

STEPHEN  
HAWKING

With Leonard Mlodinow

# 时间简史

[普及版]



A BRIEFER  
HISTORY OF TIME

史蒂芬·霍金 列纳德·蒙洛迪诺 / 著 吴忠超 / 译

湖南科学技术出版社

感谢

爱书网 [www.ilovebook.cn](http://www.ilovebook.cn)

提供图书模板

## 目 录

译者序

前言

第 1 章 思索宇宙

第 2 章 宇宙演化的图像

第 3 章 科学理论的本性

第 4 章 牛顿之宇宙

第 5 章 相对论

第 6 章 弯曲空间

第 7 章 膨胀的宇宙

第 8 章 大爆炸、黑洞和宇宙的演化

第 9 章 量子引力

第 10 章 虫洞和时间旅行

第 11 章 自然的力和物理学统一

第 12 章 结论

致谢

## 译者序

2002年8月史蒂芬·霍金第二次访华。在告别杭州飞赴北京之际，他委托我将他的第三本书译成中文，这就是读者手中的这本《时间简史（普及版）》。

直到2004年5月，我才收到他和列纳德·蒙洛迪诺的电子稿件。这比他在杭州记者招待会上预计的时间整整拖延了9个月。书稿拖延的主要原因是，今年春天霍金因肺炎反复发作，住院3个月。这场大病，场生死搏斗。大病初愈后不久，对于霍金来说，无疑又是一他就向我发出邀请，两个月前我在剑桥再次和他会面。此情此景，恍若隔世。到达剑桥当天晚上，他邀我和他共进晚餐、观看电影、品尝佳茗，度过8小时愉快的时光，直到下半夜。令人告慰的是，他的健康恢复得很好。

他的生平无论在科学上，还是在医学上，都堪称奇迹。

正如他在那次记者招待会上告诉我们的，这是一本不仅让青少年，而且让所有人都能理解的书。他将《时间简史》中的艰深部分全部删除，并不失时机地纳入了理论和观测的最近进展。

在相对论和弯曲空间两章，他以最引人入胜的方式，把爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论阐释得深入浅出，只有他才能这样举重若轻。

最近 10 年的观测已经确认宇宙的年龄为 137 亿年。科学家还认为我们生活其中的宇宙是开放的，并永远膨胀下去。不仅如此，其膨胀率正在不断增大。也就是说，宇宙的膨胀不仅没有因物质的万有引力而减缓，反而由于在宇宙中存在某种暗能量而加速。至于暗能量的机制究竟是什么，这是当代宇宙学的最大课题。

关于寻求宇宙的终极理论，目前的共识是，它很可能是称为 M—理论的一个理论网络。M—理论犹如从波浪中诞生的维纳斯女神，正在抖落身上的水珠，将以美丽优雅的形态呈现于世。佛罗伦萨乌菲

齐博物馆的波提切利的那幅名画描绘的正是这个场景。

在剑桥期间，我就许多关心的学术问题向霍金请教。离别前夕，在轻松和幽默的气氛中，杜欣欣对他进行了采访。她问了一个长期埋在她以及广大读者心中的问题：“史蒂芬，你认为你的黑洞辐射和无边界设想，哪个贡献更为重要？这个问题只有你能够回答。”他揷动鼠标，在屏幕上写出一行字：“Other people think the black hole, because that is now accepted, but I think no-boundary.” [他人认为黑洞(辐射)更重要，因为它现在已被接受。我却认为无边界(设想)更重要。]这次采访以及我们和霍金交往 20 多年的经验将收入《无中生有——霍金和〈时间简史〉》一书中。我们和他相约，在他 70 岁生日时再来剑桥庆贺。

《时间简史》的主题是人类时空观和宇宙观的变革。作者是宇宙创生理论的创立者和集大成者。

《时间简史》和《时间简史(普及版)》必将流传千古。有些朋友担心，这两部书缺乏技术性的细

节。但是回顾一下科学史上的经典，即使伟大如《天旋论》和《自然哲学的数学原理》者，后人感兴趣的也只不过是观念的变革，绝非论证的过程。

此书译事始于西湖，终于剑桥，历经一度寒暑。是为序。

吴忠超

2004 年 1 2 月 1 2 日 剑桥

## 前言

本书和另一部于1988年首版的书《时间简史》(以下简称《简史》——编者注)在书名上只有两个字母的差别。《时间简史》曾荣登《伦敦星期日时报》畅销书榜达237周之久。在地球上大约每750人(包括儿童)就拥有一册。就一部论述当代物理学一些最艰深问题的著作而言，其成功是非同寻常的。因为那些艰深的问题又是最激动人心的，由于它们论及重大的基本问题，比如关于宇宙我们究竟知道了什么？我们如何知道这一切？宇宙从何处来，又向何处去？那些问题是《时间简史》的精髓，也是本书的焦点。

在《时间简史》出版以来的岁月里，来自全球读者的反馈蜂拥而至。他们不分年龄，也不分职业。人们不断地要求出一种新版本，这种版本既保留《简史》的精髓，又能以一种更清晰更从容的方式解释



最重要的概念。从反馈中还得知，尽管有人或许认为这样一部书应取名为《不甚简明的时间历》，很少有读者要寻求一部长篇大论，那相当于大学水平的宇宙论课程。于是，就采取现在的做法。我们在撰写《时间简史(普及版)》时，保持并扩展了原书的主要内容，还顾及它的长度和可读性。这的确是一部时间的更简明历史。尽管我们删除了一些较专业的内容，却对该书中真正核心的材料进行了更深入的处理。我们觉得这样做是得大于失。

我们在此还不失时机地对原书进行了修订，并且纳入了理论和观测的新成果。《时间简史(普及版)》描述了在寻找一种物理学所有力的完备统一理论方面最近获取的进展。它特别描述了在弦理论以及在表观上不同的物理理论之间的“对偶性”或者对应中获得的进步，这种对偶性表明存在一种物理学的统一理论。在观测方面，这本书包括了诸如那些通过宇宙背景探测器(COBE)和哈勃空间望远镜所得到的新的重要发现。

大约 40 年前，理查德·费恩曼说过：“我们有幸生活于仍在进行发现的年代。这正如发现美洲一样——你只能发现一回。我们生活的年代正是我们发现自然基本定律的年代。”今天，我们正前所未有的地接近理解宇宙的本性。我们写这部书的目的，是想和大家分享这些发现的喜悦，以及由此而涌现出来的现实世界的新的图象。

## 第1章

### 思索宇宙

我们生存在一个奇妙无比的宇宙中。只有凭借非凡的想象力才能鉴赏其年龄、尺度、狂暴甚至美丽。在这个极其广袤的宇宙中，我们人类所处的地位似乎微不足道。因此我们试图理解这一切的含义，并且了解我们在宇宙中的角色。几十年前，一位著名的科学家（有人认为是伯特兰·罗素）作了一次天文学讲演。他描述地球如何围绕太阳公转，而太阳又如何围绕着一个巨大的恒星集团的中心公转，我们把这个集团称做银河系。讲演结束之际，坐在屋子后排的一位小个子老妇人站起来说道：“你讲的是一派胡言，实际上，世界是驮在一只巨大乌龟背上的平板。”这位科学家露出高傲的微笑，然后答道：“那么这只乌龟站在什么上面呢？”“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，一直驮下去的乌龟塔啊！”

当今大多数人会觉得，把我们的宇宙喻为一个无限乌龟塔的图象相当荒谬。但是我们凭什么就自认为了解得更好呢？暂时忘却你所知道的——或者认为你所知道的有关空间的知识。然后抬头凝视夜空。你对所有那些光点做何解释呢？它们是微小的火焰吗？它们究竟是什么？真是难以想象，因为这远远地超出了我们的日常经验。如果你是一位定期的观星者，你也许见到过，在晨昏时刻徘徊于地平线附近的闪烁光点。它是一颗行星，即水星，但是它和我们自己所在的这颗行星毫不相像。水星的一天相当于该行星年的  $2/3$ 。太阳出来时，水星表面温度高达 400 摄氏度，而在深夜它几乎降到 -200 摄氏度。尽管水星和我们地球的差别如此之大，但更不可思议的是一个典型的恒星，恒星是一个每秒燃尽几十亿磅 (1 磅 = 454 克) 物质的巨大火炉，而它的核心温度达到几千万摄氏度。

行星和恒星究竟离我们多么遥远?这是另一桩难以想象的事。古代中国人建筑石塔以便更近地观测星空。以为恒星和行星比它们在实际上离我们更近得多是很自然的事——在日常生活中,我们毕竟没有和巨大空间距离打交道的经验。它们离我们的距离是如此之遥远,用我们测量大多数长度的办法,即用英尺或者英里去度量,是没有什么意义的。取而代之,我们使用光年,那是光在一年中行进的距离。一束光在一秒钟内行进 186 000 英里(1 英里=1.6093 千米),这样,一光年便是一个非常长的距离。除了我们的太阳,最近的恒星叫做比邻星(也叫半人马座仅星),大约在 4 光年之外。这是那么遥远,甚至利用当今正在设计的最高速的宇宙飞船,也需要花费大约 10 000 年才能到达那里。

古人曾努力尝试理解宇宙,但是他们还没有发展出我们所知道的数学和科学。今天我们拥有强有力的工具:诸如数学和科学方法的智力工具,以及电脑和望远镜等技术工具。科学家借助这些工具把大量关于空间的知识拼凑在一起。但是关于宇宙,

我们究竟知道什么,并且我们何以得到这些知识呢?宇宙从何处来?它又向何处去?宇宙有一个开端吗?如果有的话,在此之前发生了什么?时间的本质是什么?它会到达一个终点吗?我们能在时间中返回到过去吗?物理学中最新的突破,使我们有可能为其中一些悬而未决的问题提供答案,而新技术是实现这些突破的部分原因。对我们而言,这些答案有朝一日会变得和地球围绕太阳公转那么显而易见——或许变得和乌龟塔一样荒谬,只有时间(不管其含义如何)才能裁决。

## 第 2 章

### 宇宙演化的图象

尽管迟至克里斯托弗·哥伦布时代，人们还普遍认为地球是平坦的（甚至至今仍有人这么认为），我们可以把现代天文学溯源到古希腊。公元前 340 年左右，希腊哲学家亚里士多德便撰写了一部题为《论天》的著作。在该书中亚里士多德对地球是一个圆球而不像一块板子那样平坦的信念进行了有力的论证。

一个论证是基于月食。亚里士多德意识到，月食的产生是地球运动到太阳和月球之间引起的，这时地球把它的影子投射到月球上，导致月食发生。亚里士多德注意到，地球的影子总是圆的。如果地球是一个圆球，这正是你所预料的结果，如果它是一个圆盘，就不会这样。如果地球是一个平坦的圆盘，则只有当月食发生在太阳位于圆盘中心的正下

方的时刻，它的影子才能是圆的。而在其余的时候影子将会被拉长成椭圆的形状（椭圆是拉长的圆）。

关于地球是圆的，希腊人还有另一个论证。如果地球是平坦的，你可以料想到，从地平线驶来的船首先表现为一个看不清特征的小点。然后，随着它的驶近，你将能够逐渐识别出更多细部，诸如它的帆和船身。但事实并非如此。当一艘船呈现在地平线上的时候，你首先看到的是船帆，船身随后才



海船出现在地平线上

因为地球是一个球体，所以一艘从地平线上驶来的海船，它的桅杆和船帆先显露出来，随后才是船体。



进入视线。高耸在船身上的桅杆首先露出地平线是地球为球状的一个证据。

对于夜空，希腊人也给予了极大的关注。直到亚里士多德时代，人们已经在几个世纪里记录了光点在夜空中如何运动。他们注意到，虽然他们看到的成千上万的光点几乎全部似乎一起穿越天穹，但是其中的 5 个（还不算月亮）例外，它们有时离开由东向西的规则轨道逆行，然后又循原路倒退。这些光点被称做行星——希腊语的意思是“漫游者”。希腊人之所以只观测到 5 颗行星，是因为肉眼只能观察到这 5 颗行星：水星、金星、火星、木星和土星。现在我们知道行星们为何沿着这种不寻常的路径穿越天空：尽管恒星和我们的太阳系相比较几乎完全不动，而行星围绕着太阳公转，这样它们在夜空中的运动轨迹比遥远的恒星远为复杂。

亚里士多德认为地球是静止的，而太阳、月亮、行星以及恒星沿着圆形的轨道围绕着地球运动。他之所以有这个信念，是因为他觉得由于一些神秘的原因，地球是宇宙的中心，而圆周运动才是最完美

的。公元 2 世纪，另一个希腊人托勒密将这个观念转变成一个完备的宇宙模型。托勒密对他的研究极度狂热，他写道：“当我快乐地追随着做圆周运动的无数恒星群时，我觉得飞上了天空。”

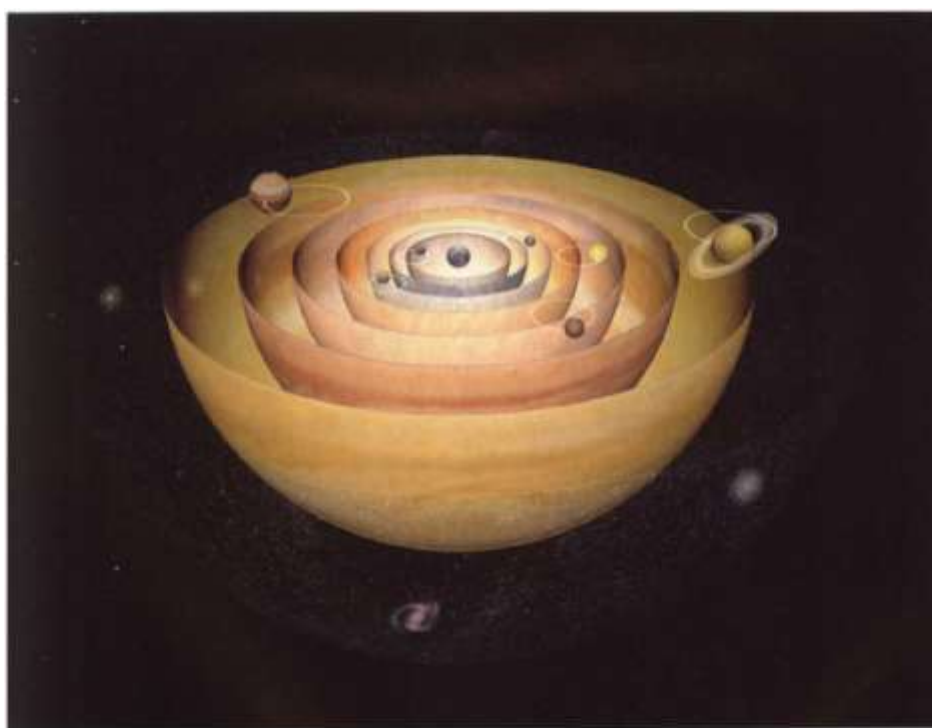
在托勒密的模型中，8 个旋转的圆球同绕着地球，每一个圆球依次比前一个圆球更大，这有点像俄罗斯套娃。地球处于这圆球的中心，而位于最远的圆球之外为何物，从未弄得很清楚，但是它肯定不是人类可观测到的宇宙部分。于是对于宇宙而言，最外面的圆球是某种边界或者容器。恒星在该球面上占据固定的位置，所以当它旋转时，恒星间的相对位置不变，它们作为一个整体，一起旋转着穿越天穹，正如我们所观测到的。内部的圆球携带着行星，它们不像恒星那样被固定在它们各自的圆球上，而是沿着它们的圆球面上的小圆周运动，小圆周又称为本轮。由于行星球旋转，行星本身又在它们的圆球面上运动，因此相对于地球，它们的轨道就显得复杂。托勒密正是以这种方法解释这个事实，即

观测到的行星轨道比穿越天穹的简单圆周要复杂得多。

托勒密模型为预言天体在天空的位置提供了一个相当精确的系统。但是为了正确预言这些位置，托勒密不得不假定月亮沿着这样一条轨道前进，在这一轨道上，月亮和地球的距离有时是其他时刻的一半。这就意味着，月亮在某些时刻看起来应当显得是其他时刻的 2 倍！托勒密承认这是个瑕疵，但是尽管如此，他的模型仍然被普遍地，虽然并非无异议地接受。它在固定的恒星球之外为天堂和地狱留下了大量的空间，由于这一极大优势，基督教会把它当成和《圣经》相符的宇宙图象。

然而，1514 年波兰教士尼古拉·哥白尼提出了另一个模型。(起先，也许哥白尼害怕被教会谴责为异教徒，所以将他的模型匿名地流传。)哥白尼拥有革命的观念，即并非所有天体都必须围绕地球公转。事实上，他的观念是太阳静止地位于太阳系的中心，而地球和行星在同绕着太阳的圆周轨道上运动。和托勒密模型一样，哥白尼的模型相当成功，但是它

和观测并不完全符合。由于它比托勒密模型简单得多，人们也许以为它会被欣然地接受。然而，这个观念几乎花了一个世纪才被认真接受。此后，两位天文学家——德国的约翰斯·开普勒和意大利的伽利略·伽利雷开始公开支持哥白尼理论。



托勒密模型  
在托勒密模型中，地球位于宇宙的中心，8个携带当时已知天体的圆球围绕着她。

伽利略于 1609 年开始使用刚发明的望远镜观测夜空。当伽利略观测木星时，他发现几个围绕着

它公转的小卫星或月亮伴随着它。这意味着，事情并不像亚里士多德和托勒密所认为的那样，一切都必须直接地围绕着地球公转。在同一时期，开普勒改进了哥白尼理论，提出行星沿着椭圆而非正圆运行。由于这种改进，理论预言一下子就和观测符合起来。这些事件宣告了托勒密模型的死亡。

尽管椭圆轨道改善了哥白尼模型，就开普勒而言，这还仅仅是权宜的假设。那是因为开普勒关于自然的观念不是基于任何观测，而是先入之见：正如亚里士多德一样，开普勒朴实地相信椭圆不如正圆完美。他觉得行星沿着如此不完美的轨道运行的思想太丑，不可能是最后的真理。还有一件使开普勒烦恼的事，他认为磁力迫使行星围绕太阳公转，而椭圆轨道无法和他的这个思想保持一致。尽管他的行星轨道起因于磁力的观念是错误的，我们还是应该把必须有一个力才能引起运动这一认识归功于他。1687年，当艾萨克·牛顿爵士发表了他的《自然哲学的数学原理》，这部很可能是物理科学中有史

以来仅有的最重要的著作之后，才正确地解释了行星围绕太阳公转的原因，不过那已是很晚的事了。

牛顿在《自然哲学的数学原理》中提出一个定律，这个定律陈述道，除非有一个力作用在静止的物体上，否则所有这些物体自然地保持在静止状态。牛顿还描述了力的效应如何使物体运动或者改变物体的运动。那么，为何行星以椭圆轨道围绕太阳运行呢？牛顿说，这是由一种特别的力引起的，并且宣称这和你释放物体时，使之下落到地面上而不保持静止的力相同。他把那种力命名为引力（牛顿之前，引力这个词的意思要么是严肃的情绪，要么是庄重的品质，而没有别的意思）。他还发明了一种数学，它在数值上可以算出当一个力，比如引力，拉拽物体时后者的反应，而且他解出获得的方程。他能够用这种方法证明，由于太阳的引力，地球和其他行星应该在一个椭圆轨道上运行——正如开普勒所预言的那样！牛顿宣称，他的定律适用于宇宙中的任何东西，从正在下落的苹果直至恒星和行星。这在人类历史上首次按照定律，既解释了行星的运动，也

确定了地球上的运动。它既是现代物理学，也是现代天文学的开端。

抛弃了托勒密球的概念，就不再有任何理由去假定宇宙有一个自然的边界，最外面的球面。而且，因为地球围绕自己的轴自转，恒星就显得似乎在进行穿越天穹的旋转，除此之外，恒星看来是固定不动的，那么认为恒星是像我们太阳一样的，但却非常遥远的物体，就顺理成章了。我们不仅放弃了地球是宇宙中心的思想，而且，甚至认为太阳，也许我们的太阳系在宇宙中都不占有独特的地位。世界观的这一改变象征着人类思想的深刻转变：这是我们现代科学对宇宙理解的开端。

## 第 3 章

### 科学理论的本性

为了谈论宇宙的本性，并且讨论诸如它是否有起始或终结的问题，你必须弄清楚什么是科学理论。我们将要采用素朴的观点，即理论只不过是宇宙或者它受限制的一部分的一个模型，以及一组规则，这组规则把这个模型中的量和我们进行的观测相联系。它只存在于我们的头脑中，而不具有任何其他真实性(不管其含义如何)。如果一个理论满足如下两个要求，即是一个好理论。在一个只包含一些任意要素的模型基础上，该理论应能精确地描述大量的观测，而且它还应能明确预言未来的观测结果。例如，亚里士多德相信恩贝多克的理论，万物都是由 4 种元素：土、空气、火和水组成。这是足够简单了，但是它不能够做出任何明确的预言。另一方面，牛顿引力论基于更简单的模型，在该模型中物



体相互吸引，其吸引力和称做它们质量的量成正比，和它们之间的距离的平方成反比。然而牛顿引力论以很高的精确度预言了太阳、月亮和行星的运动。

任何物理理论都只不过是一个假设，在这个意义上，它只能是暂时的：你永远不能证明它。不管实验的结果多少次和某种理论相一致，你永远不能断定下一次的结果不和该理论相冲突。另一方面，一旦找到哪怕一个单独的和理论预言不一致的观测，就足以将该理论证伪。正如科学哲学家卡尔·波普强调过的，一个好的理论应以下面的事实为特征：它做出一些在原则上可被观测证伪的预言。每一回观察到和预言相一致的新实验，则该理论存活，而我们就增大对它的信赖；但是一旦发现和预言不一致的新观测，我们就必须抛弃或者修正该理论。

人们认为这迟早总会发生，但是你总可以质疑进行该观测人员的能力。

在现实中经常发生的是，设计出的新理论实际上是原先理论的一个扩展。例如，非常精确地观测水星，发现它的运动和牛顿引力论的预言之间有一

个微小的差异。爱因斯坦的广义相对论预言了和牛顿理论预言稍微不同的运动。爱因斯坦的预言和观测到的相符合，而牛顿理论做不到，这一事实是对新理论的一个关键性的证实。然而，因为在我们正常处理的情形下，牛顿理论和广义相对论的预言之间差异非常微小，所以在所有实用的场合，我们仍然使用牛顿理论。(牛顿理论还有一个巨大的优势，用它计算比用爱因斯坦理论简单多了!)

科学的终极目的是提供一个描述整个宇宙的统一理论。然而，大多数科学家实际采取的手段是把问题分成两部分。首先，存在告诉我们宇宙如何随时间变化的定律。(如果我们知道宇宙在任一时刻的状态，这些物理定律就告诉我们它在未来任何时刻的状态。)其次，存在宇宙初始状态的问题。有些人觉得科学只应该关心第一部分；他们将初始状态的问题看做玄学或者宗教的事体。他们会说，无所不能的上帝可以随心所欲地启始宇宙。那也许是真的，但是在那种情形下，上帝还可以使宇宙以完全任意的方式发展。然而，似乎上帝决定让它根据一

定的定律，以一种非常规则的方式演化。所以似乎可以同等合理地假定，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宇宙的理论，实际上是非常困难的。换一种方法，我们可将这个问题分成一些小块，并发明一些部分理论。其中每一种部分理论描述并预言某些有限种类的观测，而忽略其他的量的效应，或者将这些效应用简单的数的集合来代表。这样的方法也可能全错了。如果宇宙中任何事物都以一种基本的方式依赖于其余事物，

用隔离法来研究问题的部分也许不可能接近完整的答案。尽管如此，我们过去正是用这种方法取得进展。最好的例子仍然是牛顿引力论，它告诉我们两个物体之间的引力只依赖和每个物体相关的一个数，即它的质量，但和物体的构成无关。这样，我们为了计算太阳和行星的轨道，不需要它们的结构和成分的理论。

当今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 20 世纪上半叶伟大的智慧成就。广义相对论描述引力和宇宙的大尺度结构，也就是从仅仅几英里到大至 1 亿亿亿 (1 后面跟 24 个零) 英里的可观测宇宙的结构。另一方面，量子力学处理尺度极端微小的，比如一万亿分之一英寸 (1 英寸 = 2.54 厘米) 的现象。然而不幸的是，人们知道，这两个理论不能相互协调——它们不可能都正确。当今物理学的一个主要抱负，以及本书的主要论题，便是寻求一种把两者结合在一起的新理论——量子引力论。我们还没有获得这个理论，寻找它的路途也许还相当遥远，但是我们

已经知道它必须具有的许多性质。我们在后面的章节中将会看到，关于量子引力论应做出的预言，我们已经知道得相当多了。

现在，如果你相信宇宙不是任意的，而是被明确的定律制约的，你最终必须把部分理论结合成一个完备的统一理论，它描述宇宙中的万物。但是，在寻找这样一个完备的统一理论时，存在一个基本矛盾。在上述有关科学理论的思想中，假定我们是理性的生物，可以随心所欲地观测宇宙，并且从看到的事物中得出逻辑结论。在这样的方案中可以合理地假定，我们可能不断地趋近制约我们宇宙的定律。然而，如果的确存在一个完备的统一理论，它也很可能决定我们的行动——于是，理论本身会决定我们寻求它的结果！而为什么它必须决定我们从这些证据得到正确的结论？难道它不会同样地决定我们得出错误的结论吗？或者根本没有结论？

对于这一诘问，我们仅能给出的回答是基于达尔文的自然选择原理之上的。其思想是，在任何自我繁殖的有机组织群体中，不同个体的遗传物质和

成长存在变异。这些差别意味着，某些个体比其他个体更能得出有关它们周围世界的正确结论并相应地行为。这些个体就更可能存活并繁衍，这样他们的行为和思想模式就会处于优势。下面这一点在过去肯定是真的，我们称做智慧和科学发现的东西传递存活的优势。这种情况是否仍然如此，就不清楚了：我们的科学发现可以轻而易举地把我们所有人都消灭掉，而且即使它们没有这样，一个完备的统一理论对我们存活的机会并没有多大影响。然而，假如宇宙以规则的方式演化至今，我们可以预料，自然选择赋予我们的推理能力，对于我们寻找完备的统一理论方面也会有效，因此，这样就不会误导我们去得到错误的结论。

因为我们已经拥有的部分理论，对除了最极端之外的所有情形都可以做出精确的预言，为了实用的原因，似乎没有太多的理由去寻求宇宙的终极理论。(值得注意的是，虽然类似的议论也可以用来反对相对论和量子力学，然而这些理论给我们既带来了核能，又带来微电子学革命。)因此，发现完备的

统一理论也许无助于我们人种的存活。它甚至对我们的生活方式毫无影响。但是自从文明肇始以来，人们总是不满足于把事件视做互不相关和神秘莫测的。我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，以及我们从何而来。哪怕仅仅出于人类对知识的最深切渴求，我们就应该继续探索。而我们的目标不多不少，正是完整地描述我们生活于其中的宇宙。

## 第 4 章

### 牛顿之宇宙

我们现在有关物体运动的观念，可以追溯到伽利略和牛顿。在他们之前，人们相信亚里士多德。他说物体的自然状态是静止的，只有当它受到力或冲量的作用时才运动。因为更重的物体受到更大的朝向地面的拉力，由此推断出，相对于较轻的物体，更重的物体下落得更快。亚里士多德传统还持有这样的观点，人们可以单凭思维即能得出制约宇宙的所有定律：没有必要用观测去检验。所以在伽利略之前，没人费功夫去检查不同重量的物体是否的确以不同速度下落。据说伽利略从意大利的比萨斜塔释放重物，用来证明亚里士多德的信条是错误的。这个故事几乎可以肯定不是真的，但是伽利略确实做了某些等效的事：他让不同重量的球从光滑的斜面上滚下。这情形和重物垂直下落相似，但是由于



速度比垂直下落更小，所以更容易观测。伽利略的测量表明，不管每个物体的重量为多少，它们都以相同的速率增加速度。例如，如果你在一个沿着每走 10 米下降 1 米的斜面上释放一个球，不论该球有多重，1 秒之后它沿斜面运动的速度大约为每秒 1 米，2 秒之后为每秒 2 米，等等。当然一个铅球比一片羽毛会下落得更快，但是这仅仅是因为空气阻力减缓了羽毛下落的速度。如果你释放两个没有受太大空气阻力的物体，比如两个不同的铅球，它们就会以同样的速度下落（我们很快就会明白它的原因）。在月球上没有空气减缓物体下降的速度，航天员大卫·R·斯各特进行过羽毛和铅球实验，并且发现它们的确同时落到月面上。

牛顿将伽利略的测量当做他的运动定律的基础。在伽利略实验中，当物体沿着斜坡滚下时，总是受到同样的力（它的重量），而该力使它恒定地加速。这表明，力的真正效应总是改变物体的速度，而不像早先以为的那样仅仅是使之运动。这还意味着，只要物体不受到任何力的作用，它就会以相同

的速度保持直线运动。1687 年牛顿在《自然哲学的数学原理》首次明确地陈述了这个思想，它称做牛顿第一定律。牛顿第二定律指出，当力作用到一个物体上时会发生什么。该定律陈述道，物体将会加速，或者改变其速度，其改变率和力成正比。(例如，如果力加倍，则加速度就加倍。)物体的质量(或者物质的量)越大，则加速度就越小。(同样的力作用于具有 2 倍质量的物体将产生一半的加速度。)小轿车可以提供一个熟知的例子：发动机越强有力，则加速度就越大；但是对于同样的发动机，小轿车越重，则加速度就越小。

除了描述物体对力如何反应的运动定律之外，牛顿引力论还描述了如何确定一种特殊种类的力，即引力的强度。正如我们说过的，该理论陈述，任何两个物体都相互吸引，其引力与每一物体的质量成正比。这样，如果其中一个物体(比如说，物体 A)的质量加倍，则两物体间的力就变成 2 倍强。这是可以预料得到的，因为人们可以把这新物体 A 认为由两个物体组成，每个物体都具有原先的质量。

其中的每个用原先的力来吸引物体 B。于是，A 和 B 之间的总力应该是原先的力的 2 倍。而且，比如讲，如果其中一个物体具有 6 倍质量，或者，一个具有 2 倍质量而另一个具有 3 倍质量，那么它们之间的力就有 6 倍强。

现在你可以看到，为何所有物体以同样速度下落。根据牛顿引力定律，具有 2 倍重量的物体将受到往下拉的 2 倍的引力。但是它也有 2 倍的质量，这样按照牛顿第二定律，每单位力的加速度将被减半。根据牛顿定律，这两个效应刚好相互抵消掉。因此，不管物体的重量多少，它的加速度相同。

牛顿引力定律还告诉我们，物体相离越远，引力就越小。该定律说，一个恒星的引力刚好是一半距离的类似恒星引力的  $1/4$ 。这定律非常精确地预言了地球、月球和行星的轨道。如果这定律改变成恒星引力随距离下降得更快或更慢，则行星的轨道就不会是椭圆；它们要么会向太阳旋进，要么会从太阳逃离。



复合物体的引力吸引  
如果物体的质量加倍，它的引力也加倍。

亚里士多德观念和伽利略及牛顿观念之间的巨大差别在于，亚里士多德相信优越的静止状态，如果一个物体没有受到力或者冲量的作用就会处于这种状态。特别是，他认为地球是静止的。但是从牛顿定律推出，不存在唯一的静止标准。物体 A 静止，而物体 B 以恒常速度相对于物体 A 运动，或者物体 B 静止而物体 A 运动，这两种说法是等价的。

例如，如果你暂时忽视地球的自转以及它围绕太阳的公转，你可以说，地面静止，而在它上面的一列火车以每小时 90 英里的速度向北运行，或者火车静止，而地面以每小时 90 英里的速度向南运动。如果你在火车上进行运动物体的实验，牛顿的所有定律仍然成立。牛顿正确，还是亚里士多德正确，你何以得知？

下面是一种检验：想象你被封闭在一个盒子里，而你不知道这个盒子是停在运行着的火车的地板上，还是停在坚固的地面上，按照亚里士多德的观念，后者是静止标准。有办法确定是哪一种情形吗？如果有的话，也许亚里士多德是正确的——在地面上处于静止状态是特殊的。但是如果你在火车上的盒子里进行实验，其结果正和在“静止的”火车站站台上盒子里一模一样（假定乘火车时铁轨没有隆起、转弯或者缺陷）。在火车上打乒乓球，你会发现球的行为同在铁轨旁的乒乓球桌上一样。而如果你在盒子里打球，而盒子以相对于地面不同的速度，比如每小时 0、50 英里和 90 英里的速度运动，在所有这些

情形中球的行为都是相同的。世界的行为就是这样，这正是牛顿定律的数学所反映的：无法得知究竟是火车还是地面在运动。运动的概念只有当它相对于其他物体时才有意义。

亚里士多德正确，还是牛顿正确，这关系重大吗？这仅仅是在观点或者哲学上的不同，或者是一个科学上的重要问题？实际上，缺乏静止的绝对标准在物理学上含义深远：它意味着，我们不能确定发生在不同时间的两个事件是否发生在空间中的相同位置上。

为了描述这一点，假定某人在火车上让乒乓球直上直下地弹跳，以 1 秒钟的间隔两次撞到桌子上的同一点。对那个人而言，第一次和第二次弹跳位置的空间间隔为零。对于站在铁轨旁的某人，因为火车在这弹跳之间沿着铁轨行进了 40 米，所以两次弹跳似乎发生在那么远的空间间隔上。按照牛顿的观念，这两位观测者有同等权利认为自己是静止的，所以可以同等地接受这两种观点。一种观点并不比另一种更优越，不像亚里士多德相信的那样。观察

到的事件位置以及它们之间的距离，对于在火车上和铁轨边上的人会是不同的，没有任何理由认为其中一人的观测比另一人的观测更受欢迎。

牛顿对不存在绝对位置或者所谓绝对空间的观念极度忧虑，因为这和他绝对上帝的观念不协调。事实上，尽管他的定律隐含着摒弃绝对空间，但他拒绝接受这一点。许多人，最著名的是贝克莱主教，严厉地批评他的这一非理性信仰。贝克莱是一位相信一切物体、空间以及时间都是幻觉的哲学家。当著名的约翰逊博士得知贝克莱的主张时，他把脚趾踢到大石块上叫道：“我这样反驳它！”

不管是亚里士多德还是牛顿都相信绝对时间。也就是说，他们相信人们可以毫无歧义地测量两个事件之间的时间间隔，而且只要使用好的时钟，不管谁去测量，这个时间都是一样的。不像绝对空间、绝对时间和牛顿定律相协调。而且这是大多数人当做常识的观点。然而，在 20 世纪，科学家们意识到，他们必须改变他们的时间和空间观念。正如我们将要看到的，他们发现事件之间的时间长度，正如兵

乒乓球弹跳点之间的距离一样，与观察者有关。他们还发现时间不能和空间完全分离并和空间无关。对光性质新的洞察是觉察这些的关键。它们似乎和我们的经验相违背，但是尽管我们的常识观念在处理诸如苹果和行星等运动得比较慢的物体时有效，这些常识观念在处理以光速或接近光速运动的物体时却完全失效。



距离的相对性  
对不同的观察者，物体旅行的距离——和路径——可以显得不一样。



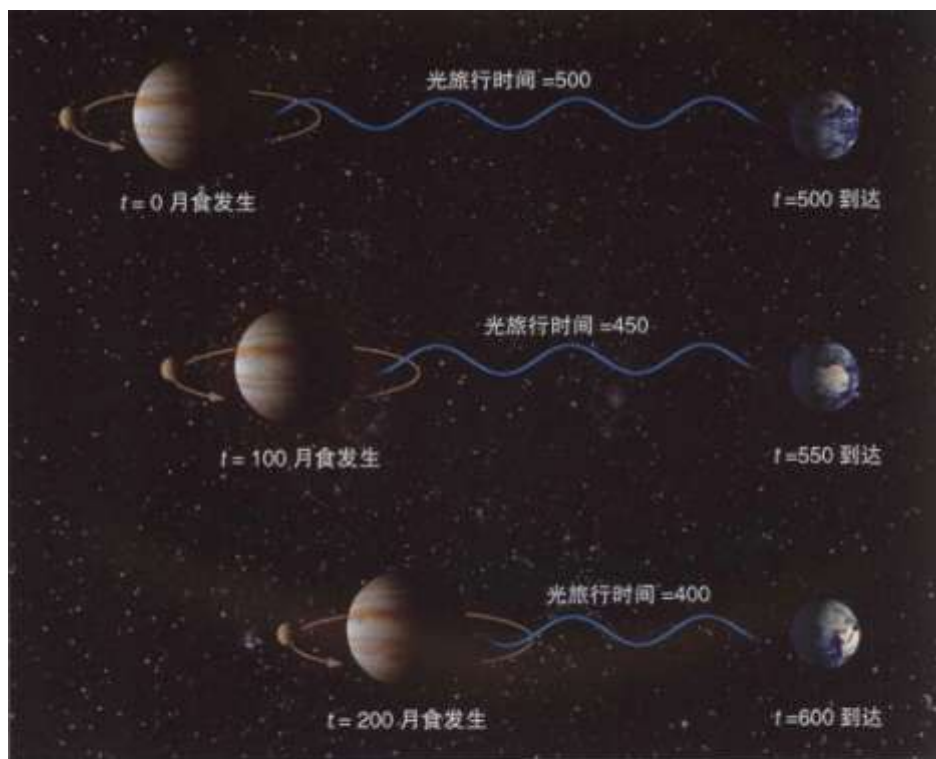
## 第 5 章

### 相对论

1676 年丹麦天文学家欧尔·克里斯琴森·罗默首次发现，光以有限但非常高的速度行进。如果你观察木星的卫星，你就会注意到，它们不时地从视野中消失，这是因为它们走到这颗巨大行星的背后。这些木星卫星的月食应该以规则的时间间隔发生，但是罗默观测到这些月食并没有以相等的时间间隔发生。卫星在它们的轨道上，是否不知怎么有时加快，有时减慢呢？他给出了另外的解释。如果光以无限的速度行进，那么我们会在月食发生的同一时刻，在地球上看见它们以规则的间隔发生，犹如宇宙之钟的滴答声。由于光在同一时刻穿越任何距离，无论木星靠近或者离开地球，这种情形都不会改变。

现在想象光以有限速度行进。如果这样的话，我们将在每次月食发生之后的某一时间看到它。这

个延迟依赖光速，以及木星和地球的距离。如果木星不改变它离开地球的距离，则每一次对月食延迟的时间都会是相同的。然而，木星有时运动得离地球更近。在这种情形下，从每次接续月食来的“信号”行进的距离越来越短，这样它比木星若保持在常数距离时来的“信号”不断提早地到达。由于类似的原因，当木星从地球退离，我们看到月食比预料断地延后。这种提早或延迟到达的程度依光速而定，就允许我们去测量它。这正是罗默所做的。他注意臣一年里，当地球接近木星轨道时，木星的一个卫星的月食出现提早，而当地球离开时推迟出现，而且他利用这个差计算出光速。然而，他不能很精确地测量地球离开木星距离的变化，与光速的现代每秒 186 000 英里的值相比，他的光速的值为每秒 140 000 英里。尽管如此，罗默不仅证明了光以有限的速度行进，而且还测量了那个速度，其成就是卓越的，要明白，这是在牛顿发表《自然哲学的数学原理》之前 11 年进行的。



光池和月食发生的时刻

观察到的木星卫星月食的时刻既依赖于月食实际发生的时刻，也依赖于光从木星行进到地球花费的时间。这样，当木星向地球运动时，月食发生得较频繁，而当木星离开地球运动时，月食发生得较不频繁。为了明晰，本图将效应夸大了。

1865 年英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦提出了一个理论，它成功地统一了直到那时用来描述电力和磁力的部分理论。这时我们才得到了光传播的正确理论。虽然在古代人们就知道电和磁，但是直到 18 世纪，英国化学家亨利·卡文迪许和法

国物理学家查尔斯·奥古斯丁·库仑才建立了制约两个带电物体之间电力的定量定律。几十年之后，在 19 世纪早期，一些物理学家建立了磁力的类似定律。麦克斯韦在数学上证明了，这些电力和磁力不是由粒子之间相互直接作用引起的；而是每个电荷和电流在周围空间产生一个场，场将力作用在位于那个空间内的其他每一个电荷和电流上。他发现每一个单独的场都携带电力和磁力，这样电和磁都是同一个力的不可分离的方面。他把这个力称做电磁力，而携带它的场称做电磁场。

麦克斯韦方程预言，在电磁场中可能存在波状的微扰，这些微扰以固定的速度行进，正如池塘水面的涟漪那样。当他计算这一速度时，发现它和光速恰好一致！今天我们知道，当麦克斯韦波的波长在四千万分之一厘米至八千万分之一厘米之间时，人眼可以把它作为光看到。（波是一串连续的波峰和波谷；波长是波峰或波谷之间的距离。）波长比可见光波长更短的波称为紫外线、x 射线以及伽马射线。具有更长波长的波称为射电波（1 米或更长）、微波

(1 厘米左右)或者红外线(比万分之一厘米短,但比可见光的波长长)。

麦克斯韦理论意味着,射电或者光波以某种固定速度行进。这很难和牛顿理论中不存在静止的绝对标准的观点相和谐。因为如果不存在这样的标准,关于物体速度就不可能存在普适的意见。为了理解其中的原因,再次想象你在火车上打乒乓球。如果你把球击到火车的前面,你的对手测量到球的速度为每小时 10 英里,那么你可以预料到,在站台上的一个观察者发觉球以每小时 100 英里速度运动——其中每小时 10 英里是它相对于火车的运动,加上每小时 90 英里是火车相对于站台的运动。球的速度是多少呢,每小时 10 英里还是 100 英里?你如何定义它——相对于火车呢,还是相对于地面?你不能在没有绝对静止的标准下指定球的绝对速度。可以同样合理地说,同一个球具有任何速度,这依赖于测量该速度的参考系。根据牛顿理论,以上论述对于光也应该是成立的。那么,对麦克斯韦理论中的光波以某一固定的速度行进,这意味着什么?

为了让麦克斯韦理论和牛顿定律相协调，人们提出存在一种称为以太的物质，它无所不在，甚至存在于“空虚”的真空中。以太观念对于科学家还有某种额外的吸引力，他们觉得正如水之于水波或者空气之于声波，毕竟需要某种媒介去负载电磁能的波动。按照这种观点，光波通过以太行进，正如声波通过空气行进一样，因此从麦克斯韦方程推出它们的“速度”必须相对于以太来测量。按照这个观点，不同观察者会看到，光以不同的速度射向他们，但是光相对于以太的速度将保持不变。

人们可以检验这个思想。想象从某个光源发射出光。根据以太理论，光以光速穿越以太行进。如果你穿过以太向它运动，你趋近光的速度将是光通过以太的速度和你穿过以太的速度之和。光将比假设你不动或者你沿着其他方向运动更快地趋近于你。然而，因为和我们对着光源运动的速度相比较，光的速度如此之巨大，所以测量这个速度差异的效应非常困难。



波长  
波长是连续波峰或波谷之间的距离。

1887 年阿尔伯特·迈克耳孙(他后来成为第一个获得诺贝尔物理奖的美国人)和爱德华·莫雷在克里夫兰的凯思应用科学学校(现在凯思西储大学)的做了一个非常精细而困难的实验。他们意识到，因为地球几乎以每秒 20 英里的速度围绕太阳公转，他们的实验室本身必须以相对高的速度穿越以太运动。

当然，没有人知道以太相对于太阳沿着哪个方向，多快，或者究竟是否在运动。但是在一年中的不同时间重复实验，由于地球在其轨道的不同位置上，我们有望解释这一未知的因素。这样，迈克耳孙和莫雷着手一个实验，去比较在地球通过以太运动的方向上的（当我们向着光源运动时），和与该运动成直角的方向上的（当我们不向着光源运动时）光速。他们发现在两个方向上的速度完全相同，这使他们大吃一惊！

1887 至 1905 年之间科学家们做过几次尝试，以挽救以太理论。最著名的是荷兰物理学家亨德利克·洛伦兹做的，他企图按照当物体和钟表通过以太运动时分别收缩和变慢，去解释迈克耳孙—莫雷实验的结果。然而，1905 年一位瑞士专利局的直到当时还默默无闻的职员阿尔伯特·爱因斯坦在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，以太的观念就纯属多余（我们很快就会知道为什么）。法国著名的数学家亨利·庞加莱几周之后提出了类似的观点。爱因斯坦的论证比庞加莱更接近



物理，后者把这个问题看成纯粹是数学的，而且至死不接受爱因斯坦的理论解释。

顾名思义，爱因斯坦相对论的基本假说陈述道，对于所有无论以任何速度自由运动的观察者，科学定律必须相同。这适用于牛顿运动定律，但是爱因斯坦现在将这种思想推广，包括了麦克斯韦理论。换言之，由于麦克斯韦理论指出光速具有给定的值，任何自由运动的观察者，无论离开或趋近光源多快，他们都一定会测量到同样的值。这个简单的思想当然解释了麦克斯韦方程中光速的意义——而且不必使用以太或者其他任何优越的参考系——此外它还有某些令人印象深刻的而且通常是反直觉的推论。

例如，要求所有观察者必须在光行进多快的问题上取得一致意见，迫使我们改变时间的概念。再次想象快速行进的火车。我们在第 4 章看到，虽然在火车上把乒乓球打得上上下下的某人会说，球只行进了几英寸，但是站在站台上的某人会觉得球大约行进了 40 米。类似地，如果火车上的观察者发出闪光，这两位观察者在光行进的距离上不能取得一

致意见。由于速度是距离除以时间，如果他们在光行进的距离上意见不一致，那么让他们在光速上意见一致的唯一办法是，他们关于该行程所花费的时



乒乓球的运动速度

根据相对论，虽然观察者测量到的物体速度可以不同，但是每个人的测量是同等有效的。

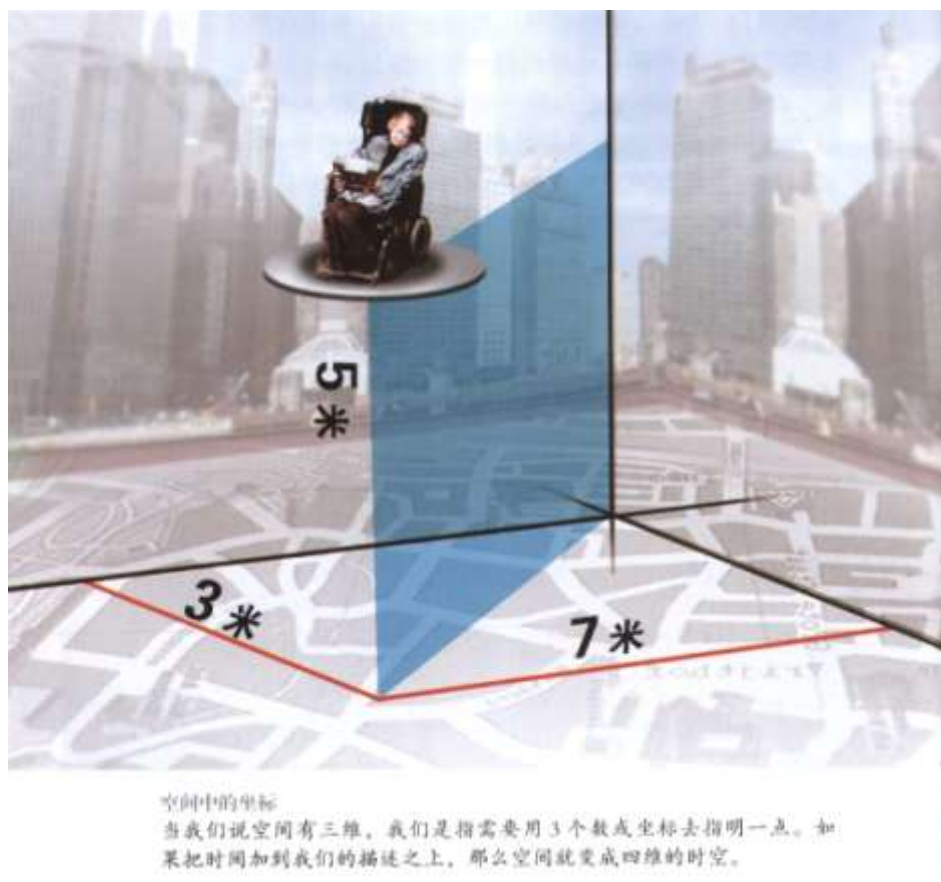
间上的意见也不一致。换言之，相对论使绝对时间的观念寿终正寝！相反，每个观察者必须拥有自己的

时间测量，由他自己携带的钟表所记录，而不同观察者携带的同样的钟表并不一定同步。

在相对论中没有必要引进以太的观念，正如迈克耳孙-莫雷实验所显示的，根本检测不到以太的存在。相反，相对论迫使我们从根本上改变空间和时间观念。我们必须接受，时间不能完全地和空间分离并且独立于它，而是和它相结合，形成一个称做时空的客体。这些都是不容易掌握的思想，甚至连物理学家们也花了许多年才普遍接受相对论。爱因斯坦能够孕育出相对论，展现了他无与伦比的想象力。他还从相对论导出许多推论，尽管它似乎会引出古怪的结论，这显示了他对自己逻辑的自信。

我们可以用3个数或坐标来描述空间中一点的位置，这是一个常识。例如，我们可以说房间中的一点距离一堵墙7米，距离另一堵墙3米，而且比地板高5米。或者我们可以指明一个点处于一定的纬度、经度以及海拔。我们可以自由使用任何3个适当的坐标，尽管它们只在有限的范围内有效。根据皮卡迪里广场以北和以西多少英里，以及高于海

平面多少英尺来指明月球的位置是不现实的。相反，我们可以按照离开太阳的距离，离开行星轨道面的



距离，以及月球到太阳的连线和太阳到附近的恒星例如比邻星连线的夹角来描述它。这些坐标甚至在描述太阳在我们星系中的位置，或者我们的星系在

本星系群中的位置时，也没有太多用处。事实上，我们可以用一组相互交叠的坐标碎片来描述整个宇宙。在每一碎片中，我们可用 3 个坐标的不同集合来指明一点的位置。

在相对论的时空中，可用 4 个数或坐标来指明任何事件——也就是在特定时刻在空间中特定点发生的任何事。重说一遍，坐标的选择是任意的：我们可以利用任何 3 个定义得很好的空间坐标和任何时间测度。但是在相对论中，不可能真正地区分空间和时间坐标，如同不可能真正地区分任何两个空间坐标一样。我们可以选择一组新的坐标，比如说第一个空间坐标是旧的第一个和第二个空间坐标的组合。于是，为了测量地面上一点的位置，我们可以利用皮卡迪里东北多少英里和西北多少英里，来替代在皮卡迪里以北多少英里和以西多少英里去测量。类似地，我们可以使用新的时间坐标，它是旧的时间(以秒为单位)加上皮卡迪里往北的距离(以光秒为单位)。

相对论的另一个众所周知的推论是，质量和能量是等效的。这被概括在爱因斯坦著名的方程  $E=mc^2$  (此处  $E$  为能量， $m$  为质量，而  $c$  为光速) 中。人们经常使用这个方程计算，比如讲，如果把一些物质转变成纯粹电磁辐射时会产生多少能量。(因为光速是一个很大的数，其答案是能量很大——转变成毁灭广岛市炸弹中能量的物质，其重量还不到 1 盎司。)但是这个方程还告诉我们，如果一个物体的能量增加，它的质量也会增加，也就是它对加速或者速度改变的抵抗也增加。

能量的一种形式是运动的能量，称做动能。正如使你的小轿车运动需要能量一样，增加任何物体的速度都需要能量。一个运动物体的动能等同于使它运动必须花费的能量。所以，一个物体运动得越快，它所拥有的动能越多。但是根据能量和质量等效，动能增加了物体的质量，所以物体运动得越快，进一步增加该物体的速度就越困难。

只有当物体以接近于光速的速度运动时，这个效应才真正有意义。例如，一个物体具有 10% 的光

速时，其质量只比正常大 0.5%，而具有 90% 光速时，其质量会比正常质量的 2 倍还大。当一个物体接近光速时，其质量会上升得越来越快，这就需要越来越多的能量才能使它进一步加速。根据相对性理论，一个物体事实上永远达不到光速，这是因为到那时它的质量会变成无限大，而由于质量和能量等效，需要无限大的能量才能达到目的。这就是任何正常物体永远受相对论限制，以慢于光速的速度运动的原因。只有光，或者其他没有内禀质量的波可以以光速运动。

爱因斯坦 1905 年的相对性理论称做狭义相对论。这是因为，尽管它非常成功地解释了光速对所有观测者都是相同的，以及当物体以接近光速的速度运动时会发生什么，但是它和牛顿引力论不相协调。牛顿理论说，在任何给定时刻物体之间相互吸引，其引力依赖于那个时刻它们之间的距离。这意味着，如果你移动其中一个物体，那么加到另一个物体上的力会即刻改变。如果，比如讲太阳忽然消失了，麦克斯韦理论告诉我们，地球直到 8 分钟后

才会变暗(由于这正是光从太阳到达我们所需的时间)。但是根据牛顿引力论,地球会立刻觉察到太阳的吸引不复存在而飞离轨道。这样太阳消失的引力效应以无限大的速度,而不像狭义相对论要求的那样,以光速或者低于光速到达我们这里。在 1908 年和 1914 年之间爱因斯坦进行了一些未能成功的尝试,去寻找一个和狭义相对论相协调的引力论。1915 年,他终于提出了一个更具革命性的理论,也就是我们现在称为广义相对论的理论。



## 第 6 章

### 弯曲空间

爱因斯坦的广义相对论是基于一个革命性的设想，引力和其他力不同，它不是力，只不过是时空并非平坦这一事实的结果，而早先人们以为时空是平坦的。在广义相对论中，在时空中的质量和能量的分布使时空弯曲或“翘曲”。诸如地球这样的物体并非受到称做引力的力的作用而沿着弯曲轨道运动；相反，它们之所以沿着弯曲轨道运动，是因为在弯曲空间中，它们遵循着一条最接近直线的路径运动，这个路径称做测地线。用专业语言来说，测地线的定义就是相邻两点之间的最短(或最长)的路径。

几何平面是二维平坦空间的一个例子，在它上面的测地线是直线。地球的表面是一个二维的弯曲空间。地球上的测地线称做大圆。赤道就是一个大

圆。地球上其中心和地心重合的任何其他的圆也都是大圆。（这些是在地球上你能画出的最大的圆，这个事实是术语“大圆”的来源。）由于测地线是两个



地球上的距离

地球上的两点之间的最短距离是沿着一个大圆。在一张平坦的地图上，最短距离不对应于一条直线。

机场之间的最短的路径，这就是航线领航员告诉驾驶员飞行的轨道。例如，你可以从纽约到马德里，按照罗盘，几乎是一直往东，沿着它们的共同纬线飞行 3 707 英里。但是如果沿着大圆首先往东北方向，然后逐渐转向东方，最后转向东南方向飞，只



宇宙飞船影子的路径  
宇宙飞船在空间中沿直线飞行，把它的路径投影到二维的地面上就显得是弯曲的。

要飞 3 605 英里即能到达那里。在一张地图上呈现出的这两条路径是令人误解的，地球表面在该地图

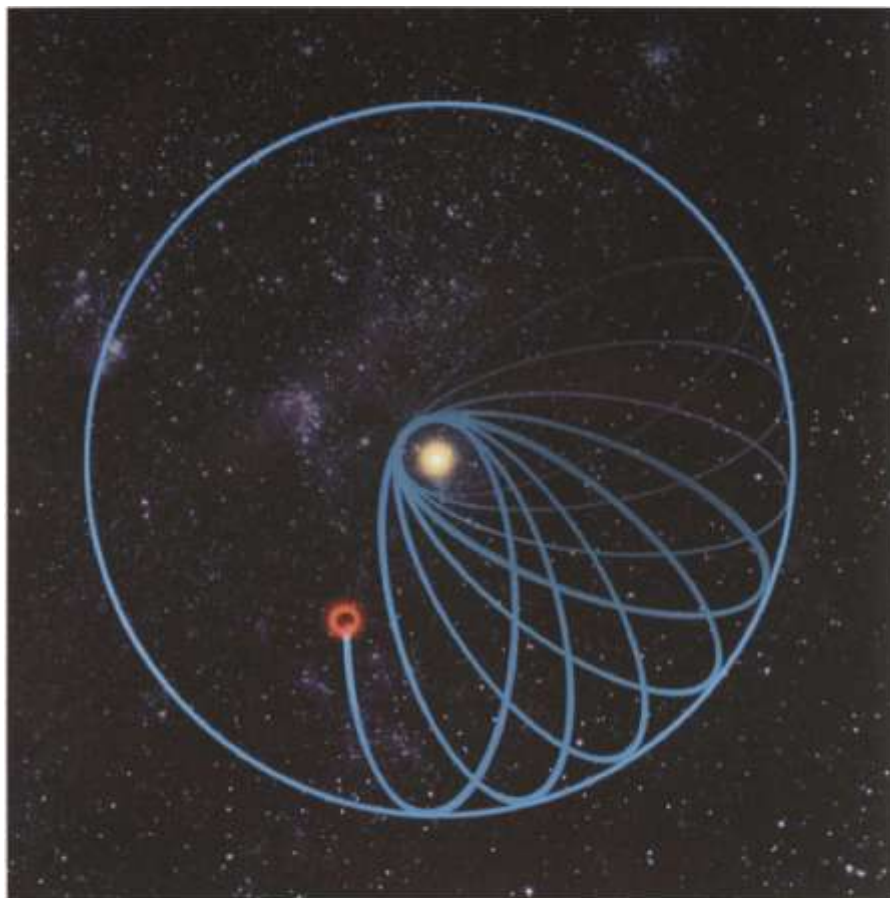
上被畸变(拉平)了。当你“笔直”往东运动时，你并不真正地笔直运动，至少在最直接的路径即测地线的意义上说不是笔直的。

在广义相对论中，物体在四维时空中总是沿着测地线运动。在没有物质时，这些在四维时空中的测地线是三维空间中的直线。在物质存在时，四维时空中的物体在三维空间中的路径弯曲。在旧的牛顿理论中，这种弯曲的方式被解释成引力吸引的效应。这和观看飞机在多山的地面上空飞行相当类似。飞机也许是在一条直线上飞越三维空间，但是除去第三维——高度——时，你会发现它在多山的地面上的影子是沿着一道弯曲的路径。或者想象一艘宇宙飞船在一条直线上飞越空间，直接通过北极上空，将它的路径投影到地球的二维表面上，你会发现它沿着半圆，在北半球上画出一条经线。太阳的质量弯曲时空，使得地球虽然在四维时空中遵循笔直的路径，但我们在三维空间中看去，它却是沿着一个几乎圆周的轨道运动。这是一个很难摹绘的现象。

实际上，尽管广义相对论和牛顿引力论推导的方法不同，但由它们预言的行星轨道几乎完全相同。水星轨道的偏差最大。作为最接近太阳的行星，水星受到最强大的引力效应，并且它的椭圆轨道被拉伸得相当厉害。广义相对论预言，该椭圆的长轴应该以大约每 10 000 年 1 度的速率旋转。尽管这个效应很小，但它还是在 1915 年之前很久就被注意到了（见第 3 章），而且它成为爱因斯坦理论的最早验证之一。近年来，人们用雷达测量到其他行星轨道和牛顿预言的甚至更为微小的偏差，并且发现和广义相对论的预言一致。

光线在时空中也必须遵循测地线。再说一遍，空间是弯曲的这个事实意味着，在空间中，光显得不再沿着直线行进，这样广义相对论预言引力场应当弯折光线。例如，该理论预言，由于太阳质量的缘故，在太阳附近的光的路径，会向里稍微弯曲。这意味着，从遥远恒星来的恰好通过太阳附近的光会偏折一个小的角度，于是地球上的观测者发觉，该恒星出现在不同的位置上。当然，如果从恒星来

的光线总是在太阳邻近通过，我们就无法得知光线是被偏折呢，还是恒星本来就在我们似乎看到它的



水星轨道的进动  
随着水星重复地围绕着太阳公转，它的椭圆路径的长轴缓慢地旋转，  
这个长轴大约每 360 000 年转一圈。

地方。然而，由于地球围绕太阳公转，不同的恒星便显得在太阳背后通过，并使它们的光线受到偏折。因此，它们相对于其他恒星的表现位置发生改变。

因为太阳的光亮，人们不可能观测到在天空中邻近太阳出现的恒星，所以在通常情形下，观察这效应是非常困难的。然而，当日食发生时就能做到，那时月球把太阳光阻挡住了。由于 1915 年第一次世界大战正在进行，所以不能立即验证爱因斯坦的光偏折预言。直到 1919 年，一支英国的远征队从西非的海岸观测日食，证明了光线的确被太阳偏折，正如理论所预言的那样。英国科学家对德国理论的这次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，后来人们检查这次探险所拍的照片，发现其误差和企图测量的效应同样大。他们的测量纯属运气，或许是由于已知所要得到的结果——这在科学上时有发生。然而，后来的观测多次准确地证实了光的偏折。

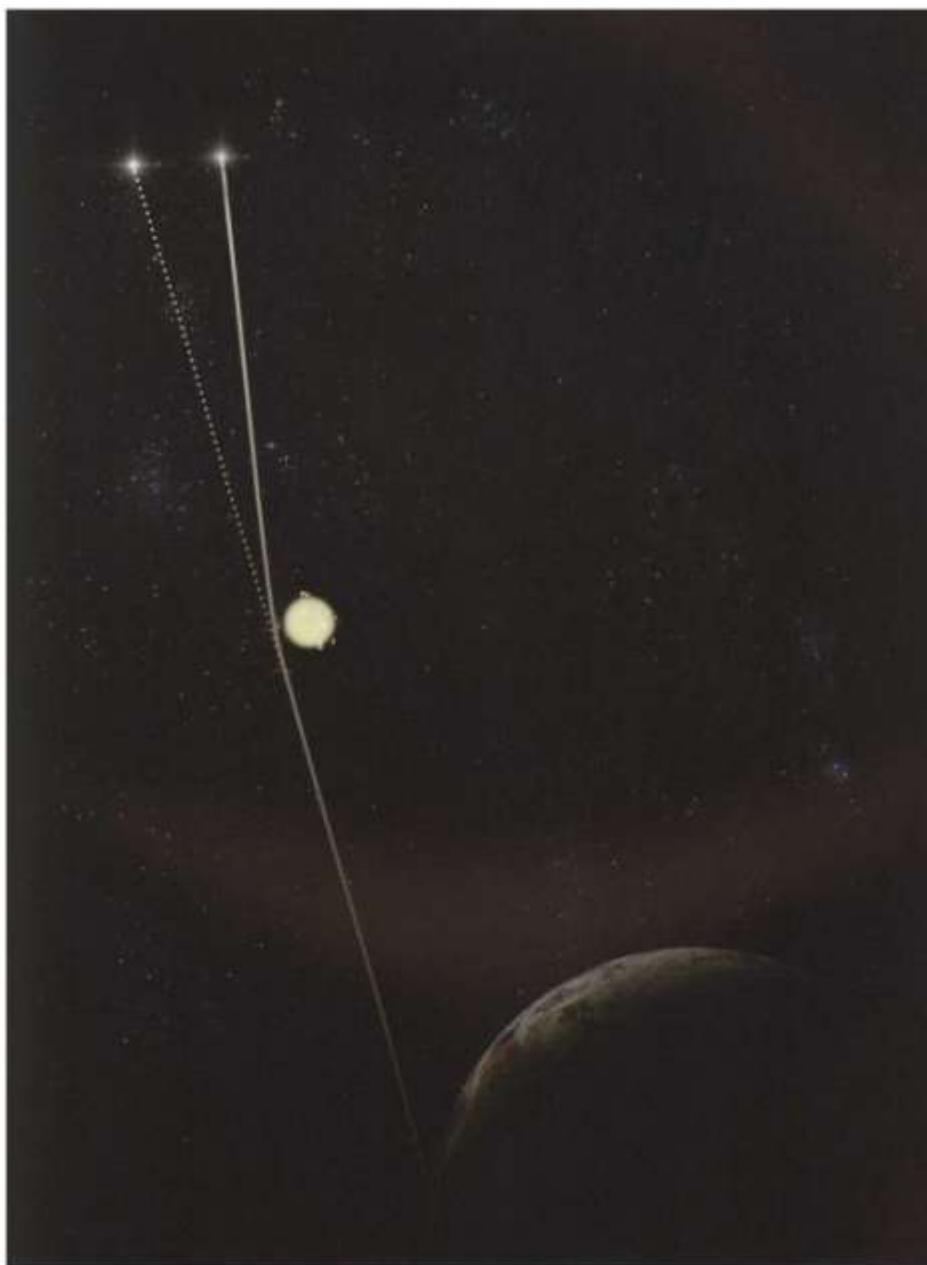
广义相对论的另一个预言是，在诸如地球这样的大质量物体附近，时间应该显得流逝得较缓慢一些。爱因斯坦在 1907 年就首次意识到这一点，这比他意识到引力还会改变空间形状要早 5 年，而且比他完成他的理论要早 8 年。爱因斯坦利用他的等效

原理推导出这个效应。等效原理在广义相对论中的作用正如基本假设对于狭义相对论一样。

回顾一下，狭义相对论的基本假设是说：对所有自由运动的观察者而言，不管其运动的速度多大，科学定律必须是相同的。粗略地讲，等效原理将此推广到那些不是自由运动而是在引力场影响下的观察者。在精确陈述这个原理时有些技术细节，诸如引力场并非均匀这一事实，你必须对微小的、互相交叠的区域分别应用这个原理，但是我们在此不理睬它。为了我们的目的，我们可以用如下方式叙述这个原理：在足够小的空间区域中，不可能区分你是静止地处于引力场中，还是在空虚的空间中做匀加速运动。

想象你在空虚空间中的一台升降机内。不存在引力，没有“向上”，也没有“向下”。你在自由地漂浮。现在升降机开始做等加速运动，你突然感觉到重量。那就是说，你感觉到往升降机一端的拉力，突然使你觉得这一端仿佛是地板！如果你现在拿出一个苹果并释放之，它就掉到地板上。事实上，现





光线在太阳附近的弯曲

当太阳几乎刚好处于地球和一个遥远恒星之间时，太阳的引力场把星光偏折，改变了恒星的表现位置。

在你正在加速，发生在升降机内的一切事情呈现出仿佛升降机根本不动，而静止地处于一个均匀的引力场中一样。爱因斯坦意识到，正如你从火车内不能得知你是否在做匀速运动一样，你从升降机内也不能得知，你是在均匀地加速运动呢，还是处于均匀的引力场中。这就导出了他的等效原理。

等效原理以及它的上述例子，只有当惯性质量（牛顿第二定律中的质量，它决定你加速多少，以回应外力）和引力质量（牛顿引力定律中的质量，它决定你感受到多大的引力）（见第 4 章）是同一东西时，才能成立。那是因为如果两种质量是相同的，那么引力场中的所有物体将以相同的速率下落，而不管它们的质量是多少。如果这个等效不真，那么在引力影响下，某些物体会比另一些下落得更快，而这样你就可以把引力拉力和均匀加速区分开来，对于均匀加速的情形所有东西的确都以相同的速率下落。爱因斯坦利用惯性质量和引力质量等效去推导他的等效原理，并最终得出整个广义相对论，堪称人类思想史上无与伦比的逻辑推理的无畏进军。

现在我们通晓了等效原理，可以着手跟随爱因斯坦的逻辑进行另外的理想实验，以展示为何时间一定会受引力的影响。请设想在太空中有一艘火箭飞船。为了方便起见，想象该火箭飞船如此之长，光要 1 秒钟才能从顶部穿越到底部。最后，假定在火箭飞船的天花板上和地板上各有一名观察者，每人都携带一个每秒滴答响一下的完全相同的钟表。

假定天花板观察者等到钟表的滴答，就立即给地板观察者发送光信号。天花板观察者在钟表的下一次滴答时再重复这样做。依照这个架构，每个信号行进 1 秒钟，然后被地板观察者接收到。这样，正如天花板观察者在相隔 1 秒的时间发送出两次光信号，地板观察者也在相隔 1 秒的时间收到两次光信号。

如果火箭飞船停在地球上受引力的影响，而不在天外自由浮动，这个情形会有什么不同呢？根据牛顿的理论，引力对此毫无效应。如果天花板观察者发送间隔 1 秒的信号，那么地板观察者将在间隔 1 秒接收到它们。但是等效原理却做出不同的预言。

考虑到均匀加速的效应，而非引力效应，这个原理告诉我们将看到发生什么。这是爱因斯坦利用等效原理创造他的新引力理论方法的一个例子。

现在我们假定，火箭飞船正在加速。(我们想象，它加速得这么慢，使我们不会接近光速!)由于火箭飞船向上运动，因此第一个信号比以前行进的距离要少，所以将比 1 秒钟更短的时间到达。如果火箭以恒常速度运动，则第二个信号将会以刚好同样的时间提前量到达这里，这样两个信号之间的时间间隔仍会是 1 秒。但是由于加速，火箭在第二个信号发送出时甚至会比在发出第一个信号时运动得更快，这样第二个信号穿越的距离甚至比第一个更小，从而在甚至更少的时间内到达。因此，地板观察者将会测量到短于 1 秒钟的信号间隔，他和天花板观察者有分歧，后者宣称刚好以 1 秒钟间隔发送过信号。

在火箭飞船加速航行的情形下，这也许还不至于令人吃惊——我们仅仅对它进行了解释!但是要记住，等效原理说，它还适用于静止于引力场中的

火箭飞船。这意味着，即使飞船不加速，比如说，停在地球表面的发射台上，如果天花板观察者向地板每隔 1 秒钟 ( 按照他的钟表 ) 发射信号，地板观察者也将在更短的间隔时 ( 按照他的钟表 ) 接收到信号。这真是令人吃惊！

你也许仍然会问：这是否意味着引力改变时间，或者它只不过毁坏了钟表？假设地板观察者爬到天花板上，他和他的伙伴在上面对表。它们是同样的钟表，而且可以肯定，两位观察者将会发现他们这时在 1 秒钟的长度上是一致的。地板观察者的钟表没有任何毛病：不管它碰巧放在何处，它总是测量当地时间的流逝。正如狭义相对论告诉我们的，对于相对运动的观察者们，时间推移得不一样；广义相对论告诉我们，对于在一个引力场中不同高度的观察者，时间推移得不一样。根据广义相对论，由于时间在接近地球表面处运动得更慢，所以地板观察者在信号之间测量到短于 1 秒钟的时间。引力场越强，这个效应就越大。牛顿的运动定律终结了

空间中绝对位置的观念。现在我们已经看到，相对性理论如何摆脱了绝对时间。

1962 年，人们利用安装在水塔顶部和底部的一对非常精密的钟表，检验了这个预言。在底部的钟表更接近地球，发现它走得较慢，和广义相对论精确地一致。这个效应很小——和地球表面上的钟表相比较，在太阳表面上的钟表 1 年才大约走快 1 分钟。然而，随着依赖卫星信号的非常精密的导航系统的发明，在地球上方的不同高度钟表的速率之差，目前在实用上相当重要。如果无视广义相对论的这个预言，计算得  $m$  的位置会差几英里！

时间流逝的这些改变同样影响我们的生物钟。假定一对双胞胎中的一位住在一座山顶上，另一位留在海平面上，则第一位双胞胎比第二位衰老得更快。于是，如果他们再次相遇，一位就比另一位更老。在这种情形下，年龄的差异会非常微小，但是如果双胞胎中的一位乘坐宇宙飞船去进行一次长途旅行，他被加速到接近光速，则差异就大得多。当他返回时，他就比留在地球上的那一位年轻得多。

这称做双生子佯谬，但是只有当你在内心还有绝对时间观念之时，这才是一个佯谬。在相对性理论中不存在唯一的绝对时间；相反，每一个体都有其自身的个人时间测度，这个测度依他在何处以及如何运动而定。

1915 年以前，人们认为空间和时间仅仅是个固定的舞台，事件在其上发生，但舞台不受发生事件的影响，甚至在狭义相对论中也是如此。物体运动，力吸引和排斥，但是时间和空间简单地延续而不受影响。人们很自然地认为空间和时间会永远延伸下去。然而，在广义相对论中情况完全不同。现在空间和时间是动力量：当一个物体运动时，或者一个力作用时，它影响空间和时间的曲率——而时空结构反过来也影响物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅影响宇宙中发生的一切，而且受后者的影响。正因为我们在谈论宇宙中发生的事件时不能不提到空间和时间的概念，在广义相对论中谈论在宇宙界限之外的空间和时间也是没有意义的。1915 年之后的几十年间，对空间和时间的这个新理解是要

变革我们的宇宙观。正如我们将要看到的，一个动态的膨胀的宇宙的观念已经取代一个本质上不变的宇宙的旧观念。一个不变的宇宙也许已经存在了无限久远，并将继续无限久地存在，而一个动态的宇宙似乎在有限的过去起始，也许会在将来的有限时间内终结。



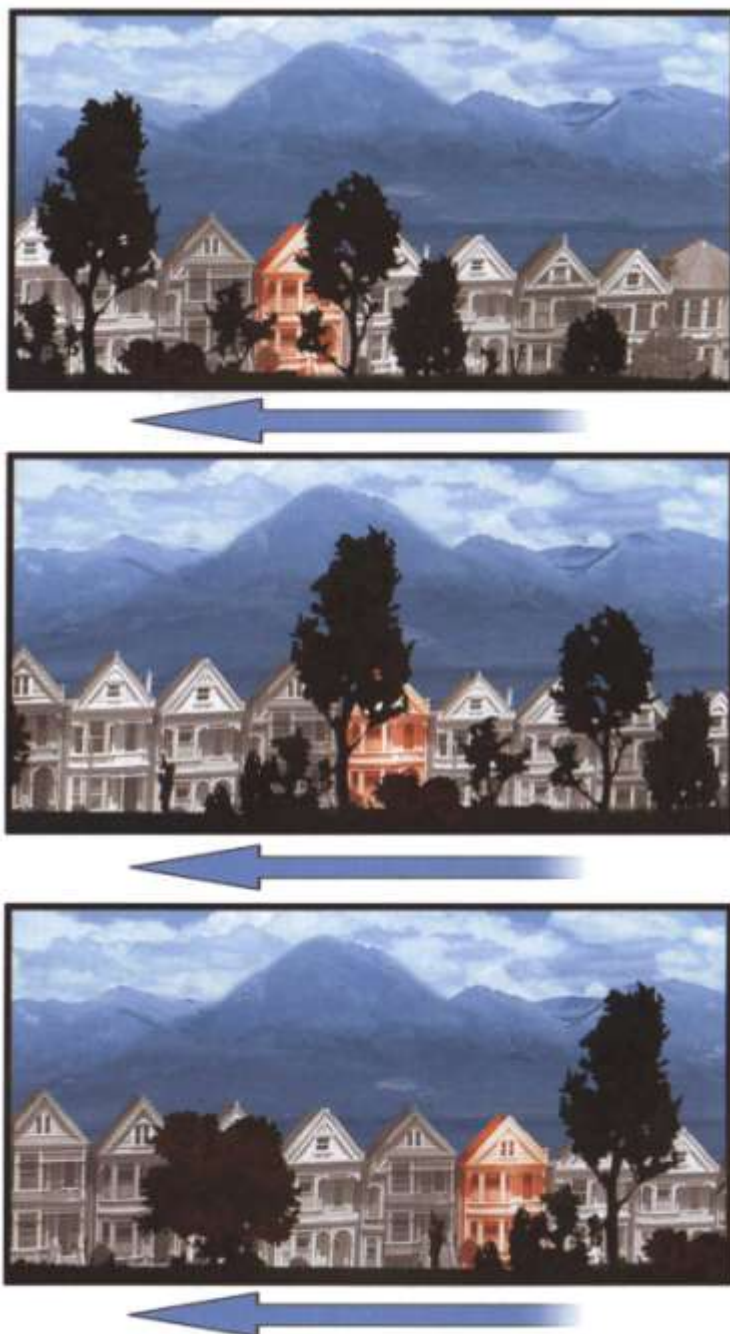
## 第 7 章

### 膨胀的宇宙上

如果你在一个清澈无月的夜晚仰望星空，你可能看到的最亮的星体是金星、火星、木星和土星，还有数目巨大的类似我们太阳的，但离开我们遥远得多的恒星。事实上，当地球围绕着太阳公转时，这些固定的恒星中的一些，相互之间的位置呈现出非常微小的改变。它们绝非完全固定不动的！这是因为它们距离我们相对接近一些。随着地球围绕着太阳公转，相对于更远处的恒星背景，我们从不同的位置观测较近的恒星。这个效应和你在空旷的路上驾车时所看到的景象很类似，以地平线上的任何东西为背景，附近树木的相对位置仿佛在变化。树木愈近，似乎运动愈甚。这种相对位置之变化称为视差（见 44 页插图 1。说到恒星，这真是幸运，因为它使得我们能直接测量这些恒星与我们的距离。

正如我们在第 1 章提到的，最近的恒星比邻星大约有 4 光年或者 230 000 亿英里那么遥远，其他大多数肉眼可见的恒星离开我们的距离均在几百光年之内。与之相比，我们的太阳仅仅有 8 光分之遥！可见的恒星看起来散布在整个夜空，但是特别集中在一条我们称为银河的带子上。

早在公元 1750 年就有一些天文学家提出，如果大部分可见的恒星处在单独的碟状结构中，就可以解释银河的外观。该碟状结构便是我们现在称为螺旋星系的一个例子。之后不到几十年，天文学家威廉·赫歇尔爵士就非常精心地对大量恒星的位置和距离进行编目分类，从而证实了这个观念。即便如此，直到 20 世纪初人们才完全接受这个思想。我们现在知道，银河系——我们的星系——大约有 10 万光年宽并且缓慢旋转；它螺旋臂上的恒星每几亿年围绕着它的中心公转一圈。我们的太阳只不过是一颗寻常的平均大小的黄色恒星，处于银河系的一个螺旋臂的内缘附近。在亚里士多德和托勒密时代，



#### 视差

无论你在路上还是在空间中运动，当你行进的时候，近处和远处物体的相对位置随之变化，测量这种变化可以用于确定物体的相对距离。

人们认为地球是宇宙的中心。从那以后，我们的确已经走过了很长的历程！

直到 1924 年，当美国天文学家埃德温·哈勃证明了银河系不是仅有的星系，我们现代的宇宙图象才得以奠定。事实上，他找到了许多其他星系，它们之间是巨大的空虚的太空。为了证明这些，哈勃必须确定从地球到其他星系的距离。但是这些星系是如此之遥远，而不像邻近的恒星那样，它们的位置显得完全同定不动。由于哈勃不能使用视差法测量这些星系，他不得不利用间接的办法。恒星距离的一个显然的测度是它的光度。但是恒星的视亮度不仅依赖它的距离，还依赖它发射  $f$  “多少光(它的光度)。一颗暗淡的恒星，如果足够近，将使任何远处星系中最亮的恒星相形见绌。所以，为了使用视亮度作为恒星距离的测度，我们必须知道它的发光度。

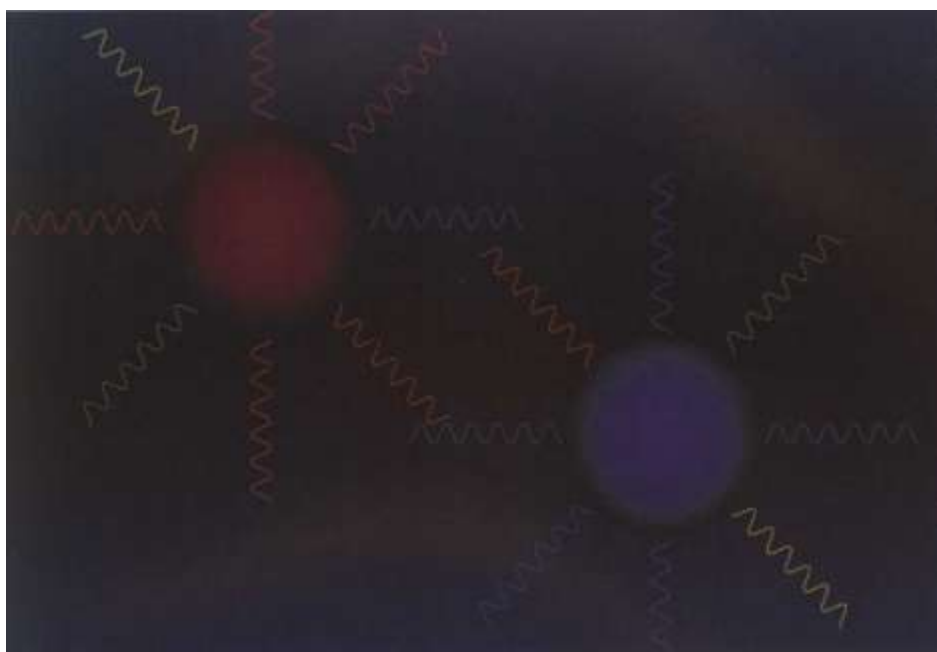
因为从邻近恒星的视差我们可以知道它们的距离，所以从它的视亮度可以计算出它的光度。哈勃注意到，按照这些邻近恒星发出的光的种类，可

以将它们分成若干类型。同类的恒星总是具有相同的光度。然后他论证道，如果我们在一个遥远的星系中发现这些类型的恒星，我们可以假定它们具有与我们邻近的类似恒星相同的发光度。我们可以利用这些信息来计算出该星系的距离。如果我们可以对同一星系的一些恒星做这种处理，而且我们的计算总-出相同的距离，我们就能相当确信自己的估计。哈勃：种办法得出 9 个不同星系的距离。



恒星光谱  
人们通过分析星光的组分色，既能确定恒星的温度，又能确定其大气成分。

今天我们知道肉眼可见的恒星只占有所有恒星的极小部我们能够看到大约 5 000 颗恒星，这大约只占我们自『星系即银河系中所有恒星的 0.000 1%。而银河系本身：过是我们用现代望远镜能看到的多于 1 000 亿个星系中的一个 —— 而每个星系都平均包含大约 1 000 亿颗恒星。如果一颗恒星是一粒盐，你可以把肉眼看得见的所有恒星填满一个茶匙，而宇宙中的所有恒星可以充满直径比 8 英里还长的一个球体。



**黑体辐射**

由所有物体——不仅恒星——的微观成分的热运动导致物体发出辐射。这种辐射中的频率分布表征该物体的温度。

恒星是如此遥远，在我们的眼中它们只不过是微小的光点。我们不能看到它们的尺度或者形状。但是，正如哈勃注意到的，宇宙间存在很多不同种类的恒星，而我们可以按照它们的光的颜色将其区分。牛顿发现，如果太阳光通过一块称为棱镜的三角状玻璃，它就会分解成像在彩虹中一样的组分色。从一个给定光源发射出的各种颜色的相对强度称为它的光谱。人们把望远镜聚焦在单独的恒星或星系，就能观察到从该恒星或星系发来的光谱。

这个光告诉我们的诸事之一就是温度。1860年德国物理学家古斯塔夫·克希霍夫意识到，任何物体，比如恒星，加热时就会发出光或者其他辐射，正如煤炭加热时会发光一样。这种炽热物体中的原子的热运动引起发光，它称为黑体辐射（虽然炽热的物体不是黑的）。黑体辐射谱很容易辨识：它具有一个特殊的形状，这种形状随物体的温度而变化。因此，炽热物体发射的光像是一个温度读数。我们从不同恒星观测到的光谱总是恰好处于这种形式：它是该恒星热的状态的明信片。

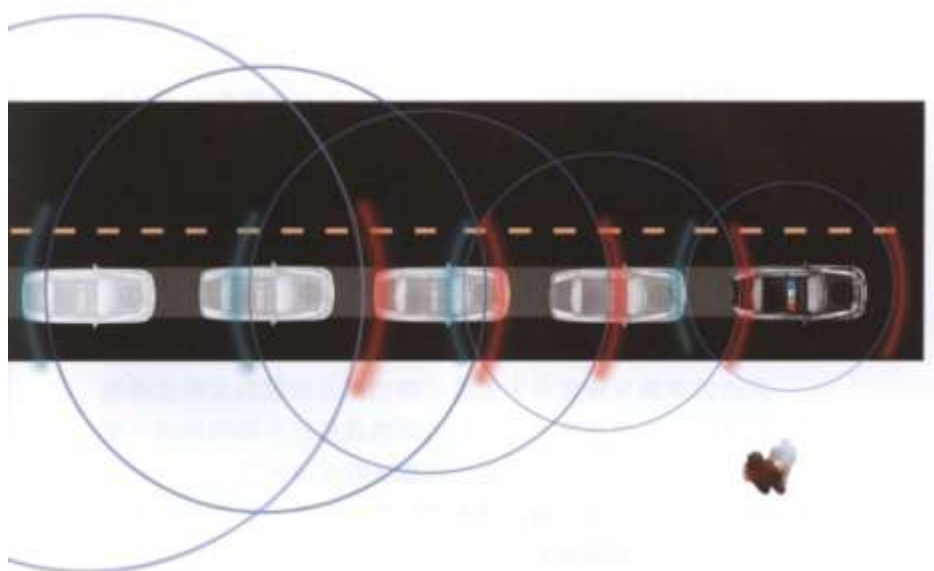
如果我们更仔细地观测，从星光可以得到更多信息。我们发现某些非常特定的颜色缺失，而这些缺失的颜色可依恒星而变。由于我们知道每种化学元素吸收独具特点的一组非常特殊的颜色，把这些和在恒星光谱中缺失的那些相对照，我们就能精确地确定在那个恒星的大气中存在哪些元素。

20 世纪 20 年代，当天文学家开始观测其他星系中的恒星光谱时，发现某些非常奇怪的东西：在那些星系中存在和我们自身星系中的恒星相同的缺失颜色的特征模式，只不过它们都向光谱的红端移动了同样的相对量。

物理学家将这种颜色或者频率的移动称为多普勒效应。大家在声音的领域里都对此非常熟悉。聆听路过的小轿车：当小轿车驶近时，它的发动机——或者它的喇叭——发出较高的音调，而在它通过再离去，它就发出较低的音调。它的发动机或者喇叭的声音是一个波，是一连串波峰和波谷。当一辆小轿车向我们急速开来，随着它发出每一个连续的波峰，它会越来越接近我们，这样波峰之间的距



离——声音的波长——就比小轿车静止时短。波长越短，每秒钟到达我们耳朵的波动就越多，音调或者声音的频率也就越高。相应地，如果小轿车离开我们而去，波长就变得较长，而到达我们耳朵的波将具有较低的频率。小轿车运动越快，此效应就越大，这样我们可以利用多普勒效应去测量速度。光或者射电波的行为很类似。警察就是利用多普勒效应，通过测量从小轿车反射回来的射电波脉冲的波长来测量它们的速度。



多普勒效应

当波源朝着观察者运动时，它的波长就显得较短。如果波源离开观察者运动，它的波长就显得较长。这就称做多普勒效应。

正如我们在第 5 章提到的，可见光的波长极短，其范围是四千万分之一厘米至八千万分之一厘米。光的不同波长正是人眼当做不同颜色看到的東西，最大的波长出现在光谱的红端，而最短的波长在蓝端。现在想象和我们距离不变的一个光源，比如一颗恒星，正在以一个不变的波长发射出光波。我们接收到的波的波长和它们被发射时的波长相同。然后假定光源开始离开我们而去。正如声音的情形那样，这意味着光的波长被拉长，因此，它的光谱向谱的红端移动。

哈勃在证明了其他星系存在之后的岁月里，花费时间为星系距离编目并观测其光谱。在那个时候，大多数人料想星系完全任意地运动，于是哈勃预料找到的蓝移谱会和红移谱一样多。因此，当他发现大多数星系呈现红移，确实感到非常惊奇：几乎所有星系都飞离我们。1929 年哈勃发表的观测发现更令人惊奇：甚至星系红移的大小也不是任意的，它和星系离开我们的距离成正比。换句话说，星系

越远,则飞离得越快速!这意味着宇宙不像原先所有人以为的那样是静止的,或者在尺度上不变。事实上,宇宙正在膨胀,不同星系之间的距离一直在增长。

宇宙膨胀的发现是 20 世纪最伟大的智力革命之一。事后回想,人们很容易惊讶,为何前人从未想到这一点。牛顿和其他人应该可以意识到,由于没有可相比较的斥力来平衡所有恒星和星系相互作用的引力拉力,一个静止的宇宙会是不稳定的。因此,即便宇宙在某一时刻是静止的,由于所有恒星和星系的相互引力吸引会很快使它收缩,所以它也不能保持静止。事实上,即便宇宙正在相当慢地膨胀,引力也会使它最终停止膨胀,然后它再开始收缩。然而,如果宇宙以超过某一临界速率膨胀,引力就永远不会强大到足以停止它,而它将继续永远膨胀下去。这有点像当你在地球表面向上方引燃火箭时发生的情景。如果火箭的速度相当慢,引力将最终使之停止并开始折回地面。另一方面,如果火箭的速度比某一临界值(大约每秒 7 英里)更高,引

力就没有强大到足以将其拉回，这样它将永远飞离地球。

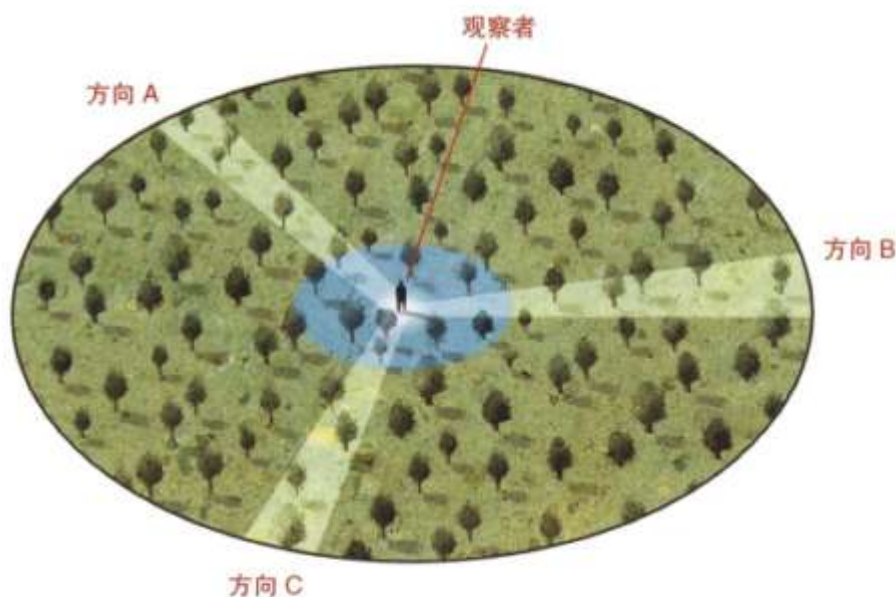
19 世纪、18 世纪甚至 17 世纪末的任何时候，人们都可以从牛顿引力论预言出宇宙的这个行为。然而，静态宇宙的信念是如此之根深蒂固，使它一直维持到 20 世纪的初叶。甚至爱因斯坦于 1915 年表述其广义相对论时，还如此坚信宇宙必须是静止的，他甚至在其方程中引进一个称做宇宙常数的敷衍因素，去修正他的理论，使宇宙可能处于静态。宇宙常数具有新的“反引力”的效应，它不像其他的力那样，不由任何特别的源引起，而是嵌入在时空的自身结构之中。这个新力的一个结果便是，时空具有一种内禀的膨胀倾向。爱因斯坦调节宇宙常数，就可以调节这种倾向的强度。他发现，他可以把它调节得恰好去平衡宇宙中的所有物体的相互吸引，这样就可以得到静态的宇宙。他后来否认宇宙常数，将这个敷衍因素称为他的“最大错误”。正如我们很快就要看到的，今天我们有理由相信，他引进宇宙常数也许终究是正确的。但是，爱因斯坦让

静态宇宙的信念压倒他的理论似乎要预言的东西：宇宙正在膨胀，这肯定会使他十分沮丧。似乎只有一个人愿意相信广义相对论的这个预言。当爱因斯坦和其他物理学家正在寻求避免广义相对论的非静止宇宙时，俄国物理学家兼数学家亚历山大·弗里德曼却着手解释它。

弗里德曼对于宇宙做了两个非常简单的假定：我们无论往哪个方向观察宇宙，也无论从任何其他地方观察宇宙，宇宙看起来都是一样的。弗里德曼证明，仅仅从这两个观念出发去解广义相对论的方程，我们应该预料到宇宙不是静止的。事实上，1922年，也就是在埃德温·哈勃做出发现的几年前，弗里德曼就预言了恰好是哈勃后来发现的东西！

很清楚，关于宇宙在任何方向上都显得一样的假设，在实际上不是准确成立的。例如，正如我们注意到的，我们星系中的其他恒星形成了横贯夜空的做法银河系的清晰光带。但是我们如果观看遥远的星系，似乎在每一方向上都有大致相同数量的星系。所以，假定我们在比星系间距离更大的尺度下

来观察，而不理睬在小尺度下的差异，则宇宙确实所有的方向上看起来是大致一样的。想象站在森林中，林中的树木随意分布。如果你往一个方向看，可能看到在 1 米距离处的最近的树。在另一方向最近的树也许在 3 米以外。在第三个方向你可以在 2 米处看到一簇树。森林似乎在每个方向上都显得不同，但是如果考虑在 1 英里半径之内的所有树木，这类差异就会被平均掉了，而你会发现，不管在哪个方向上，你看到的森林都是一样的。



各向同性的森林

即使森林中的树木均匀分布，邻近的树木仍然可以成簇。类似地，尽管宇宙在我们附近显得不均匀，但是在尺度下，无论在我们视线的任何方向上，都显得是相同的。

在很长一段时期里，这种恒星的均匀分布已经充分地支持了弗里德曼假设——它可以看成是实在宇宙的粗略近似。然而，近世的一桩幸运的事件揭示了另一方面：事实上，弗里德曼假设异常准确地描述了我们的宇宙。1965 年位于新泽西州的贝尔电话实验室的两个美国物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊正在试验一个非常灵敏的微波探测器。（提醒一下，微波正如光波，但是它的波长大约为 1 厘米。）彭齐亚斯和威尔逊发现其探测器接收到比应有的还要大的噪声，他们为此而困惑。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。这个噪声很特别，尽管地球围绕着自己的轴自转，而且围绕着太阳公转，这噪声白天晚上并且整年都是一样的。由于地球的自转和公转使探测器指向空间的不同方向，于是彭齐亚斯和威尔逊得出结论，噪声来自太阳系之外，甚至来自银河系之外。它似乎从空间的每一方向同样地到来。现在我们知道，不管我们往哪个方向看，这个噪声变化总是非常微小，于是彭齐亚斯和威尔逊

意外地发现了弗里德曼第一个假设的一个引人注目的例子,这个假设讲宇宙在每个方向上都是相同的。

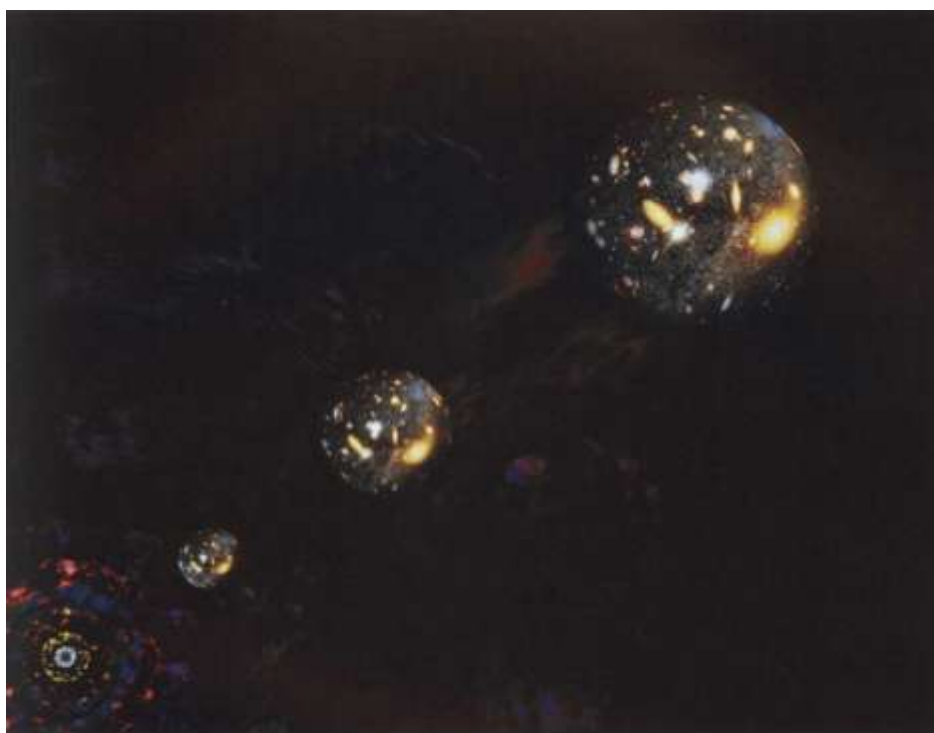
这个宇宙背景噪声的起源是什么呢?大致和彭齐亚斯和威尔逊研究他们检测器噪声的同时,在附近的普林斯顿大学的两位美国物理学家鲍伯·狄克和詹姆士·皮帕尔斯也对微波发生兴趣。他们正在研究乔治·伽莫夫(曾一度为亚历山大·弗里德曼的学生)的一个建议:早期的宇宙应该是非常密集的和白热的。狄克和皮帕尔斯论证道,我们仍然应该能看到早期宇宙的白热,这是因为从它非常遥远的部分发来的光,刚好现在才到达我们这里。然而,宇宙的膨胀意味着光被红移得这么厉害,以至于现在只能作为微波辐射,而非可见光呈现给我们。当彭齐亚斯和威尔逊听说狄克和皮帕尔斯的研究工作时,后者正准备着手寻找这个微波辐射,前者立即意识到,自己已经找到了这个辐射。为此,彭齐亚斯和威尔逊得到1978年的诺贝尔奖(狄克和皮帕尔斯似乎对此相当难过,更别提伽莫夫了)。



初看起来，宇宙在我们视线的任何方向上都显得相同，这一切证据似乎暗示，我们在宇宙中的位置有点特殊。特别是，如果我们看到所有其他的星系都远离我们而去，那么我们似乎必须处于宇宙的中心。然而，对此还可以做另外的解释：从任何其他星系上看，宇宙在任何方向上也可能都一样。正如我们所看到的，这是弗里德曼的第二个假设。

我们没有任何科学证据去支持或反驳弗里德曼的第二个假设。由于教会教义宣布我们在宇宙的中心占有一个独特的位置，所以若在几个世纪以前，这个假设就会被教会认为是异端邪说。但是今天我们之所以相信弗里德曼的假设，几乎基于相反的原因，即某种谦虚：我们觉得如果宇宙只是在围绕我们，而不在围绕宇宙其他点上的每个方向上都显得相同，那可真是太令人吃惊了！

在弗里德曼的宇宙模型中，所有星系都直接相互飞离。这种情形很像画上许多斑点的被持续吹胀的气球。随着气球膨胀，任意两个斑点之间的距离增大，但是没有一个是膨胀的中心。此



膨胀“气球”宇宙

由于宇宙的膨胀，所有星系都相互离开。犹如正在吹胀的气球上的一些斑点。相对于相互临近的星系，相互远离的星系之间的距离随时间增大得更快。因此，在任何星系上的观察者会觉得，越远的星系离开得越快。

外，随着气球半径的持续增大，气球上的斑点相离得越远，则它们互相离开得越快。例如，假定气球的半径在 1 秒钟内加倍。原先相离 1 厘米的两个斑点现在就相离 2 厘米(沿着气球表面来测量)，这样它们的相对速度是每秒 1 厘米。另一方面，一对原先相离 10 厘米的斑点现在就相离 20 厘米，这样它们相对速度为每秒 10 厘米。类似地，在弗里德曼模

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。所以他预言，星系的红移应与离开我们的距离成正比，这正是哈勃发现的。尽管弗里德曼成功地给出了他的模型，并且成功地预言了哈勃的观测，但是直到 1935 年，为了响应哈勃的宇宙均匀膨胀的发现，美国物理学家霍瓦德·罗伯逊和英国数学家阿瑟·瓦尔克提出类似的模型后，西方才普遍知道弗里德曼的工作。

弗里德曼只推导了宇宙的一个模型。但是如果他的假设是正确的话，爱因斯坦方程实际上可能有三种类型的解，也就是三种不同类型的弗里德曼模型——又是宇宙可能行为的三种不同方式。

在第一类(弗里德曼找到的)解中，宇宙膨胀得足够慢，这样不同星系之间的引力使膨胀减缓，并最终使之停止。然后星系开始朝着相互靠近的方向运动，而宇宙收缩。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。最后，还有第三类解，宇宙的膨胀

刚好快到足以避免坍缩。星系分开的速度越变越小，但是它永远不会完全达到零。

第一类弗里德曼模型引人注意的特点是，在该模型中，宇宙在空间上不是无限的，但是却没有边界。引力是如此之强大，把空间折弯绕回到自身。这和地球的表面很像，它是有限的，但是没有边界。如果你在地球表面上沿着一定的方向不停地行进，你将永远不会遇到一个不可超越的障碍，或者从边缘上掉下去，你最终会回到你出发的地方。在这个模型中，空间正与此相似，但是具有三维，而不像地球表面那样只具有二维。你可以直接绕宇宙走一周再回到出发点的思想，可成为科学幻想的好题材，但它在实际上没有多大意义。因为可以证明，你还没来得及绕回一圈，宇宙已经坍缩到了零尺度。宇宙是如此之大，你为了在宇宙终结之前回到你的出发点，就必须旅行得比光还快——而这是不允许的！在第二类弗里德曼模型中，空间也是弯曲的，虽然是以不同的方式。只有第三类弗里德曼模型对应于

一个宇宙,其大尺度几何是平直的(尽管在大质量物体邻近,空间仍然是弯曲的或者翘曲的)。

哪一类弗里德曼模型描述我们的宇宙?宇宙最终将停止膨胀并开始收缩,或者将永远膨胀下去?

这个问题的答案比科学家们最初以为的还要复杂。最基础的分析依赖两件东西:宇宙现在的膨胀率和它现在的平均密度(在空间的给定体积内的物质的量)。现在的膨胀率越快,停止它所需要的引力就越大,这样需要的物质密度也就越大。如果平均密度比某一(由膨胀率所确定的)临界值还大,物质的引力吸引就将成功地停止其膨胀并使之坍缩——对应于第一类弗里德曼模型。如果平均密度比临界值小,就不存在足够的引力拉力去停止它膨胀,宇宙将永远地膨胀下去——对应于第二类弗里德曼模型。而如果平均密度刚好是临界值,那么宇宙将永远减缓它的膨胀,逐渐地越来越趋向,但永远不会达到一个静态的尺度,这对应于第三类弗里德曼模型。

那么我们的宇宙究竟是哪一类呢?我们利用多普勒效应测量其他星系离开我们的速度,就能确定现在的膨胀率。这可以非常精确地做到。然而,因为我们只能间接地测量这些星系的距离,所以它们测量得不很准确。于是,我们只不过知道,宇宙正在以每 10 亿年 5% 至 10% 的速率膨胀。我们关于宇宙现在的平均密度的不确定性甚至更大。即使我们把银河系和其他星系中能看到的恒星的质量加起来,甚至在对膨胀率取最低值的估计时,其质量总量仍然不及停止宇宙膨胀所需质量的 1%。

但这还不是故事的全部。我们的星系和其他星系肯定还包含大量我们不能直接观察到的“暗物质”。但是由于它对星系中恒星轨道的引力吸引的影响,我们知道它肯定存在。那些处于像银河系这样的螺旋星系的外围的恒星也许是最好的证据。这些恒星围绕着它们的星系公转得太快,如果仅仅依赖能看到的星系恒星的引力吸引,是不足以将其约束在轨道上。此外,人们还发现大多数星系是成团的,我们可以从星系团对星系运动的影响做类似的推断,

在这些团中的星系之间还存在着更多的暗物质。事实上，在宇宙中暗物质的总量远远地超过平常物质的总量。当我们将所有这些暗物质加起来，我们大约只得到用来停止膨胀所需物质的量的  $1/10$ 。但是也可能还存在几乎均匀地分布于整个宇宙的其他形式的暗物质，尚未被我们检测到，它们甚至可能更多地提高宇宙的平均密度。例如，存在一种叫做中微子的基本粒子，它和物质非常微弱地相互作用，而且去检测它非常困难（最近的一个中微子实验使用一个充满 50 000 吨水的地下检测器）。过去以为中微子是无质量的，因此没有引力吸引，但是最近几年的实验表明中微子实际上具有非常微小的质量，该质量在早先没有被检测到。如果中微子具有质量，它们可以是暗物质的一种形式。即使允许中微子暗物质，宇宙中的物质仍然远比停止膨胀需要的少得多。于是，直到最近，大多数物理学家本来要达成共识：第二类弗里德曼模型是适用的。

后来又有了一些新的观测。最近几年，几个研究小组研究了彭齐亚斯和威尔逊发现的背景微波辐

射中的微小起伏。那些起伏的尺度可用来作为宇宙大尺度几何的指示物，它们指出宇宙根本是平坦的（正如在第三类弗里德曼模型中那样）！由于似乎没有足够的物质和暗物质对此做出解释，物理学家为了解释它，假定存在另一种还未被探测到的实体——暗能量。

使事情更进一步变复杂的是，最近的其他观测指出，宇宙的膨胀实际上不是减慢，而是加速。弗里德曼模型中没有一类做到这一点！这是非常奇怪的，因为空间中的物质效应，不管其密度高低，只能减缓膨胀，引力毕竟是吸引的。宇宙膨胀正在加速，这有点像一个炸弹的爆炸，这种炸弹在爆炸后它的威力不但没有耗散，反而得到加强。越来越快地把宇宙分离开的原因可能是什么力呢？没有人清楚，但是它也许证明，爱因斯坦引进宇宙常数（以及它的反引力效应）终归是正确的。

随着新技术和新的卫星携带的大型望远镜的快速发展，我们正快速地得到新的令人惊讶的宇宙知识。现在我们已对它的晚期行为甚为了解：宇宙



将继续以不断增加的速度膨胀。至少对于那些足够谨慎而不落进黑洞的人们，时间将永远流逝。但是非常早期的情形如何呢？宇宙是如何起始的，又是什么使它膨胀呢？

## 第 8 章

### 大爆炸、黑洞和宇宙的演化

在第一类弗里德曼宇宙模型中，第四维，时间——正如空间一样——在范围上是有限的。它正如一根具有两个端点或边界的线。因此时间具有终结，而且它也有一个开端。事实上，在宇宙具有我们观测到的物质总量的情形下，由爱因斯坦方程得出的所有解中，都有一个非常重要的特征：在过去的某一时刻(大约 137 亿年以前)相邻星系之间的距离必须为零。换言之，整个宇宙被挤压在零尺度的单独的一点，就像一个半径为零的球。那时，宇宙的密度和时空曲率都为无限大。它是我们称做大爆炸的时刻。

我们所有的宇宙学理论都是在时空是光滑和几乎平坦的假设这个基础上表述的。这就意味着，我们所有的理论都在大爆炸处崩溃了：把具有无限

曲率的时空叫做几乎平坦的,肯定是荒谬的!因为可预见性在大爆炸处失效了,因此即便在大爆炸之前存在事件,我们也不能用它们来确定以后会发生什么。

相应地,事实也正是如此,如果我们只知道大爆炸之后发生的事,我们就不能确定在它之前发生了什么。就我们而言,在大爆炸之前的事件没有后果,所以不应成为宇宙科学模型的一部分。因此,我们应该从模型中把它们割除,并且声称大爆炸是时间的起始。这意味着诸如谁为大爆炸设立条件的问题不是科学要过问的问题。

如果宇宙具有零尺度,还引起了另一种无限大,即温度的无限大。在大爆炸本身,宇宙被认为无限热。随着宇宙的膨胀,辐射的温度减小。由于温度就是粒子平均能量——或者速度的测度,宇宙的这个冷却对其中的物质就有重大的影响。在非常高的温度下,粒子会运动得快到使它们能够逃逸核力或电磁力所引起的任何相互吸引,但是随着它们的冷却,我们可以预料相互吸引的粒子开始聚集成堆。

甚至在宇宙中存在的粒子的种类也依赖宇宙的温度，并由此依赖宇宙的年龄。

亚里士多德相信物质不是由粒子构成的。他相信物质是连续的。也就是说，根据他的看法，一块物体可以被无限地分割成越来越小的小块：永远不存在不能被进一步分割的物质颗粒。然而，一些希腊人，比如德谟克里特认为物质本性上是颗粒性的，所有东西都是由大量的各种不同种类的原子组成的。（原子这个词在希腊文中意思是“不可分的”。）现在我们知道——至少在我们的环境中，以及在宇宙的现在状态中，这是对的。但是我们宇宙的原子并不是一直存在的，它们不是不可分的，而且它们只代表了宇宙中粒子种类的小部分。

原子由更小的粒子：电子、质子和中子组成。质子和中子本身又由更小的称为夸克的粒子组成。此外，对应于这些次原子粒子的每一种都有一种反粒子存在。反粒子具有和同胞粒子相同的质量，但是它们的电荷和其他属性均相反。例如，电子的反粒子称做正电子，它具有正电荷，也就是和电子电

荷相反。可能还有由反粒子构成的整个反世界和反人存在。然而，当反粒子和粒子相遇时，它们相互湮灭。这样，如果你遭遇上你的反自身，千万不要握手——你们俩会在一次巨大的闪光中消灭殆尽！

光能以另一类粒子，称做光子的无质量粒子的形式参与进来。邻近的太阳核反应炉对地球而言是最大的光子源。太阳还是另一种粒子，即前面提到的中微子(和反中微子)的巨大源泉。但是这些极轻的粒子几乎从来不和物质相互作用，因此它们穿透我们而毫无效应，其速率是每秒几十亿颗。物理学家总共已经发现了几十种这类基本粒子。在岁月的流逝中，随着宇宙经历的复杂演化，这个粒子家族的成分也在时间中演化。正是由于这种演化，类似地球的行星和诸如我们这样的生命才能够存在。

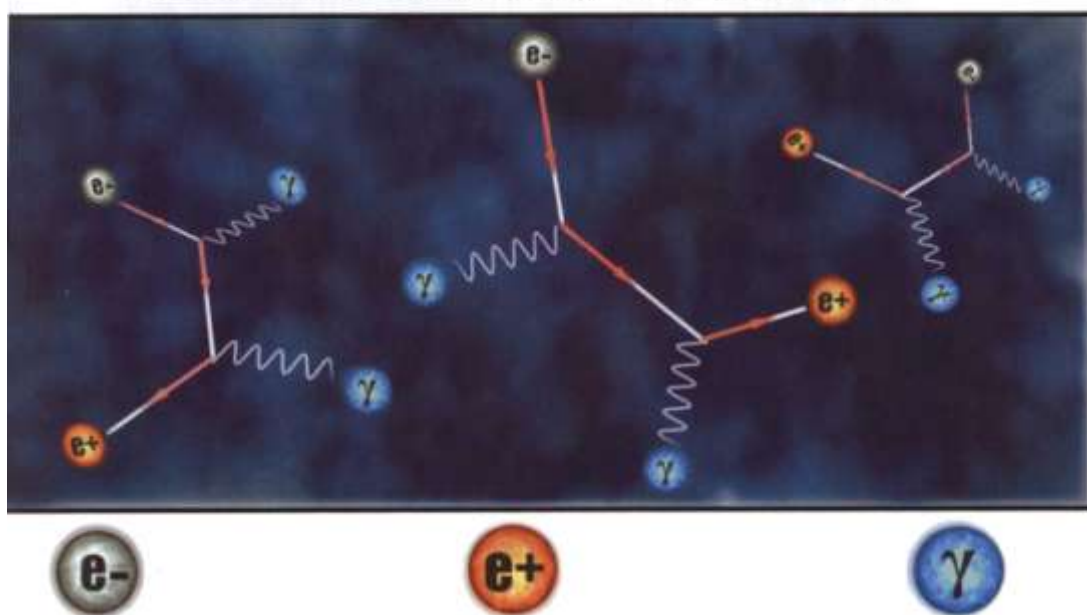
大爆炸后的 1 秒，宇宙已经膨胀到足以使温度降到大约 100 亿摄氏度。这大约是太阳中心温度的 1 000 倍，但是氢弹爆炸能达到这么高的温度。这时宇宙主要包含光子、电子和中微子以及它们的反粒子，还有一些质子和中子。这些粒子曾经有过这

么大的能量，当它们碰撞时，会产生许多不同的粒子 / 反粒子对。例如，碰撞的光子会产生一个电子和它的反粒子，即正电子。这些新产生的粒子中的一些会与反粒子同胞相碰撞并且湮灭。只要电子与正电子相遇，它们就要湮灭，但是相反过程却没有这么容易：为了让两个诸如光子的无质量粒子去创生诸如电子和正电子的一对粒子 / 反粒子，该碰撞的无质量粒子必须具有确定的最小能量。那是因为一个电子和正电子具有质量，而这新创生的质量必须来自碰撞粒子的能量。随着宇宙继续膨胀以及温度继续下降，发生能量大到足以创生电子 / 正电子对的碰撞不如电子 / 正电子对湮灭那么频繁。因此，大多数电子和正电子最终会相互湮灭，产生更多光子，只余下相对少的电子。另一方面，中微子和反中微子与自己以及与其他粒子之间只能非常微弱地相互作用，所以它们几乎不会这么快地相互湮灭，它们今天应当仍然留围。如果我们能够观测到它们，那将为这幅宇宙极热早期阶段的图象提供很好的检验。但是不幸的是，在 100 多亿年之后的现在，它

们的能量实在太低了,低到我们无法直接观察到(尽管我们也许能间接地检测到)。

光子/电子/正电子的平衡

在早期宇宙中,存在电子/正电子对碰撞创生光子和相反过程之间的平衡。随着宇宙温度下降,这种平衡变得对创生光子有利。宇宙中的大多数电子和正电子最终会相互湮灭,只余下相对少的电子存在至今。



大爆炸后大约 100 秒,宇宙的温度降到 10 亿摄氏度,也就是最热恒星的内部温度。在这个温度下,一个称为强力的力起了重要的作用。我们将要在第 11 章里更加仔细讨论这种强力,是一种短程的

吸引力，它把质子和中子捆绑在一起而形成核。在足够高的温度下，质子和中子具有有足够高的运动能量(见第 5 章)，使它们能从相互碰撞中自由独立地出现。但是在十几亿摄氏度下，它们不再有足以克服强力吸引的能量，而开始结合在一起，产生氘(重氢)原子核，氘核包含一个质子和一个中子。然后，氘核会再与更多的质子和中子结合形成氦核，氦核包含两个质子和两个中子，还有少量的一对更重的元素，锂和铍。人们可以计算出，在热大爆炸模型中大约  $1/4$  的质子和中子转变成氦核，还有少量的重氢和其他元素。而遗留下的中子会衰变成质子，这是通常氢原子的核。

1948 年，在一篇和他的学生拉夫·阿尔法合作的著名的论文中，科学家乔治·伽莫夫(见 53 页)提出了宇宙热的早期阶段的这个图象。伽莫夫颇为幽默——他说服核物理学家汉斯·贝特将他的名字加到这篇论文上面，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、伽马，这对于一篇有关宇宙开初的论文特别适合！



他们在这篇论文中做出了一个惊人的预言：来自宇宙非常热的早期阶段的(以光子形式的)辐射今天还应该在周围存在，但是它的温度已降低到只比绝对零度高几摄氏度。(当物质处于绝对零度即 $-273$  摄氏度时，不包含任何热能，因此它是可能的最低温度。)

这正是彭齐亚斯和威尔逊在 1965 年发现的微波辐射。在阿尔法、贝特和伽莫夫写他们的论文时，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做的预言相当不准确，但是按照更好的知识重新进行这些计算之后，现在和我们的观测非常符合。况且，去解释为何宇宙大约  $1/4$  质量处于氦的形式，用任何其他方法都是非常困难的。

但是这个图象存在问题。在热大爆炸模型中，热在极早的宇宙中来不及从一个区域流到另一个区域。这意味着要想解释微波背景在我们观测的任一方向上都具有相同温度的事实，宇宙的初始状态一定曾经是处处温度都完全相等。此外，其初始的膨

胀率也必须选取得这么精确，使得现在的膨胀率仍然这么接近于避免坍缩所需要的临界值。除了把它作为上帝想要创造像我们这样的生灵所采取的举动之外，解释宇宙为何恰好以这个方式起始是非常困难的。为了试图寻找一个能够从许多不同的初始结构演化成像现在宇宙这样的模型，麻省理工学院的科学家阿伦·固斯提出，早期宇宙可能经历过一个非常快速膨胀的时期。这个膨胀叫做暴胀，这意思是说，宇宙在一段时间里以增加的速率膨胀。按照固斯的说法，在远远小于 1 秒的时间里，宇宙的半径增大了 100 万亿亿亿 (1 后面跟 30 个零) 倍。宇宙中的任何不规则性都被这种膨胀抹平，正如当你吹胀气球时，它上面的皱纹就被抹平了。暴胀以这种方式解释了宇宙现在光滑均匀的状态是如何由许多不同的非均匀的初始状态演化而来的。因此，我们的图象至少在回到大爆炸后的十万亿亿亿亿分之一秒时仍然正确，对此我们有相当的把握。

在初始的一切混乱之后，只在大爆炸后的几个钟头内，氦以及其他某些诸如锂等元素的产生就

停止了。此后的 100 万年左右，宇宙仅仅继续膨胀，并没有发生太多的事。最终，一旦温度下降到几千摄氏度，电子和核将不再有足够的运动能量去克服它们之间的电磁吸引，它们就会开始结合形成原子。宇宙整体继续膨胀和冷却，但是在比平均密度稍微密集的区域，额外的引力吸引使膨胀缓慢下来。

这种吸引最终会使某些区域停止膨胀并开始坍缩。随着它们的坍缩，这些区域外的物质的引力拉力可能使它们开始稍微旋转。随着坍缩区域变得更小，它会自转得更快——正如在冰上旋转的滑冰者，当他们缩回手臂时会旋转得更快。最终，当这个区域变得足够小，它会旋转得快到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。其他碰巧没有得到旋转的一些区域，就会形成称为椭圆星系的椭球状物体。在这些星系中，因为星系的个别部分稳定地围绕着它的中心旋转，所以区域停止坍缩，但星系整体并不旋转。

随着时间的流逝，星系中的氢气和氦气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，它们中的原子相互碰撞，气体的温度升高，直到最后热得足以启动核聚变反应。这些反应将氢转变成更多的氦。正是这个类似于受控的氢弹爆炸的反应所释放的热使恒星发光。这一附加的热也增大了气体的压力，直至足以平衡引力的吸引，从而气体停止收缩。星云以这种方式合并成类似我们太阳的恒星，把氢燃烧成氦，并且将产生的能量作为热和光辐射出来。这有点像气球——在试图使气球膨胀的内部空气压力和试图使气球缩小的橡皮张力之间有一个平衡。

热气体云一旦合并成恒星，核反应产生的热和引力吸引相平衡，恒星会稳定地维持很长的时间。然而，恒星最终会耗尽它的氢和其他核燃料。恒星初始的燃料越多，它则会越快燃尽。这的确似非而是，因为恒星的质量越大，为了平衡引力它就必须越热；而恒星越热，核聚变反应就越快，也就越快耗尽它的燃料。我们的太阳很可能有足够再维持 50 亿年左右的燃料，但是质量更大的恒星却可在 1 亿

年这么短的时间内耗尽燃料，这可比宇宙的年龄短多了。

当恒星耗尽了燃料，它开始变冷，而引力占优势使它收缩。这一收缩把原子挤到一起，并使恒星再次变得更热。随着恒星进一步变热，它开始把氢转变成像碳和氧那样更重的元素。然而，这并没有释放出更多得多的能量，于是，危机就要发生了。我们不完全清楚下一步会发生什么，但是看来很可能恒星的中心区域会坍缩成一个非常紧密的状态，诸如黑洞。“黑洞”这个术语是非常近期才出现的，它是 1969 年美国科学家约翰·惠勒为了形象地描述一个观念时杜撰的名字。这个观念至少可回溯到 200 年前，那个时候共有两种光的理论：牛顿赞成其中一种，光由粒子组成，另一种是光由波构成。现在我们知道，实际上这两者都是正确的。正如我们将在第 9 章中看到的，由于量子力学的波粒二象性，光既可被认做波，也可被认做粒子。描述词波动和粒子是人类创造的概念，自然没有必要遵照这

些概念，把所有现象都非此即彼地归入其中的一个种类！

在光由波构成的理论中，我们不清楚光对引力的反应如何。但是如果认为光是由粒子组成的，我们可以预料，那些粒子正如炮弹、火箭和行星一样，以相同的方式受引力影响。特别是，如果你从地球——或者恒星——的表面向上发射出一个炮弹（正如 50 页的火箭），除非其向上起始的速度超过某个值，否则它最终将会停止，然后返回。这个最小的速度称为逃逸速度。一个恒星的逃逸速度依赖于它的引力拉力的强度，恒星的质量越大，其逃逸速度就越大。起先人们认为，光粒子无限快地运动，这样引力不能够使它们缓慢下来，但是罗默对光以有限速度行进的发现意味着，引力可能具有重要的效应：如果恒星质量足够大，光的速度将小于恒星的逃逸速度，那么所有从恒星发射出来的光都将返落回去。1783 年，在这个假定的基础上，剑桥的学监约翰·米歇尔在《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，并且足够紧

致的恒星可能具有如此强大的引力场，以至于连光线都不能逃逸。任何从恒星表面发出的光，还没到达非常远的距离即被恒星的引力吸引拉曳回来。这样的物体就是我们现在称做黑洞的东西，因为那是名副其实的：空间中的黑的空洞。

几年后，法国科学家拉普拉斯侯爵提出了一个类似的观念，他的论断显然独立于米歇尔。有趣的是，拉普拉斯只将此观念纳入他的《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除。也许他认定这是一个愚蠢的观念——因为在 19 世纪利用波理论似乎就能解释一切，光的微粒说变得不时兴了。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并不真正协调。从地面发射上天的炮弹由于引力而减速，最后停止并折回；然而，一个光子必须以不变的速度向上继续运动。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理论，而且直到 1939 年，一位年轻的美国人罗伯特·奥本

海默，根据广义相对论，才首先解决了理解大质量恒星会发生什么问题。

现在，从奥本海默的工作中，我们得到如下的图象。恒星的引力场改变了光线通过时空的路径，使之和原先没有恒星情况下的路径不一样。这正是当日食发生时，从远处恒星来的光线的弯曲中观测到的效应。在恒星表面附近，光线在空间和时间中的轨道稍微向内弯曲。随着恒星收缩，它变得更密集，这样在它的表面上引力场变得更强大。（你可以认为引力场是从恒星的中心点出来的；随着恒星收缩，它表面上的点越来越靠近中心，这样它们感受到更强大的场。）更强大的场使在表面附近的光线路径向内弯曲更甚。最终，当恒星收缩到某一临界半径时，表面上的引力场变得这么强大，将光线路径向内弯曲得这么厉害，以至于光不再能够逃逸。

根据相对性理论，没有东西运动得比光还快。这样，如果光都逃逸不出去，其他东西也不可能逃逸；任何东西都被引力场拉回去。坍缩的恒星形成一个围绕它的时空区域，不可能从那里逃逸而到达





高于或低于逃逸速度的炮弹

如果向上发射的物体比逃逸速度还快，它就未必落回。

远处的观察者。这个区域就是黑洞。黑洞的外边界称做事件视界。今天，多谢哈勃空间望远镜和其他专注于 X 射线和伽马射线而非可见光的其他望远镜，我们知道黑洞乃是普通现象——比人们原先以为的要普通得多。一颗卫星只在一个小天区里就发现了 1 500 个黑洞。我们还在我们星系的中心发现了一个黑洞，其质量比 100 万个太阳的质量还要大。那个超重的黑洞有一个围绕着它以大约 2% 光速公转

的恒星，其速度比一颗围绕着原子核公转的电子的平均速度还快！

为了理解你凝视一个大质量恒星坍缩形成黑洞时出现的景象，必须记住在广义相对论中不存在绝对时间。换言之，每位观察者都有他自己的时间测度。因为在恒星表面上的引力场更强，所以在恒星表面上的某人和在远处的某人的时间流逝是不同的。

设想在正在坍缩的恒星表面上有一位无畏的航天员，当恒星向内坍缩时他留在星球表面上。在他的手表的某一时刻——比如讲 11:00——恒星收缩到临界半径以下，此时引力场变得这么强，以至于没有任何东西可以逃逸出去。现在假定他的指令是按照他的手表每一秒发送一个信号到上方的一个宇宙飞船上，后者在离开恒星中心的某一固定距离上公转。他开始在 10:59:58，也就是比 11:00 早 2 秒开始传送，他在宇宙飞船上的同伴会记录到什么呢？

我们从早先的搭乘火箭飞船理想实验中得知，引力使时间变得缓慢，而且引力越强，则效应越大。在恒星上的航天员比他在轨道上的同伴们处于更强的引力场中，这样对他而言的 1 秒按照他同伴们的手表要比 1 秒长久。而且随着他乘坐的恒星向内坍缩，他感受的场会变得越来越强，这样宇宙飞船上的那些人觉得，从他来的信号间隔显得越来越长。这种时间的拉长在 10: 59: 59 之前是非常微小的，于是，在轨道上公转的航天员们，为了接收航天员，按照他的表，分别在 10: 59: 58 和 10: 59: 59 发出的信号，只需等待比 1 秒稍长的时间。但是，轨道上的航天员们必须无限久地等待 11: 00 的信号。

所有发生于恒星表面上在 10: 59: 59 和 11: 00 (按照航天员的手表) 之间的每件事情，在宇宙飞船看来，都被散开到一个无限的时期。当接近 11: 00 时，从恒星出发的任何光的接续的波峰和波谷之间的到达时间间隔会变得越来越长，正如同从航天员来的信号之间的间隔一样。由于光的频率是以每秒波峰和波谷的数目来测度的，对于在宇宙飞船上

的那些人，恒星来的光频率显得越来越低。这样，它的光会显得越来越红（也越来越暗）。最终，该恒星变得这么暗淡，以至于在宇宙飞船上再也看不见它了：所余下的一切便是空间中的一个黑洞。可是，该恒星仍然将同样的引力继续作用到宇宙飞船上，使飞船继续公转。

然而，由于以下的问题，这个场景不是完全现实的。你离开恒星越远则引力越弱，这样在我们无畏的航天员脚上的引力总是比在他头上的力更大。在恒星收缩到临界半径并在那里形成事件视界之前，这种力的差异就足以把他拉伸得像意大利面条一样或者撕裂。然而，我们相信在宇宙中存在大得多的物体，例如在一些星系的中心区域，它们也能遭受引力坍缩而产生黑洞，正如在我们星系中心的超大质量黑洞。在这样的一个物体上，在形成黑洞之前，航天员不会被撕开。事实上，当他到达临界半径时没有觉察到任何特殊之处，甚至他能够不知不觉地通过这一永不回返之点——尽管对于在外面的那些人，他的信号变得越来越稀疏，直至最终停止。而

随着区域继续坍缩，仅仅在（由航天员测量的）几个小时之内，他头上和脚上的引力的差别就会变得这么强大，又会将他撕裂。



**潮汐力**

因为引力随距离减弱，由于你脚部比头部离地球中心近1~2米，地球对你的头部的拉力小于脚部受到的拉力。我们觉察不到这么小的差别。但是在黑洞表面附近的航天员肯定会被撕裂。

当一个质量非常大的恒星坍缩时，恒星的外部区域有时会在一次称做超新星的极大的爆发中被刮跑。超新星爆发是如此之巨大，它发出的光可以比它所在的星系中所有其他恒星合并在一起发出的光还要多。我们看到的蟹状星云便是超新星爆发一例的残余。1054 年中同人对此做了记载。虽然爆发的恒星在 5 000 光年之遥，但在数月的时间里仍可被肉眼看到，它是这么耀眼，甚至白天都能看到，夜里可以借它看书。500 光年之遥的超新星—— $1 / 10$  那么远——将会亮 100 倍，并且真的可将黑夜变成白昼。为了理解这种爆发的猛烈，只要考虑到，尽管它比太阳 ( 回忆一下，我们的太阳位于 8 光分的邻近距离上 ) 远几千万倍，它的光仍然可以和太阳相匹敌。如果超新星发生得足够近，虽然地球可以安然无恙，但它仍然发射出足以使所有生物致命的辐射。事实上，最近有人还提出，发生在上新世和更新世过渡期的大约 200 万年前的海洋生物的灭绝，是由邻近的称做天蝎一半人马星协的星团中超新星宇宙线辐射导致的。一些科学家相信，因为在星系中恒

星密集的区域，诸如超新星之类的现象甚为普遍，足以在所有生命演化的起始就将它们定期扑灭。所以，高级生命只可能在没有太多恒星的区域——“生命带”——中演化。在宇宙中每天平均有成千上万次超新星在某处爆发。在任何特定的星系中超新星大约每一世纪发生一次，但这仅仅是平均。可惜的是——至少对于天文学家而言——在银河系中上一回有记录的超新星发生于 1604 年，是在望远镜发明之前。

一颗被称为仙后座  $\rho$  星的是我们星系中下一次超新星爆发的最重要候选者。幸运的是，它是安全无忧的，距我们有 10 000 光年的距离。它属于称为黄特超巨星类型的恒星，只是在银河系中已知的 7 个黄特超巨星中的一个。1993 年一支国际天文学家队伍开始研究这个恒星。在他们后来观测的几年间，这个恒星经历了几百摄氏度的周期性温度起伏。在 2000 年夏天，它的温度忽然从 7 000 摄氏度左右快速降至 4 000 摄氏度。在这一期间，天文学家们

还在恒星大气层测到氧化钛，他们相信这是被巨大的冲击波从恒星抛出的外层的一部分。

在超新星中，在接近恒星生命终点时产生的某些重元素被摔回到星系中，并为下一代恒星提供一些原料。我们的太阳就包含大约 2% 的这些重元素。它是第二或第三代恒星，在大约 50 亿年前由包含更早的超新星残骸的旋转气体云形成的。云中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，形成了现在像地球的，作为行星围绕太阳公转的物体。我们首饰上的金以及我们核反应堆中的铀，都是在我们太阳系诞生之前发生的超新星的残余！

当地球刚刚凝聚时，它非常热并且没有大气。它在时间的长河中冷却下来，并从岩石中逸出的气体里获得大气。我们不能够在这个初始的大气中存活。它不包含氧气，但它肯定包含大量对我们有毒的其他气体，例如硫化氢（也就是臭鸡蛋发出的难闻的气体）。然而，那时就存在着能在这种条件下繁衍的其他原始生命的形式。人们认为，它们可能是原



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，这种结构能将海洋中的其他原子聚集成类似的结构。它们就这样自我复制而繁殖。在有些情况下复制中有误差，这些误差大多数使得新的宏观分子不能自我复制并最终被消灭。然而，有一些误差会产生出新的宏观分子，这些宏观分子在复制它们自己时甚至会变得更好。所以它们有优势，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，进化导致越来越复杂的自我复制有机体的发展。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释放氧气，这就逐渐地将大气改变到今天这样的成分，并允许诸如鱼、爬行动物、哺乳动物以及最终是人类的高级生命形式的发展。

20 世纪见证了人类宇宙观的转变：我们意识到，我们自己的行星在广袤的宇宙中是微不足道的，而且我们发现时间和空间是弯曲的，是不可分离的，宇宙正在膨胀，而且它在时间中有一开端。

宇宙从非常热的状态起始，并随着膨胀而冷却的这一图景是基于爱因斯坦的引力论，即广义相对论，它和我们今天得到的所有观测证据都相符合，这是该理论的伟大胜利。然而这理论预言了宇宙从大爆炸，也就是当它的密度和时空的曲率都为无限大的时刻。因为数学不能真正地应付无穷大的数，广义相对论预言了在宇宙中存在一点，在那里，理论本身崩溃或者失败了。这样的点正是数学家称之为奇点的一个例子。当一个理论预言诸如无限密度和曲率的奇点时，这是一个征兆，说明该理论必须做某种修正。因为广义相对论不能告诉我们宇宙是如何起始的，所以它是一个不完备的理论。

除了广义相对论，20 世纪还孕育了自然的另一个伟大的部分理论，量子力学。那个理论处理发生在非常小尺度下的现象。我们的大爆炸图景告诉我们，在极早期宇宙有过一个时刻，那时宇宙如此之小，甚至在研究它的大尺度结构时，人们不能够再无视量子力学的小尺度效应。我们在下一章将会看到，把这两个部分理论结合成一个单独的量子引力

论，激起我们一个伟大的抱负，去完全理解宇宙自始至终的全过程。在量子引力论中，通常的科学定律在所有地方，也包括在时间的开端处都成立，没有必要存在任何奇点。

## 第 9 章

### 量子引力

科学理论，尤其是牛顿引力论的成功，使拉普拉斯侯爵在 19 世纪初就论证道，宇宙完全是决定论的。拉普拉斯相信应该存在一族科学定律，它们——至少在原则上——允许我们预言会在宇宙中发生的每一件事物。这些定律需要的输入仅仅是宇宙在任意一个时刻的完整状态。这被称为初始条件或者边界条件(边界可指空间或时间中的边界；空间中的边界条件是宇宙在它的外边界——如果它有一个的话——的状态)。拉普拉斯相信，基于完整的一族定律，以及适当的初始或边界条件，我们应能计算出宇宙在任意时刻的完整的状态。

需要初始条件凭直觉也许是显而易见的：现在的不同状态将明显地导致将来的不同状态。在空间中对边界条件的需求略微微妙些，但原则上是一样

的。一般而言，作为物理理论基础的方程具有很不相同的解，而你必须依赖初始或者边界条件去决定哪些解适用。它就有点像你的银行账户有大数额的进账和出账，你最后以破产还是富有告终，不仅由你进账和出账的总额，还由一开始在账户中有多少钱的边界或者初始条件决定。

如果拉普拉斯是正确的，那么依照宇宙现在的状态，这些定律就会告诉我们宇宙无论在将来还是在过去所处的状态。例如，给定太阳和行星的位置和速度，我们就能用牛顿定律计算出太阳系在任何更晚或更早时刻的状态。对行星来说，决定论似乎是相当明显的——毕竟天文学家能非常精确地预言诸如日食月食等事件。但是拉普拉斯走得更远，他假定存在类似的定律，这些定律制约其他任何事物，也包括人类行为。

科学家在未来真的可能计算出我们所有的行动吗？1杯水包含比10的24次方（1后面跟24个零）个更多的分子。实际上，我们永远别想知道其中的每个分子的状态，这比宇宙的甚至比我们身体的完

整的状态要简单得多。然而说宇宙是决定论的，这指的是，纵然我们没有智能去进行计算，我们的未来仍然是被预先决定的。

许多人强烈抵制科学决定论的这条教义，他们觉得它触犯了上帝随心所欲驾驭世界的自由。但是直到 20 世纪的早期，这一直是科学的标准假定。当英国科学家瑞利勋爵和詹姆斯·金斯爵士计算了诸如恒星的热物体应该发射的黑体辐射的总量时（正如在第 7 章中提到的，任何物体被加热时都会发出黑体辐射），出现了必须抛弃上述信条的最初征兆之一。

根据那时我们相信的定律，一个热体必须在所有频率上同等地发出电磁波。倘若果真如此，那么它会在可见光谱的每种颜色，以及微波、射电波、x 射线等所有频率发射出相等的能量。回忆一下，波的频率是每秒上下振荡的次数，也就是每秒波动的数目。一个热体在所有频率上同等地发射波，在数学上意味着，它在每秒 0 次波动与每秒 1 000 000 次波动之间，和在每秒 1 000 000 次波动与每秒 2

000 000 次波动之间,和在每秒 2 000 000 次至 3 000 000 次波动之间,等等,直至无穷,都发出相同的能量。让我们把频率在每秒 0 次至 1 000 000 次波动之间,以及在每秒 1 000 000 次至 2 000 000 次波动之间等的波发射出的能量作为一个单位。那么在所有频率上发射出的总能量就是 1 加 1 加 1,一直继续下去的总和。由于在一个波中每秒波动的数目是有限度的,所以能量的和是一个没有终结的和。根据这个推理,发射的总能量应是无限大。

为了避免这个显然荒谬的结果,德国科学家马克斯·普朗克在 1900 年提出,光、x 射线以及其他电磁波只能发出一定的分立的波包,他把这种波包称做量子。正如在第 8 章中提到过的,我们今天把光的一个量子叫做光子。光频率越高,它所含能量越大。因此,尽管任意给定颜色或频率的光子都是等同的,但根据普朗克理论,不同频率的光子携带不同能量。这意味着在量子论中,任何给定颜色的最黯淡的光——一个单独光子携带的光——具有依赖其颜色的能量含量。例如,由于紫光频率是红光

频率的 2 倍，一个紫光量子的能量含量为红光量子的 2 倍。这样，紫光能量最小量是红光能量最小量的 2 倍。

这个理论如何解决黑体问题呢？一个黑体在任何给定频率上发射电磁能的最小量是那个频率的一个光子所携带的，在较高的频率上光子的能量较大。于是，黑体在较高频率上能发射的最小能量较高。在足够高的频率上，甚至一个单个量子的能量都比



可能的最微弱的光  
微弱的光意味着较少的光子。任何颜色的最微弱的光是由单个光子携带的光。



一个物体所拥有的能量还要多，在这种情形下没有光可供发射，这就终结了原先不可终结的总和。这样，在普朗克理论中，高频的辐射被减小，物体损失能量的速率就变成有限的，从而解决了黑体问题。

量子假设非常成功地解释了观察到的热体辐射的发射率。但是直到 1926 年另一位德国科学家威纳·海森伯表述了他的著名的不确定性原理之后，它对决定论的含义才被意识到。

不确定性原理告诉我们，和拉普拉斯信条相反，自然制我们利用科学定律预言将来的能力。这是因为，为了预言一个粒子未来的位置和速度，人们必须能够精确地测其初始状态——也就是它现在的位置和速度。显然，做此事的方法是把光照射到该粒子上。粒子把一些光波散，观察者能够检测到这些波并用来指示粒子的位置。然，给定波长的光只有有限的灵敏度，你测定粒子的位置可能比测定光的两波峰间的距离更精确。于是，为了精密地测量粒子的位置，就必须利用短波长也就是高频率的光。但是按照普朗克量子假设，你不能使用任意小量的

光：你至少要使用一个量子，在更高频率下其能量更高。这样，你希望越精确地测量粒子位置，你射到它上面的光量子的能量就必须越大。

根据量子理论，甚至一个光量子都会扰动粒子：它将以一种不能预言的方式改变其速度。而你使用的光量子的能量越大，扰动很可能就越大。这意味着，为了更精密地测量位置，当你必须使用能量更大的量子时，粒子的速度将被扰动一个更大的量。这样，你想把粒子的位置测量得越准确，你就只能越不准确地测量它的速度，反之亦然。海森伯指出，粒子位置的不确定性乘以它的速度的不确定性再乘以粒子质量绝不能小于某个固定的量。这意味着，如果你将位置的不确定性减半，你就必须将速度的不确定性加倍，反之亦然。自然永远强迫我们做这个折中。

这个折中有多么糟糕呢？这依赖我们在上面提及的“某个固定的量”的数值。那个量称做普朗克常数，它是一个非常微小的数。因为普朗克常数如此之微小，折中的效应，或者一般而言量子论的效

应，正如相对论效应一样，在我们日常生活中是不能直接觉察到的(尽管量子论——作为诸如现代电子学这类领域的基础——的确影响我们的生活)。例如，如果我们把质量为 1 克的乒乓球的位置精确地确定在任何方向上 1 厘米之内，那么我们可以把它的速度确定到的精度，远远超过我们需要知道的程度。但是，如果我们测量一个电子的位置，精确至大约一个原子的范围，那我们对它速度的了解就一点也不精确，误差比大约正负每秒 1 000 千米还要大。

不确定性原理指定的限制，与人们想测量粒子的位置或速度的方式，以及粒子的种类无关。海森伯的不确定性原理是世界一个基本的不可避免的性质，它对我们观察世界的方式有深远的意义。甚至在 70 多年之后，许多哲学家还没有充分了解这些，它们仍然是许多论战的主题。不确定性原理标志着拉普拉斯科学理论之梦的终结，这个理论是一个完全决定论的宇宙模型。如果我们

甚至不能精密地测量宇宙现在的状态，肯定不能准确地预言未来的事件！

我们仍然可以想象，对于某个超自然体存在一族完全确定事件的定律，这个超自然体不像我们那样，能够在不干扰宇宙的情形下观测它现在的状态。然而，我们这些必朽的芸芸众生对这样的宇宙模型没有太大兴趣。看来最好使用称做奥铿剃刀的经济原理，将理论中不能被观测到的所有特征都割掉。这种方法导致海森伯、厄文·薛定谔以及保罗·狄拉克在 20 世纪 20 年代，基于不确定性原理，将牛顿力学重新表达为称做量子力学的新理论。粒子在该理论中不再具有各自很好定义的位置和速度。相反，它们具有一个量子态，那是位置和速度的一个结合，只有在不确定性原理的限制下才能定义位置和速度。

量子力学的一个变革性质是，它不对一次观测做出单独确定结果的预言。相反，它预言了一些不同可能的结果，并且告诉我们其中每种结果多么可能发生。那也就是说，如果你对大量相似系统做相同测量，其中每个系统都以相同方式起始，你会发

现，在一定数目的情形测量结果为 A，另一不同数目为 8，等等。你可以预言结果为 A 或者 B 的近似的次数，但是你不能预言任何单独测量的特定结果。

例如，想象你往镖板上掷镖。根据经典理论——也就是旧的非量子理论——镖要么击中靶心，要么没有击中。而如果你知道掷镖时它的速度、引力拉力和其他这类因素，你就能算出它会不会击中。但是量子理论告诉我们这是错误的，你说不准。相反，根据量子理论，存在镖击中靶心的某种概率，还有镖落到板上任何其他给定面积的非零概率。对于像镖这么大的一个物体，如果经典理论——在这个情形下即牛顿定律——断言镖将击中靶——IL，，那么你假定它将击中是保险的。至少，它未击中（根据量子理论）的概率是如此之小，以至于你继续以完全相同的方式掷镖，直至宇宙的终结，你也许仍然观察不到镖没有击中目标的情形。但是在原子尺度下情形就不同了。由单一原子构成的镖会有 90% 的击中靶心的概率，5% 的机会击中板上的其他地方，还有 5% 的可能什么也没击中。你不能预先说可能

发生哪种情形，你能说的只不过是，如果你多次重复此实验，可以预料，每重复实验 100 次，平均有 90 次镖将击中靶心。

因此，量子力学将一种不可预见性或者随机性的不可回避因素引入科学。尽管爱因斯坦在发展这观念时起过重要作用，但他却非常强烈地反对它。事实上，爱因斯坦正是由于对量子理论的贡献而获得诺贝尔奖。尽管如此，他从未接受宇宙是由机缘制约的观念；他的感情可以用他的名言来表达：“上帝不掷骰子。”

正如我们说过的，科学理论的检验是它预言实验结果的能力。量子理论限制了我们的能力，这意味着量子理论限制科学吗？如果科学要进展，我们从事科学的方法就得由自然规定。在这个情形下，自然需要我们重新界定我们预言的含义：我们也许不能准确预言每次实验的结果，但是我们能够多次重复该实验，并且确认不同结果可能出现的概率，正是量子理论所预言的。因此，尽管存在不确定性原理，但仍然没必要放弃物理定律制约世界的信念。



抹平的量子位置

根据量子理论，人们不能无限精确地测定一个物体的位置和速度，也不能准确地预言未来事件的过程。

而事实上，正是因为量子力学和实验符合得很完美，大多数科学家最终心悦诚服地接受了它。

海森伯不确定性原理的一个最重要的含义是，粒子在某些方面像波一样行为。正如我们已经看到的，它们没有确定的位置，而是被一定的概率分布“抹平”。同样，虽然光是由波构成的，普朗克量子假设却又告诉我们，光在某些方面的行为仿佛是由

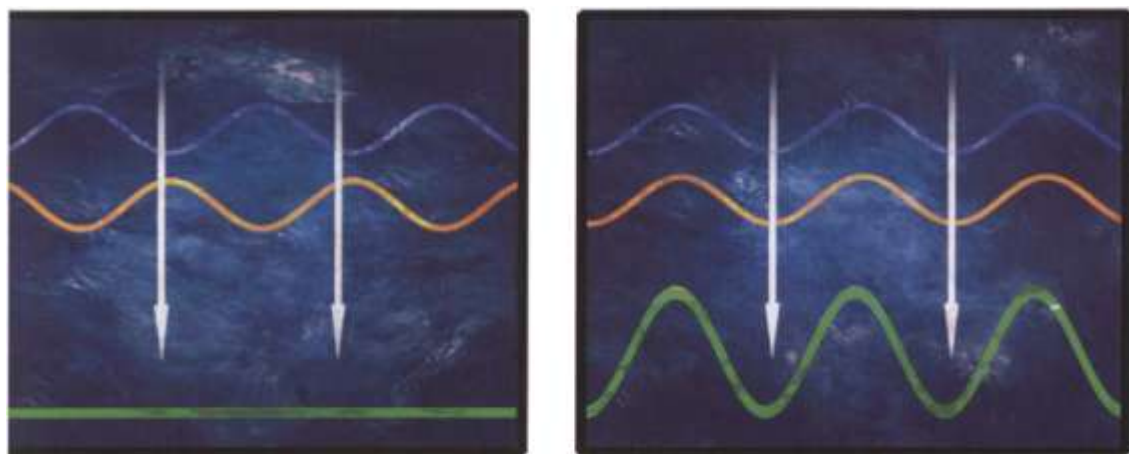
粒子构成的：它只能以波包或者量子的形式发射或者吸收。事实上，量子力学的理论基于崭新类型的数学之上，它不再按照要么粒子要么波来描述实在的世界。为了某些目的，把粒子当成波是有用的，而为了其他目的，最好把波当成粒子，但是这些思维方式仅仅是方便而已。当物理学家们说在量子力学中存在波和粒子的对偶性时，他们指的就是这个意思。

在量子力学中类波行为的一个重要推论是，可以观察到两束粒子之间所谓的干涉。在正常情形下，干涉被认为是波的一个现象；也就是说，当波碰撞时，一束波的波峰可与另一束波的波谷重合，在这种情形下，就说两束波处于反相。如果发生碰撞的话，这两束波就相互对消，而不像人们可能预料到的，叠加成一个更强的波。对于光的情形，在肥皂泡上经常呈现彩色便是熟知的干涉例子。这是由形成泡泡的水的薄膜两边来的光的反射引起的。白光由所有不同波长或者不同颜色的光波组成。对于一定的波长，从肥皂膜一边反射来的波峰和从另一边



反射来的波谷重合，对应于这些波长的颜色就在反射光中缺失，因此反射光呈现彩色。

但是量子理论告诉我们，因为量子力学引入的对偶性，粒子也会发生干涉。所谓的双缝实验便是一个著名的例子。想象一个隔板——一堵薄墙——上面有两道平行的狭缝。在我们考虑粒子通过这些缝隙发送时会发生什么之前，让我们先考察当光照在上面会发生什么。你把特殊颜色（也就是特殊波长）的光源放在隔板的一边，大部分光会射到隔板上，但有少量光会穿过缝隙。现在假定你在隔板与光源相反的一边安放一个屏幕，屏幕上的任何一点将从两个缝隙接受波。但是，一般而言，光从光源通过一道缝隙到达该点和通过另一道缝隙到达该点必须行进的距离不同。由于行进的距离不同，从两个缝隙来的波在到达该点时将不会同相。在某些地方一个波的波谷会和另一个波的波峰重合，波会相互抵消；在其他地方波峰和波谷会重合，波会相互加强；而在大多数地方，情形处于这两者之间。其结果是一个明暗相间的特征条纹。



同相和反相

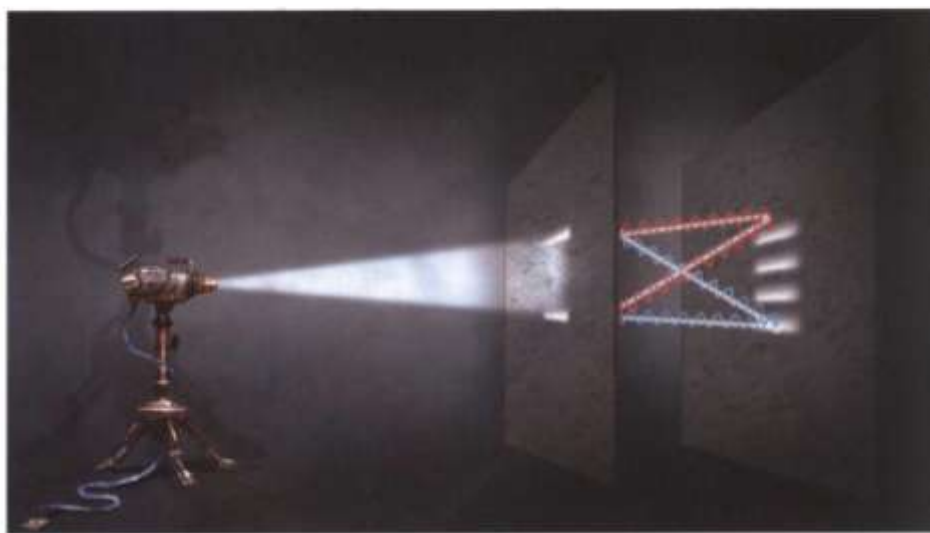
如果两个波的波峰和波谷相重合，它们就形成一个更强的波，但是如果一个波的波峰和另一个波的波谷相重合，这两个波就相互抵消。

如果你用诸如电子的具有确定速度的粒子源来取代光，你会得到刚好同一类型的条纹，这真是令人吃惊。曼据量子理论，如果电子具有确定速度，则相应的物质具有确定的波长。）假如你打开一道缝隙，并开始对着板发射电子，大多数电子都会被隔板阻止，但是有一些子会通过缝隙，并到达另一边的屏幕。因此设想将隔板的第二道缝隙打开，只不过增加打到屏幕的每一点上的子数目而已，也许看起来是符合逻辑的。但是，如果你开第二道缝隙时，打到屏幕上的电子数目在某些点增，而在其他点减少，电子似乎像波一样在干涉，而不像粒子那

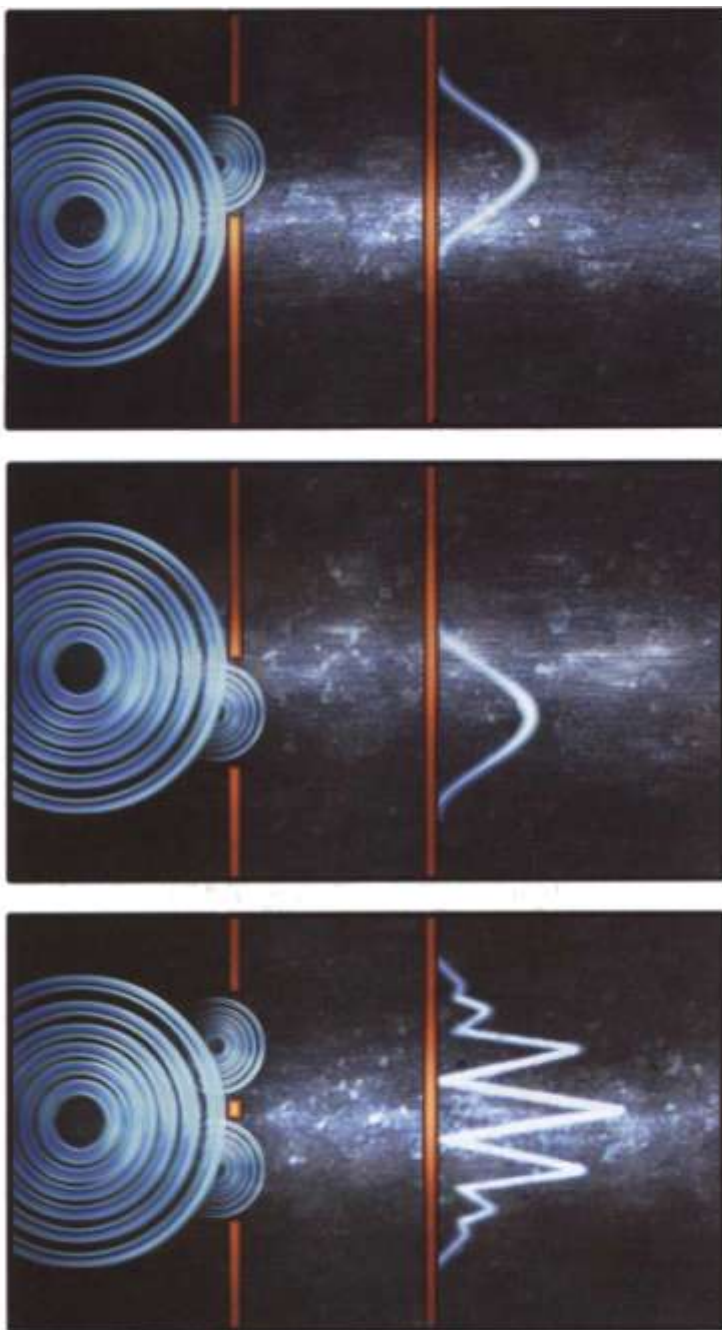
样行为(见下页插图)。现在想象通过两个缝隙每次发射一个电子，仍然会存干涉吗?人们也许会认为，每个电子通过这个或那个缝，摆脱了干涉条纹。然而在实际上，甚至当每次只发射个电子时，仍然出现干涉条纹。因此，每个电子一定是在相同的时刻通过双缝，并且与自己干涉！

路程距离和干涉

在双缝实验中，波从顶缝和底缝到达屏幕。它们必须行进的距离随着屏幕的高度而变化。这导致波在一定高度上相互加强，在其他高度上相互抵消，形成了干涉条纹。



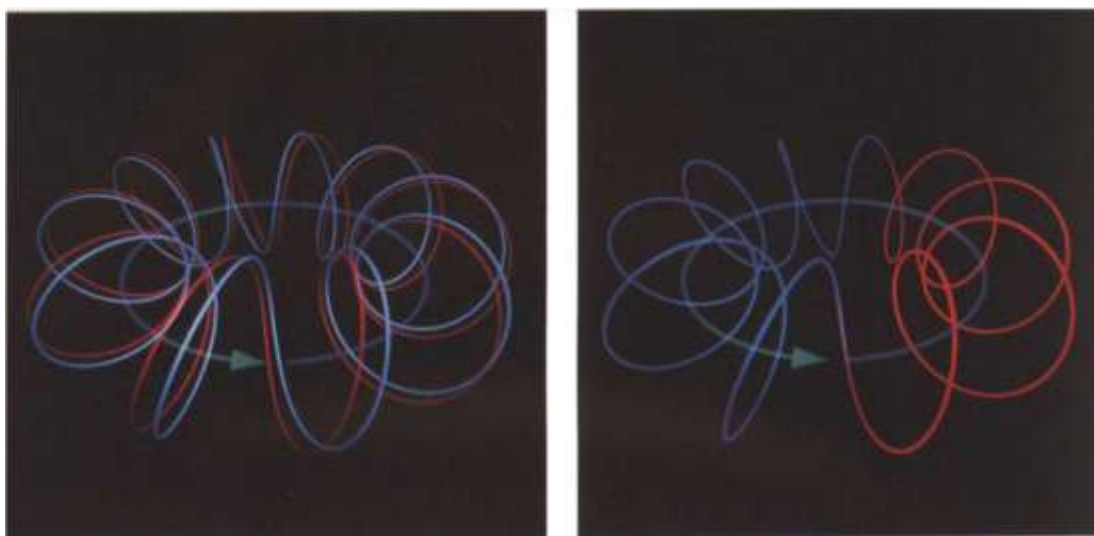
粒子间的干涉现象是我们理解原子结构的关键是一个基本单位，我们以及我们周围的一切都是由成的。20 世纪初，人们认为原子和行星围绕太阳



电子干涉

因为干涉，把一束电子通过双缝发射的结果并不相当于把电子通过每一单缝发射的结果。

公转很像，电子(具有负电荷的粒子)围绕着携带正电荷核公转。人们认为正负电荷之间的吸引将电子维持的轨道上，这与太阳和行星之间的引力的吸引把行在轨道上的方式是一样的。这种观点的麻烦在于，力学之前，力学和电学的经典定律预言以这种方式电子会发出辐射。辐射会使它们损失能量，并且因旋进，直至和核相撞。这意味着原子，其实也就是体，都应该非常快地坍缩到一种非常紧密的状态，显然这并没有发生！

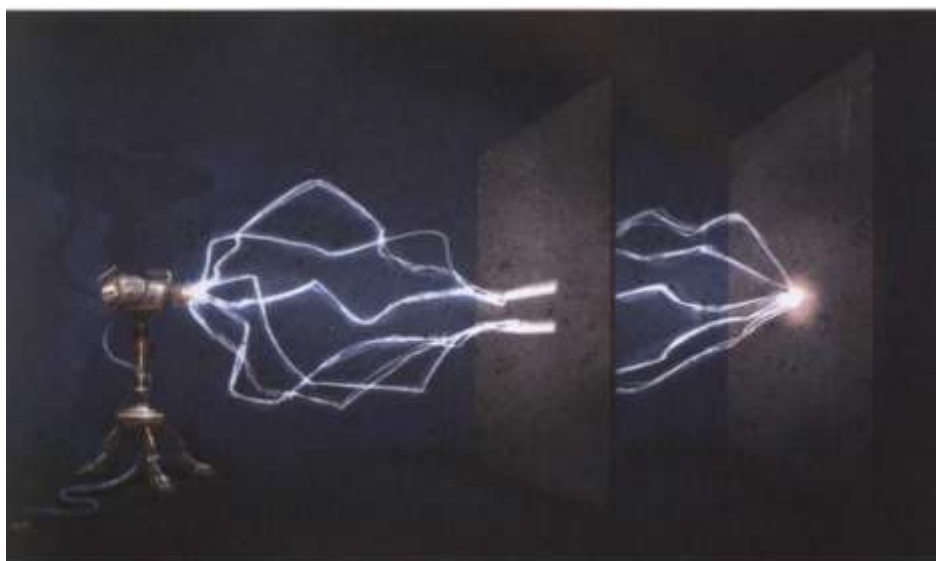


原子轨道中的波

尼尔斯·玻尔把原子想象成由不断地环绕原子核的电子波组成。在他的图象中，只有周长对应于电子波长整数倍的轨道才能幸存，而不受到毁灭性的干涉。

1913 年，丹麦科学家尼尔斯·玻尔为这个问题找到了部分的解。他提出，也许电子不能在离中心核任意距离上，而只能在某些特定的距离上公转。假定在这些特定的一个距离上只有一个或两个电子可以公转，就解决了坍缩的问题。这是因为一旦有限数目的内部轨道被充满了，电子就不能再进一步向里旋进。这个模型相当好地解释了最简单的氢原子的结构。氢原子只有一个电子围绕着核公转。但是，如何将其推广到更复杂的原子人们并不清楚。此外，允许轨道的有限集合的观念似乎仅仅是贴橡皮膏。它是数学上可行的技巧，但是无人知道自然必须这么行为的原因，或者它代表了什么更深的定律——如果存在的话。量子力学的新理论解决了这个困难。它揭示了一个围绕着核公转的电子可被认为是一个波，其波长依赖于它的速度。正如玻尔假设的，想象波在特定的距离上同绕着核循环。对某些轨道，轨道周长相当于电子波长的整数倍（和分数倍相反）。对于这些轨道，每循环一次其波峰还在同一位置，这样波就相互加强。这些轨道对应于玻尔

允许的轨道。然而，对于长度不是波长整数倍的轨道，在电子循环时每一波峰都最终被波谷对消，这些轨道是不允许的。这样就解释了玻尔的允许和禁止轨道定律。



电子的许多路径

在量子理论的理查德·费恩曼表述中，一个粒子，比如这个从源到屏幕的电子，可以采取每一种可能的路径。

美国科学家理查德·费恩曼引入了所谓的对历史求和，这是一个摹想波粒对偶性的好方法。在经典非量子理论中假定粒子在时空中具有单独的历史或路径。相反，在费恩曼的方法中，假定粒子从 A

到 B 可以通过所有可能的路径。他用一对数与 A 和 B 之间的每一路径相关联，其中一个代表幅度或波的大小。另一个代表相位或在循环中的位置 ( 也就是它是否处于波峰或者波谷，或者两者之间的某处 ) 。一个粒子从 A 走到 B 的概率是将所有连接 A 和 B 的路径的波叠加而求得。一般来说，如果人们比较一族邻近的路径，其相位或在循环中的位置会有很大差别。这意味着和这些路径关联的波几乎完全被对消了。然而，对于一些邻近路径的集合，它们之间的相位变化不大，所以这些路径的波没有对消。这种路径对应于玻尔的允许轨道。

可以相对直截了当地把这些观念以具体的数学形式表述，去计算在更复杂的原子甚至分子中的允许轨道。分子是由一些原子组成的，围绕着多于一个核公转的电子把这些原子捆在一起。由于分子结构以及它们的相互反应是所有化学和生物学的基础，在原则上量子力学允许我们在不确定性原理设下的限制之内，预言我们在周围看到的几乎一切东西。(然而，在实际上，除了最简单的氢原子之外，



我们不能解任何其他原子的方程。氢仅有一个电子。我们利用近似法和计算机去分析更复杂的原子和分子。)

量子理论已成为极其成功的理论，它几乎是所有现代科学和技术的基础。它制约着半导体和集成电路的行为，而后者是诸如电视和计算机电子装置的最重要部件。此外量子力学还是现代化学和生物学的基础。引力和宇宙的大尺度结构是量子力学尚未适当纳入的仅有的物理科学领域：正如早先提到的，爱因斯坦的广义相对论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，这一点是应该的。

正如我们在上一章中看到的，我们已经知道广义相对论必须修改。因为经典(即非量子)广义相对论预言了无限密度的点——奇点——它也就预言了自己的垮台，正如经典力学暗示黑体应发射出无限能量，或者原子应坍缩成无限的密度，而预言了它的垮台一样。我们希望把经典广义相对论变成一个

量子的理论——也就是创造量子引力论，来消除这些不可接受的奇点，正如我们处理经典力学一样。

如果广义相对论是错误的，那么为何迄今所有的实验都支持它呢？我们尚未注意到与观测有任何差异，其原因是我们通常经验的所有引力场都非常微弱。但是正如我们看到的，在早期宇宙中，当宇宙中的所有物质和能量都被挤压成非常小的体积时，引力场应变得非常强大。存在如此强大的场时，量子理论应有重要的效应。

尽管我们尚未拥有量子引力论，但我们的确知道一些我们相信它应该具有的特征。其中一项是，它应与费恩曼的按照对历史求和来表述量子理论的设想相合并。我们相信，爱因斯坦如下的思想肯定是作为任何终极理论部分的第二项特征，即引力场由弯曲的时空来代表，粒子企图沿着弯曲空间中最接近直线的东西运动，但是因为时空不是平坦的，它们的路径显得仿佛被引力场弯曲了。当我们把费恩曼对历史求和应用到爱因斯坦的引力观点时，那

么粒子历史的类似物，现在就是代表整个宇宙历史的完整的弯曲时空。

在经典引力论中，宇宙只能以两种方式行为：要么它已存在了无限时间，要么它在过去的某一有限时间的奇点处有一个开端。基于我们早先讨论过的理由，我们相信宇宙并未存在过无限久。然而如果它有一个开端，根据经典广义相对论，为了知道爱因斯坦方程的哪个解描述我们的宇宙，我们必须知道它的初始态——也就是说，准确地知道宇宙如何起始。上帝也许最初就颁布了自然定律，但是从此之后，他似乎让宇宙按照这些定律演化，而且现在不干涉它。上帝如何选择宇宙的初始态或者初始位形呢？什么是时间开端的边界条件呢？因为经典广义相对论在宇宙的开端失效，所以在经典广义相对论中这是个问题。

另一方面，在量子引力论中出现了一个新的可能性。如果这是真的，就可以补救这个问题。在量子理论中，时空可能在范围上有限，但却没有形成时空的边界或边缘的奇点。时空就会像地球的表面，

只不过多了两维。正如以前指出过的，如果你在地球表面沿着某一方向不断前进，你永远不会遭遇到一个不可逾越的障碍，却最终会返回到出发之处，并且不会撞上奇点。这样，如果情形果真如此，那么量子引力论开启了一种新的可能性，不会存在科学定律在那里失效的奇点。

如果时空没有边界，则不需要指定边界上的行为——不需要知道宇宙的初始状态，不存在我们必须祈求上帝或者某些新的定律为时空设定边界条件的时空边缘。我们可以讲：“宇宙的边界条件是它没有边界。”宇宙会是完全自足的，并且任何外在于它的东西都不能对它施加影响。它既不被创生，也不被消灭，它只是存在。只要我们相信宇宙有个开端，造物主的作用似乎是清楚的。但是如果宇宙的确是完全自足的，没有边界或者边缘，既没有开端又没有终结，那么其答案就不这么明显：造物主还有什么作用呢？

## 第 10 章

### 虫洞和时间旅行

我们已在前面的几章中看到，有关时间本质的观点在漫长岁月中是如何变化的。直到 20 世纪初，人们还相信绝对时间。也就是说，每一事件都可由称为“时间”的一个数，以唯一的方式来标记，而且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。然而科学发现，光速对于无论在怎么运动的观察者都显得相同，这个发现导致了相对性理论——抛弃了存在唯一的绝对时间的观念。不能以唯一的方式标记事件的时间。相反，每一个观察者都有他自己的时间测量，由他携带的钟记录，而且不同观察者携带的钟不一定一致。这样，相对于测量时间的观察者而言，时间变成一个更为个人的概念。时间仍然被看成仿佛是一条笔直的铁轨，你只能往一个方向或另一个方向前进。如果该铁轨有环

圈以及分叉，使得一直向前开动的火车返回原先通过的车站，那么会发生什么呢？换言之，某人可能旅行到未来或回到过去吗？H·G·韦尔斯在《时间机器》一书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球等都被科学实现了。那么，时间旅行的前景如何呢？

旅行到未来是可能的。那也就是说，相对论显示，人们可以创造一台时间机器，它使你在时间中往前跳跃。你步入时间机器，等待，步出，发现地球上的时间流逝比你体验到的要长久得多。我们今天还没有能够实现这些的技术，但是它只不过是个工程的问题：我们知道这是能够做到的。我们在第6章讨论过的双生子佯谬，利用那种情形是建造这种机器的一种方法。用这种方法，当你坐在这台时间机器里，它发射升空，加速到接近于光速，继续一段时间（依你希望在时间旅行中要超前多少而定），然后返回。因为根据相对论，时间和空间是相关的，时间机器也是宇宙飞船，你对此不应感到惊讶。无

论如何就你而言，在整个过程中，你所呆的地方仅仅是时间机器之中。而当你步出，你将发现在地球上流逝的时间比你度过的更久。你已经旅行到未来。



时间机器  
两位作者在时间机器中。

但是你能返回过去吗？我们能创造逆时旅行的必要条件吗？

1949年，库尔特·哥德尔发现了爱因斯坦方程的一个新解，也就是广义相对论允许的一个新的时空。这是物理定律可能真的允许逆时旅行的第一个预示。宇宙的很多不同的数学模型满足爱因斯坦方程，但是这不表明它们对应于我们生活其中的宇宙。比如讲，它们在其初始或者边界条件上不同。为了决定它们能否对应于我们的宇宙，我们必须检查这些模型的物理预言。

哥德尔是一位数学家，他由于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，哪怕你仅仅去证明就像算术那样显然枯燥乏味的学科中所有真的陈述。正如不确定性原理一样，哥德尔的不完备性定理也许是我们理解和预言宇宙能力的基本限制。在普林斯顿高级学术研究院里，哥德尔和爱因斯坦度过他们的晚年。在那段时间里他通晓了广义相对论。哥德尔的时空具有一个古怪的性质：整个宇宙都在旋转。



整个宇宙正在旋转是什么意思呢？旋转意味着不停地转下去，这难道不表明存在一个固定的参考点吗？这样，你也许会问道：“它相对于何物旋转？”其答案有点专业性，但是基本上是说，远处的物体相对于宇宙中的小陀螺或者陀螺仪的指向旋转。哥德尔时空的旋转性质有一个附加的数学效应。如果一个人从地球旅行到巨大距离以外，然后返回，他可能在出发之前就已经回到地球。

爱因斯坦过去认为广义相对论不允许时间旅行，而他的方程却允许这种可能性，这实在使他非常沮丧。尽管哥德尔发现的解满足爱因斯坦方程，因为我们的观测显示我们的宇宙不在旋转，至少没有明显地旋转，所以它不对应于我们生活于其中的宇宙。哥德尔宇宙也不膨胀，而我们的宇宙膨胀。然而，从那时以后，研究爱因斯坦方程的科学家们已经找到了广义相对论的确容许逆时旅行的其他时空。然而，微波背景以及对诸如氢和氦元素的丰度的观测表明，早期宇宙并不具有这些模型的允许时间旅行的那种曲率。如果无边界设想是正确的，根

据理论也能得到同样的结论。这样，问题就变成：如果宇宙在起始时没有时间旅行所需的那类曲率，我们随后能否将时空的局部区域翘曲得足够厉害，进而允许时间旅行？

再重复一下，由于时间和空间是相关的，一个和逆时旅行紧密相关的问题是你能否行进得比光还快，这一点也许不会使你惊讶。很容易看出，时间旅行意味着超光速旅行：在你旅程的最后阶段做逆时旅行，就能够使你的整个旅行，在你希望的任意短的时间内完成，而这样你就能以不受限制的速度行进！但是，正如我们将要看到的，倒过来也是成立的：如果你能以不受限制的速度行进，你也能够逆时旅行。其中一者成立而另一者不成立是不可能的。

科学幻想作家十分关切超光速旅行的争论。他们的问题是，根据相对论，如果我们往最邻近的恒星，大约 4 光年那么远的比邻星，发射宇宙飞船，我们预期至少要等待 8 年，旅行者才能返回，而告知他们的发现。但若要到我们星系中心去探险，则至少要花费 10 万年才能返回。如果你要写星系际大

战则前景不妙！不过，相对性理论的确让我们得到一个安慰，让我们再沿着第 6 章中关于双生子佯谬讨论的思路：对于空间旅行者来说，这个旅程可能比留在地球上的人要感觉短促得多。但是在空间旅行老了几年的人，再返回时并没有什么太大的喜悦，因为你会发现当时留下的每一个人都已经死产几千年了。所以为了使人们对科学幻想作家们的故事感兴趣，他们必须假定，我们会有朝一日发现如何进行超光速旅行。这些作者中的大多数似乎还未意识到这一事实，即如果你能超光速旅行，则相对性理论意味着你还能逆时旅行，正如以下五行打油诗所言：

有位年轻小姐叫怀特，  
她行走得比光还快得多。  
她以相对性的方式，  
在当天刚刚出发，  
却已于前晚到达。

与此相关的要点是，相对性理论不仅认为不存在让所有观察者同意的唯一的时间测量，而且认为



虫洞

如果虫洞存在的话，它们可以为空间中相距遥远的点之间提供捷径。

在一定的情况下，观察者们甚至在事件时序上的看法也不必一致。特别是，如果两个事件 A 和 B 在空间上相隔得如此远，一个火箭必须行进得比光还快才能从事件 A 到达事件 B，那么两位以不同速度运动的观察者，会对事件 A 在事件 B 之前发生，还是事件 B 在事件 A 之前发生产生异议。例如，假定事件 A 是 2012 年的奥林匹克竞赛的 100 米决赛的结束，而事件 B 是比邻星议会第 100 004 届会议开幕式。假设对于地球上的一名观察者而言，事件 A 发生在前，然后才是事件 B。比方说按照地球的时间，B 发生在一年之后，即 2013 年。由于地球和比邻星相

距 4 光年左右，这两个事件满足上述的判据：虽然 A 在 B 之前发生，但是你必须进行超光速旅行才能从 A 到达 8。那么对于在比邻星上，在离开地球方向以接近光速旅行的观察者看来，事件的时序就显得颠倒了：事件 B 在事件 A 之前发生。这位观察者会说，如果你可以超光速运动就能够从事件 B 到达事件 A。事实上，如果你旅行得实在快，你还来得及在赛事之前从 A 赶回到比邻星，并且在得知谁是赢家的情形下投放赌注！

要打破光速壁垒存在着一个问题。相对论告诉我们，一个宇宙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大。对此我们已有实验的证据，但不是宇宙飞船的经验，而是在诸如费米实验室或者欧洲核子研究中心 (CERN) 的那些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大功率，也不可能把它们加速到超过光速壁垒。宇宙飞船的情形也类似：不管火箭有多大功率，它们也不可能加速到超过光速。而且因为只有在超光速旅行成为可能

时,才能逆时旅行,这似乎既排除了高速空间旅行,又排除了逆时旅行。

然而,可能还有出路。你也许可以把时空卷曲起来,使得在 A 和 B 之间有一条近路。在 A 和 B 之间建立一个虫洞就是一个方法。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。它有点像处于巍峨的山脊的底部。为了到达另一边,你通常要往上攀登很长距离,然而再往下来——但是如果有一个水平穿过岩体的巨大虫洞,你就不必如此了。你可以想象去建立或者发现从我们太阳系邻近通往比邻星的一个虫洞。尽管在通常的空间中地球和比邻星相隔 200 000 亿英里,而通过这个虫洞的距离却可能只有几百万英里。如果我们通过虫洞传递百米赛事的消息,可以比议会开幕早很多到达。但是后来一名向地球飞去的观察者也应该能找到另一个虫洞,使他能从比邻星议会的开幕在赛事之前回到地球。因此,正和其他可能的超光速旅行一样,虫洞允许人们逆时旅行。

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，它的来源是非常令人敬重的。1935年，爱因斯坦和纳珍·罗森写了一篇论文。在论文中，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存在。爱因斯坦-罗森桥只能维持很短时间，宇宙飞船来不及穿越：由于虫洞紧缩，飞船会撞到奇点上去。然而有人提出，一个先进的文明可能使虫洞维持开放。为了达到这个目的，或者用任何其他方式翘曲时空，以便时间旅行。你可以证明，你必须有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，赋予时空正曲率，如同一个球面。所以，为了使时空卷曲到允许逆时旅行的方式，人们需要负能量密度的物质。

具有负能量密度是什么意思呢？能量有点像金钱：如果你的银行余额是正的，你就可用不同方式分配它，但是根据一个世纪前信奉的经典定律，你不得透支。于是，这些经典定律已经排除了负能量密度，也就是逆时旅行的任何可能性。然而，正如在前面几章所描述的，以不确定性原理为基础的量

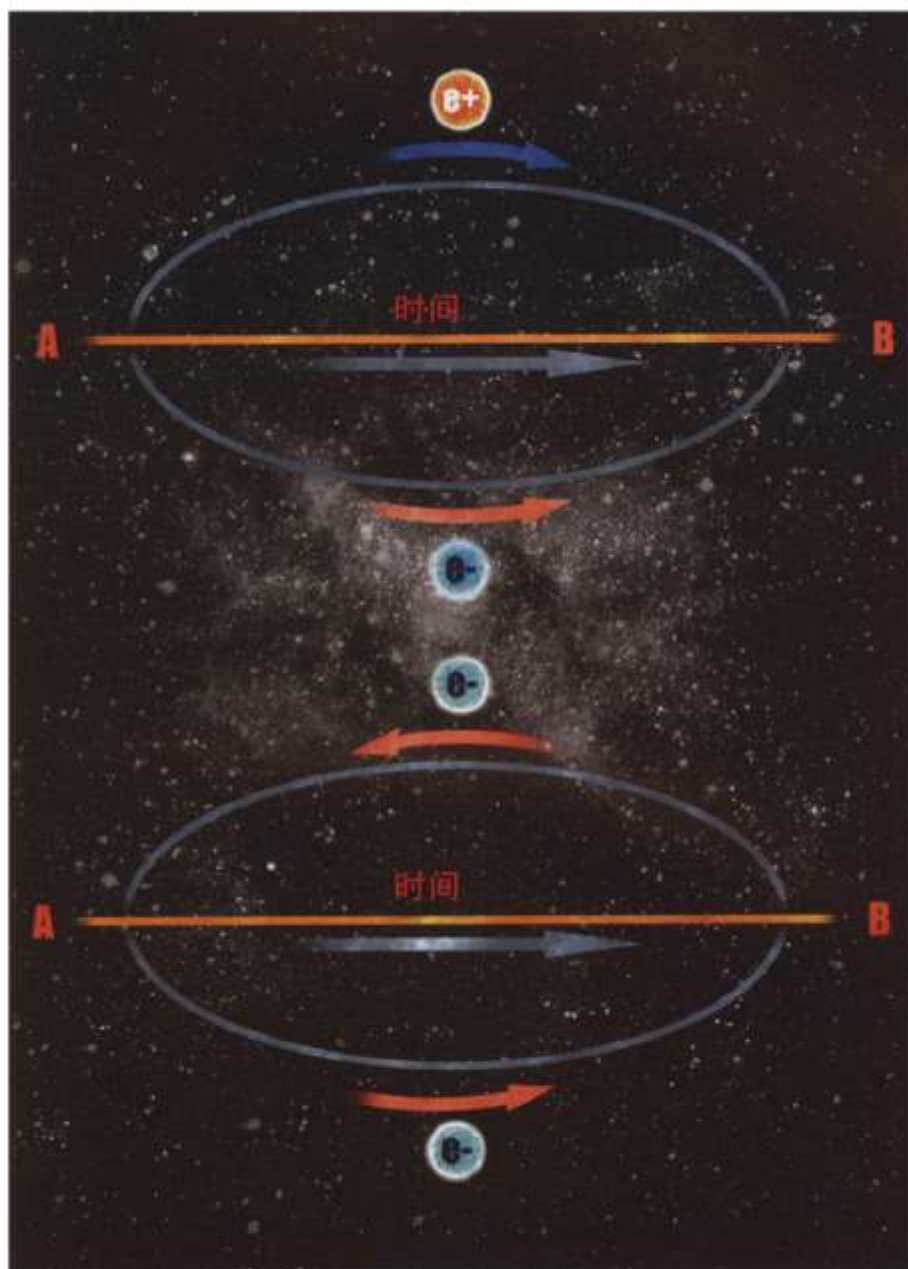
子定律已经超越了经典定律。量子定律更慷慨些，只要你总的余额是正的，你就可以从一个或两个账户透支。换言之，量子理论允许在一些地方的能量密度为负，只要在其他地方的正的能量密度能把它补偿，使得总能量保持为正就可以了。因此，我们有理由相信，不但时空可被翘曲，而且它能被弯曲成允许逆时旅行所需要的样子。

根据费恩曼的对历史求和，在单个粒子尺度上，在某种程度上的确发生逆时旅行。在费恩曼方法中，通常粒子顺时运动等效于反粒子逆时运动。用他的数学方法，人们可以将一对粒子 / 反粒子一起创生并相互湮灭，看成单独粒子在时空中的一个闭圈上的运动。为了看到这一点，首先以传统方式想象这个过程。在某一时刻——比如说时刻 A——创生了一对粒子 / 反粒子，两者都做顺时运动。接着在后来的时刻 B，它们再互相作用，并且互相湮灭。在 A 之前以及 B 之后，两个粒子皆不存在。但是依照费恩曼的理论，你可用不同的观点看待之。一个单独粒子在时刻 A 创生，它顺时运动到 B，然后它逆时



回到 A。取代粒子和反粒子一道的顺时运动，只有一个单独粒子沿着“圈环”从 A 运动到 B 然后再返回。当该物体顺时(从 A 至 B)运动时，它被称为粒子。然而当该物体逆时(从 B 至 A)旅行时，它显现为一个顺时旅行的反粒子。

这种时间旅行能产生观测效应。例如，假设粒子 / 反粒子对中的一个成员(例如，反粒子)落入黑洞中去，留下另一个成员，没有伙伴可与之相湮灭。这被遗弃的粒子也可以落入黑洞，但是它也可以从黑洞邻近逃逸。如果这样的话，对于一位远处的观察者，它就像一个从黑洞发射出的粒子。然而，你可以对从黑洞辐射的发射机制有一个不同但是等效的直觉的图象。你可把落入黑洞的粒子对这个成员(例如反粒子)当成从黑洞中出来做逆时旅行的粒子。当它到达粒子 / 反粒子对一起出现的那一点时，它被黑洞的引力场散射成向时间正方向运动的粒子，并从黑洞逃逸。或者相反，如果粒子对的粒子成员落入黑洞，你可以把它当成逆时旅行的反粒子，并



费恩曼秘诀中的反粒子

反粒子可以认为是向时间过去旅行的粒子。

因此虚粒子 / 反粒子对可以认为是在时空中的闭合圈环上运动的一个粒子。

从黑洞出来。这样，黑洞的辐射显示，量子理论允许微观尺度上向时间过去的时间旅行。

因此，我们可以诘问量子理论是否容许以下的可能性，一旦在科学技术上取得进展时，我们是否最终能够设法建造一台时间机器。初看起来，似乎应该是可能的。费恩曼对历史求和的设想假定是对于所有历史进行的。这样，它应包括这类历史，其时空被翘曲到允许逆时旅行的程度。然而，即使已知的物理定律似乎不排除时间旅行，但是依然还有其他理由，质疑这是否真的可能。

问题在于，如果人们可以逆时旅行，为什么从未有来自未来的人，回来告诉我们如何实现呢？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明智的。除非人类本性得到彻底改变，否则难以置信，某位从未来飘然而至的访客会贸然泄露天机。当然，某些人会宣称，发现幽浮(UFO)就是外星人或者来自未来的人们造访的证据。(鉴于其他恒星的巨大距离，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。) 未曾有过来自未来的访客，这可以用以下方法解释，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，所以它很可能具有所需要的曲率。这意味着，任何时间旅行都被局限于未来。此时此刻，柯克船长和进取号星际飞船没有机会来临。

这也许可以解释，当今世界为何还没被来自未来的游客充斥。但是，如果可能回到以前并改变历史，则仍然不能回避另一类由此引起的问题：那么，为什么我们不和历史过不去呢？例如，假定某人回到过去并且将原子弹的秘密给予纳粹，或者你回到过去并且将你的曾曾祖父在他得到孩子之前杀死。这类佯谬有许多版本，但是它们在根本上是等效的：如果我们有改变过去的自由，则我们就会遇到矛盾。

似乎存在两种可能的方法去解决由时间旅行导致的佯谬。第一种可以称为协调历史方法。它是说，即使时空被卷曲得可能逆时旅行，在时空中所

发生的必须是物理定律的协调的解。换言之，根据这个观点，除非历史已经表明，你曾经到达过去，并且当时并没有杀死你的曾曾祖父，或者没有采取任何行为，这些行为和到达你现状的历史相冲突，你才能在时间中回到过去。况且，当你回到过去，你不能改变记载的历史，你仅仅是跟随着它。按照这一观点，过去和将来是注定的：你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备的物理理论，它也似乎决定你的行动。但是对于像人类这么复杂的机体，它的制约和决定方式是不可能计算的，而且这里还牵涉到量子力学效应引起的某种随机性。这样，有一种看法是，我们说人类具有自由意志，那是因为我们不能够预言他们未来的行为。然而，如果一个人乘火箭飞船出发并在这之前已经返回，因为他的未来行为是记载的历史的一部分，所以我们就能预言之。这样，在那种情形下，时间旅行者在任何意义上都没有自由意志。

解决时间旅行佯谬的其他可能方法可以称做选择历史假想。其思想是，当时问旅行者回到过去，他们进入和记载的历史不同的另外的历史中去，这样，他们可自由地行动，不受和他们原先历史相一致的约束。史蒂芬·斯匹柏十分喜爱影片《回归未来》中的创意：玛提·马克弗莱能够回到过去，并把他双亲恋爱的历史改得更令人满意。

听起来，选择历史假想和理查德·费恩曼把量子理论表达成历史求和的方法相类似，正如第9章所描述的。这是说宇宙不仅仅有一个独立历史；它具有每一种可能的历史，每种历史都有各自的概率。然而，在费恩曼的设想和选择历史之间似乎存在一个重要的差别。在费恩曼求和中，每一种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的程度。但是火箭要留在同一时空，并从而留在同一历史中，历史必须是一致的。这样，费恩曼的历史求和的设想似乎支持协调历史假想，而不支持选择历史的思想。

如果我们接受我们可称做时序防卫的猜测,就能避免这些问题。这是说,物理学定律共同防止宏观物体将信息传递到过去。这个猜测还未被证明,但是有理由相信它是真的。其原因是,当时空被翘曲得可能旅行到过去时,利用量子理论的计算显示,不断绕着一个闭合圈环运动的粒子 / 反粒子对能够产生足够大的能量密度,赋予时空以正的曲率,抵消了允许时间旅行的翘曲。因为究竟是否如此还不清楚,时间旅行的可能性仍然未决。但是不要为之打赌,你的对手或许具有通晓未来的不公平的优势。

## 第 11 章

### 自然的力和物理学统一

正如在第 3 章中解释的，一蹴而就地建立一个完备的宇宙万物统一理论是非常困难的。取而代之，在寻求描述有限范围内的事件的部分理论方面，我们取得了进展，此时忽略了其他效应或者用某些数来对这些效应做近似。尽管我们目前知道，科学定律包含许多数——比如电子电荷的大小和质子电子质量比——至少现在，我们不能从理论中把它们预言出来。相反，我们必须利用观测将它们找出，然后把它们放到方程中去。某些人将这些数称做“基本常数”，另一些人把它们叫做胡说因素。

不管你持何种观点，以下的事实是值得注意的，这些数值似乎被非常精细地调节过，使生命可能发展。例如，如果电子的电荷稍微不同，它就破坏了恒星中的电磁力和引力的平衡，它们要么没有燃烧



氢和氦，要么没有爆发。不管哪种情形发生，生命都不能存在。归根结底，我们希望找到一个完备的协调的统一理论，它将所有这些部分理论作为近似而包容进去，而不必为理论中的任意数，诸如电子电荷强度选取合适的值，以此调节这些部分理论来与事实相符合。

寻求这样一个理论称做物理学的统一。爱因斯坦用他晚年的大部分时间去寻求统一理论，但是没有成功。因为尽管已有了引力和电磁力的部分理论，但是关于核力，当时知道得还非常少，所以时机还没有成熟。此外，正如在第 9 章提到的，爱因斯坦拒绝相信量子力学的真实性。但是，不确定性原理似乎是我们生活于其中的宇宙的一个基本特征。因此，一个成功的统一理论必须将这个原理结合进去。

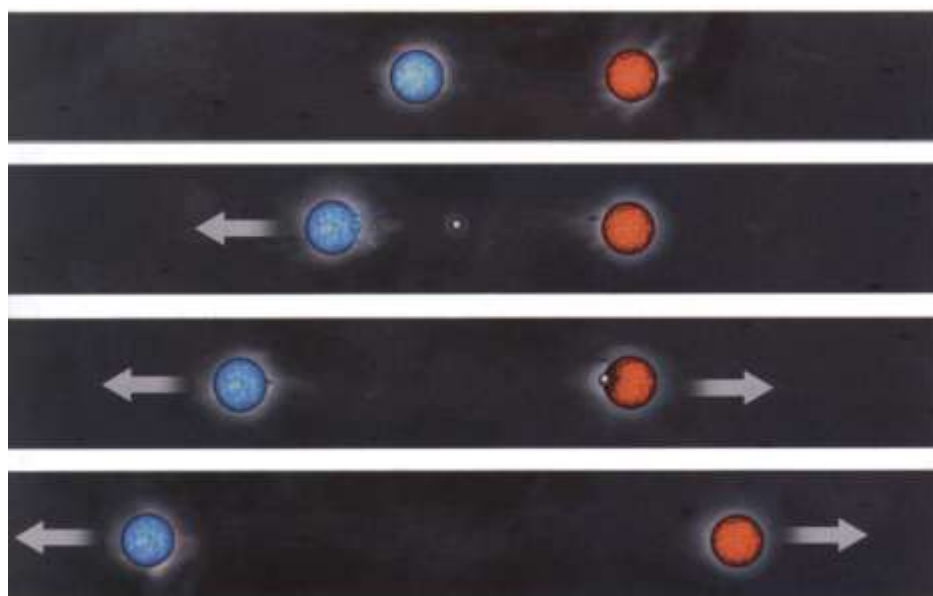
因为我们已对宇宙了解得这么多，现在寻求这种理论的前景似乎要好得多了。但是我们必须防止过分自信——我们在过去有过对成功的错误的期望！例如，在 20 世纪初，曾经以为任何东西都可以按照连续物质诸如弹性和热导的性质予以解释。原子结

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·玻恩告诉一群来格丁根大学的访问者：“根据我们所知，物理学将在6个月内结束。”他的信心是基于狄拉克新近发现的制约电子的方程。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，并且那将会是理论物理的终结。然而，中子和核力的发现对此又是当头一棒。尽管讲到这些，仍然有理由谨慎地乐观，我们现在也许已经接近探索自然终极定律的尾声。

在量子力学中，物质粒子之间所有的力或者相互作用应该都是由粒子携带的。所发生的是，诸如电子或者夸克等物质粒子发射了携带力的粒子。这个发射所引起的反弹，改变了物质粒子的速度，其道理和发射炮弹之后大炮后退是相同的。然后，携带力的粒子又和另一物质粒子碰撞并被吸收，改变了那个粒子的运动。发射吸收过程的净结果和在两个物质粒子之间有过一个力相同。

每种力都是由它自己特有的携带力的粒子来传递。如果携带力的粒子具有大质量，产生和在远距离上交换它们就很困难，于是它们携带的力只能是短程的。另一方面，如果携带力的粒子没有自身的质量，该力就是长程的。由于在物质粒子之间交换的携带力的粒子，不像实粒子，它们不能被粒子探测器直接探测到，所以被称为虚粒子。然而，因为它们具有可测量的效应：它们引起了物质粒子之间的力，所以我们知道它们存在。

携带力的粒子可分成4个种类。应该强调的是，



粒子交换  
根据量子理论，力是由交换携带力的粒子引起的。

这样地分成 4 种是人为的；只是为了便于建立部分理论，但是它也许不具深意。大多数物理学家希望最终能找到一个统一理论，统一理论将把所有这 4 种力解释成为一种单独的力的不同方面。的确许多人愿意说，这是当今物理学的首要目标。

第一种力是引力。这种力是万有的；也就是说，每一个粒子都因它的质量或能量而感受到引力。引力吸引被描写成因交换称做引力子的虚粒子引起的。引力比其他三种力都弱得多；它是如此之弱，若不是它具有两个特别的性质，就根本不可能引起我们的注意：它会作用到非常远的距离，并且总是吸引的。这意味着，在像地球和太阳这样两个巨大的物体中，单独粒子之间的非常弱的引力能叠加起来，产生可观的力量。另外三种力或者由于是短程的，或者由于时而吸引时而排斥，所以它们倾向于互相抵消。

第二种力是电磁力。它和诸如电子和夸克之类的带电荷的粒子相互作用，但不和诸如中微子之类的不带电荷的粒子相互作用。它比引力强得多：两

个电子之间的电磁力比引力约大 100 亿亿亿亿亿 (在 1 后面有 42 个零) 倍。然而, 有两种电荷: 正电荷和负电荷。两个正电荷之间正如两个负电荷之间一样, 力是排斥的, 但是在一个正电荷和一个负电荷之间的力是吸引的。

一个大的物体, 比如地球或者太阳, 具有几乎等量的正电荷和负电荷。这样, 单独粒子之间的吸引力和排斥力几乎全部相互抵消掉, 而余下的净电磁力非常小。然而, 在原子和分子的小尺度下, 电磁力起主要作用。在带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围绕着原子核公转, 正如同引力使得地球围绕着太阳公转一样。科学家把电磁吸引力描绘成由大量称做光子的虚粒子的交换引起的。再说一遍, 被交换的光子又是虚粒子。然而, 当一个电子从一个轨道转换到另一个离核更近的轨道时, 它释放出能量并且发射一个实光子——如果其波长刚好, 则作为可见光被肉眼观察到, 或者被诸如照相底片之类的光子探测器观察到。同样, 如果一个光子和原子相碰撞, 它会将电子从离

核较近的轨道移到外面更远的轨道。这就把光子的能量消耗殆尽，于是光子就被吸收了。

第三种力称为弱核力。我们在日常生活中并不直接接触到这种力。然而，它导致放射性——原子核衰变。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·温伯格提出把这个相互作用和电磁力统一的理论后，我们才清楚地理解弱核力。此举正如大约 100 年前麦克斯韦统一电学和磁学一样。该理论的预言与实验非常符合，使萨拉姆和温伯格以及也在哈佛的谢尔登·格拉肖一起获得了 1979 年的诺贝尔物理学奖。格拉肖提出过类似的统一电磁力和弱核力的理论。

第四种力是强核力。它是 4 种力中最强的力。这是另一种我们并不直接接触的力，但是正是这种力将我们日常世界的大部分东西维系在一起。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。如果没有强核力，那么带正电荷的质子之间的电斥力将导致宇宙中的每个原子核分崩离析，除了只包含一个质子的氢原子核之外。

科学家相信，这种力由称做胶子的粒子携带，它只和自身以及夸克相互作用。

统一电磁力和弱核力的成功，使许多人试图将这两种力和强核力合并所谓的在大统一理论 ( 简称 GUT ) 之中。这称号相当夸张：所得到的理论并不那么辉煌，也没把全部力都统一进去，因为它并不包含引力。因为它们包含了一些不能从这个理论预言，而必须人为选择去适合实验的参数，所以它们也不是真正完备的理论。尽管如此，它们可能向着完备的全面统一理论推进了一步。

寻找一个把引力和其他力统一的理论的主要困难在于，引力论——广义相对论——是仅有的非量子的理论：它没有考虑不确定性原理。因为其他力的部分理论，以非常根本的方式依赖量子力学，为了把引力和其他理论统一，就需要寻找把该原理结合到广义相对论中的一种方法。但是迄今还无人能够找到一种量子引力论。

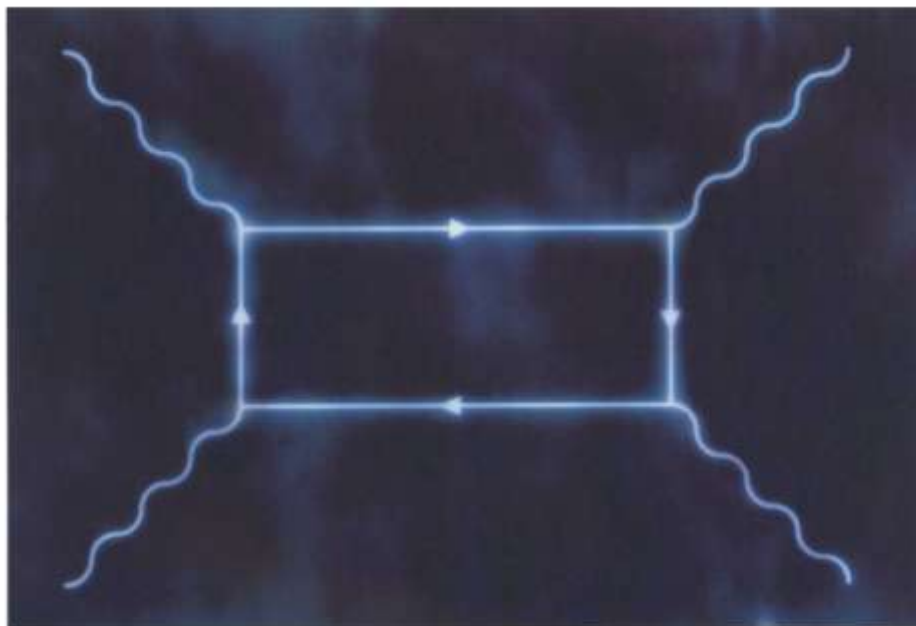
创造量子引力论之所以如此困难与这个事实有关：不确定性原理意味着甚至“空虚的”空间也

充满了虚的粒子 / 反粒子对。如果情形并非如此——即如果“空虚的”空间真的是完全空虚的——那就意味着所有的场，比如引力和电磁场就必须精确地为零。然而，场的值及其随时间的变化率与粒子的位置和速度（也就是位置的改变）相像：不确定性原理意味着，人们越精确地知道这些量中的一个，则只能越不精确地知道另一个量。所以，如果在空的空間中的一个场被精确地固定在零上，那么它就既有准确的值（零），又有准确的变化率（也为零），这就违反了上述原理。这样，在场的值中必须有不确定性或者量子涨落的某个最小量。

人们可以将这些涨落看成许多在某一时刻同时一起出现，运动分开，然后又走到一起，并且相互湮灭的粒子对。它们像携带力的粒子一样是虚粒子，而不像实粒子，它们不能用粒子检测器直接观测到。然而，它们的间接效应，诸如电子轨道的能量的微小改变，可以测量到，而这些数据和理论预言符合的精确程度令人印象深刻。在电磁场涨落的情形下，这些粒子是虚光子，而在引力场涨落的情



形下，它们是虚引力子。然而，在弱力场和强力场涨落的情形下，虚粒子对是实体粒子对，例如电子或者夸克以及它们的反粒子。



虚粒子/粒子对的费恩曼图

把不确定性原理应用到电子，就使得即使在空虚的空间中，虚粒子/粒子对也会出现，然后再相互湮灭。

问题在于虚粒子具有能量。事实上，因为有无数的虚粒子对，它们似应具有无限的能量，因此，由爱因斯坦的方程  $E=mc^2$  (见第 5 章) 可知，它们似应具有无限的质量。根据广义相对论，这意味着它们的引力会将宇宙弯曲到无限小尺度。那显然没有

发生!在其他部分理论——强、弱和电磁力的理论——中也发生类似的似乎荒谬的无限大,但是所有这些情形下的无限大都可用称为重正化的过程消除掉,这就是为什么我们能够创造出那些力的量子理论。

重正化牵涉到引入新的无限大,它具有消除理论中产生的无限大的效应。然而,它们无需被准确地消除。我们能够选择这新的无限大以便留下小的余量。这些小的余量在理论中称为重正化的量。

尽管在实际中这个技巧在数学上相当可疑,但是它似乎的确行得通,并用来与强、弱和电磁力的理论一起做 H{预言,这些预言和观测的一致达到非凡的精度。然而,从企图找到一个完备理论的观点看,由于重正化意味着不能从理论预言质量和力的强度的实际值,它们必须被选择出来去符合观测,因此重正化具有一个严重的缺陷。不幸的是,在企图利用重正化从广义相对论中消除量子的无限大时,我们只有两个可以调整的量:引力的强度和宇宙常数的值。因为爱因斯坦相信宇宙不再膨胀,他将宇宙常数项引进了他的方程(见第 7 章)。结果是,调

整它们不足以消除所有的无限大。因此人们得到的量子引力论似乎预言，诸如时空曲率之类的某些量真的无限大——但是观察和测量表明这些量全然有限！

把广义相对论和不确定性原理结合在一起可能会有这个问题，这一点被置疑了一段时期，在1972年通过仔细的计算后才得到最后证实。4年之后，科学家提出了一种叫做超引力的可能解决方法。不幸的是，去找出在超引力中是否存在未被抵消而留下的无限大的计算，是如此之冗长和困难，以至于没人准备着手去进行。即使利用计算机，预计也要花费许多年，况且至少犯一个也许更多错误的可能是非常大的。于是只有当其他人重复计算，并得到同样答案时，我们才能断定已经取得了正确的答案，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和观测到的粒子不符合，大部分科学家仍然相信，可以修改超引力理论，它也许是统一引力和其他力问题的正确答案。

然后，在 1984 年，人们的看法发生了显著的改变，他们转去喜欢所谓的弦理论。

在弦论之前，人们认为每个基本粒子占据空间中的单独的点。在弦论中，基本对象不是点粒子，而是具有长度但不具有其他维，正如一段无限细的弦的东西。这些弦可以有端点(所谓的开弦)，也可以自身首尾相接成闭合的圈环(闭弦)。一个粒子在每一时刻占据空间的一点。另一方面，一根弦在每一时刻占据空间的一根线。两段弦可以连接在一起，形成一根单独的弦；在开弦的情形下，只要将它们的端点连在一起即可，在闭弦的情形下，像是两条裤腿合并成一条裤子。类似地，一根单独的弦可以分解成两根弦。

如果弦是宇宙中的基本对象，那么我们在实验中似乎观测到的点粒子又是什么呢？在弦论中，原先认为是不同的点粒子，现在被描绘成弦上的各种波，犹如振动着的风筝的弦上的波。但是，弦以及沿着它的振动如此之微小，甚至我们最好的技术都不能识别它的形状，所以在我们的所有实验中，它们像

微小的没有特征的点在行为。想象凝视一个小尘埃：你靠近它，或者在显微镜下就会发现这斑点具有无规则的甚至类弦的形状，但从远处看，它就像一个无特征的点。

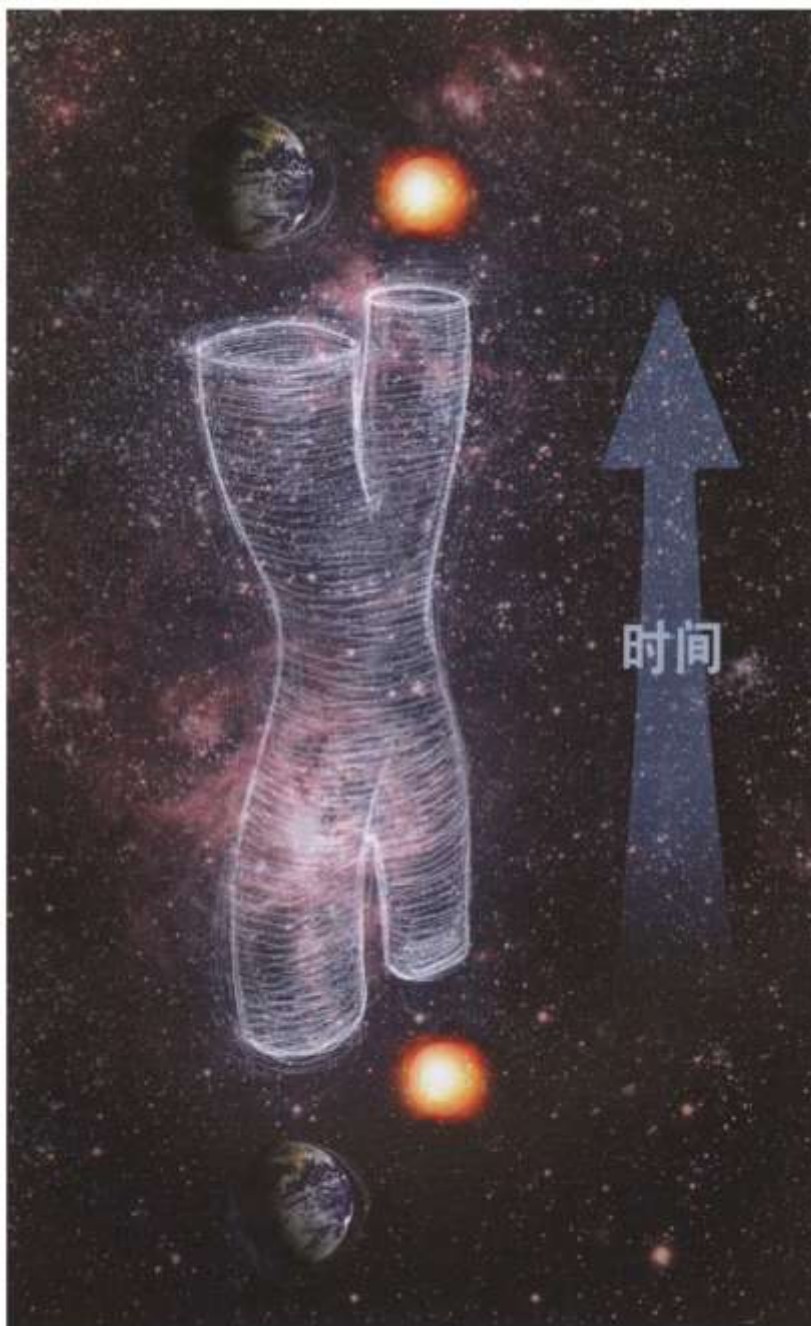
在弦论中，一个粒子被另一个粒子发射或者吸收，与弦的分解与合并相对应。例如，太阳作用到地球上的引力，在粒子理论中被描绘成由称为引力子的携带力的粒子引起的，太阳上的一个物质粒子发射出引力子，并被地球的一个粒子吸收。在弦论中，这个过程相应于一个 H 形状的管（弦论在一定程度上有点像管道工程）。H 两个垂直的边对应于太阳和地球上的粒子，而水平的横杠对应于在它们之间运动的引力子。

弦论的历史很古怪。它原来是 20 世纪 60 年代后期发明的，试图用来找出一个描述强力的理论。其思想是，诸如质子和中子这样的粒子可以被认为是被一根弦上的波。这些粒子之间的强力对应于连接其他一些弦片段之间的弦片段。正如在蜘蛛网中一

样。这弦必须像具有大约 10 吨拉力的橡皮带，理论才能给出粒子之间强力的观察值。

1974 年，巴黎高等师范大学的朱勒·谢尔克和加州理工学院的约翰·施瓦兹发表了一篇论文，指出弦论可以描述引力的性质，只不过在弦上的张力大约是 1 000 万亿亿亿吨 (1 后面跟 39 个零)。在通常尺度下，弦论的预言和广义相对论的预言刚好相同，但是在非常小的距离下，即是比 10 亿亿亿分之一厘米 (1 厘米被 1 后面跟 33 个零除) 还小时，它们就不一样了。然而，他们的工作并没有引起太多的注意，因为大约正是那时候，大多数人抛弃了原先的强力的弦论，而倾心于以夸克和胶子为基础的理论，后者似乎和观测符合得更好得多。谢尔克死得很惨 (他受糖尿病折磨，因身边没人给他注射胰岛素而昏迷死去)，这样一来，施瓦兹几乎成为弦论的唯一支持者，只不过现在设想的弦张力要大得多而已。

1984 年，人们对弦论的兴趣突然复活，显然由于两个原因，其中的一个原因是，在证明超引力是



弦论中的费恩曼图

在弦论中，长距力被看成由连接它们的管子，而非携带力的粒子交换引起的。

有限的或者用它解释我们观察到的粒子种类方面，人们未能真正取得多少进展。另一个原因是，约翰·施瓦兹这一回和伦敦玛丽皇后学院的迈克·格林发表了另一篇论文。这篇论文指出，弦论能够解释内禀的左手征的粒子存在，正如我们观察到的一些粒子那样。（当你将实验装置完全对调成像它在一面镜子里反射的那样，多数粒子的行为将是相同的，但是这些粒子的行为会改变。它们仿佛是左撇子——或者右撇子，而不是左右手都灵巧的。）不管是出于什么原因，许多人很快开始做弦论的研究，而且发展了新的版本，它似乎能够解释我们观测到的粒子种类。

弦论也导致无限大，但是人们认为它们在正确的版本中会完全对消掉（虽然这一点还未被确认）。然而，弦论有更大的问题：似乎只有当时空是十维或者二十六维，而不是通常的四维时，它们才是协调的！当然，额外的时空维是科学幻想的老生常谈。它们的确提供了一种理想方法，克服广义相对论中人们不能超光速或者逆时旅行的通常限制（见第 10



章)。其思想是通过额外维抄近路。你可用以下方法描绘这一点。想象我们生活的空间只有二维，并且弯曲成像一个锚环或甜甜饼的表面。如果你处在这环的内侧一边，而要到环内侧的另一边的点上去，你必须沿着环的内边缘上的圆圈走，直至目标点。然而，如果你能够在第三维空间里旅行，则可以离开这环，直接穿过去。

如果这些额外维确实存在，为什么我们全然没有觉察到它们呢？为什么我们只看到 3 个空间维和 1 个时间维呢？人们的看法是，其他的维不像我们习惯的维那样。它们被卷曲成非常小的尺度的空间，大约为 1 英寸的一百万亿亿亿分之一。我们根本无从觉察到这么小的尺度：我们只能看到 1 个时间维和 3 个空间维，在这些维中的时空是相当平坦的。想象一根麦秸的表面就能知道怎么回事了。如果你近看它，就会发现其表面是二维的。也就是说，由两个数来描述麦秸上的点的位置，一个是沿着麦秸的长度，一个是围绕着圆周方向的距离。但是其圆周的维比其长度的维小很多。正因为这个原因，当你

远看麦秸时，你分辨不出它的粗细，而它就显得是一维的了。也就是说，仿佛你只要给出沿麦秸的长度，就可以指明点的位置。于是关于时空，弦论家们是这样说的：在非常小的尺度下它是十维的，并且被高度弯曲，但是在更大的尺度下你看不见这种曲率或者额外维。

如果这幅图象是正确的，对于有望成为空间旅行者的人来讲可是个坏消息：额外维实在是太小了，不允许宇宙飞船通过。然而，它也给科学家提出了一个重要问题：为何是一些而不是所有维都被卷曲成一个小球？也许在宇宙的极早期，所有的维一度非常弯曲。为何 1 个时间维和 3 个空间维被摊平开来，而其他的维仍然紧紧地卷曲着？

所谓的人存原理可能提供一个答案。人存原理可以释义为：“我们看到的宇宙之所以是这个样子，那是因为我们存在。”人存原理有弱的和强的两种版本。弱人存原理是说，在一个空间和 / 或时间大的或者无限的宇宙里，只有在空间和时间有限的一定区域，才存在智慧生命发展的必要条件。因此，在

这些区域中，如果智慧生物观察到它们在宇宙中的位置满足它们生存所需的那些条件，它们就不应感到惊讶。这有点像住在富裕街坊中的富人，看不到任何贫穷。

有的人走得远得多，并且提出这个原理的强版本。按照这个理论，要么存在许多不同的宇宙，要么存在一个单独宇宙的许多不同区域，每一个都有自己的初始结构，或许还有自己的一套科学定律。在这些宇宙的大多数中，不具备复杂机体发展的适当条件；只有在和我们相像的少数宇宙中，智慧生命才得以发展并能质疑：“为何宇宙是我们看到的这种样子？”其答案很简单：如果它不是这个样子，我们就不会在这里！

很少人会对弱人存原理的成立或有效性提出异议，但是人们会对用强人存原理解释所观察到的宇宙状态提出一些反对的理由。例如，在何种意义上，我们可以说所有这些不同的宇宙存在？如果它们确实互相分离，那么在其他宇宙发生的事件，就不能在我们自己的宇宙中有任何可观测的后果。所以，

我们应该用经济原理，将它们从理论中割除掉。另一方面，如果它们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，否则我们便不能从一个区域连续地运动到另一个区域。在这种情况下，不同区域的初始结构便是它们之间仅有的差别。这样强人存原理即归结为弱人存原理。

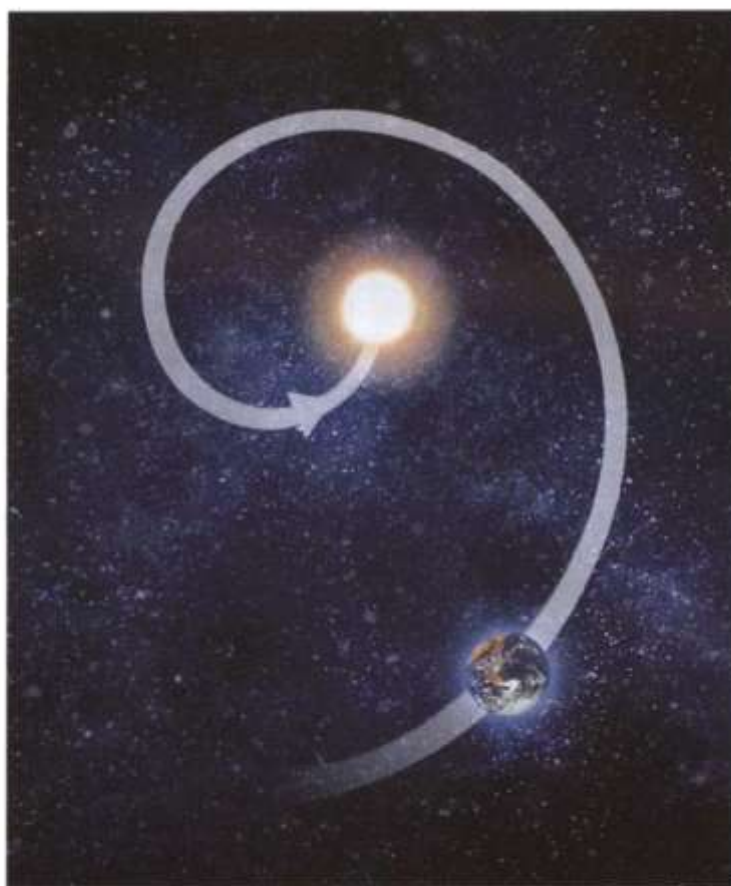
为何弦论的额外维被卷曲起来，人存原理可能提供一个答案。二维空间似乎不足以允许像我们这样复杂的生命发展。例如，在一个圆周（一个二维地球的表面）上生活的二维动物为了互相通过，就必须一个爬到另一个之上。而且如果一个二维动物吃东西时不能将其完全消化，则它必须将其残渣从吞下食物的同一通道吐出来，因为如果有一个穿过全身的通道，它就将这动物分割成分开的两半：我们的二维动物就解体了。类似地，很难看出在二维动物身上怎么可能有血液循环。

多于 3 个空间维也有问题。两个物体之间的引力随距离衰减得将比在三维空间中更快。（在三维空间内，当你把距离加倍，则引力减小到  $1/4$ 。在四

维空间中减小到  $1/8$ ，在五维空间中则为  $1/16$ ，等等。)其意义在于使像地球这样围绕着太阳的行星的轨道变得不稳定：从圆周轨道的最小的偏离(比如由其他行星的引力吸引引起的)会使地球以螺旋线的轨道向外离开或者向内落到太阳上去。我们就要么会被冻死，要么会被烧死。事实上，在维数多于 3 的空间中，引力随距离变化的同样行为意味着，太阳不可能在压力和引力相平衡的一个稳定状态下存在。太阳要么被四分五裂，要么坍缩形成一个黑洞。在任一情况下，作为地球上生命的热和光的来源而言，它没有多大用处。在更小的尺度下，原子中使电子围绕着原子核转动的电力的行为也正和引力一样。这样，这些电子要么从原子核逃逸出去，要么以螺旋的轨道落到原子核内去。在任一情形下，我们所知道的原子都不会存在。

看来很清楚，至少正如我们所知，生命只能存在于 1 个时间维和刚好 3 个空间维没被卷曲得很小的时空区域里。这表明，只要我们可以证明弦论至少允许宇宙的这样的区域存在——看来弦论确实能

做到这一点，我们便可以诉求弱人存原理。同样，也许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，或者多于四维是几乎平坦的。但在这样的区域里，不会有智慧生物去观察这不同数目的有效维。



空间是三维的重要性

在多于三维的空间中，行星轨道将是不稳定的，而行星要么以螺旋线的轨道向内落到太阳上去，要么完全逃脱它的吸引。

除了维数的问题，弦论的另一个问题是，至少有 5 种不同的弦论 ( 两种开弦和三种不同的闭弦理论 ) 存在，而且弦论还预言，可以用极其繁多的方式卷曲额外维。为什么仅仅应该挑选一种弦论和一种卷曲方式？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 年起，人们开始发现所谓的对偶性：不同的弦论以及额外维的不同卷曲方式会导致在四维时空中的同样结果。不仅如此，除了在空间占据一点的粒子，以及线状的弦，还发现了另一种称做 P-膜的东西，它在空间占据二维或更高维的体积。( 粒子可认为是 0-膜，而弦为 1-膜，但是还存在  $p=2$  到  $p=9$  的 P-膜。2-膜可认为是像二维薄膜的某种东西。描绘更高维的膜更加困难。) 这似乎表明，在超引力、弦以及 p-膜理论中有某种民主 ( 在拥有同等发言权的意义上 ) : 它们似乎和平相处，没有一种声称比另一种更基本。相反，它们似乎都是对某种更基本的理论的不同近似，每一种理论在不同情形下成立。

人们探索过这个基本理论，但是迄今毫无成就。正如哥德尔证明的不可能用单独的一组公理系统来表述算术一样，很可能类似地，基本理论的任何单独表述并不存在。相反，它也许和地图相像——你不可能只用一张单独的平面地图去描绘地球的球形表面或者锚圈的表面：对于地球，你至少需要两张地图去覆盖每一点，而对于锚圈，则需要 4 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。整套地图就完整地描述了该表面。类似地，在物理学中对不同的情形也许需要使用不同的表述，但是两种不同表述在它们都应用的情形下要相互一致。

如果情形果真如此，则整套不同的表述可以被认为是完备的统一理论，尽管它不再是能够依照单独的一组假设来表达的理论。但是，也许自然苛刻得连这个也不容许。可能根本就没有统一理论？也许我们仅仅是在追求海市蜃楼？看来有三种可能性：



1. 确实存在一个完备的统一理论(或者一堆交叠的表述),如果我们足够聪明的话,总有一天将会找到它。

2. 并不存在宇宙的终极理论,仅仅存在一个越来越精密,但绝不可能完全准确地描述宇宙的无限的理论序列。

3. 并不存在宇宙的理论:事件在一定程度之外不可能被预言,仅仅是以一种随机和任意的方式发生。

有些人基于以下理由赞同第三种可能性,如果存在一套完备的定律,这将侵犯上帝改变其主意并对世界进行干涉的自由。然而,既然上帝是无所不能的,如果上帝乐意的话,难道他就不能侵犯他自己的自由吗?这有点像那古老的二律背反:上帝能制造一块重到连他都不能举起的石头吗?上帝想要改变他主意的思想,实际上,正如圣·奥古斯丁指出的,是把上帝想象成存在于时间中的生物的谬误的例子。时间只不过是上帝创造的宇宙的一个性质。可以设想,当他创造宇宙时,知道自己所有的企图!

随着量子力学的出现，我们认识到，由于总有一定程度的不确定性，所以不可能完全精确地预言事件。如果你愿意，你可以将此随机性归结为上帝的干涉。但这将是一种非常奇怪的干涉，没有任何证据表明它具有任何目的。的确，如果它有目的，则按定义就不会是随机的。当今，由于我们重新定义科学的目标，所以已经有效地排除了上述的第三种可能性：我们的目的是表述一套定律，这些定律使我们能够只在不确定|生原理设定下的界限之内预言事件。

第二种可能性，也就是存在一个无限的越来越精制的理论序列，这和我们迄今为止的所有经验相符合。我们在许多场合增加了测量的灵敏度，或者进行了新的类型的观测，只是为了发现还没被现有理论预言的新现象，而为了解释这些，我们必须发展更高级的理论。从研究以越来越高能量相互作用的粒子，我们也许真的可以期待找到比我们现在以为是“基本”粒子的夸克和电子更基本的新结构层次。

引力可以为这个“盒子套盒子”的序列提供极限。如果我们有一个能量比称做普朗克能量更高的粒子，其质量就会集中到如此程度，以至于它自身会脱离宇宙的其他部分，而形成一个小黑洞。这样看来，当我们往越来越高的能量去的时候，越来越精制的理论序列应当有某个极限，于是一定存在宇宙的某种终极理论。可是，普朗克能量离开目前我们在实验室中可产生的最大能量非常远。我们不可能在可见的未来用粒子加速器填补其间的差距。然而，宇宙的极早期阶段正是这样大的能量应该出现过的舞台。早期宇宙的研究和数学一致性的要求，很有可能会使我们中的某些人在有生之年获得一个完备的统一理论。当然，这一切都有个前提，即我们不首先使自身毁灭！

如果我们确实发现了宇宙的终极理论，这意味着什么？

正如在第 3 章解释过的，我们将永远不能完全肯定，我们是否确实找到了正确的理论，因为理论不能被证明。但是如果理论在数学上是协调的，并

且总是给出与观察一致的预言，我们便有理由相信它是正确的。它将为一个光辉的篇章打上一个休止符，那是人类智慧为理解宇宙的斗争的长期历史。但是，它还会变革常人对制约宇宙定律的理解。

在牛顿时代，一个受过教育的人至少在梗概上能够掌握人类知识的整体。但从那以后，科学发展的步伐使之不再可能。因为理论总是被改变以解释新的观测，它们从未被适当地消化或简化到使常人能够理解。你必须是一个专家，即便如此，你只能希望适当地掌握科学理论的一小部分。此外，科学进步的速度如此之快，以至于在中学和大学所学的东西总是有些过时。只有很少人可以跟得上知识快速进步的前沿，但他们必须贡献全部的时间，并且局限在一个很小的领域里。其余的人对于正在做出的进展或其引发的激动，所知甚少。另一方面，70年以前，如果爱丁顿的话是可信的，那么只有两个人理解广义相对论。今天，成千上万的大学毕业生能理解，并且几百万人至少熟悉这种思想。如果科学家发现了一套完备的统一理论，以同样方法将其

消化并简化，在学校中至少讲授其梗概，则只是迟早的问题。那时我们大家就都能够对制约宇宙并对我们的存在负责的定律有所理解。

即使我们发现了一套完备的统一理论，但由于两个原因，这并不表明我们能够一般性地预言事件。第一是量子力学的不确定性原理给我们的预言能力设立的限制，对此我们无法克服。然而，比第一个限制更为严厉的实际上是第二个限制。这是由以下的事实引起的，除了非常简单的情形，我们多半不能准确解出这样一种理论的方程。正如我们说过的，对于包含一个核与多于一个电子的原子，无人能够准确地解出其量子方程。甚至在像牛顿引力论这么简单的理论中，我们都不能准确地求解  $n$  体的运动，而且随着物体的数目和理论复杂性的增加，困难越来越大。近似解对于应用通常已经足够了，但是它们和“万物统一理论”这一术语激起的伟大期望毫不匹配！

今天，除了在最极端条件下以外，我们已经知道规范物体在所有条件下的行为的定律。特别是，

我们已知道作为所有化学和生物的基础的基本定律。然而，我们肯定还不能将这些学科归于已解决的问题的地位。而且我们用数学方程来预言人类行为成效甚微！所以，即使我们确实找到了基本定律的完备集合，在未来的岁月里，我们仍面临着在智慧上挑战性的任务，那就是发展更好的近似方法，使得在复杂而现实的情形下，能够做出对可能结果的有用预言。一个完备的协调的统一理论只是第一步：我们的目标是完全理解我们周同的事件以及我们自身的存在。

## 第 12 章

### 结论

我们发现自己处于令人闲惑的世界中。我们要理解周寸戈围所看到的一切的含义，并且寻问：宇宙的本质是什么？我们在其中的位置如何，以及宇宙和我们从何而来？宇宙为何是这个样子？

我们试图采用某些世界之图来回答这些问题。恰如一个无限的乌龟塔背负平坦的地球是这样的图象一样，超弦理论也是一种图。虽然后者比前者更数学化，更准确得多，但两者都是宇宙的理论。两个理论都缺乏观测的证据：没人看到一个背负地球的巨龟，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。除非可以用它解释人们在百慕大三角消失的传说，否则这个理论和经验不一致！



从乌龟塔到弯曲空间  
古代和现代宇宙观。

最早在理论上描述和解释宇宙的企图牵涉到这样的思想：具备人类情感的灵魂控制着事件和自然现象，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物体，诸如河流、山岳以及包括太阳和月亮这样的天体之中。我们必须向它们祈祷并供奉，以保证土壤肥沃和四季循环。然而，我们逐渐注意到一些规律：太阳总是东升西落，而不管我们是否用牺牲向太阳神供奉。此外，太阳、月亮和行星沿着可事先被预言得相当准确的



轨道穿越天穹。太阳和月亮仍然可以是神祇，只不过是服从严格定律的神祇。如果人们不把为约书亚停止太阳运行之类的神话当真，则这一切显然是毫无例外的。

最初，只有在天文学和其他一些情形下，这些规律和定律才是显而易见的。然而，随着文明的发展，特别是近 300 年间，越来越多的规律和定律得到发现。这些定律的成功，使得拉普拉斯在 19 世纪初提出科学的决定论；也就是说，他认为，存在一族定律，只要给定宇宙在某一时刻的状态，这些定律就能精确决定宇宙的演化。

拉普拉斯的决定论在两个方面是不完整的：它没讲应该如何选择定律，也没指定宇宙的初始状态。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，他将不再干涉宇宙。事实上，上帝被局限于 19 世纪科学不能理解的领域里。

我们现在知道，拉普拉斯对决定论的希望，至少按照他所想的方式，是不能实现的。量子力学的

不确定性原理意味着，某些成对的量，比如粒子的位置和速度，不能同时被完全精确地预言。量子力学通过一类量子理论来处理这种情形，在这些理论中粒子没有精确定义的位置和速度，而是由一个波来代表。这些量子理论给出了波随时间演化的定律，在这种意义上，它们是决定论的。于是，如果我们知道某一时刻的波，我们便可以将它在任一时刻推算出。只是当我们试图按照粒子的位置和速度对波做解释的时候，不可预见性的随机的要素才出现。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。只不过是我们将波硬套到我们关于位置和速度的先人为主的观念之上而已。由此导致的不协调乃是表面上不可预见性的原因。

事实上，我们已经将科学的任务重新定义为发现定律，以使我们能在由不确定性原理设定的界限内预言事件。然而，仍然留下问题：如何或者为何选取宇宙的定律和初始状态？

本书特地突出制约引力的定律，因为正是引力使宇宙的大尺度结构成形，即使它是 4 类力中最弱

的一种。引力定律和直到相当近代还为人深信的宇宙在时间中不变观念不相协调：引力总是吸引，这一事实意味着，宇宙的演化方式两者必居其一，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肯定有一个具有无限密度的状态，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，亦即大挤压，这是时间的终结。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。在大爆炸时和其他奇点，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如何开始。

当我们将量子力学和广义相对论结合，似乎产生了前所未有的新的可能性：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，但具有更多的维。看来这种思想能够解释宇宙间已观察到的许多特征，诸如它的大尺度一致性，还有包括星系、恒星甚至人类等在小

尺度上对此均匀性的偏离。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：“在建造宇宙时上帝有多少选择性？”如果无边界假设是正确的，上帝就根本没有选择初始条件的自由。当然，上帝仍有选择宇宙所服从的定律的自由。然而，这也许实在并没有那么多选择性；很可能只有一个或数目很少的完备的统一理论，例如弦论，它们是自洽的，并且允许像人类那样复杂结构的存在，这些结构能够研究宇宙定律并询问上帝的本性。

即使只有一种可能的统一理论，那也只不过是一组规则和方程而已。是什么赋予这些方程以活力去制造一个为它们所描述的宇宙呢？通常构造一个数学模型的科学方法不能回答为什么会有一个为此模型所描述的宇宙这个问题。为什么宇宙要克服这么多麻烦以获取存在？难道统一理论如此咄咄逼人，以至于其自身之实现不可避免？或者它需要一个造

物主，若是这样，它对宇宙还有其他效应吗？又是谁创造了它？

迄今为止，大部分科学家太忙于发展描述宇宙为何物的理论，以至于没工夫过问为什么。另一方面，以寻根究底为己任的哲学家跟不上科学理论的进步。18 世纪，哲学家把包括科学在内的整个人类知识当做他们的领域，并讨论诸如宇宙有无开端的问题。然而，19 世纪和 20 世纪，对哲学家或除了少数专家以外的任何人来说，科学变得过于专业化和数学化了。哲学家把他们的质疑范围缩小到如此程度，以至于连维特根斯坦，这位 20 世纪最著名的哲学家都说道：“哲学余下的任务仅是语言分析。”这是从亚里士多德到康德伟大哲学传统的何等的堕落啊！

如果我们确实发现了一个完备的理论，在广泛的原理上，它应该及时让所有人理解，而不仅仅让几个科学家理解。那时我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通通的人，都能参与讨论我们和宇宙为什么存在的问题。如果我们对此找到了答案，

那将是人类理性的终极胜利——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·因斯坦与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，并且在战后致力于阻止核战争的爆发。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，用爱因斯坦自己的话来说，他的一生“一半用于政治，一半用于方程”。

爱因斯坦最早从事政治活动是在第一次世界大战期间，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。他拥护非暴力反抗以及公开鼓



励人民拒绝服兵役，因而不受他的同事们欢迎。后来，在战时，他又致力于调解和改善国际关系。这也使他不受欢迎，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，但他拒绝接受《圣经》上关于上帝的说法。然而，在第一次世界大战之前和期间，他越发看清反犹主义，这导致他逐渐认同犹太团体，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。他的理论开始受到攻击，甚至有人成立了一个反爱因斯坦的组织。有一个人因教唆他人去谋杀爱因斯坦而被定罪(却只罚了 6 美金)。但爱因斯坦是冷静的。当一本题为《100 个反爱因斯坦的作家》的书出版时，他反驳道：“如果真是我错了的话，有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，他宣布不再回德国。后来纳粹冲锋队查抄了他的房子，并没收了他的银行存款。一家柏林报纸的头条

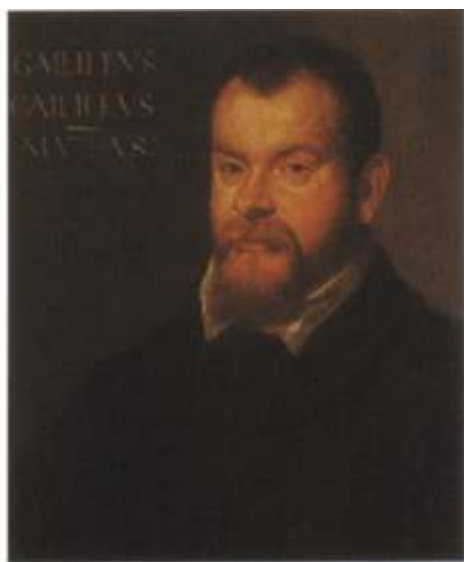


写道：“来自爱因斯坦的好消息——他不回来了。”  
面对着纳粹的威胁，爱因斯坦放弃了和平主义，由于担心德国科学家会制造核弹，他终于建议美国应该发展自己的核弹。但是，甚至在第一枚原子弹爆炸之前，他就曾经公开警告过核战争的危险，并提议对核武器进行国际控制。

终其一生，爱因斯坦致力于和平的努力可能成效甚微——肯定不受欢迎。然而，1952年他得到担任以色列总统的提议，他对犹太复国主义事业的畅言无忌的支持得到了充分的承认。但他谢绝了。他说他认为自己在政治上过于天真。可是，也许他真正的理由却并非如此，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，而方程却是永恒的东西。”

## 伽利略·伽利雷

伽利略可能比任何其他人更有资格称为近代科学的奠基人。他与天主教会名闻遐迩的冲突对他的哲学是极重要的，因为伽利略是最早做出如下论断的人之一：人类有望理解世界如何行为，而且我们能够通过观察现实世界来做到这一点。伽利略很早就相信哥白尼理论（即行星绕太阳公转），但只有当他发现了支持这一观念的证据后，才公开支持。他



用意大利文写有关哥白尼理论的文章（没有用通常的学院式拉丁文），并且他的观点很快就广泛地传播到大学之外。这惹怒了亚里士多德派的教授们，他们联合起来反对他，并极力说服

天主教会禁止哥白尼主义。

伽利略为此担心，他赶到罗马去向天主教会当局当面申诉。他争辩道，《圣经》并不试图告诉我们任何科学理论，而且通常都是假定，在《圣经》和常识发生矛盾的地方，《圣经》是以讽喻的方式叙述的。

但是教会害怕这样的丑闻可能削弱它对新教的斗争，所以采取了镇压的手段。1616 年，天主教会宣布哥白尼主义是“虚假的和错误的”，并命令伽利略再也不准“保卫或坚持”这一学说。伽利略勉强接受了。

1623 年，伽利略的一位老友成为教皇，伽利略立即试图为 1616 年的判决翻案。他失败了，但他设法获得了准许，在两个前提下写一本讨论亚里士多德和哥白尼理论的书：他不能有倾向，同时要得出结论，无论如何人不能确定世界是如何运行的，因为上帝会以人难以想象的方式来达到同样的效果，而人类不能限制上帝的万能。

这本题为《关于两个大世界体系的对话》的书，于 1632 年在审查官的全力支持下完成并出版了——并且立刻被全欧洲欢呼为文学和哲学的杰作。不久教皇就意识到，人们把这本书视为拥护哥白尼主义的令人信服的论证，后悔允许该书出版。教皇指出，虽有审查官正式批准出版该书，但伽利略依然违背了 1616 年的禁令。他把伽利略带到宗教法庭，宣布对他终身软禁，并命令他公开放弃哥白尼主义。伽利略第二次被迫服从。

伽利略仍然是一个忠实的天主教徒，但是他对科学独立的信仰从未动摇过。1642 年，即他逝世前 4 年，当时他仍然被软禁着，他第二本主要著作的手稿被偷运给一个荷兰的出版商。正是这本被称为《两种新科学》的书，甚至比支持哥白尼更进一步，成为现代物理学的发端。

## 艾萨克·牛顿

艾萨克·牛顿是一个不讨人喜欢的人。他和其他院士的入关系声名狼藉。他在激烈的争吵中度过晚年的大部分时间。随着那部肯定是物理学有史以来最有影响的书——《自然哲学的数学原理》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，并成为第一个被授予爵位的科学家。

不久，牛顿就与皇家天文学家约翰·夫莱姆斯梯德发生冲突。他起初曾为牛顿《自然哲学的数学原理》一书提供急需的数据，但是他后来却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，然后强迫立即公布这些数据。最后，他指使夫莱姆斯梯德的冤家对头爱德蒙·哈雷夺取夫莱姆斯梯德的工作成果，并且准备出版。可是夫莱姆斯梯德告到法庭去，在最紧要关头赢得了法庭的判决——不得发行这部剽窃的著作。牛顿被激怒了，作为报复，他在《自然哲学的数学原理》后来的版本中系统地删除了所有来自夫莱姆斯梯德的引证。

他和德国哲学家哥特夫瑞德·莱布尼茨之间发生了更严重的争论。莱布尼茨和牛顿各自独立地发展了称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茨早若干年，可是他比莱布尼茨晚很久才出版他的著作。于是发生了关于谁是第一个发现者的大争吵，科学家们激烈地为双方做辩护。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，虽然是以他朋友的名义出版！当争论日趋激烈时，莱布尼茨犯了向皇家学会起诉来解决争端的错误。牛顿作为其主席，指定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，牛顿后来自己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼茨的剽窃行为。即便如此，牛顿心犹未足，他又在皇家学会的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。据报道，莱布尼茨死后，牛顿扬言他为“伤透了莱布尼茨的心”而洋洋得意。

在这两次争吵期间，牛顿已经离开剑桥和学术界。在剑桥他曾积极从事反天主教政治，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差。在这里，他以社会上更能接受的方式，施展他那狡狴和刻薄的能耐，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绞刑架。

## •小辞典•

**绝对零度：**所能达到的最低温度，在此温度下物体没有热能。

**加速度：**物体速度改变的速率。

**人存原理：**我们之所以看到宇宙是这个样子，是因为如果它不是这样的话，我们就不会在这里去观察它。

**反粒子：**每个类型的物质粒子都有相对应的反粒子。当一个粒子和它的反粒子碰撞时，两者就湮灭，只留下能量。

**原子：**通常物质的基本单元，是由很小的核子(包括质子和中子)以及围着它转动的电子构成。

**大爆炸：**宇宙开端的奇点。

**大挤压：**宇宙终结的奇点。

**黑洞：**时空的一个区域，因为那里的引力是如此之强，以至任何东西，甚至光都不能从该处逃逸出来。



**坐标：**指定时空中一点的位置的一组数。

**宇宙常数：**爱因斯坦使用的一个数学手段，它赋予时空一个嵌入的膨胀倾向。

**宇宙学：**对整个宇宙的研究。

**暗物质：**在星系、星系团以及可能在星系团之间的物质，这种物质不能直接被观测到，但是可以由它的引力效应被检测到，宇宙中的质量多达 90% 可能处于暗物质的形式。

**对偶性：**导致相同的物理结果的，表面上不同的理论之间的对应。

**爱因斯坦-罗森桥：**连接两个黑洞的时空的细管。

还请参见虫洞。

**电荷：**粒子的一个性质，由于这性质粒子排斥(或吸引)其他带有相同(或相反)符号电荷的粒子。

**电磁力：**在带电荷的粒子之间引起的力；它是四种基本力中第二强的力。

**电子：**带有负电荷并围绕着原子核转动的粒子。

**弱电统一能量：**大约为 100 吉电子伏的能量，在比这能量更大时，电磁力和弱力之间的差别消失。

**基本粒子：**被认为不可再分的粒子。

**事件：**由它的时间和位置所指明的在时空中的点。

**事件视界：**黑洞的边界。

**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在一点存在的粒子。

**频率：**对一个波而言，在 1 秒内完整循环的次数。

**伽马射线：**波长非常短的电磁射线，是由放射性衰变或由基本粒子碰撞产生的。

**广义相对论：**爱因斯坦基于如下思想的理论，即科学定律对所有的观察者，不管他们如何运动，都必须是相同的。它将引力解释成四维时空的曲率。

**测地线：**两点之间最短(或最长)的路径。

**大统一理论(GUT)：**一种统一电磁力、强力和弱力的理论。

**光秒(光年)：**光在 1 秒(1 年)的时间里走过的距离。

**磁场：**引起磁力的场，现在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：**起源于炽热的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(波长为几厘米的射电波)的形式呈现出来。

**中微子：**只受弱力和引力影响的极轻的粒子。

**中子：**一种和质子非常类似的但不带电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是中子。

**中子星：**在超新星爆发后，有时一个恒星中心的物质的核坍缩成一团密集的中子，这种余下的冷的恒星称做中子星。

**无边界条件：**宇宙是有限的但是没有边界的思想。

**核聚变：**两个核碰撞并合并形成单独的更重的核的过程。

**核：**原子的中心部分，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：**一种利用电磁铁能够对运动的带电粒子加速，给它们更多能量的机器。

**相位：**对一个波，特定的时刻在它循环中的位置：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)只能被发射或吸收分立的量子，其能量与它们的频率成正比，和它们的波长成反比的思想。

**正电子：**电子的(带正电荷的)反粒子。比例：“ $x$  正比于  $y$ ”，表示当  $y$  被乘以任何数时， $x$  也如此；“ $x$  反比于  $y$ ”，表示当  $y$  被乘以任何数时， $x$  被那个数除。

**质子：**一种和中子非常类似的但带正电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是质子。

**量子力学：**从普朗克量子原理和海森伯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由 3 个夸克组成。

**雷达：**利用脉冲射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类型的原子核。

**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：**时空中的一点，在该处时空曲率(或者一些其他的物理量)变得无限大。

**时空：**四维的空间，上面的点是事件。空间维：三维中的任何一维——也就是除了时间维外的任何一维。

**狭义相对论：**爱因斯坦的基于如下思想的理论，即科学定律在没有引力现象时，对所有进行自由运动的观察者，无论他们的运动速度如何，都必须相同。

**谱：**构成一个波的分频率。太阳谱的可见光部分可以在彩虹中看见。

**弦论：**物理学的理论，在该理论中粒子被描述成弦上的波。弦具有长度，但没有其他维。

**强力：**4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核。

**不确定性原理：**海森伯表述的一个原理，该原理说，人们永远不能够精确地同时知道粒子的位置和速度；对其中的一个知道得越精确，则对另外一个就知道得越不精确。

**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，认为在波和粒子之间没有区别；粒子有时可以像波一样行为，而波有时可以像粒子一样行为。

**波长：**在一个波中，两个相邻波谷或波峰之间的距离。

**弱力：**4 种基本力中仅次于引力的第二弱的，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：**引力场作用在物体上的力。它和质量成正比，但又不同于质量。

**虫洞：**联结宇宙的遥远区域的时空细管。虫洞还可以联结到平行或婴儿宇宙，并且能够提供时间旅行的可能性。

## 致谢

我们对以下各位表示诚挚的感谢：我们的编辑，班坦姆出版社的安·哈里斯。借助于她丰富的经验和卓越的才能，我们才能使手稿精益求精。班坦姆出版社的艺术总监格伦·埃德尔斯坦为本书花费了大量心血。我们的艺术团队菲利普·杜恩、詹姆斯·张和基斯·维宁波斯。他们花时间学习物理，进而在不损害物理内容的前提下，把这本书做得光彩夺目。我们的代理人，作者之家的阿尔·朱克曼和苏珊·金斯堡贡献了他们的智慧、关心和支持，莫尼卡·盖伊进行了校对。还有那些在我们追求明晰的过程中，热心地阅读不同阶段的手稿的各位。他们是：多娜·斯各特、阿列克塞·蒙洛迪诺、尼古拉·蒙洛迪诺、马克·希勒里、约书亚·韦伯曼、史蒂芬·尤拉、罗伯特-巴科维奇、马莎·娄特、凯瑟琳·玻尔、阿曼达·伯根、杰弗里·玻依默、金伯利-柯默、彼德·库克、

马修·狄金森、德鲁·多诺瓦尼克、大卫·弗拉林格、伊林诺·格鲁瓦尔、艾丽西娅·金斯敦、维克多·拉蒙德、迈克尔·梅尔顿、米克尔·穆伦、马修·里查兹、米歇尔·罗斯、萨拉·斯米特、柯提斯·西蒙斯、克里斯廷·韦伯和克里斯托弗·赖特。

图书模板由[爱书网 www.ilovebook.cn](http://www.ilovebook.cn) 提供