勒希特独立地提出和林 徳非常相似的思想。现在他们和林徳分享以缓慢对称破缺的思想为基础的所谓“新暴胀模 型”的荣誉。（旧的暴胀模型是指固斯关于形成泡泡后快速对称破缺的原始设想。）

新暴涨模型是一个好的尝试，它能解释宇宙为何是这种样子。然而我和其他几个人指 出，至少在它原先的形式，它预言的微波背景辐射的温度起伏比所观察到的情形要大得 多。后来的工作还对极早期宇宙中是否存在这类所需要的相变提岀怀疑。我个人的意见 是，现在新暴涨模型作为一个科学理论是气数己尽。虽然有很多人似乎没有听进它的死 讯，还继续写文章，好像那理论还有生命力。林徳在1983年提岀了一个更好的所谓紊乱暴 涨模型。这里没有相变和过冷，而代之以存在一个自旋为0的场，由于它的量子涨落，在 早期宇宙的某些区域有大的场量。在那些区域中，场的能量起到宇宙常数的作用，它具有 排斥的引力效应，因此使得这些区域以暴涨的形式膨胀。当它们膨胀时，它们中的场的能 量慢慢地减小，直到暴涨改变到犹如热大爆炸模型中的膨胀时为止。这些区域之一就成为 我们看到的宇宙。这个模型具有早先暴涨模型的所有优点，但它不是取决于使人生疑的相 变，并且还能给出微波背景辐射的温度起伏，其幅度与观测相符合。

暴涨模型的研究指出：宇宙现在的状态可以从相当大量的不同初始结构引起的。这是 重要的，因为它表明不必非常细心地选取我们居住的那部份宇宙区域的初始状态。所以， 如果愿意的话，我们可以利用弱人择原理解释宇宙为何是这个样子。然而，绝不是任何一 种初始结构都会产生像我们所观察到的宇宙。这一点很容易说明，考虑现在宇宙处于一个 非常不同的态，例如一个非常成团的、非常无规则的态，人们可以利用科学定律，在时间 上将其演化回去，以确定宇宙在更早时刻的结构。按照经典广义相对论的奇点定理，仍然 存在一个大爆炸奇点。如果你在时间前进方向上按照科学定律演化这样的宇宙，你就会得 到你一开始给定的那个成团的无规则的态。这样，必定存在不会产生我们今天所观察到的 宇宙的初始结构。所以，就连暴涨模型也没有告诉我们，为何初始结构不是那种产生和我 们观测到的非常不同的宇宙的某种态。我们是否应该转去应用人择原理以求解释呢？难道 所有这一切仅仅是因为好运气？看来，这只是无望的遁词，是对我们理解宇宙内在秩序的 所有希望的否定。

为了预言宇宙应该是如何开始的，人们需要在时间开端处有效的定律。罗杰•彭罗斯 和我证明的奇点定理指出，如果广义相对论的经典理论是正确的，则时间的开端是具有无 限密度和无限空间——时间曲率的一点，在这一点上所有已知的科学定律都失效。人们可 以设想存在在奇点处成立的新定律，但是在如此不守规矩的点处，甚至连表述这样的定律 都是非常困难的，而且从观察中我们没有得到关于这些定律应是什么样子的任何提示。然 而，奇点定理真正表明的是，该处引力场变得如此之强，以至于量子引力效应变得重要： 经典理论不再能很好地描述宇宙。所以，人们必须用量子引力论去讨论宇宙的极早期阶 段。我们将会看到，在量子力学中，通常的科学定律有可能在任何地方都有效，包括时间 开端这一点在内：不必针对奇点提出新的定律，因为在量子理论中不须有任何奇点。

我们仍然没有一套完整而协调的理论，它将量子力学和引力结合在一起。然而，我们 相当清楚这样一套统一理论所应该具有的某些特征。其中一个就是它必须和费因曼提出的 按照对历史求和的量子力学表述相一致。在这种方法里，一个粒子不像在经典理论中那 样，不仅只有一个历史。相反的，它被认为是通过空间——时间里的每一可能的路径，*每* 一条途径有一对相关的数，一个代表波的幅度，另一个代表它的相位。粒子通过一指定点 的槪率是将通过此点的所有可能途径的波迭加而求得。然而，当人们实际去进行这些求和 时，就遇到了严重的技术问题。回避这个问题的唯一独特的方法是：你必须不是对发生在 你我经验的“实”的时间内的，而是对发生在所谓“虚”的时间内的粒子的途径的波进行求 和。虚时间可能听起来像科学幻想，但事实上，它是定义得很好的数学概念。如果你取任 何平常的（或“实的”）数和它自己相乘，结果是一个正数。（例如2乘2是4,但-2乘-2也 是这么多）。然而，有一种特别的数（叫虚数），当它们自乘时得到负数。（在这儿的虚 数单位叫做i,它自乘时得-1, 2i自乘得-4,等等。）

人们可以用下面的办法来图解实数和虚数：实数可以用一根从左至右的线来代表，中 间是零点，像-1. -2等负数在左面，而像1, 2等正数在右面。而虚数由书页上一根上下的 线来代表，i, Zi在中点以上，而-i, -2i在中点以下。这样，在某种意义上可以说，虚数和 实数夹一直角。

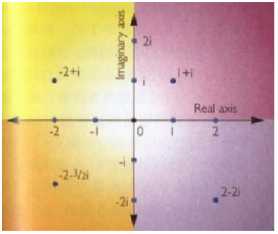


图8.2

人们必须利用虚时间，以避免在进行费因曼对历史求和的技术上的困雄。也就是为了 计算的目的人们必须用虚数而不是用实数来测量时间。这对时空有-有趣的效应：时间和 空间的区别完全消失。事件具有虚值时间坐标的时空被称为欧几里德型的，它是采用建立 了二维面几何的希腊人欧凡里徳的名字命名的。我们现在称之为欧几里徳时空的东西除了 是四维而不是二雄以外，其余的和它非常相似。在欧几里德时空中，时间方向和空间方向 没有不同之处。另•方面，在通常用实的时间坐标来标记事件的实的时空里，人们很容易 区别这两种方向—— 光锥中的任何点是时间方向，之外为空冋方向。就日常的量子力学 而言，在任何情况下，我们利用虚的时冋和欧几里徳时空可以认为仅仅是一个计算实时空 的答案的数学手段（或技巧）°

我们相信，作为任何终极理论的-部分而不可或缺的第二个特征是爱因斯坦的思想， 即引力场是由弯曲的时空来代发：粒子在弯曲空间中试图沿若最接近于直线的某种途径 走，但因为时空不是平坦的。它们的途径看起来似乎被引力场折弯心当我们用费因曼的 路径求和方法去处理说伪斯坦的引力观点时，和粒子的历史相类似的东西则是代表整个宇 宙历史的完整的弯曲的时空。为r避免实际进行历史求和的技术困难.这些弯曲的时空必 须釆用欧儿里徳型的•也就是,时冋是虚的并和空间的方向不可区分。为了计算找到具冇 一定性质，例如在每一点和毎一方向上看起来都一样的实的时空的槪率，人们将和所有具 有这性质的历史相关联的波迭加起来即可.

在广义相对论的经腮理论中，冇许多不同的可能弯曲的时空，毎一个对应于宇宙的不 同的初始态.如果我们知道宇宙的初始态.我们就会知道它的整个历史•类似地.在量于 引力论中，存在许名不同的可能的宇宙量于态•如果我们知道在历史求和中的欧凡里徳弯 曲时空在早先时刻的行为，我们就会知道宇宙的量于态•

在以实的时空为基础的经典引力论中.宇宙可能的行为只冇两种方式X或者它己存在 r无限长时冋.或者它在有限的过去的某一时刻的奇点上冇一个升端•而在量千引力论 中,还存在第三种可能性•因为人们是用欧几里徳时空•在这儿时间方向和空间方向是同 等的.所以时空只有仃限的尺度,却没有奇点作为它的边界或边縁是可能的.时空就像是 地球的表而，只不过多了两维.地球的表面枳是有限的.但它没有边界或边缘：如果你朝 若落日的方向骂船.你不会抻到边缘外面或陷入奇点中去.（因为我曾经环球旅行过，所 以知道！）

如果欧几里徳时空延伸到无限的虚时间，或者在一个虚时间奇点处开始，我们就有了 和在经典理论中指定宇宙初态的同样问题，即上帝可以知道宇宙如何开始，但是我们提不 出任何特别原因，认为它应以这种而不是那种方式开始。另一方面，量子引力论开辟了另 一种新的可能性，在这儿时空没有边界，所以没有必要指定边界上的行为。这儿就没有使 科学定律失效的奇点，也就是不存在在该处必须祈求上帝或某些新的定律给空间一时间设 定边界条件的时空边缘。人们可以说：“宇宙的边界条件是它没有边界。”宇宙是完全自足 的，而不被任何外在于它的东西所影响。它既不被创生，也不被消灭。它就是存在。

我正是在早先提到的那次梵帝冈会议上第一次提出，时间和空间可能会共同形成一个 在尺度上有限而没有任何边界或边缘的面。然而我的论文数学气息太浓，所以文章中包含 的上帝在创造宇宙的作用的含义在当时没有被普遍看出来（对我也正是如此）。在梵蒂冈 会议期间，我不知道如何用“无边界”思想去预言宇宙。然而，第二年夏天我在加州大学的 圣他巴巴拉分校渡过。我的一位朋友兼合作者詹姆•哈特尔在那里，他和我共同得出了如 果时空没有边界时宇宙应满足的条件。回到剑桥后，我和我的两个研究生朱丽安•拉却尔 和约纳逊•哈里威尔继续从事这项工作。

我要着重说明，时空是有限而无界的思想仅仅只是一个设想，它不能从其他原理导 出。正如任何其他的科学理论，它原先可以是出于美学或形而上学的原因而被提出，但是 对它的真正检验在于它所给出的预言是否与观测相一致。然而，在量子引力的情况下，由 于以下两个原因这很难确定。首先，正如将在十一章所要解释的，虽然我们对能将广义相 对论和量子力学结合在一起的理论所应具有的特征，己经知道得相当多，但我们还不能准 确地认定这样一个理论。其次，任何详尽描述整个宇宙的模型在数学上都过于复杂，以至 于我们不能通过计算做出准确的预言。所以，人们不得不做简化的假设和近似——并且甚 至这样，要从中引出预言仍是令人生畏的问题。

在对历史求和中的每一个历史不只描述时空，而且描述在其中的任何东西——包括像 能观察宇宙历史的人类那样复杂的生物。这可对人择原理提供另一个支持，因为如果任何 历史都是可能的，就可以用人择原理去解释为何我们发现宇宙是现今这样子。尽管我们对 自己并不生存于其中的其他历史充竟有什么意义还不淸楚。然而，如果利用对历史求和可 以显示，我们的宇宙不只是一个可能的，而且是最有可能的历史，则这个量子引力论的观 点就会令人满意得多。为此，我们必须对所有可能的没有边界的欧几里徳时空进行历史求 和。

人们从“无边界”假定得知，宇宙沿着大多数历史的机会是可以忽略不计的，但是有一 族特别的历史比其他的历史有更多机会。这些历史可以描绘得像是地球的表面。在那儿与 北极的距离代表虚的时间，并且离北极等距离的圆周长代表宇宙的空间尺度。宇宙是从作 为单独一点的北极开始的。当你一直往南走去，离开北极等距离的纬度圈变大，这是和宇 宙随虚时间的膨胀相对应（图8.1） °宇宙在赤道处达到最大的尺度，并且随着虚时间的 继续增加而收缩，最后在南极收缩成一点。尽管宇宙在北南二极的尺度为零，这些点不是 奇点，并不比地球上的北南二极更奇异。科学定律在这儿有效，正如同它仍在地球上的北 南二极有效一样。

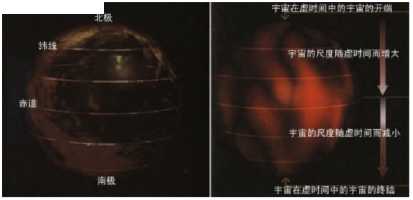


图8.1

然而，在实的时间里宇宙的历史显得非常不一样。大约在100或200亿年以前.它有一 个最小的尺度•这相当于在虚时间里的最大的半径。在后来的实时冋里，宇宙就像由林徳 设想的紊乱暴涨模型那样地膨胀（但是现在人们不必假定宇宙是从某一类正确的状态产生 出来）-宇宙会膨胀到一个非常大的尺度，并最终重新坍缩成为在实时间里看起来像是奇 点的一个东西。这样，在某种意义上说，即使我们躲开黑洞，仍然是注定要毁灭的。只冇 当我们按照虚时间来描绘宇宙时才不会有奇点.

如果宇宙确实处在这样的一个量于态里，在虚时间里宇宙就没有奇点.所以，我近期 的工作似乎完全使我早期研究奇点的工作成果付之东流。但是正如上面所指出的，奇点定 理的真正重要性在于，它们指出引力场必然会强到不能无视量于引力效应的程度。这接着 导致也许在虚时间里宇宙的尺度有限但没有边界或奇点的观念.然而.当人们回到我们生 活于其中的实时间，那儿仍会出现奇点.陷进黑洞那位口J怜的航天员的结局仍然是极W悲 的；只有当他在虚时间里生活，才不会遭遇到奇点.

上述这些也许暗示所谓的虚时间是覓正的实时间•而我们叫做实时间的东西恰恰是于 虚乌有的空想的产物.在实时间中，宇宙的开端和终结都是奇点.这奇点构成了科学定律 在那儿不成立的时空边界.但是.在虚时间里不存在奇点或边界.所以•很叮能我们称之 为虚时间的才貝正是更基本的观念，而我们称作实时间的反而是我们臆造的，它方助于我 们描述宇宙的模样.但是.按照我在第一章所描述的方法.科学理论仅仅是我们用以描述 自己所观察的数学模型，它只存在于我们的头脑中.所以去问诸如这样的何題是臺无意义 的，“实”的成“虚”的时间，哪一个是实在的？这仅仅是哪-个描述更为有用的问题.

人们还叮以利用对历史求和以及无边界假设去发现宇宙的哪些性质W能发生•例如， 人们可以计算.当宇宙具仔现任'密度的某一时刻，在所白.方向上以几乎同等速率膨胀的概 率.在迄今己被号察的简化的模型中，发现这个概率是髙的：也就是.无边界假设导致 个预有.即宇宙现在在毎-方向的膨胀率几乎相同是极KW能的.这与微波背景辐射的观 测相一致，它指岀在任何方向上具白几乎完全同样的强度.如果宇宙在某些方向比其他方 向膨胀得更快,在那些方向辐射的强度就会被一个附加的红移所减小O

人们正在研究无边界条件的进一步预盲.一个特别有趣的何題是•早期字宙中物质密 度对其平均值的小幅度偏离.这些偏离样先引起星系.然后是恒星.最后是我们自身的形 成.不确定性原理意味若.早期宇宙不可能是完全均匀的.因为粒子的位置和速度必定有 -•些不确定性或起伏❷利用无边界条件，我们发现，宇宙事实上必须是从仅仅由不确连性

原理允许的最小的可能的非均匀性开始的。然后，正如在暴胀模型中预言的一样，宇宙经 历了一段快速膨胀时期。在这个期间，初始的非均匀性被放大到足以解释在我们周围观察 到的结构的起源o 1992年宇宙背景探险者卫星（COBE）首次检测到微波背景随方向的非 常微小的变化。这种非均匀性随方向的变化方式似乎和暴胀模型以及无边界设想的预言相 符合。这样，在卡尔•波普的意义上，无边界设想是一种好的科学理论：它的预言可以被 观测证伪，但是却被证实了。在一个各处物质密度稍有变化的膨胀字宙中，引力使得较紧 密区域的膨胀减慢，并使之开始收缩。这就导致星系、恒星和最终甚至像我们自己这样微 不足道的生物的形成。因而，我们在宇宙中看到的所有复杂的结构，可由宇宙无边界条件 和量子力学中的不确定性原理给予解释。

空间和时间可以形成一个没有边界的闭曲面的思想，对于上帝在宇宙事务中的作用还 有一个深远的含义。随着科学理论在描述事件的成功，大部分人进而相信上帝允许宇宙按 照一套定律来演化，而不介入其间促使宇宙触犯这些定律。然而，定律并没有告诉我们， 字宙的太初应该像什么样子——它依然要靠上帝去卷紧发条，并选择如何去启动它。只要 宇宙有一个开端，我们就可以设想存在一个造物主。但是，如果宇宙确实是完全自足的， 没有边界或边缘，它就既没有开端也没有终结——它就是存在。那么，还会有造物主存身 之处吗？

第九章时间箭头

第九章时间箭头

我们在前几章中看到了，长期以来人们关于时间性质的观点是如何变化的。直到本世 纪初，人们还相信绝对时间。也就是说，每一事件可由一个称为“时间”的数以唯一的方式 来标记，所有好的钟在测量两个事件之间的时间间隔上都是一致的。然而，对于任何正在 运动的观察者光速总是一样的这一发现，导致了相对论：而在相对论中，人们必须抛弃存 在一个唯一的绝对时间的观念。代之以每个观察者携带的钟所记录的他自己的时间测量 ——不同观察者携带的钟不必要读数一样。这样，对于进行测量的观察者而言，时间变成 一个更主观的概念。

当人们试图统一引力和量子力学时，必须引入“虚”时间的概念。虚时间是不能和空间 方向区分的。如果一个人能往北走，他就能转过头并朝南走：同样的，如果一个人能在虚 时间里向前走，他应该能够转过来并往后走。这表明在虚时间里，往前和往后之间不可能 有重要的差别。另一方面，当人们考察“实”时间时，正如众所周知的，在前进和后退方向 存在有非常巨大的差别。这过去和将来之间的差别从何而来？为何我们记住过去而不是将 来？

科学定律并不区别过去和将来。更精确地讲，正如前面所解释的，科学定律在称作 C、P和T的联合作用（或对称）下不变。（C是指将反粒子来替代粒子：P的意思是取镜 象，这样左和右就互相交换了： T是指颠倒所有粒子的运动方向，也就是使运动倒退回 去。）在所有正常情形下，制约物体行为的科学定律在CP联合对称下不变。换言之，对 于其他行星上的居民，若他们是我们的镜像并且由反物质而不是物质构成，则生活会刚好 是同样的。

如果科学定律在CP联合对称以及CPT联合对称下都不变，它们也必须在单独的T对称 下不变。然而，在日常生活的实时间中，前进和后退的方向之间还是有一个大的差异。想 像一杯水从桌子上滑落到地板上被打碎。如果你将其录像，你可以容易地辨别出它是向前 进还是向后退。如果将其倒回来，你会看到碎片忽然集中到一起离开地板，并跳回到桌子 上形成一个完整的杯子。你可断定录像是在倒放，因为这种行为在日常生活中从未见过。 如果这样的事发生，陶瓷业将无生意可做。

为何我们从未看到碎杯子集合起来，离开地面并跳回到桌子上，通常的解释是这违背 了热力学第二定律所表述的在任何闭合系统中无序度或炳总是随时间而增加。换言之，它 是穆菲定律的一种形式：事情总是趋向于越变越糟：桌面上一个完整的杯子是一个高度有 序的状态，而地板上破碎的杯子是一个无序的状态。人们很容易从早先桌子上的杯子变成 后来地面上的碎杯子，而不是相反。

无序度或燔随着时间增加是一个所谓的时间箭头的例子。时间箭头将过去和将来区别 开来，使时间有了方向。至少有三种不同的时间箭头：第一个，是热力学时间箭头，即是 在这个时间方向上无序度或墙增加：然后是心理学时间箭头，这就是我们感觉时间流逝的 方向，在这个方向上我们可以记忆过去而不是未来：最后，是宇宙学时间箭头，在这个方 向上宇宙在膨胀，而不是收缩。

我将在这一章论断，宇宙的无边界条件和弱人择原理一起能解释为何所有的三个箭头 指向同一方向。此外，为何必须存在一个定义得很好的时间箭头。我将论证心理学箭头是 由热力学箭头所决定，并且这两种箭头必须总是指向相同的方向。如果人们假定宇宙的无 边界条件，我们将看到必然会有定义得很好的热力学和宇宙学时间箭头。但对于宇宙的整 个历史来说，它们并不总是指向同一方向。然而，我将指出，只有当它们指向一致时，对 于能够发问为何无序度在宇宙膨胀的时间方向上增加的智力生命的发展，才有合适的条 件。

首先，我要讨论热力学时间箭头。总存在着比有序状态更多得多的无序状态的这一事 实，是使热力学第二定律存在的原因。讐如，考虑一盒拼板玩具，存在一个并且只有一个 使这些小纸片拼成一幅完整图画的排列。另一方面，存在巨大数量的排列，这时小纸片是 无序的，不能拼成一幅画。

假设-•个系统从这少数的有序状态之中的一个出发。随着时间流逝，这个系统将按照 科学定律演化，而且它的状态将改变。到后来，因为存在着更多的无序状态，它处于无序 状态的可能性比处于有序状态的可能性更大。这样，如果一个系统服从一个高度有序的初 始条件，无序度会随着时间的增加而增大。

假定拼板玩具盒的纸片从能排成一幅图画的有序组合开始，如果你摇动这盒子，这些 纸片将会采用其他组合，这可能是一个不能形成一幅合适图画的无序的组合，就是因为存 在如此之多得多的无序的组合。有一些纸片团仍可能形成部份图画，但是你越摇动盒子， 这些团就越可能被分开，这些纸片将处于完全混乱的状态，在这种状态下它们不能形成任 何种类的图画。这样，如果纸片从一个高度有序的状态的初始条件出发，纸片的无序度将 可能随时间而增加。

然而，假定上帝决定不管宇宙从何状态开始，它都必须结束于一个高度有序的状态， 则在早期这宇宙有可能处于无序的状态。这意味着无序度将随时间而减小。你将会看到破 碎的杯子集合起来并跳回到桌子上。然而，任何观察杯子的人都生活在无序度随时间减小 的宇宙中，我将论断这样的人会有一个倒溯的心理学时间箭头。这就是说，他们会记住将 来的事件，而不是过去的事件。当杯子被打碎时，他们会记住它在桌子上的情形：但是当 它是在桌子上时，他们不会记住它在地面上的情景。

由于我们不知道大脑工作的细节，所以讨论人类的记忆是相当困难的。然而，我们确 实知道计算机的记忆器是如何工作的。所以，我将讨论计算机的心理学时间箭头。我认 为，假定计算机和人类有相同的箭头是合理的。如果不是这样，人们可能因为拥有一台记 住明年价格的计算机而使股票交易所垮台。

大体来说，计算机的记忆器是一个包含可存在于两种状态中的任一种状态的元件的设 备，算盘是一个简单的例子。其最简单的形式是由许多铁条组成：每一根铁条上有一念 珠，此念珠可呆在两个位置之中的一个。在计算机记忆器进行存储之前，其记忆器处于无 序态，念珠等几率地处于两个可能的状态中。（算盘珠杂乱无章地散布在算盘的铁条 ±） O在记忆器和所要记忆的系统相互作用后，根据系统的状态，它肯定处于这种或那种 状态（每个算盘珠将位于铁条的左边或右边。）这样，记忆器就从无序态转变成有序态。 然而，为了保证记忆器处于正确的状态，需要使用一定的能量（例如，移动算盘珠或给计 算机接通电源）。这能量以热的形式耗散了，从而增加了宇宙的无序度的量。人们可以证 明，这个无序度增量总比记忆器本身有序度的增量大。这样，由计算机冷却风扇排出的热 量表明计算机将一个项目记录在它的记忆器中时，宇宙的无序度的总量仍然增加。计算机 记忆过去的时间方向和无序度增加的方向是一致的。

所以，我们对时间方向的主观感觉或心理学时间箭头，是在我们头脑中由热力学时间 箭头所决定的。正像一个计算机，我们必须在燜增加的顺序上将事物记住。这几乎使热力 学定律变成为无聊的东西。无序度随时间的増加乃是因为我们是在无序度增加的方向上测 量时间。你不可能有比这个更具胜算的打赌了！

但是究竟为何必须存在热力学时间箭头？或换句话说，在我们称之为过去时间的一 端，为何宇宙处于高度有序的状态？为何它不在所有时间里处于完全无序的状态？毕竟这 似乎更为可能。并且为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的方向相同？

在经典广义相对论中，因为所有已知的科学定律在大爆炸奇点处失效，人们不能预言 宇宙是如何开始的。宇宙可以从一个非常光滑和有序的状态开始。这就会导致正如我们所 观察到的、定义很好的热力学和宇宙学的时间箭头。但是，它可以同样合理地从一个非常 波浪起伏的无序状态开始。在那种情况下，宇宙己经处于一种完全无序的状态，所以无序 度不会随时间而增加。或者它保持常数，这时就没有定义很好的热力学时间箭头：或者它 会减小，这时热力学时间箭头就会和宇宙学时间箭头相反向。任何这些可能性都不符合我 们所观察到的情况。然而，正如我们看到的，经典广义相对论预言了它自身的崩溃。当时 空曲率变大，量子引力效应变得重要，并且经典理论不再能很好地描述宇宙时，人们必须 用量子引力论去理解宇宙是如何开始的。

正如我们在上一章看到的，在量子引力论中，为了指定宇宙的态，人们仍然必须说清 在过去的空间-时间的边界的宇宙的可能历史是如何行为的。只有如果这些历史满足无边 界条件，人们才可能避免这个不得不描述我们不知道和无法知道的东西的困难：它们在尺 度上有限，但是没有边界、边缘或奇点。在这种情形下，时间的开端就会是规则的、光滑 的空间-时间的点，并且宇宙在一个非常光滑和有序的状态下开始它的膨胀。它不可能是 完全均匀的，否则就违反了量子理论不确定性原理。必然存在密度和粒子速度的小起伏， 然而无边界条件意味着，这些起伏又是在与不确定性原理相一致的条件下尽可能的小。

宇宙刚开始时有一个指数或“暴涨”的时期，在这期间它的尺度增加了一个非常大的倍 数。在膨胀时，密度起伏一开始一直很小，但是后来开始变大。在密度比平均值稽大的区 域，额外质量的引力吸引使膨胀速度放慢。最终，这样的区域停止膨胀，并坍缩形成星 系、恒星以及我们这样的人类。宇宙开始时处于一个光滑有序的状态，随时间演化成波浪 起伏的无序的状态。这就解释了热力学时间箭头的存在。

如果宇宙停止膨胀并开始收缩将会发生什么呢？热力学箭头会不会倒转过来，而无序 度开始随时间减少呢？这为从膨胀相存活到收缩相的人们留下了五花八门的科学幻想的可 能性。他们是否会看到杯子的碎片集合起来离开地板跳回到桌子上去？他们会不会记住明 天的价格，并在股票市场上发财致富？由于宇宙至少要再等一百亿年之后才开始收缩，忧 虑那时会发生什么似乎有点学究气。但是有一种更快的办法去査明将来会发生什么，即跳 到黑洞里面去。恒星坍缩形成黑洞的过程和整个宇宙的坍缩的后期相当类似：这样，如果 在宇宙的收缩相无序度减小，可以预料它在黑洞里面也会减小。所以，一个落到黑洞里去 的航天员能在投赌金之前，也许能依靠记住轮赌盘上球儿的走向而赢钱。（然而，不幸的 是，玩不了多久，他就会变成意大利面条。他也不能使我们知道热力学箭头的颠倒，或者 甚至将他的赢钱存入银行，因为他被困在黑洞的事件视界后面。）

起初，我相信在宇宙坍缩时无序度会减小。这是因为，我认为宇宙再变小时，它必须 回到光滑和有序的状态。这表明，收缩相仅仅是膨胀相的时间反演。处在收缩相的人们将 以倒退的方式生活：他们在出生之前即己死去，并且随着宇宙收缩变得更年轻。

这个观念是吸引人的，因为它表明在膨胀相和收缩相之间存在一个漂亮的对称。然 而，人们不能置其他有关宇宙的观念于不顾，而只采用这个观念。问题在于：它是否由无 边界条件所隐含或它是否与这个条件不相协调？正如我说过的，我起先以为无边界条件确 实意味着无序度会在收缩相中减小。我之所以被误导，部分是由于与地球表面的类比引起 的。如果人们将宇宙的开初对应于北极，那么宇宙的终结就应该类似于它的开端，正如南 极之与北极相似。然而，北南二极对应于虚时间中的宇宙的开端和终结。在实时间里的开 端和终结之间可有非常大的差异。我还被我作过的一项简单的宇宙模型的研究所误导，在 此模型中坍缩相似乎是膨胀相的时间反演。然而，我的一位同事，宾夕凡尼亚州立大学的 当•佩奇指出，无边界条件没有要求收缩相必须是膨胀相的时间反演。我的一个学生雷蒙• 拉夫勒蒙进一步发现，在一个稍复杂的模型中，宇宙的坍缩和膨胀非常不同。我意识到自 己犯了一个错误：无边界条件意味着事实上在收缩相时无序度继续増加。当宇宙开始收缩 时或在黑洞中热力学和心理学时间箭头不会反向。

当你发现自己犯了这样的错误后该如何办？有些人从不承认他们是错误的，而继续去 找新的往往互相不协调的论据为自己辩解——正如爱丁顿在反对黑洞理论时之所为。另外 一些人首先宣称，从来没有真正支持过不正确的观点，如果他们支持了，也只是为了显示 它是不协调的。在我看来，如果你在出版物中承认自己错了，那会好得多并少造成混乱。 爱因斯坦即是一个好的榜样，他在企图建立一个静态的宇宙模型时引入了宇宙常数，他称 此为一生中最大的错误。

回头再说时间箭头，余下的问题是：为何我们观察到热力学和宇宙学箭头指向同一方 向？或换言之，为何无序度增加的时间方向正是宇宙膨胀的时间方向？如果人们相信，按 照无边界假设似乎所隐含的那样，宇宙先膨胀然后重新收缩，那么为何我们应在膨胀相中 而不是在收缩相中，这就成为一个问题。

人们可以在弱人择原理的基础上回答这个问题。收缩相的条件不适合于智慧人类的存 在，而正是他们能够提出为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的时间方向相同的问题。 无边界假设预言的宇宙在早期阶段的暴涨意味着，宇宙必须以非常接近为避免坍缩所需要 的临界速率膨胀，这样它在很长的时间内才不至坍缩。到那时候所有的恒星都会烧尽，而 在其中的质子和中子可能会衰变成轻粒子和辐射。宇宙将处于几乎完全无序的状态，这时 就不会有强的热力学时间箭头。由于宇宙已经姓于几乎完全无序的状态，无序度不会增加 很多。然而，对于智慧生命的行为来说，一个强的热力学箭头是必需的。为了生存下去， 人类必须消耗能量的一种有序形式——食物，并将其转化成能量的一种无序形式——热 量，所以智慧生命不能在宇宙的收缩相中存在。这就解释了，为何我们观察到热力学和宇 宙学的时间箭头指向一致。并不是宇宙的膨胀导致无序度的增加，而是无边界条件引起无 序度的增加，并且只有在膨胀相中才有适合智慧生命的条件。

总之，科学定律并不能区分前进和后退的时间方向。然而，至少存在有三个时间箭头 将过去和将来区分开来。它们是热力学箭头，这就是无序度增加的时间方向；心理学箭 头，即是在这个时间方向上，我们能记住过去而不是将来：还有宇宙学箭头，也即宇宙膨 胀而不是收缩的方向。我指岀了心理学箭头本质上应和热力学箭头相同。宇宙的无边界假 设预言了定义得很好的热力学时间箭头，因为宇宙必须从光滑、有序的状态开始。并且我 们看到，热力学箭头和宇宙学箭头的一致，乃是由于智慧生命只能在膨胀相中存在。收缩 相是不适合于它的存在的，因为那儿没有强的热力学时间箭头。

人类理解宇宙的进步，是在一个无序度增加的宇宙中建立了一个很小的有序的角落。 如果你记住了这本书中的每一个词，你的记忆就记录了大约200万单位的信息——你头脑 中的有序度就增加了大约200万单位。然而，当你读这本书时，你至少将以食物为形式的1 千卡路里的有序能量，转换成为以对流和汗释放到你周围空气中的热量的形式的无序能 量。这就将宇宙的无序度增大了大约20亿亿亿单位，或大约是你头脑中有序度増量——那 是如果你记住这本书的每一件事的话——的1000亿亿倍。我试图在下一章更增加一些我们 头脑的有序度，解释人们如何将我描述过的部分理论结合一起，形成一个完整的统一理 论，这个理论将适用于宇宙中的任何东西。

第十章虫洞和时间旅行

我们在上一章讨论了，为什么我们看到时间向前进；为什么无序度增加并且我们记住 过去而不是将来。时间好像是一条笔直的铁轨，人们只能往一个方向前进。

如果该铁轨有环圈以及分叉，使得一直往前开动的火车却返回原先通过的车站，这是 怎么回事呢？换言之，人们可能旅行到未来或过去吗？，

H・G•韦尔斯在《时间机器》中探讨了这些可能性，正好像其他无数的科学幻想作家 那样。科学幻想的许多观念，如潜水艇以及飞往月亮等等都被科学实现了。那么，时间旅 行的前景如何昵？

1949年库尔特•哥徳尔发现了广义相对论允许的新的时空。这首次表明物理学定律的 确允许人们在时间里旅行。哥徳尔是一名数学家，他因证明了不完备性定理而名震天下。 该定理是说，不可能证明所有真的陈述，哪怕你把自己限制去证明在像算术这么一目了然 而且枯燥的学科中所有真的陈述。这个定理也许是我们理解和预言宇宙能力的基本极限， 然而迄今它还未成为我们寻求完整统一理论的障碍。

哥徳尔在和爱因斯坦于普林斯顿高级学术研究所度过他们晚年时通晓了广义相对论。 他的时空具有一个古怪的性质：整个宇宙都在旋转。人们也许会问：“它相对于何物而旋 转？ ”其答案是远处的物体绕着小陀螺或者陀螺仪的指向旋转。

这导致了一个附加的效应，一位航天员可以在他出发之前即回到地球。这个性质使爱 因斯坦非常沮丧，他曾经以为广义相对论不允许时间旅行。然而，鉴于爱因斯坦对引力坍 缩和不确定原理的无端反对，这也许反而是一个令人鼓舞的迹象。因为我们可以证明，我 们生存其中的宇宙是不旋转的，所以哥徳尔找到的解并不对应于它。它还有一个非零的宇 宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦以为宇宙是不变时引进的。在哈勃发现了宇宙的膨胀后， 就不再需要宇宙常数，而现在普遍认为它应为零。然而，之后从广义相对论又找到其他一 些更合理的时空，它们允许旅行到过去。其中之一即是旋转黑洞的内部。另外一种是包含 两根快速穿越的宇宙弦的时空。顾名思义，宇宙弦是弦状的物体，它具有长度，但是截面 很微小。实际上，它们更像在巨大张力下的橡皮筋，其张力大约为1亿亿亿吨。把一根宇 宙弦系到地球上，就会把地球在1/30秒的时间里从每小时零英里（1英里=1.609公里）加 速到每小时60英里（1英里=1.609公里）。宇宙弦初听起来像是科学幻想物，但有理由相 信，它在早期宇宙中可由在第五章讨论过的那种对称破缺机制而产生。因为宇宙弦具有巨 大的张力，而且可以从任何形态起始，所以它们一旦伸展开来，就会加速到非常高的速 度。

哥徳尔解和宇宙弦时空一开始就扭曲，使得总能旅行到过去。上帝也许会创生了一个 如此卷曲的宇宙，但是我们没有理由相信他上帝会这样做。微波背景和轻元素丰度的观测 表明，早期宇宙并没有允许时间旅行的曲率。如果无边界设想是正确的，从理论的基础上 也能导出这个结论。这样问题就变成：如果宇宙初始就没有时间旅行所必须的曲率，我们 能否随后把时空的局部区域卷曲到这种程度，以至于允许时间旅行？

快速恒星际或星系际旅行是一个密切相关的问题，也是科学幻想作家所关心的。根据 相对论，没有东西比光运动得更快。因此，如果我们向我们最近邻的恒星a-半人马座—— 发送空间飞船，由于它大约在4光年那么远，所以我们预料至少要8年才能等到旅行者们回 来报告他们的发现。如果要去银河系中心探险，至少要10万年才能返回。相对论确实给了 我们一些宽慰。这就是在第二章提及的双生子佯谬。

因为时间不存在惟一的标准，而每一位观察者都拥有他自己的时间。这种时间是用他 携带的时钟来测量的，这样航程对于空间旅行者比对于留在地球上的人显得更短暂是可能 的。但是，这对于那些只老了几岁的回程的空间旅行者，并没有什么值得高兴的，因为他 发现留在地球上的亲友们己经死去几千年了。这样，科学幻想作家为了使人们对他们的故 事有兴趣，必须设想有朝一日我们能运动得比光还快。大部分这些作家似乎未意识到的 是，如果你能运动得比光还快，则相对论意味着，你能向时间的过去运动，正如以下五行 打油诗所描写的那样：

有位年轻小姐名怀特，

她能行走得比光还快。

她以相对性的方式，

在当天刚刚出发，

却己在前晚到达。

关键在于相对论认为不存在让所有观察者同意的惟一的时间测量。相反地，每位观察 者各有自己的时间测量。如果一枚火箭能以低于光的速度从事件A （譬如2012年奥林匹克 竞赛的100米决赛）至事件B （讐如a-半人马座议会第100, 004届会议的开幕式），那么 根据所有观察者的时间，他们都同意事件A发生于事件B之先。然而，假定飞船必须以超 过光的速度才能把竞赛的消息送到议会，那么以不同速度运动的观察者关于事件A和事件 B何为前何为后就众说纷纭。按照一位相对于地球静止的观察者，议会开幕也许是在竞赛 之后。这样，这位观察者会认为，如果他不理光速限制的话，该飞船能及时地从A赶到 Bo然而，在a-半人马座上以接近光速在离开地球方向飞行的观察者就会觉得事件B,也 就是议会开幕，先于事件A,也就是百米决赛发生。相对论告诉我们。对于以不同速度运 动的观察者，物理定律是完全相同的。

这己被实验很好地检验过。人们认为，即使用更高级的理论去取代相对论，它仍然会 被作为一个特性而保留下来。这样，如果超光速旅行是可能的，运动的观察者会说，就有 可能从事件B,也就是议会开幕式，赶到事件A,也就是百米竞赛。如果他运动得更快一 些，他甚至还来得及在赛事之前赶回，并在得知谁是赢家的情形下放下赌金。

要打破光速壁垒存在一些问题。相对论告诉我们，飞船的速度越接近光速，用以对它 加速的火箭功率就必须越来越大。对此我们己有实验的证据，但不是空间飞船的经验，而 是在诸如费米实验室或者欧洲核子研究中心的粒子加速器中的基本粒子的经验。我们可以 把粒子加速到光速的99. 99%,但是不管我们注入多少功率，也不能把它们加速到超过光 速壁垒。空间飞船的情形也是类似的：不管火箭有多大功率，也不可能加速到光速以上。

这样看来，快速空间旅行和往时间过去旅行似乎都不可行了。然而，还可能有办法。 人们也许可以把时空卷曲起来，使得A和B之间有一近路。在A和B之间创造-•个虫洞就是 一个法子。顾名思义，虫洞就是一个时空细管，它能把两个几乎平坦的相隔遥远的区域连 接起来。

虫洞两个端点之间在几乎平坦的背景里的分离和通过虫洞本身的距离之间没必要有什 么关系。这样，人们可以想像，他可以创造或者找到一个从太阳系附近通到。半人马座的 虫洞。虽然在通常的空间中地球和a-半人马座相隔20万亿英里（1英里=1.609公里），而 通过虫洞的距离却只有几百万英里（1英里=1.609公里）°这样百米决赛的消息就能赶在 议会开幕式前到达。然后一位往地球飞去的观察者也应该能找到另一个虫洞，使他从a-半 人马座议会开幕在赛事之前回到地球。因此，虫洞正和其他可能的超光速旅行方式一样， 允许人们往过去旅行。

时空不同区域之间的虫洞的思想并非科学幻想作家的发明，它的起源是非常令人尊敬 的。

1935年爱因斯坦和纳珍•罗森写了一篇论文。在该论文中他们指出广义相对论允许他 们称为“桥”，而现在称为虫洞的东西。爱因斯坦——罗森桥不能维持得足够久，使得空间 飞船来得及穿越：虫洞会缩紧，而飞船撞到奇点上去。然而，有人提出，一个先进的文明 可能使虫洞维持开放。人们可以把时空以其他方式卷曲，使它允许时间旅行。可以证明这 需要一个负曲率的时空区域，如同一个马鞍面。通常的物质具有正能量密度，赋予时空以 正曲率，如同一个球面。所以为了使时空卷曲成允许旅行到过去的样子，人们需要负能量 密度的物质。

能量有点像金钱：如果你有正的能量，就可以用不同方法分配，但是根据本世纪初相 信的经典定律，你不允许透支。这样，这些经典定律排除了时间旅行的任何可能性。然 而，正如在前面几章所描述的，量子定律己经超越了经典定律。量子定律是以不确定性原 理为基础的。量子定律更慷慨些，只要你总的能量是正的，你就允许从一个或两个账号透 支。换言之，量子理论允许在一些地方的能量密度为负，只要它可由在其他地方的正的能 量密度所补偿，使得总能量保持为正的。量子理论允许负能量密度的一个例子是所谓的卡 西米尔效应。正如我们在第七章看到的，甚至我们认为是“空”的空间也充满了虚粒子和虚 反粒子对，它们一起出现分离开，再返回一起并且相互湮灭。现在，假定人们有两片距离 很近的平行金属板。金属板对于虚光子起着类似镜子的作用。事实上，在它们之间形成了 一个空腔。它有点像风琴管，只对指定的音阶共鸣。这意味着，只有当平板间的距离是虚 光子波长（相邻波峰之间的距离）的整数倍时，这些虚光子才会在平板之中的空间岀现。 如果空腔的宽度是波长的整数倍再加上部分波长，那么在前后反射多次后，一个波的波峰 就会和另■-个波谷相重合，这样波动就被抵消了。

因为平板之间的虚光子只能具有共振的波长，所以虚光子的数目比在平板之外的区域 要略少些，在平板之外的虚光子可以具有任意波长。所以人们可以预料到这两片平板遭受 到把它们往里挤的力。实际上己经测量到这种力。并且和预言的值相符。这样，我们得到 了虚粒子存在并具有实在效应的实验证据。

在平板之间存在更少虚光子的事实意味着它们的能量密度比它处更小。但是在远离平 板的“空的，，空间的总能量密度必须为零，因为否则的话，能量密度会把空间卷曲起来，而 不能保持几乎平坦。这样，如果平板间的能量密度比远处的能量密度更小，它就必须为负 的。

这样，我们对以下两种现象都获得了实验的证据。第一，从日食时的光线弯折得知时 空可以被卷曲。第二，从卡西米尔效应得知时空可被弯曲成允许时间旅行的样子。所以， 人们希望随着科学技术的推进，我们最终能够造出时间机器。但是，如果这样的话，为什 么从来没有一个来自未来的人回来告诉我们如何实现昵？鉴于我们现在处于初级发展阶 段，也许有充分理由认为，让我们分享时间旅行的秘密是不智的。除非人类本性得到彻底 改变，非常难以相信，某位从未来飘然而至的访客会贸然泄漏天机。当然，有些人会宣 称，观察到幽浮就是外星人或者来自未来的人们来访的证据（如果外星人在合理的时间内 到达此地，他们则需要超光速旅行，这样两种可能性其实是等同的）O

然而，我认为，任何外星来的或者来自未来的人的造访应该是更加明显，或许更加令 人不悦。如果他们有意显灵的话，为何只对那些被认为不太可靠的证人进行？如果他们试 图警告我们大难临头，这样做也不是非常有效的。

一种对来自未来的访客缺席的可能解释方法是，因为我们观察了过去并且发现它并没 有允许从未来旅行返回所需的那类卷曲，所以过去是固定的。另一方面，未来是未知的开 放的，所以也可能有所需的曲率。这意味着，任何时间旅行都被局限于未来。此时此刻， 柯克船长和星际航船没有机会出现。

这也许可以解释，当今世界为何还没被来自未来的游客所充斥。但是如果人们能够回 到以前并改变历史，则问题就不能回避。例如，假定你回到过去并且将你的祖先在他仍为 孩童时杀死。这类佯谬有许多版本，但是它们根本上是等效的：如果一个人可以自由地改 变过去，则他就会遇到矛盾。

看来有两种方法解决由时间旅行导致的佯谬。我把一种称为协调历史方法。它是讲， 甚至当时空被卷曲得可能旅行到过去时，在时空中所发生的必须是物理定律的协调的解。 根据这一观点，除非历史表明，你曾经到达过去，并且当时并没有杀死你的祖先或者没有 任何行为和你的现状相冲突，你才能回到过去。况且，当你回到过去，你不能改变历史记 载。那表明你并没有自由意志为所欲为。当然，人们可以说，自由意志反正是虚幻的。如 果确实存在一套制约万物的完整的统一理论，它也应该决定你的行动。但是对于像人类这 么复杂的机体，其制约和决定方式是不可能计算出来的。我们之所以说人们具有意志，乃 在于我们不能预言他们未来的行动。然而，如果一个人乘火箭飞船出发并在这之前己经回 返，我们就将能预言其未来行为，因为那将是历史记载的一部分。这样，在这种情形下， 时间旅行者没有自由意志。

解决时间旅行的其他可能的方法是称为选择历史假想。其思想是，当时间旅行者回到 过去，他就进入和历史记载不同的另外的历史中去。这样，他们可以自由地行动，不受和 原先的历史相一致的约束。史蒂芬•斯匹柏十分喜爱影片《回归未来》中的创意：玛提•马 克弗莱能够返回而且把他双亲恋爱的历史改得更令人满意。

选择历史假想听起来，和理査徳•费因曼把量子理论表达成历史求和的方法相类似， 这己在第四章和第八章描述过。它是说宇宙不仅仅有一个单独历史，它有所有可能的历 史，每一个历史都有自己的概率。然而，在费因曼的设想和选择历史之间似乎存在一个重 要的差别。在费因曼求和中，每一个历史都是由完整的时空和其中的每一件东西组成的。 时空可以被卷曲成可能乘火箭旅行到过去。但是火箭要留在同一时空即同一历史中，因而 历史必须是协调的。这样，费因曼的历史求和设想似乎支持协调历史假想，而不支持选择 历史假想。

费因曼历史求和允许在微观的尺度下旅行到过去。我们在第九章看到，科学定律在 CPT联合对称下不变。这表明，一个在反时钟方向自旋并从A运动到B的反粒子还可以被 认为是在时钟方向自旋并从B运动回A的通常粒子。类似地，一个在时间中向前运动的通 常粒子等价于在时间中往后运动的反粒子。正如在本章以及第七章讨论过的，“空”的空

第十一章物理学的统一

第十一章物理学的统一

正如在第一章中所解释的，一下子建立一个包括宇宙中每一件东西的完整的统一理论 是非常困难的。取而代之，我们在寻求描述发生在有限范围的部分理论方面取得了进步。 我们忽略了其他效应，或者将它们用一定的数字来近似。（例如，当我们用化学来计算原 子间的相互作用时，可以不管原子核内部的结构。）然而，最终人们希望找到一个完整 的、协调的、将所有这些部分理论当作它的近似的统一理论。在这理论中不需要选取特定 的任意数值去符合事实。寻找这样的一个理论被称之为“物理学的统一”。爱因斯坦用他晚 年的大部分时间去寻求一个统一理论，但是没有成功，因为尽管己有了引力和电磁力的部 份理论，但关于核力还知道得非常少，所以时间还没成熟。并且，尽管他本人对量子力学 的发展起过重要作用，但他拒绝相信它的真实性。看来，不确定性原理还是我们在其中生 活的宇宙的一个基本特征。所以，一个成功的统一理论必须将这个原理合并进去。

正如我将描述的，由于我们对宇宙知道得这么多，现在找到这样的一个理论的前景似 乎是好得多了。但是我们必须小心，不要过份自信一 们在过去有过错误的奢望！例 如，在本世纪初，曾经以为每件东西都可以按照连续物质（诸如弹性和热导）的性质予以 解释。原子结构和不确定性原理的发现使之彻底破产。然后又有一次，1928年物理学家、 诺贝尔奖获得者马克斯•玻恩告诉一群来哥丁根大学的访问者：“据我们所知，物理学将在 6个月之内结束。”他的信心是基于狄拉克新近发现的能够制约电子的方程。人们认为质子 ——这个当时仅知的另一种粒子——服从类似的方程，并且这是理论物理的终结。然而， 中子和核力的发现对此又是当头一棒。讲到这些，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。

在前几章中，我描述了引力的部分理论即广义相对论和制约弱、强和电磁力的部分理 论。这后三种理论可以合并成为所谓的大统一理论（GUT） o这个理论并不令人非常满 意，因为它没有包括引力，并且因为包含讐如不同粒子的相对质量等不能从理论预言，而 必须人为选择以适合观测的一些量。要找到一个将引力和其他力相统一的理论，困难在于 广义相对论是一个“经典”理论：也就是说，它没有将量子力学不确定性原理合并在里面。 另一方面，其他的部分理论以非常基本的形式依赖于量子力学，所以第一步必须将广义相 对论和量子力学结合在一起。正如我们己经看到的，这能产生一些显著的推论，例如黑洞 不是黑的：宇宙没有任何奇点并且是完全自足的、没有边界的。正如第七章所解释的，麻 烦在于不确定性原理意味着甚至“空的”空间也是充满了虚的粒子和反粒子，这些粒子对具 有无限的能量，并且由爱因斯坦的著名方程E=mc2可知，这些粒子具有无限的质量。这 样，它们的引力的吸引就会将宇宙卷曲到无限小的尺度。

相当类似地，在其他部分理论中也发生颇似荒谬的无限大，然而，所有这些情形下的 无限大都可用称之为重正化的过程消除掉。这牵涉到引入其他的无限大去消除这些无限 大。虽然在数学上这个技巧相当令人怀疑，而在实际上似乎确实行得通，并用来和这些理 论一起作岀预言，这预言极其精确地和观测相一致。然而，从企图找到一个完全理论的观 点看，由于重正化意味着质量和力的强度的实际值不能从理论中得到预言，必须被选择以 去适合观测，因此重正化有一严重的缺陷。

试图将不确定性原理合并到广义相对论时，人们只有两个可以调整的量：引力强度和 宇宙常数的值。但是调整它们不足以消除所有的无穷大。所以人们得到一个理论，它似乎 预言了诸如空间一时间的曲率的某些量真的是无穷大，但是观察和测量表明它们地地道道 是有限的！人们对于合并广义相对论和不确定性原理的问题怀疑了许久，直到1972年才为 仔细的计算所最后确证。4年之后，人们提岀了一种叫做“超引力”的可能的解答。它的思 想是将携带引力的自旋为2称为引力子的粒子和某些其他具有自旋为3/2、1、1/2和0的新 粒子结合在一起。在某种意义上，所有这些粒子可认为是同一“超粒子”的不同侧面。这样 就将自旋为1/2和3/2的物质粒子和自旋为0、1和2的携带力的粒子统一起来了。自旋1/2和 3/2的虚的粒子反粒子对具有负能量，因此抵消了自旋为2、1和0的虚的粒子对的正能量。 这就使得许多可能的无限大被抵消掉。但是人们怀疑，某些无穷大仍然存在。然而，人们 需要找出是否还留下未被抵消的无穷大，这计算是如此之冗长和困难，以至于没有人会准 备着手去进行。即使使用一个计算机，预料至少要用4年功夫，而且犯至少一个或更多错 误的机会是非常高的。这样，只有其他人重复计算，并得到同样的答案，人们才能判断已 取得了正确的答案，但这似乎是不太可能的！

尽管存在这些问题，尽管超引力理论中的粒子似乎不与观察到的粒子相符合的这一事 实，大部分科学家仍然相信，超引力可能是对于物理学统一问题的正确答案。看来它是将 引力和其他力相统一起来的最好办法。然而1984年，人们的看法显著地改变为更喜欢所谓 的弦理论。在这些理论中，基本的对象不再是只占空间单独的点的粒子，而是只有长度而 没有其他线度、像是一根无限细的弦这样的东西。这些弦可以有端点（所谓的开弦），或 它们可以自身首尾相接成闭合的圈子（闭弦）（图11.1和图11.2） o在每一时刻每一个粒 子占据空间的一点。这样，它的历史可以在空间一时间用一根线代表（“世界线”）。另一 方面，在每一时刻一根弦占据空间的一根线。所以它在时空里的历史是一个叫做世界片的 二维面（在这世界片上的任一点都可用两个数来描述：一个指明时间，另一个指明这一点 在弦上的位置。）一根开弦的世界片是一带子，它的边缘代表弦的端点通过时空的路径 （图11.1）: 一根闭弦的世界片是一个圆柱或一个管（图11.2）: 一个管的截面是一个

圈，它代表在一特定时刻的弦的位置。

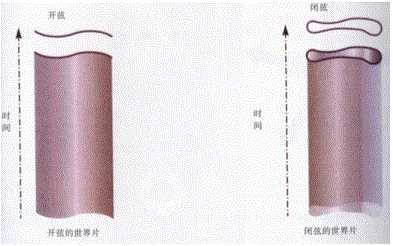


图 11.1、图 11.2

两根弦可以连接在一起，形成一根单独的弦。在开弦的情形下只要将它们端点连在一 起即可（图11.3）:在闭弦的情形下，像是两条裤腿合并成一条裤子（图11.4） o类似 地，一根单独的弦可以分成两根弦。在弦理论中，原先以为是粒子的东西，现在被描绘成 在弦里传播的波动，如同振动着的风筝的弦上的波动。一个粒子从另一个粒子发射出来或 者被吸收，对应于弦的分解和合并。例如，太阳作用到地球上的引力，在粒子理论中被描

述成由太阳上的粒子发射出并被地球上的粒子所吸收的引力子（图11.5） °在弦理论中, 这个过程相应于一个H形状的管（图11.6）（弦理论有点像管道工程）。H的两个垂直的 边对应于太阳和地球上的粒子，而水平的横杠对应于在它们之间传递的引力子。





大N艸

图 11.3、图 11.4 疫 /

f

*■:< I*

图 11.5、图 11.6

弦理论有一个古怪的历史。它原先是60年代后期发明来试图找岀一个描述强作用的理 论。其方法是，诸如质子和中子这样的粒子可被认为是一根弦上的波动。这些粒子之间的 强作用力对应于连接于其他一些弦之间的弦的片段——正如蜘蛛网一样。这弦必须像具有 大约10吨拉力的橡皮带，才能使理论给出粒子之间强作用力的观察值。

1974年，巴黎的朱勒•谢尔克和加州理工学院的约翰•施瓦兹发表了一篇论文，指出弦 理论可以描述引力，但是只不过其张力要大得多，大约是1000万亿亿亿亿吨（1后面跟39 个0） °在通常尺度下，弦理论和广义相对论的预言是相同的，但在非常小的尺度下，比 10亿亿亿亿分之一厘米（1厘米被1后而跟33个0除）更小时，它们就不一样了。然而，他 们的工作并没有引起很大的注意，因为大约正是那时候。大多数人抛弃了原先的强作用力 的弦理论，而倾心于夸克和胶子的理论，后者似乎和观测符合得好得多。谢尔克死得很惨 （他受糖尿病折磨，在周围没人给他注射胰岛素时昏迷死去）。这样一来，施瓦兹几乎成 为弦理论的唯一支持者，只不过现在设想的弦张力要大得多而己。

1984年，因为两个明显的原因，人们对弦理论的兴趣突然复活。一个原因是，在证明 超引力是有限的，以及解释我们观察到的粒子的种类方面，人们未能真正取得进展。另一 个原因是，约翰•施瓦兹和伦敦玛丽皇后学院的麦克•格林发表的一篇论文指出，弦理论可 以解释内禀的左旋性的粒子存在，正如我们观察到的一些粒子那样。不管是什么原因，大 量的人很快开始作弦理论的研究，而且发展了称之为异形弦的新形式，这种形式似乎能够 解释我们观测到的粒子类型。

弦理论也导致无穷大，但是人们认为，它们在一种类似异形弦的变体中会被消除掉

（虽然这一点还没被确认）。然而，弦理论有更大的问题：似乎只有当时空是十维或二十 六维，而不是通常的四维时它们才是协调的！当然，额外的时空维数是科学幻想的老生常 谈：的确，它们几乎是必不可少的，因为否则相对论对人们不能旅行得比光更快的限制意 味着，由于要花这么长的时间，以至于在恒星和星系之间的旅行成为不可能。科学幻想的 办法是，人们可以通过更高的维数抄近路。这一点可用以下方法描述。想像我们生活的空 间只有二维，并且弯曲成像一个锚圏或环的表面（图11.7）。如果你是处在这圈的内侧的 一边而要到另一边去，你必须沿着圏的内边缘走一圈。然而，你如果允许在第三维空间里 旅行，则可以直穿过去。

二ttt立间中屮利8的谥短程 三維空间中从的*S^li*

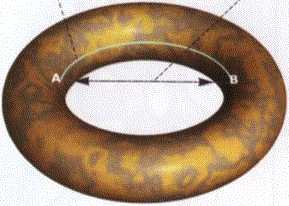


图11.7

如果这些额外的维数确实存在，为什么我们没有觉察到它们呢？为何我们只看到三维 空间和一维时间呢？ 一般认为，其他的维数被弯卷到非常小的尺度——大约为1英寸的100 万亿亿亿分之一的空间，人们根本无从觉察这么小的尺度。我们只能看到一个时间和三个 空间的维数，这儿时空是相当平坦的。这正如一个桔子的表面：如果你靠非常近去看，它 是坑坑洼洼的并有皱纹；但若离开一定的距离，你就看不见高低起伏而显得很光滑。对于 时空亦是如此。因此在非常小的尺度下，时空是十维的，并且是高度弯曲的；但在更大的 尺度下，你看不见曲率或者额外的维数。如果这个图像是正确的，对于自愿的空间旅行者 来讲是个坏消息，额外附加的维实在是太小了，以至于不能允许空间飞船通过。然而，它 引起了另一个重要问题：为何是一些而不是所有的维数被卷曲成一个小球？也许在宇宙的 极早期所有的维都曾经非常弯曲过。为何一维时间和三维空间摊平开来，而其他的维仍然 紧紧地卷曲着？

人择原理可能提供一个答案。二维空间似乎不足以允许像我们这样复杂生命的发展。 例如，如果二维动物吃东西时不能将之完全消化，则它必须将其残渣从吞下食物的同样通 道吐出来：因为如果有一个穿通全身的通道，它就将这生物分割成两个分开的部分，我们 的二维动物就解体了（图10.8） o类似的，在二维动物身上实现任何血液循环都是非常困 难的。



图 11.8

多于三维的空间维数也有问题。两个物体之间的引力将随距离衰减得比在三维空间中 更快。（在三维空间内，如果距离加倍则引力减少到1/4。在四维空间减少到1/8,五维空 间1/16,等等。）其意义在于使像地球这样绕着太阳的行星的轨道变得不稳定，地球偏离 圆周轨道的最小微扰（例如由于其他行星的引力吸引）都会引起它以螺旋线的轨道向外离 开或向内落到太阳上去。我们就会被冻死或者被烧死。事实上，在维数多于三维的空间 中，引力随距离变化的同样行为意味着，太阳不可能由于压力和引力相平衡，而存在于一 个稳定的状态，它若不被分解就会坍缩形成黑洞。在任一情况下，作为地球上生命的热和 光的来源来说，它没有多大用处。在小尺度下，原子里使电子绕着原子核运动的电力行为 正和引力一样，这样电子或者从原子逃逸出去，或者以螺旋的轨道落到原子核上去。在任 一情形下，都不存在我们所知道的原子。

看来很清楚，至少如我们所知，生命只能存在于一维时间和三维空间没被卷曲得很小 的时空区域里。这表明，只要人们可以证明弦理论至少允许存在宇宙的这样的区域——似 乎弦理论确实能做到这一点，则我们可以用弱人择原理。同样，也会存在宇宙的其他区域 或其他宇宙（不管那是什么含意），那里所有的维都被卷曲得很小，或者多于四维几乎是 平坦的。但在这样的区域里，不会有智慧生物去观察这有效维数的不同数目。另一个问 题是存在至少四种不同的弦理论（开弦和三种不同的闭弦理论），以及由弦理论预言的额 外维的极其繁多的卷曲方式。为何自然只挑选一种弦理论和一种卷曲方式？这问题一度似 乎没有答案，因而无法向前进展。后来，大约从1994年开始，人们发现了所谓的对偶性： 不同的弦理论以及额外维的不同卷曲方式会导致四维时空中的同样结果。不仅如此，正如 在空间中占据一点的粒子，也像空间中线状的弦，还存在另一种称作P-膜的东西，它在空 间里占据二维或更高维的体积。（粒子可认为是O-膜，而弦为1-膜，但是还存在P从2到9 的P-膜）。这似乎表明，在超引力、弦以及P膜理论中存在某种民主：它们似乎和平相 处，没有一种比另一种更基本。看起来，它们是对某种基本理论的不同近似，而且在不同 的情形下成立。人们探索了这个基本理论，但是迄今臺无成就。因为哥徳尔指出，不可 能用单独的一组公理系统来表述算术。我相信这儿的情形不可能比它更好，基本理论不可 能存在单独的表述。这犹如你不可能只用一张单独的地图去描述地球或者锚圈的表面：在 地球的情形下，你至少需要两张地图去覆盖每一点，而在锚圈的情形下，则需要四张。每 张地图只对一个有限的区域有效，但是不同的地图有一个交叠的区域。整族地图就为该表 面提供了完整的描述。类似地，在物理学中对不同的情形需要使用不同的表述，但是两种

学上协调的并且总是给出与观察一致的预言，我们便可以适度地有信心认为它是正确的。 它将给人类为理解宇宙的智力斗争历史长期的光辉篇章打上一个休止符。但是，它还会改 变常人对制约宇宙定律的理解。在牛顿时代，一个受教育的人至少在梗概上掌握整个人类 知识。但从那以后，科学发展的节奏使之不再可能。因为理论总是被改变以囊括新的观察 结果，它们从未被消化或简化到使常人能理解。你必须是一个专家，即使如此，你只能希 望适当地掌握科学理论的一小部分。另外，其发展的速度是如此之快，以至于在中学和大 学所学的总是有点过时。只有少数人可以跟得上知识快速进步的前沿，但他们必须贡献他 们的毕生，并局限在一个小的领域里。其余的人对于正在进行的发展和它们产生的激动只 有很少的概念。70年以前，如果爱丁顿的话是真的，那么只有两个人理解广义相对论。今 天，成千上万的大学研究生能理解、并且几百万人至少熟悉这种思想。如果发现了一套完 整的统一理论，以同样方法将其消化并简化，以及在学校里至少讲授其梗概，这只是时间 的迟早问题。我们那时就都能够对制约宇宙的定律有所理解，并对我们的存在负责。

即使我们发现了一套完整的统一理论，由于两个原因，这并不表明我们能一般地预言 事件。第一是我们无法避免不确定性原理给我们的预言能力设立的极限。然而，更为严厉 的是第二个限制。它是说，除了非常简单的情形，我们不能准确解出这理论的方程。（在 牛顿引力论中，我们甚至连三体运动问题都不能准确地解出，而且随着物体的数目和理论 复杂性的增加，困难愈来愈大。）除了在最极端状态下，我们己经知道规范物体行为的定 律。特别是，我们知道作为所有化学和生物基础的基本定律。我们肯定还没有将这些学科 归结为可解问题的状态：我们在从数学方程来预言人类行为上只取得了很少的成功！所 以，即使我们确实找到了基本定律的完整集合，在未来的岁月里，仍存在着发展得更好的 近似方法，使得我们在复杂而现实的情形下，能完成对可能结果的有用预言的、这一智慧 的、富有挑战性的任务。一个完全的、协调的统一理论只是第一步，我们的目标是完全理 解发生在我们周围的事件以及我们自身的存在。

第十二章结论

第十二章结论

我们发现自己是处于使人为难的世界中。我们要为自己在四周所看的一切赋予意义并 问道：什么是宇宙的性质？我们在它之中的位置如何，以及宇宙和我们从何而来？为何它 是这个样子的？我们采用某种“世界图”来试图回答这些问题，如同无限的乌龟塔——一个 支持平坦的地球是这样的一种图象一样，超弦理论也是一种图象。虽然后者比前者更数学 化、更精确，但两者都是宇宙的理论。两个理论都缺乏观察的证据：没人看到一个背负地 球的大龟，但也没有人看到超弦。然而，龟理论作为一个好的科学理论是不够格的，因为 它预言了人会从世界的边缘掉下去。除非发现它能为据说在百慕达三角消失的人提供解 释。这个预言和经验不一致！

最早先在理论上描述和解释宇宙的企图牵涉到这样的思想，事件或自然现象是由具备 人类感情的灵魂所控制，它们的行为和人类非常相像，并且是不可预言的。这些灵魂栖息 在自然对象之中，诸如河流和山岳，包括诸如太阳和月亮这样的天体之中。它们必须被祈 祷并供奉，以保证土壤的肥沃和四季的变化。然而，一些规律性逐渐地被注意到：太阳总 是东升西落，而不管是否用牺牲去对之进贡。更进一步，太阳、月亮和行星沿着以被预言 得相当精确的轨道穿越天穹。太阳、月亮仍然还可以是神祗，只不过是服从严格定律的 神。如果你不将耶和华停止太阳运行之类的神话当真，则这-•切显然是臺不例外的。

首先，只有在天文学和一些其他情形下，这些规则和定律是显而易见的。然而随着文 明的发展，特别是近300年期间，越来越多的规则和定律被发现。这些定律的成功，使得 拉普拉斯在19世纪初主张科学的宿命论。他提议只要给定宇宙在某一时刻的结构，由给定 的一组定律即能精确地决定它的演化。

拉普拉斯的宿命论在两个方面是不完整的。它没讲定律应该如何选择，也没指定宇宙 的初始结构。这些都留给了上帝。上帝会选择让宇宙如何开始并要服从什么定律，但是一 旦开始之后它将不再干涉。事实上，上帝是被限制于19世纪科学不能理解的领域里。

我们现在知道，拉普拉斯的宿命论的希望，至少在按照他头脑中的方式，是不能实现 的。量子力学不确定性原理表明，某些诸如粒子的位置和速度的对偶的量，不能同时以完 全的精确度去预言。

量子力学通过一族量子理论来处理这种情形，粒子没有很好定义的位置和速度，而是 由一个波来代表。它们给出了这波随时间演化的定律，在这种意义上，这些量子理论从属 于宿命论。这样，如果某一时刻这个波是已知的，便可以将任一时刻的波算出。只是当我 们试图按照粒子的位置和速度对波作解释之时，不可预见性的紊乱的要素才出现。但这也 许是我们的错误：也许不存在粒子的位置和速度，只有波。只不过是我们企图将波硬套到 我们预想的位置和速度的观念之中而己。由此导致的不一致乃是表面上不可预见性的原 因。

事实上，我们已经重新将科学的任务定义为发现能使我们在由不确定性原理设定的极 限内预言事件的定律。然而，还存在如下问题：宇宙的定律和初始条件是如何及为何选取 的？

在本书中，我特别将制约引力的定律突出出来，因为正是引力使宇宙的大尺度结构成 形，即使它是四类力中最弱的一种。引力定律和直到相当近代还被坚持的宇宙随时间不变 的观念不相协调：引力总是吸引的这一事实意味着，宇宙的演化方式必居其一，要么正在 膨胀，要么正在收缩。按照广义相对论，宇宙在过去某一时刻必须有一无限密度的状态， 亦即大爆炸，这是时间的有效起始。类似地，如果整个宇宙坍缩，在将来必有另一个无限 密度的状态，即大挤压，这是时间的终点。即使整个宇宙不坍缩，在任何坍缩形成黑洞的 局部区域里都会有奇点。这些奇点正是任何落进黑洞的人的时间终点。在大爆炸或其他奇 点，所有定律都失效，所以上帝仍然有完全的自由去选择发生了什么以及宇宙是如何开始 的。

当我们将量子力学和广义相对论相结合，似乎产生了以前从未有过的新的可能性：空 间和时间一起可以形成一个有限的、四维的没有奇点或边界的空间，这正如地球的表面， 但有更多的维数。看来这种思想能够解释观察到的宇宙的许多特征，诸如它的大尺度一致 性，还有像星系、恒星甚至人类等等小尺度的对此均匀性的偏离。它甚至可以说明我们观 察到的时间的箭头。但是如果宇宙是完全自足的、没有奇点或边界、并且由统一理论所完 全描述，那么就对上帝作为造物主的作用有深远的含义。

有一次爱因斯坦问道：“在制造宇宙时上帝有多少选择性？ ”如果无边界假设是正确 的，在选择初始条件上它就根本没有自由。当然，它仍有选择宇宙所服从的定律的自由。 然而，实在并没有那么多的选择性：很可能只有一个或数目很少的完整的统一理论，它是 自治的，并且允许复杂到像能研兖宇宙定律和询问上帝本性的人类那样的结构的存在。

即使只存在一个可能的统一理论，那只不过是一组规则或方程。是什么赋予这些方程 以生命去制造一个为它们所描述的宇宙？通常建立一个数学模型的科学方法不能回答，为 何必须存在一个为此模型所描述的宇宙这样的问题。为何宇宙陷入其存在性的错综复杂之 中？是否统一理论是如此之咄咄逼人，以至于其自身之实现成为不可避免？或者它需要一 个造物主？若是这样，它还有其他的宇宙效应吗？又是谁创造了造物主？

迄今，大部分科学家太忙于发展描述宇宙为何物的理论，以至于没工夫去过问为什么 的问题。另一方面，以寻根究底为己任的哲学家不能跟得上科学理论的进步。在18世纪， 哲学家将包括科学在内的整个人类知识当作他们的领域，并讨论渚如宇宙有无开初的问 题。然而，在19和20世纪，科学变得对哲学家，或除了少数专家以外的任何人而言，过于 技术性和数学化了。哲学家如此地缩小他们的质疑的范围，以至于连维特根斯坦——*这位* 本世纪最著名的哲学家都说道：“哲学仅余下的任务是语言分析。”这是从亚里士多徳到康 徳以来哲学的伟大传统的何等的堕落！

然而，如果我们确实发现了一套完整的理论，它应该在一般的原理上及时让所有人

（而不仅仅是少数科学家）所理解。那时，我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通 通的人，都能参加为何我们和宇宙存在的问题的讨论。如果我们对此找到了答案，则将是 人类理智的最终极的胜利一因为那时我们知道了上帝的精神。

阿尔伯特•爱因斯坦

爱因斯坦和核弹政治的瓜葛是众所周知的：他签署了那封著名的致富兰克林•罗斯福 总统的信，说服美国认真考虑他的想法，并且他在战后从事阻止核战争的各项努力。但 是，这些不仅仅是一位科学家被拖入政界的孤立行动。事实上，爱因斯坦的一生用他自己 的话来说是“踌躇于政治和方程之间。”

爱因斯坦最早从事政治活动是在第一次世界大战，当时他在柏林当教授。由于目睹草 菅人命而不胜厌恶，他卷入了反战示威。他拥护国内反抗以及公开鼓励人民拒绝征兵，因 而不讨他的同事们喜欢。后来，在战时他又致力于调解和改善国际关系。这也不得人心， 而且他的政治态度很快使他难以访问美国，甚至连讲学都有困难。

爱因斯坦第二个伟大的事业是犹太复国主义。虽然他在血统上是犹太人，但他拒绝 《圣经》上关于上帝的说法。然而，第一次世界大战之前和期间，他越发看清反犹主义， 这导致他逐渐和犹太团体相认同，而后成为一个直言不讳的犹太复国主义的拥护者。再度 不受欢迎也未能阻止他发表自己的主张。他的理论一发表就受到攻击，甚至成立了一个反 爱因斯坦的组织。有一个人被定罪为教唆他人去谋杀爱因斯坦（只罚了6美金）。但爱因 斯坦是冷静的：当一本书以题为《100个反爱因斯坦的作家》出版时，他反驳道：“如果真 是我错了的话，那么一个人反对我就足够了！”

1933年，希特勒上台了，爱因斯坦正在美国，他宣布不再回徳国。后来纳粹义勇军抄 查了他的房子，并没收了他的银行账号。一家柏林报纸的头条写道：“来自爱因斯坦的好 消息——他不回来了。”面对着纳粹的威胁，爱因斯坦放弃了和平主义，终于忧虑到徳国 科学家会制造核弹，因而建议美国应该发展自己的核弹。但是，即使在第一枚原子弹爆炸 之前，他就曾经公开警告过核战争的危险，并提议对核武器进行国际控制。

贯穿爱因斯坦一生，他致力于和平的努力可能成效甚微——肯定只说服了很少的朋 友。然而，他对犹太复国主义事业的口头支持在1952年被及时承认，其时他被推荐为以色 列的总统。但他谢绝了。他说他认为自己在政治上太天真。可是，也许其真正的原因却并 非如此，再次引用他自己的话：“方程对我而言更重要些，因为政治是为当前，而一个方 程却是一种永恒的东西。”

伊萨克•牛顿

伊萨克•牛顿不是一个讨人喜欢的人物。他和其他院士的关系声名狼藉。他晚年的大 部分时间都是在激然的争吵纠纷中渡过。随着那部肯定是物理学有史以来最有影响的书 ——《数学原理》的出版，牛顿很快就成为名重一时的人物。他被任命为皇家学会主席， 并成为第-•个被授予爵士的科学家。

牛顿不久就与皇家天文学家约翰•夫莱姆斯梯徳发生冲突。他早先曾提供牛顿许多 《原理》一书所需的数据，后来他扣压了牛顿需要的资料。牛顿是不许别人回答“不”字 的，他自封为皇家天文台的大总管，然后迫使立即出版这些数据。最后，他指使夫莱姆斯 梯徳的冤家对头爱徳蒙•哈雷夺得夫莱姆斯梯徳的工作成果，并且准备出版。可是夫莱姆 斯梯徳告到法庭去，在最紧要关头，赢得了法庭的判决：不得散发这剽窃的著作。牛顿被 激怒了，作为报复，他就在后来的《原理》版本中系统地删除所有来自夫莱姆斯梯徳的引 证。

他和徳国哲学家高特夫瑞徳•莱布尼兹之间发生了更严重的争吵。莱布尼兹和牛顿各 自独立地发展了叫做微积分的数学分支，它是大部分近代物理的基础。虽然现在我们知 道，牛顿发现微积分要比莱布尼兹早若干年，可是他很晚才出版他的著作。随着关于谁是 第一个发现者的严重争吵的发生，科学家们激烈地为双方作辩护。然而值得注意的是，大 多数为牛顿辩护的文章均出自牛顿本人之手，只不过仅仅用朋友的名义岀版而己！当争论 日趋激烈时，莱布尼兹犯了向皇家学会起诉来解决这一争端的错误。牛顿作为其主席，指 定了一个清一色的由牛顿的朋友组成的“公正的”委员会来审查此案。更有甚者后来牛顿自 己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼兹剽窃。牛顿还不满 意，他又在皇家学会自己的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。据报道，莱布尼 兹死后，牛顿扬言他为伤透了莱布尼兹的心而洋洋得意。

在这两次争吵期间，牛顿己经离开剑桥和学术。在剑桥他曾积极从事反天主教运动， 后来在议会中也很活跃，最终作为酬报，他得到皇家造币厂厂长的肥缺。在这里，他以社 会上更能接受的方式，施展他那狡裁和刻薄的能酎，成功地导演了一场反对伪币的重大战 役，甚至将几个人送上了絞刑架。

的差别消失。

基本粒子：被认为不可能再分的粒子。

事件：由它的时间和空间所指定的空间-时间中的一点。

事件视界：黑洞的边界。

不相容原理：两个相同的自旋为1/2的粒子（在测不准原理设定的极限之内）不能同 时具有相同的位置和速度。

场：某种充满空间和时间的东西，与它相反的是在一个时刻，只存在于空间-时间中 的一点的粒子。

频率：对一个波而言，在1秒钟内完整循环的次数。

伽玛射线：波长非常短的电磁波，是由放射性衰变或由基本粒子碰撞产生的。

广义相对论：爱因斯坦的基于科学定律对所有的观察者（而不管他们如何运动的）必 须是相同的观念的理论。它将引力按照四维空间-时间的曲率来解释。

测地线：两点之间最短（或最长）的道路。

大统一能量：人们相信，在比这能量更大时，电磁力、弱力和强力之间的差别消失。

大统一理论（GUT）: 一种统一电磁、强和弱力的理论。

虚时间：用虚数测量的时间。

光锥：空间-时间中的面，在上面标出光通过一给定事件的可能方向。

光秒（光年）：光在1秒（1年）时间里走过的距离。

磁场：引起磁力的场，和电场合并成电磁场。

质量：物体中物质的量：它的惯性，或对加速的抵抗。

微波背景辐射：起源于早期宇宙的灼热的辐射，现在它受到如此大的红移，以至于不 以光而以微波（波长为几厘米的无线电波）的形式呈现出来。

裸奇点：不被黑洞围绕的空间-时间奇点。

中微子：只受弱力和引力作用的极轻的（可能是无质量的）基本物质粒子。

中子：一种不带电的、和质子非常类似的粒子，在大多数原子核中大约一半的粒子是 中子。

中子星：一种由中子之冋的不相容原理排斥力所支持的冷的恒星。

无边界条件：宇宙是有限的但无界的（在虚时间里）思想。

核聚变：两个核碰撞并合并成一个更重的核的过程。

核：原子的中心部份，只包括由强作用力将其束缚在一起的质子和中子。

粒子加速器：一种利用电磁铁能将运动的带电粒子加速，并给它们更多能量的机器。

相位：一个波在特定的时刻的在它循环中的位置-一种它是否在波峰、波谷或它们之 间的某点的标度。

光子：光的一个量子。

普朗克量子原理：光（或任何其他经典的波）只能被发射或吸收其能量与它们频率成 比例的分立的量子的思想。

正电子：电子的反粒子（带正电荷）O

太初黑洞：在极早期宇宙中产生的黑洞。

比例：“X比例于Y”表示当Y被乘以任何数时，X也如此：“X反比例于Y”，表示，当Y 被乘以任何数时，X被同-•个数除。

质子：构成大多数原子中的核中大约一半数量的、带正电的粒子。

量子：波可被发射或吸收的不可分的单位。

量子力学：从普郎克量子原理和海森堡不确定性原理发展而来的理论。

夸克：感受强作用力的带电的基本粒子。每一个质子和中子都是由三个夸克组成。

雷达：利用脉冲无线电波的单独脉冲到达目标并折回的时间间隔来测量对象位置的系 统。

放射性：一种类型的原子核自动分裂成其他的核。

红移：由于多普勒效应，从离开我们而去的恒星发出的光线的红化。

奇点：空间-时间中空间-时间曲率变成无穷大的点。

奇点定理：这定理是说，在一定情形下奇点必须存在--特别是宇宙必须开始于一个奇 点。

时空：四维的空间，上面的点即为事件。

空间的维：空间-时间的类空的、也就是除了时间的维之外的三维的任一维。

狭义相对论：爱因斯坦的基于科学定律对所有进行自由运动的观察者（不论他们的运 动速度）必须相同的观念。

谱：诸如电磁波对它的分量频率的分解。

自旋：相关于但不等同于日常的自转概念的基本粒子的内部性质。

稳态：不随时间变化的态：一个以固定速率自转的球是稳定的，因为即便它不是静止 的，在任何时刻它看起来都是等同的。 弦理论：物理学的一种理论，其中粒子被描述成 弦上的波。弦只有长度，但是没有其他维。

强力：四种基本力中最强的、作用距离最短的一种力。它在质子和中子中将夸克束缚 在一起，并将质子和中子束缚在一起形成原子。

不确定性原理：人们永远不能同时准确知道粒子的位置和速度：对其中一个知道得越 精确，则对另一个就知道得越不准确。

虚粒子：在量子力学中，一种永远不能直接检测到的，但其存在确实具有可测量效应 的粒子。

波/粒二象性：量子力学中的概念，是说在波动和粒子之间没有区别：粒子有时可以 像波动一样行为，而波动有时可以像粒子一样行为。

波长：对于一个波，在两相邻波谷或波峰之间的距离。

弱力：四种基本力中第二弱的、作用距离非常短的一种力。它作用于所有物质粒子， 而不作用于携带力的粒子。

重量：引力场作用到物体上的力。它和质量成比例，但又不同于质量。

白矮星：一种由电子之间不相容原理排斥力所支持的稳定的冷的恒星。

虫洞：连接宇宙遥远区域间的时空细管。虫洞也可以把平行的宇宙或者婴儿宇宙连接 起来，并提供时间旅行的可能性。

感谢

我在著作本书时得到多人相助。我的科学同仁亳无例外地富有灵感。在漫长的岁月 里，我主要的同伴和合作者为罗杰•彭罗斯、罗伯特•格罗许、布兰登•卡特、乔治•埃里 斯、盖瑞•吉朋斯。当•佩奇和詹姆•哈特尔。他们总是有求必应，我欠他们以及我的学生们 许多情。

我的一名学生布里安•维特在准备初版时提供了许多帮助。拜坦姆书社的编辑彼徳•古 查底还给我写下无数评语，使本书改善甚多。此外，我还想感谢安徳鲁•杜恩，他为我作 了文字修正。

如果没有眼前的这台交流系统，本书就写不成。这套称作平衡器的软件是加利福尼亚 兰卡斯特峨尔兹•帕拉斯公司的瓦特•沃尔托兹捐赠的。我的语言合成器是加利福尼亚太阳 谷的斯匹兹•帕拉斯公司捐赠的。剑桥适用通讯公司的大卫•梅森把合成器和控制板安装在 我的轮椅之上。我现在利用这个系统交流，能够进行得比我失声之前还要好。

在我著作和修改此书的年代里，有过许多秘书和助手。对于秘书们，我特别应感谢的 有茱迪•费拉、安•拉弗、劳拉•珍翠、谢瑞尔•比林顿和苏梅西。我的助手为柯灵•威廉斯、 大卫•托玛斯、雷蒙•拉夫勒蒙、尼克、菲利普、安徳鲁•杜恩、斯图瓦•詹米森、约纳逊•布 连奇利、提蒙•汉特、赛蒙•基尔、琼•罗杰斯和汤姆•肯达尔。尽管我是残废的，但是我的 护士、合作者、朋友以及家人们使我的生命非常充实并能进行研究。

史蒂芬•霍金

**Table of Contents**

译者序

第一章我们的宇宙图像 第二童空间和时间 第三章膨胀的宇宙 第四章不确定性原理 *筑五章* 基本粒子和白然的力 第六章黑洞

第七章黑洞不是这么黑的 第八彖宇甬的起源和命运 第九童时间箭头 第士竟虫洞和时间旅行 第-一斎：物理学的统一 第+二章结论 阿尔伯特•辱因斯圮 伊萨克•牛顿

小辞典 感谢