

《果壳中的宇宙》

第一章 相对论简史

霍金

爱因斯坦是如何为 20 世纪两个基本理论，即相对论和量子论奠基的。

阿尔伯特·爱因斯坦，这是位狭义和广义相对论的发现者，1879 年诞生于德国的乌尔姆。次年他的全家即迁往慕尼黑。在那里他的父亲赫曼和叔父各自建立了一个小型的不很成功的电器公司。阿尔伯特并非神童，但是宣称他在学校中成绩劣等似乎又言过其实。1894 年他的父亲公司倒闭，全家又迁往意大利的米兰。他的父亲决定让他留在慕尼黑，以便完成中学学业，但是他讨厌其独裁主义，几个月后离开了，前往意大利与家人团聚。后来他在苏黎完成学业。ETH 的教授们不喜欢他好辩的性格以及对权威的蔑视，他们中无人愿意雇他为助手，而这恰恰是进入学术生涯的正常途径。两年以后，他终于在伯尔尼的瑞士专利局获得一个低级职位。1905 年正是在专利局任上，他写了三篇论文。这三篇论文不仅奠定了他作为世界最主要的科学家之一的地位，而且开启了两项观念革命，这革命改变了我们对时间、空间以及未来本身的理解。

在 19 世纪末，科学家们相信他们已经处于完整描述宇宙的前夕。他们好象空间充满了所谓“以太”的连续介质。光线和无线电信号是在以太中的波动，如同声音为空气中的压力波一样。对于完整理论所需要的一切只不过是仔细测量以太的弹性性质。事实上，为了进行这种测量，哈佛大学建立了杰佛逊实验室。整个建筑物不能用任何铁钉，以免干扰灵敏的磁测量。然而策划者忘记了构筑实验室和哈佛大部分楼房的褐红色砖头含有大量的铁。这座建筑物迄今仍在使用，虽然哈佛仍然不能清楚，不用铁钉的图书馆地板究竟可以支撑多少卷藏书。

到世纪交替之际，开始出现可和穿透一切的以太观的偏差。人们预料光在通过以太时以恒定的速度旅行；但如果你通过以太顺着光的方向运动，它的速度会显得更快。

然而一系列实验不支持这个观念。阿尔伯特·迈克尔逊和爱德华·莫雷于 1887 年在俄亥俄的克里夫兰的凯思应用科学学校所进行的实验为其中最为仔细最为精确者。他们对相互垂直的两束光的速度进行比较。随着地球绕轴自转以及公转，仪器以变化的速度和方向通过以太运动。但是迈克尔逊和莫雷的两光束之间没有周日和周年的差别。不管人们在哪个方向上多快运动，光似乎总是以相同的速率相对于他的所在地运动。

爱尔兰的物理学家乔治·费兹杰拉德和荷兰物理学家亨得利克·洛伦兹，在迈克尔逊-莫雷的基础上建议，物体在通过以太运动时会收缩，而且钟表要变慢。这种收缩和钟表变慢使人们测量到相同的光速，而不管他们相对于以太如何运动。然而，爱因斯坦在 1905 年 6 月撰写的一篇论文中指出，如果我们不能检测出他是否穿越时空的运动，则以太观念纯熟多余。想反的，他以为科学定律对于所有自由运动的观察者都显得相同的假设为出发点。特别是，不管他们如何快速运动，都应测量到相同的光速。光速和他们运动无关，并且在所有方向上都相同。

这就需要抛弃一个观念，即存在一个所有钟表都测量的成为时间的普适的量。相反的，

每个人都有他或者她自己的个人时间。如果两个人处于相对静止状态，则他们的时间就一致，但是一旦他们相互运动则不一致。

这已经被很多实验所证实，其中包括两台以相反方向绕世界飞行的精确的钟表返回后显示时间的微小差异。这似乎暗示，人们若要活的更长久，应该不断地飞向东去，使得地球的旋转叠加上飞机的速度。然而，人们所获得的比一秒还短得多的生命延长，远远不及劣质飞机餐对健康的残害。

爱因斯坦的假定，即自然定律对于所有有自由运动的观察者应该显得相同，是相对论的基础。之所以这么称呼是因为它意味着只有相对运动才是重要的。它的美丽和简单征服了许多科学家，但是仍然有许多人反对。爱因斯坦推翻了 19 世纪科学家的两个绝对物：以太代表的绝对静止和所有钟表都测量的或普适时间。许多人觉得这是一个另人不安的概念。他们问道，这是否意味着，万物都是相对静止的，甚至不存在绝对的道德标准呢？这种苦恼持续穿于 20 世纪 20 年代和 30 年代。1921 年爱因斯坦获得诺贝尔奖时，其颂词是至关重要的，但是按照他的标准却是相对次要的，也是在 1905 年做过的研究。它没有提及相对论，因为相对论被认为太过于争论性了。尽管如此，现在科学界已经完全接受了相对论，无数的应用证实了他的预言。

相对论的一个非常重要的推论是质量和能量的关系。爱因斯坦关于光速对于任何人而言都应该显得相同的假设，意味着没有任何运动的比光还快。当人们应能量加速任何物体，无论是粒子或者空间飞船，实际上发生的是，它的质量增加，使得对她进一步加速更困难。要把一个粒子加速到光速要消耗无限大能量，因而是是不可能的，正如爱因斯坦的著名公式总结的： $E=mc^2$ ，质量和能量是等效的。这也许是物理学中的唯一的妇孺皆知的公式。它的一项后果是意识到，如果铀原子核裂变总质量稍小的两个核，就会释放巨大的能量。

1939 年世界大战迫在眉睫，众多意识到这些含义的物理学家都说服爱因斯坦克服其和平主义原则，以他的权威给罗斯福总统写一封信，要求美国开始核研究计划。

这就导致了曼哈顿规划并最终产生了于 1945 年在日本的广岛和长崎爆炸的原子弹。有人将原子弹归咎于爱因斯坦发现了智能关系；但是这和把飞机失事归咎于牛顿发现了引力很类似。爱因斯坦本人没有参与曼哈顿规划，并且为投原子弹而感到震惊。

爱因斯坦 1905 年的开创性论文为他建立了科学声望，但是直到 1909 年他回到苏黎世，这一次是返回苏黎世高工。尽管在欧洲的许多地方，甚至在大学中盛行反犹主义，他现在是学术界的巨星。维也纳和乌特勒希特都邀他任教，但是他选择了柏林的普鲁士科学院的研究员职务，因为这样他可以摆脱教学。1914 年 4 月他迁往柏林，不久他的妻子和两个儿子也来团聚。然而婚姻不谐已有时日，他的家庭不久返回苏黎世。尽管他偶尔去看望他们，他和妻子最终还是离婚了。爱因斯坦后来娶了他住在柏林的表姐爱尔莎。在战争年代里他过着独身生活，避免了家事纠缠，也许是他在这段期间科学上多产的一个原因。

虽然相对论和制约电磁学的定律配合的天衣无缝，它却不能和牛顿的引力定律想协调。牛顿引力定律说，如果果人们在时间的区域改变物质分布，引力场的改变在宇宙其他任何地方就会瞬间被察觉到。这不仅意味着人们可以发送比光还快的信号；为了知道这里瞬刻的含

义，它还需要存在绝对或普适的时间。这正式那种被相对论抛弃了的，并被个人时间所取代的时间。

1907 年当爱因斯坦还在伯尔尼的专利局工作时，他就知道了这个困难，但是直到 1911 年他在布拉格时才开始认真地思考这个问题。他意识到在加速度和引力场之间存在一个紧密的关系。待在一个封闭的盒子里，譬如升降机中的某人不能将盒子静止地处于地球引力场中和盒子在自由空间中被火箭加速这两种情形区别开来。

如果地球是平坦的，人们既可以说服苹果因为引力而落到牛顿头上，也可以等效地说因为牛顿和地球被往上加速。然而，对于球形地球加速度和引力之间的不等效似乎不成立，世界相反两边的人要停留在固定的相互距离上就必须在反方向上被加速。

在爱因斯坦 1921 年回苏黎世时，他灵感奔涌，意识到如果时空几何是弯曲的，而不是想迄今所假定的那样平坦，则等效成立。他的思想是质量和能量以一种还未被确定的方式将时空弯曲。诸如苹果或者行星的物体在通过时空的企图沿着直线运动，但是因为时空是弯曲的，所以他们的轨道显得被引力场所弯折。

爱因斯坦借助于他的朋友玛索尔·格罗斯曼通晓了弯曲时空和面的理论。在此之前乔治·弗里德里希·黎曼把这种理论发展成一种抽象的数学；黎曼从未想到它和实在世界有何相干。1913 年爱因斯坦和格罗斯曼合写了一篇论文，他们在论文中提出了这样的思想，我们认为引力的只不过是时空为弯曲的这一事实的表现。然而，由于爱因斯坦的一个错误，他们未能找到将时空曲率和处于其中的质量和能量相联系的方程。爱因斯坦在柏林继续研究这个问题。他不受家事的烦扰，而且不受战争影响，终于在 1915 年 11 月找到了正确的方程。1915 年夏天，当他访问哥廷大学时曾经和数学家大卫·希尔伯特讨论过他的思想，希尔伯特甚至比爱因斯坦还早几天独立找到了同一方程。尽管如此，新理论的成功应归功于爱因斯坦：把引力和时空弯曲联系起来正是爱因斯坦的思想。这个时期的德国作为文明国家是值得赞扬的，甚至在战时科学讨论和交流仍然可以不收干扰的进行。这和 20 年后的纳粹时期相比真是天壤之别。

弯曲时空的理论被称为广义相对论，以和原先没有引力的理论相区别，后者现在被认为狭义相对论。1919 年当英国赴西非的探险队在日食观察到光线通过太阳临近被稍微偏折，广义相对论因而得到辉煌的确认。这正是空间和时间被弯曲的直接证据。它激励了从欧几里得在公元前 300 年左右写下《几何原本》以来，我们对自身生活其间的宇宙之认识的最大变革。

爱因斯坦的广义相对论把空间和时间从一个事件在其中发生的被动的背景转变成宇宙动力学的主动参与者。这就引发了一个伟大的问题，这个问题在 21 世纪仍然处于物理学的最前沿。宇宙充满物质，而物质弯曲时空使得物体落到一块。爱因斯坦发现他的方程没有描述一个静态的，也就是在时间中不变的宇宙解。他宁愿不放弃这样一种永恒的宇宙，这正是他和其他大多数人所深信的，而不惜对该方程进行补缀，添加上称为宇宙常数的一项，使得物体相互离开。宇宙常数在相反的意义上将时空弯曲，使得物体相互离开。宇宙常数的排斥效应可以平衡物质的吸引效应，这样就容许宇宙具有静态解。这是理论物理学的历史中错失的最重大的机会之一。如果爱因斯坦坚持其原先的方程，他就能够预言宇宙要么正在膨胀，要么正在收缩，二者必居之一。直至 20 世纪 20 年代在威尔逊山上用 100 英寸望远镜进行观

测，人们才认真接受宇宙随时间变化的可能性。

这些观测揭示了，星系和我们像距越远，则越快速地离开我们而去。宇宙正在膨胀，任何两个星系之间的距离会随时间恒定地增加。这个发现排除了为获得静态宇宙解对宇宙常数的重要。爱因斯坦后来把宇宙常数称为他一生中最大的错误。然而，现在看来这也许根本不是什么错误：将在第三章中描述现代观测暗示，也许确实存在一个小的宇宙常数。广义相对论彻底地改变了有关宇宙起源和命运的讨论。一个静态的宇宙可以存在无限长时间，或者以它目前的形状在过去的某个瞬间创生。然而，如果现在星系正在相互分开，这表明它们过去曾经更加靠近。大约 150 亿年以前，所有它们都会相互靠在一起，而且密度非常大。天主教牧师乔治·拉玛特是第一位研究我们今天叫做大爆炸的宇宙起源。他把这种状态称作“太初原子”。

爱因斯坦似乎从未认真地接受过大爆炸。他显然认为，如果人们随着星系的运动在时间上回溯过去，则一个一致膨胀宇宙的简单模型就会失效，因为星系的很小的倾向速度就会使它们相互错开。他认为，宇宙也许早先有过一个收缩相，在一个相当适度的密度下反弹成现在的膨胀。然而，我们现在知道，为了在早期宇宙中核反应能产生在我们周围观察到的轻元素数量，其密度曾经至少达到每立方英寸 10 吨，而且温度达到 100 亿度。况且，微波背景的观测显示，密度也许一度达到每立方英寸 1×10^{72} 吨。我们现在还知道，爱因斯坦的广义相对论不允许宇宙从一个收缩相反弹到现在的膨胀。正如在第二中将要讨论的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，广义相对论预言宇宙大爆炸起始。这样爱因斯坦理论的确隐含着时间有一个开端，虽然他从不喜欢这个思想。

爱因斯坦甚至更不愿意承认广义相对论的预言，即当一个大质量恒星到达其生命的钟点，而且不能产生足够的热去平衡其自身使它收缩的引力时，时间将会到达尽头。爱因斯坦认为，这样的恒星将会在一终态安定下来。但是我们现在知道，对于比太阳质量两倍还大的恒星并不存在终态的结构。这类恒星将会继续收缩直至它们变为黑洞。黑洞是时空中如此弯曲的一个区域，甚至连光线都无法从那里逃出来。

彭罗斯和我证明了，广义相对论预言，无论是该恒星，还是任何不慎落入黑洞的可怜的航天员，其时间在黑洞中都将到达终点。但是无论是时间的开端还是终结都是广义相对论不能被定义之处。这样理论不能预言从大爆炸会出现什么。有些人将此视作上帝具有随心所欲创生宇宙的自由启示，但是其他人觉得宇宙的开端应受在其他时刻成立的同样定律的制约。真如将在第三章中所描述的那样，我们为达到这一目标已经取得一些进展。但是我们尚未完全理解宇宙的起源。

广义相对论在讨论大爆炸处失效的原因是它和量子理论不协调。量子理论是 20 世纪早期的另一项伟大的观念变革。1900 年马克思普朗克在柏林发现，如果光只能以分立的称为量子的波包发射或者吸收，就可以结实来自一个炽热物体的辐射。这是向量子理论进展的第一步。1905 年爱因斯坦在专利局撰写的开创性论文中的一篇里指出，普朗克的量子假设可以解释所谓的光电效应。光电效应是讲当光照射到某些金属表面时释放电子的方程式。这是现代光检测器和电视摄像机的基础，也正式因为这个工作，爱因斯坦获得了物理学的诺贝尔奖。

直至 20 世纪 20 年代爱因斯坦继续研究量子的思想，但是哥本哈根的威纳·海森堡，剑桥的保罗·狄拉克和苏黎世的厄文·薛定谔的工作使他深为困扰。这些人发展了所谓量子力学

的实在的新图象。微笑的离子不再具有确定的位置和速度。相反的，粒子的位置被确定得越准确，其速度则被确定得越不准确，反之亦然。其本定律中的这一随机的不可预见的要素使得爱因斯坦震惊，他从未全盘接受过量子力学。他的著名格言表达了他的感受：“上帝不玩骰子”。然而，新的量子定律能够解释整个范围原先的量子定律能够解释整个范围原先未能阐明的现象以及和观测极好地符合，所以其他为数不多的科学家欣然接受他们的有效性。它们是现代化学，分子生物学和电子学发展的基础，也是近 50 年来使世界发生天翻地覆地变化的技术的基础。

1933 年 12 月获悉纳粹和希特勒即将在德国上台，爱因斯坦离开德国并且四个月后放弃德国国籍。他的最后 20 年是在新泽西普林斯顿的高等数学研究所度过的。

纳粹在德国发动了反对“犹太人科学”运动，而许多德国科学家是犹太人；这是德国不能制造原子弹的部分原因。爱因斯坦和相对论成为这个运动的主要目标。当他听说出版为《100 个反爱因斯坦的作家》的一本书时，回答道：“何必要 100 个人呢？如果我是错了，一个人就足够了。”第二次世界大战之后，他要求盟国政府建立一个世界政府以控制原子弹。1948 年他拒绝了担任以色列新国家总统的邀请。他有一回说：“政治是为当前，而一个方程却是一种永恒的东西。”广义相对论的爱因斯坦方程是他最好的墓志铭和纪念物。它们将和宇宙同在。

世界在上一世纪的改变超过了以往的任一世纪。其原因并非新的政治后经济的教义，而是由于基础科学的进步导致的巨大发展。还有何人比阿尔伯特·爱因斯坦更能代表这些进步呢？

第二章 时间的形态

爱因斯坦的广义相对论使时间具有形态。这如何与量子理论相互和谐。

时间为何物？它是否像古老的赞歌说的那样，把我们所有的梦想一卷而空的东流逝波？抑或像一直前进，却又回到线上的早先过站。

19 世纪作家查里斯·朗母写到：“世间万物没有任何东西像时间和空间那么使我困惑。然而没有任何东西比时间和空间更少使我烦恼，因为我从不想起它们。”我们中的大多数人早本部分时间不去考虑时间和空间，不管他们为何物；但是我们所有人有时极想知道时间是什么，它如何开始，并且把我们知道何方。

关于时间或者任何别的概念的任何可靠性的科学理论，依照我的意见，都必须基于最可操作的科学哲学之上：这就是卡尔·波普和其他人提出的实证主义的方法。按照这种思维方式，科学理论是一种数学模型，它能描述和整理我们所进行的观测。一种好的理论可在一些最简单假设的基础上描述大范围的现象，并且做出被验证的预言。如果预言和观测相一致，则该理论在这个检验下存活，尽管它永远不能被证明是正确的。另一方面，如果观测和预言先抵触，人们必须将该理论抛弃或者修正。如果人们如同我们那样采用实证主义立场，他就

不能说时间究竟为何物。人们说能做的一切，是将所发现的描述成时间的一种非常好的数学模型并且说明它能预言什么。

艾萨克·牛顿在 1687 年出版的《数学原理》一书中为我们给出时间和空间的第一个数学模型。牛顿担任剑桥的卢卡斯教席。虽然在牛顿那个时代这一教席不用电动驱动。时间和空间在牛顿的模型中是事件发生的背景，但是这种背景不受事件的影响。时间和空间相互分离。时间被认为是一跟单独的线，或者是两端无限延伸的轨道。时间本身被认为是永恒的，这是它在它已经并将永远存在的意义上来说的。与此相反，大多数人认为有宇宙是在仅几千年前已多少和现状相同的形态创生的。这使哲学家们忧虑，譬如德国思想家伊曼努尔·康德。如果宇宙的的确确是被创生的，那么为何要在创生之前等待无限久？另一方面，如果宇宙已经存在了很久，为何将要发生的每一件事不早已发生，使得历史早已完结？特别是，威胁宇宙尚未到达热平衡，使得万物都具有相同温度？

康德把这个问题称作“纯粹理性的二律背反”因为它似乎是一个逻辑矛盾：它没有办法解决。但是它只是在牛顿数学模型的矿架里才是矛盾。时间在牛顿模型中是根无限的线，独立于在宇宙发生的東西。然而，正如我们在第一章中看到的，爱因斯坦在 1915 年提出了一种崭新的数学模型：广义相对论。在爱因斯坦论文以后的年代里，我们添加了一些细节，但是爱因斯坦提出的理论仍然是我们时间和空间的基础。本章和下几章将描述，从爱因斯坦革命性论文之后的年代里我们观念发展。这是许许多多人合作成功的故事，而且我为自己的小贡献感到自豪。

广义相对论把时间维和空间的三维合并形成了所谓的时空。该理论将引力效应集体化为，宇宙中物质和能量的分布引起时空弯曲和畸变，使之不平坦的思想。这个时空是弯曲的，它们的轨迹显得被弯曲了。它们的运动犹如受到引力场的影响。作为一个粗糙的比喻，但不要过于的拘泥，想象一张橡皮膜。人们可把一个大球放在膜上，它代表太阳。球的质量把膜压陷下去，使之在太阳邻近弯曲。现在如果人们在膜上滚动小滚珠，它不会直接地穿到对面去，而是围绕着该重物运动，正如行星绕日公转一样。

这个比喻是不完整的，因为在这个比喻中只有时空的两维截面是弯曲的，而时间正如在牛顿理论中那样，没有受到扰动。然而，在与大量实验相符合的相对论中，时间和空间难分难解地相互纠缠。人们不能只使空间弯曲，而让时间安然无恙。这样时间就被赋予了形态。广义相对论使时空和时间弯曲，把它们从被动的事件发生的背景改变成为发生的动力参与者。在牛顿理论中，时间独立于其他万物而存在，人们也许回诘问：上帝在创造宇宙之前做什么》正如圣·奥古斯丁说的，人们不可以为此笑柄，就象有人这样说过：“（也）正为那些寻根究底的人们准备地狱。”这是一个人们世代深思的严肃的问题。根据圣·奥古斯丁的说法，在上帝制造天地之前，（也）根本无所作为。事实上，这 and 现代观念非常接近。

另一方面，在广义相对论中时间和空间的存在不仅不能独立于宇宙，而且不能相互独立。在宇宙中的测量将它们定义，譬如钟表中的石英晶体的振动数或者尺子的长度。以这种方式在宇宙中定义的时间应该有一个最小或者最大值，换言之，即开端或者终结，这是完全可以理解的。询问在开端之前或者终结之后发生什么是没有任何意义的，因为这种时间是不被定义的。

决定广义相对论的数学模型是否预言宇宙以及时间本身应有一个开端或者终结，显然是非常重要的。在包括爱因斯坦在内的理论物理学家中有一种普遍成见，认为时间在两个方向都必须都是无限的。否则的话就引起有关宇宙创生的令人不安的问题，这个问题似乎在科学王国之外。人们知道时间具有开端或者终结的爱因斯坦方程的解，但是所有这些解都是非常特殊的，具有大量的对称性。人们以为，在自身引力之下坍塌的实际物体，压力或者斜方向的速度会阻止所有物质一道落向同一点，使那一点的密度变成无穷大。类似的，如果人们在时间的反方向将宇宙膨胀倒溯过去，他会发现宇宙中的全部物质并非从具有无限密度的一点涌现。这样无限密度的点被成为奇点，并且是时间的开端或者终结。

1963 年，两位苏联科学家叶弗根尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼科夫宣称他们证明了，所有奇点的爱因斯坦方程的解都对物质和速度做过特殊的安置。代表宇宙的解具有这种特殊安置的机会实际上为零。几乎所有能代表宇宙的解都是避免无限密度的奇点：在宇宙膨胀时期之前必须预先存在一个收缩相。在收缩相中物质落到一起，但是相互之间不碰撞，在现在的碰撞相中重新分离。如果事实果真如此，则时间就会从无限过去向无限将来永远流逝。

利弗席兹和哈拉尼科夫的论证并没有人信服。相反的，罗杰·彭罗斯和我采用了不同的手段，不像他们那样基于解的细节研究，而是基于时空的全局结构。在广义相对论中，在时空中不仅大质量物体而且能量使它弯曲。能量总是正的，所以它赋予时空的曲率，曲率使光线的轨道对方弯折。

现在考虑我们的过去的光锥。也就是从遥远的星系来在此刻到达我们的光线通过时空的途径。在一张时间向上放画时空往四边画的图上，它是一个光锥，其顶点正是我们的此时此刻。随着我们在光锥中从顶点向下走向过去，我们就看到越来越早的星系。因为迄今为止宇宙都在膨胀，而且所有的东西在以前更加靠近得多。当我们更进一步去看，我们边透过物质密度更高的区域。我们观测到微波辐射的黯然背景，这种辐射是从宇宙在比现在密集得多也热得多的极早的时刻，沿着我们的过去光锥传播到我们的。我们把接受器调节到微波的不同频率，就能测量到这个辐射的谱。这种微辐射不能溶化冻比萨饼，但是该谱和 2.7 度的物体辐射谱那么一致这一事实告诉我们，这种辐射必须起源于对微波不透明的区域。

这样，我们才能够得出结论，当我们沿着过去的光锥回溯过去，它必须通过一定量的物质。那么多的物质足以弯曲时空，使得我们过去光锥中的光线往相互方向弯折。

当我们往过去回溯，过去光锥的截面会达到最大尺度，然后开始再度缩小。我们的过去是梨子形状的。

当人们沿着我们过去光锥回溯得更远，物质的正的能量密度引起光线朝相互方向更强烈地弯折。光锥的截面在有限的时间内缩小为零尺度。这意味着在我们过去光锥之内的所有物质被捕获在一个边界收缩为零的区域之内。因此，彭罗斯和我能够在广义相对论的数学模型中证明，时间必须有成为大爆炸的开端就不足为奇了。类似的论证显示，当恒星和星系在它们自身的引力下坍塌形成黑洞，时间会有一个终结。我们抛弃了康德的暗含的假设，即时间具有独立于宇宙的意义假设，因此逃避了他的纯粹性的二律背反。我们真名时间具有开端的论文在 1969 年赢得引力研究基金会的第二名的论文奖，彭杰和我对分了丰厚的 300 美元。我认为同一年获奖的其他论文没有什么永远的价值。

我们的研究引起了各式各样的反应。它使得很多物理学家烦恼，但是使信仰创新世纪的宗教领袖们欣喜：此处便是创世纪的科学证明。此时，利弗席兹和哈拉尼科夫就处在尴尬的境地。他们无法和我们证明的数学定理争辩，但是在苏维埃制度下，他们有不能承认自己错了，而西方科学是对的。然而，他们找到一族具有急电的更不一般的解，不像他们原先的解那么特殊，以此挽回颓势。这样他们便可以宣称，奇性以及时间的开端或终结是苏维埃的发现。

大多数物理学家仍然本能地讨厌时间具有开端或终结的观念。因此他们指出，可以预料数学模型不能对奇点附近的时空作出很好的描述。其原因是，描述引力场的广义相对论是一种经典理论，正如在第一章中提到的，它和制约我们已知的所有其他的力的量子理论的不确定性相协调。因为在宇宙的大多数地方和大多数时间里，时空弯曲的尺度非常大，量子效应变得显著的尺度非常小，这种不一致性没有什么关系。但是在一个奇点附近这两种尺度可以相互比较，而量子理论效应就会很重要。这样，彭罗斯和我自己的奇点定理真正确立的是，我们时空的经典区域在过去或许还在将来以量子引力效应显著的区域为边界。为了理解宇宙的起源和命运，我们需要量子引力理论，这将是本书大部分的主题。

具有有限数量粒子系统，譬如原子的量子理论，是 1920 年海森堡，狄拉克和薛定谔提出的。然而，人们在试图把量子观念推广到麦克斯韦场时遇到的困难。麦克斯韦场是描述电、磁和光。

人们可以把麦克斯韦场认为是由不同波长的波组成的，波长是在两个临近波峰之间的距离。在一个波长中，场就像单摆一样从一个值向另一个值来回摆动。

根据量子理论，一个单摆的基态或者最低能量的态不是只停留在最低能量的点上，而直接向下指。如果那样就具有确定的位置和确定的速度，即零速度。就违背了不确定性原理，这个原理禁止同时精确地测量位置和速度。位置的不确定性乘上动量的不确定性必须大于被称为普朗克常数的一定量。普朗克常数因为经常使用显得太长，所以用一个符号来表示： h 。

这样一个单摆的基态，或最低能量的态，正如人们预料的，不具有零能量。相反的，甚至在一个单摆后者任何振动系统的基态之中，必须有一定的称为零点起伏的最小量。这意味着单摆不必垂直下指，它还有在和垂直成小角度处被发现的概率。类似的，甚至在真空或者最低能的态，在麦克斯韦场中的波长也不严格为零，而具有很小的量。单摆或者波的频率越高，则基态的能量越高。

人们计算了麦克斯韦场和电子场的基态起伏，发现这种起伏使电子的表现质量和电荷都变成无穷大，这根本不是我们所观测到的。然而，在 40 年代物理学家查里德·费因曼，朱里安·施温格和超永振一郎发展了一种协调的方法，除去或者“减掉”这些无穷大，而且只要处理质量和电荷的有限的观测值。尽管如此，基态起伏仍然产生微小效应，这种效应可以被提出的理论中的杨-米尔斯理论是麦克斯韦理论的一种推广，它描述另外两种成为弱核力和强核力的相互作用。然而，在量子引力论中基态起伏具有严重的多的效应。这里重复一下，每一波长各种基态能量。由于麦克斯韦场具有任意短的波长，所以在时空的任一区域中都具有无限数目的不同波长，并且此具有无限量的基态能。因为能量密度和物质一样是引力之源，这种无限大的能量密度表明，宇宙中存在足够的引力吸引，使时空卷曲成单独的一点，显然这并未发生。

人们也许会说基态起伏没有引力效应，以冀解决似乎在观测和理论之间的冲突，但是这也不可以。人们可以对利用卡米西尔效应是把符合在平板间的波长的数目相对于外面的数目稍微减少一些。这就意味着，在平板之间的基态起伏的能量密度虽然仍为无限大，却比外界的能量密度少了有限量。这种能量密度差产生了将平板拉到一起的力量，这种力已被实验观测到。在广义相对论中，力正和物质一样是引力的源。这样，如果无视这种能量差的引力效应则是不协调的。

解决这个问题的另一种可能的方法，是假定存在诸如爱因斯坦为了得到宇宙的静态模型的宇宙常数。如果该常数具有无限大负值，它就可能精确地对消自由空间中的基态能量的无限正值。但是这个宇宙常数似乎非常特别，并且必须被无限准确地调准。

20 世纪 70 年代人们非常幸运地发现了一种崭新的对称。这种对称机制将从基态起伏引起的无穷大对消了。超对称是我们现代数学模型的一个特征，它可以不同的方式来描述。一种方式是讲，时空除了我们所体验到的维以外还有额外维。这些维被成为格拉斯曼维，因为它们是用所谓的格拉斯曼变量的数而不用通常的实数来度量。通常的数是可以变换的，也就是说你进行乘法时乘数的顺序无关紧要： 6 乘以 4 和 4 乘以 6 相等。但是格拉斯曼变量是反交换的， x 乘以 y 和 $-y$ 乘以 x 相等。

超对称首先用于无论通常数的维还是格拉斯曼维都是平坦而不是弯曲的时空中去消除物质场和杨-米尔斯场的无穷大。但是把它推广到通常数和格拉斯曼维的弯曲的情形是很自然的事。这就导致一些所谓超引力的理论，它们分别具有不同数目的超对称。超对称一个推论是每一中场或粒子应有一个其自旋比它大或小半个的“超伴侣”。

玻色子，也就是其自旋数为整数的场的基态能量只正的。另一方面，费米子，也就是其自旋为半整数的场的基态能量非负值。因为存在相等数目的玻色子和费米子，超引力理论中的最大的无穷大就被抵消了。

或许还遗留下更小的但是仍然无限的量的可能性。无人有足够的耐心，去计算这些理论究竟是否全有限。人们认为这要一名能干的学生花 200 年才能完成，而且你何以得知他是否在第二也就犯错误了？直到 1985 年大多数人仍然相信，最超前对称的超引力理论可避免无穷大。

然后时尚突然改变。人们宣称没有理由期望超引力理论可以避免无穷大，而这意味着它们作为理论而言具有的把引力和量子理论合并的方法。它们只有长度。在弦理论中是同名物，是一维的延展的物体。它们只有长度。在弦理论中弦在时空背景中运动。弦上的涟漪被解释为粒子。

如果弦除了他们通常数的维外，还有格拉斯曼维，涟漪就对应于玻色子和费米子。在这种情形下，正的和负的基态能就会准确对消到甚至连更小种类的无穷大都不存在。人们宣布超弦是 TOE，也就是万物的理论。

未来的科学史家将会发现，去描绘理论物理学家中的思潮的起伏是很有趣的事。在好些

年里，弦理论甚至高无上，而超引力只能作为在低能下有效的近似理论而受到轻视。限定词“低能”尤其晦气，尽管此处低能是指其能量比在 TNT 爆炸中粒子能量的一百亿亿倍更低的粒子。如果超引力仅仅是低能近似，它就不能被宣称作为宇宙的基本理论。相反地，五种可能的超弦理论中的一种被认为是基本理论。但是物种弦理论中的哪一种是我们的宇宙呢？还有，在超出弦被描绘成具有一个时空维和一个时间维的通过平坦时空背景运动的面的近似时，弦理论应如何表述呢？难道弦不使背景时空弯曲吗？

1985 年后，弦理论不是完整的图象这一点逐渐清晰了。一开始，人们意识到，弦只不过是延展成多于一维的物体的广泛族类中的一员。包罗·汤森，他正如我一样是剑桥的应用数学和理论物理系的成员，他关于这些东西做了许多研究，将这些东西命名为“P-膜”。一个 P-膜在 P 个方向上有长度。这样 $P=1$ 就是弦膜， $P=2$ 的膜是面或者薄膜，等等。似乎就是没有理由对 $P=1$ 的弦的情形比其他可能的 P 值更宠爱。相反地，我们应采用 P-膜的解。十维或者十一维听起来不太像我们体验的时空。人们的观念是，其余的六维或七维被弯卷成这么小，小到我们察觉不到；我们只知悉剩下的四维宏观的几乎平坦的维。

我应该说，对于相信而外的维，我本人一直犹豫不决。但是，对于我这样的一名实证主义者，“额外维的雀存在吗？”的问题是没有意义的。人们最多只能问：具有额外维的数学模型能很好地描述宇宙吗？我们还没有任何不用额外维便无法解释的观测。然而，我们在日内瓦的大型强子碰撞机存在观察到它们的可能性。但是，使包括我在内的许多人信服的，必须认真地接受具有额外维的模型的理由是，在这些模型之间存在一种所谓对偶性的意外的关系之网。这些对偶性显示，所有这些模型在本质上都是等效的；也就是说，它们只不过是同一基本理论的不同方面，这个基础理论被叫做 M-理论。怀疑这些对偶性之网是我们在正确轨道上的征兆，有点象相信上帝把化石放在岩石中去是为了误导达尔文去提出生命演化的理论。

这些对偶性表明，所有五种超弦理论都描述同样的物理，而且它们在物理上也和超引力等效。人们不能讲超弦比超引力更基本，反之亦然。人们宁愿说，它们是同一基本理论的不同表达，对在不同情形下的计算各有用处。因为弦理论没有任何无穷大，所以用来计算一些高能离子碰撞以及散射事件很方便。然而，在描述非常大量数目的粒子的能量如何弯曲宇宙或者形成束缚态，譬如黑洞时没有多大用处。对于这些情形，人们需要超引力。超引力基本上是爱因斯坦的弯曲的时空的理论加上一些额外种类的物质。这正是我们以下主要使用的图象。

为了描述量子理论如何赋形于时间和空间，引进虚时间的观念是有助益的。虚时间听起来有点科学幻想，但其实很好定义的数学概念：它是用所谓的虚数量度的时间。人们可以将诸如 1, 2, -3, 5 等等通常的实数相成对于从左至右伸展的一根线上的位置：零在正当中，实正数在右边，而负实数在左边。

叙述对应于一根垂直线上的位置：零又是在中点，正虚数画在上头，而负虚数画在下面。这样虚数可被认为与通常的实数夹直角的新行的数。因为它们是一种数学的构造物，不需要实体的实现；人们不能有虚数个橘子或者虚数的信用卡帐单。

人们也许认为，这意味着虚数只不过是一种数学游戏，也现实世界毫不相干。然而从实证主义哲学观点看，人们不能确定任何为真实。人们所能做的只不过是去找哪种数学模型描

述我们生活其中的宇宙。人们发现牵涉到虚时间的一种数学模型不仅预言了我们已经观测到的效应，而且预言了我们尚未能观测到，但是因为其他原因仍然坚信的效应。那么何为实何为虚呢？这个差异是否仅存在于我们的头脑之中呢？

爱因斯坦经典广义相对论把实时间和三维时空合并为四维时空。但是实时间方向和三个空间反向可被识别开来：一位观察者的世界线或历史总是在实时间方向增加，但是它在三维空间的任何方向上可以增加或者减小。换言之，人们可以在空间中而非时间中颠倒方向。

另一方面，因为虚时间和实时间夹一直角，它的行为犹如空间的第四个方向。因此，它比通常的实时间的铁轨具有更丰富多彩的可能性。铁轨只可能有开端或者终结或者围着圆圈。正是在这个虚的意义上，时间具有形态。

为了领略一些可能性，考虑一个虚时间的时空，那是一个像地球表面的球面。假定虚时间的纬度，那么宇宙在虚时间的历史就是南极启始。这样，“在开端之前发生了什么？”的诘问就变得毫无意义，恰如不存在比南极更南的点一样。南极是地球表面上完全规则的点，相同的定律在那里正如在其他点一样成立。这暗示着，宇宙在虚时间中的开端可以是时空规定的点，而且相同的定律在开端处正如在宇宙的其他地方一样成立。

另一种可能的行为是可以把虚时间当作地球上的经度来阐明。所有时间在那里静止，这是在这样的意义上来讲的，即虚时间或经度的增加，让人们停留在同一点。这和在已经认识到这种实和虚时间的静止意味着时空具有温度，正如我在黑洞情形下所发现的那样。黑洞不仅有温度，它的行为方式似乎还表明它具有称作熵的量，熵是黑洞内部状态的数目的量度，这是具有给定的质量，旋转和电荷载的黑洞允许的所有内部状态。作为黑洞外面的观察者只能观测到黑洞的这三种参数。黑洞的熵可由我于 1984 年发现的一个非常简单的公式给出。它等于黑洞视界的面积：视界面积的每一基本单位都存在关于黑洞内部状态的一比特的信息。这表明在量子引力和热力学之间存在一个深刻的联系。热力学即热的科学。它还暗示，量子引力能展示所谓的全息性。

有关一个时空区域内的量子态的信息可以某种方式被编码在该区域的少二维的边界上。这就是全息术把三维的影像携带在二维的表面上的方法。如果把量子引力和全息原理相合并，这也许意味着我们能跟踪发生于黑洞之内的东西。如果我们能够语言来自黑洞的辐射，这一点是重要的。如果我们不能做到，我们将不能像原先以为的那样充分地预言将来。这将在第四章中讨论。我们在第七章中将再次讨论全息学。看来我们也许生活在一张 3-膜，即一个四维面上。它是五维区域的边界，而其余的维被卷得非常小。膜上的世界的态负载发生在五维区域内一切的密码。

第三章 果壳中的宇宙

霍金

宇宙具有多重历史，每一个历史都是由微小的硬果确定的。

哈姆雷特也许想说，虽然我们人类的肉体受到许多限制，但是我们的精神却能自由地探

索整个宇宙，甚至勇敢地闯出入连《星际航行》都畏缩不前之处——噩梦不再纠缠的话。

宇宙究竟是无限的，或者仅仅是非常浩渺的呢？它是永恒存在的，或者仅仅是年代久远的呢？我们有限的思维何以理解无限的宇宙？什么仅仅是这种企图是否就已经过于自信？我们是否冒着罗密修斯命运的风险？在经典的神话中，他为了人类的用火从宙斯处盗取火种，因为愚勇而受惩罚，他被连锁在岩石上，让鹰啄食他的肝脏。

尽管这些警戒的传说，我仍然相信，我们能够而且应该试图去理解宇宙。我们在这个方面以有了显著的进展，尤其是在前几年。当然，我们还未得到完整的图象。但以为期不远。

空间的最明显之处是它无限地向外延伸。现代仪器证明了这一点，譬如哈勃望远镜允许我们探测太空深处。我们所看到的是各种形状和尺度的数以亿计的星系。

每个星系包含难以记数的亿万个恒星，尤其许多恒星还被行星所围绕。我们生活在围绕着一个恒星公转的行星之上，而这个恒星位于螺旋形银河系的外臂上。螺旋臂上的尘埃遮住了我们在银河系平面上的宇宙视野，但是我们在该平面的每一边的方向圆锥中的视线都非常清晰，而且我们能够画出遥远星系的位置。我们发现星系大体均匀地分布于整个太空，有一些局部的聚集和空间。星系密度在非常大的距离外显得有些下降，但这也是因为它们如此遥远的暗淡，以至于我们看不见。我们所能说的是，宇宙在空间中永远延伸下去。

尽管宇宙似乎在空间的每一位置上都很相同，它肯定是随时间而变化的。这一点是直到20世纪的早期才被意识到。但在此之前，人们认为，宇宙在本质上是时间不变的。它也许存在了无限长的时间，但是这会导致荒谬的结论。如果恒星已经辐射了无限长的时间，那么它们就会把宇宙加热到和它们相同的温度。因为每一道视线都会要么终结于恒星的表面，要么终结于被加热至和恒星一样炽热的尘埃尘云团之上，所以甚至在夜晚，整个天空都会和太阳一样明亮。

我们所有人都进行过夜空是黑的观察，这是非常重要的。它意味着宇宙不能以我们今天看到的状态存在了无限久的时间。过去一定发生过某些事情，使得恒星在有限的过去时刻点亮，这意味着从非常遥远恒星来的光线尚未到达我们这里。这就解释了夜空为何不在每一个方向发光。

如果恒星仅仅是永远地待在那里，为何它们在几十亿年前忽然点亮呢？是什么钟通知它们发亮的瞬间呢？正如我们看到过的，这个问题使那些哲学家，例如伊曼努尔·康德陷入沉思。他们相信，宇宙已经存在了无限久时间。但是对于大多数人而言，它和宇宙在仅仅几千年以前和现在非常相同的初始状态下创生的观念一致。

然而，20世纪20年代韦斯托·史里弗和埃德温·哈勃的观测开始偏离这种观念。1923年哈勃发祥了许多称为星云的黯淡的光斑，实际上是其他星系，正像我们太阳系的但在遥远距离之外的恒星的巨大集团。它们之所以显得这么微笑和黯淡，其距离一定非常遥远，甚至连光线都要花费几百万甚至几十亿年才能到达我们这里。这表明，宇宙的其实不可能发生在区区几千年以前。

但是哈勃发现的第二桩事情甚至更加非凡。天文学家们已经通晓，从分析来自其他星系

的光线，可以测量它们是趋近还是远离我们的运动。使他们大为惊奇的是，他们发现，几乎所有的星系都运动离去。此外，它们距我们越远，则离开运动得越快。正是哈勃认识到这个发现的戏剧性含义：在大尺度上，每一个星系都从其余每个星系运动离去。宇宙正在膨胀。

宇宙膨胀的发现是 20 世纪的伟大的智力革命之一。它完全出乎意外，而且彻底改变了有关宇宙起源的讨论。如果星系正在相互运动离开，则它们在过去必然更加接近。我们从现在的膨胀率，可以估计它们在 100 至 150 亿年前必须非常接近。正如在上一章中描述的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，爱因斯坦的广义相对论意味着，宇宙和时间本身有过一个可怕的爆炸中的开端。这里提供了夜空威吓黑暗的解释：没有恒星可以发光的比 100 亿至 150 亿年，也就是从大爆炸迄今的时间更久。

我们对如下观念熟视无睹，即事件总是由更早的事件引起，后者依序又是由比它还早的事件引起。存在一个向过去延展的因果性之链。但是假定这条链有一个开端。假定存在第一个事件，那么它的肇因又是什么呢？许多科学家不愿意面对这个问题。他们企图逃避它，或者像俄国人那样宣布宇宙没有开端，或者坚持说宇宙的开端不属于科学王国的范畴，而是属于形而上学或宗教。依我看来，这不是任何真正的科学家该采取的立场。如果科学定律在宇宙的开端处失效，它们不也可以在其他时间失败吗？如果定律只能有时成立则不能称之为定律。我们也许是超过我们能力之外的任务，但是我们至少应该进行尝试。

彭罗斯和我证明的定理指出，宇宙必须有一开端，这些定理并没有对开端的性质给出很多信息。它们指出，宇宙从一个大爆炸启始的。很显然，人们面临的局面是，宇宙起源的问题属于科学范畴之外。

科学家不应该对这个结论满意。正如在第一章和第二章中指出的，广义相对论在大爆炸邻近失效的原因是，它没有和不正确性原理相合并。爱因斯坦基于上帝不玩弄骰子的论断反对量子理论中的这个随机元素。然而所有证据表明，上帝完全是一名赌徒。人们可以将宇宙认为是一个庞大的赌场，在每一个场合下骰子都在滚动或者轮子在旋转。因为在你每回投掷骰子或者转动轮子之际都有输钱的风险，你也许会认为开赌场是一种非常冒险的营生。但在非常多次的赌博之后，虽然不能预言任何特定赌博的结束，却能预言得失的平均结果。赌场的经营者保证概率平均的结果对他们有利。这就是为什么赌场的经营者如此庸俗。你赢他们的仅有机会是把你所有的钱压下去掷几回骰子或者转几回赌轮。

宇宙的情景也是一样。当宇宙尺度很大，正如它今天这样时，骰子被投掷的次数极为巨大，其平均结果就会得出某种可遇见的东西。这就是为何对于大系统经典定律有效的原因。但是，当宇宙尺度非常微小时，正如它在临近大爆炸的时刻，投掷骰子的次数很少，而不确定性原理则非常重要。

因为宇宙不停地滚动骰子，看看下一步还会发生什么，它就不像人们以为的那样仅仅存在一个历史。相反地，宇宙应该拥有所有可能的历史，伯里兹囊括了奥林匹克运动的所有金牌，虽然也许其概率很小。

宇宙具有很重历史懂得思想听起来像是科学幻想，但是它现在被当作科学事实而广被接受。正是理查德·费因曼提出了这个思想，他不仅是一位伟大的物理学家，也是一位有趣的

人物。

我们现在所从事的是把爱因斯坦的广义相对论和费因曼的多种历史的思想合并成一个完备的统一理论，该理论将描述在宇宙中发生的一切事物。如果我们知道宇宙的历史是如何开始的话，这个统一理论就使我们能够计算宇宙将如何发展。但是统一理论自身并不告诉我们宇宙如何开始，或者说初始条件是什么。为此，我们需要所谓的“边界条件”，也就是告诉我们在宇宙的前沿，或者在空间和时间的边缘上发生什么的规则。

如果宇宙的前言只不过是空间和时间的正常点上，我们便可以超越它并宣布更远的领地为宇宙的一部分。另一方面，如果宇宙的边界是处于一个不整齐的边缘，在那儿空间和时间被挤皱而且密度无限大，要去定义有意义的边界条件则非常困难。

然而，我和一位合作者，詹姆·哈特尔意识到还存在第三种可能性。宇宙在空间和时间中也许没有边界。初看起来，这似乎与彭罗斯和我证明的定理直接接触。该定理看出，宇宙必须有一个开端，即时间的边界。然而，正如在第二章中解释过的，存在另一种时间，称作虚时间，那是和我们感觉到正在流逝的通常的实时间成直角的时间。宇宙在实时间中的历史确定其在虚时间中的历史，反之亦然，但是这两种历史可以非常不同。特别是，宇宙在虚时间中可不必有开端或终结。虚时间正如同空间中的另一个方向那样行为。这样，宇宙在虚时间中的历史可被认为是一张曲面，像一个球面，一个平面或者一个马鞍面，只不过是思维而不是二维的。

如果宇宙的历史像一张马鞍面或一张平面那样伸展出去，人们就遭遇到如何在无穷处选取边界条件的问题。但是，如果宇宙在虚时间中的历史是一张闭合的曲面，正如地球的表面那样，人们便可以在根本上避免边界条件的选取。地球的表面没有边界或边缘。从来未有可靠的报道说人们从那儿失阻落下。

如果正如哈特尔和我设想的那样，宇宙在虚时间中的历史的确是一张闭合的曲面，它对于哲学和我们从何而来的图景边有基本的含义。宇宙就会是完全自足的；它不需要外界的任何东西去卷紧其发条并启动之。想反地，宇宙中的任何东西都由科学定律以及宇宙之中的粒子的滚动所确定。这听起来也许有些狂妄，但是它正是我和许多其他科学家所相信的。

如果即便宇宙的边界条件是它没有边界，它也不仅仅只有一个单独的历史。它将具有多重历史，正如费因曼所建议的那样。对应于每一种可能的闭曲面在虚时间中多存在一个历史，而在虚时间中的每一个历史都确定其在实时间中的历史。这样，我们对于宇宙就有了过量的可能性。是什么东西从所有可能的宇宙中挑选出我们在其中生存的特殊的宇宙呢？我们会注意到的一点是许多可能的宇宙历史不会经过形成星系和恒星的过程序列，而这个序列对于我们自身的发展是至关重要的。而智慧生命在没有星系和恒星的条件下演化似乎是不太可能的。这样，我们作为能够诘问“宇宙为何是这样子？”的问题的生命的存在本身，便是加在我们生活其中的历史的一个限制。它意味着我们的历史是具有星系和恒星的少数历史中的一个。这就是所谓的人择原理的一个例子。人择原理讲，宇宙必须多多少少像我们看到的那样，否则的话，便不会有任何人在此观察它。许多科学家不喜欢人择原理，因为它似乎相当模糊，而且似乎没有多少预言能力。但是可以赋予人择原理以精确的表述，而且看来它在处理宇宙起源之时是关键的。在第二章中描述的 **M**-理论允许巨大数量的可能的宇宙历史。这些历史

中的大多数不适合智慧生命的发展：它们要么是空虚的，要么太短命，要么太过弯曲，或者在其他某方面出差错。而根据查里德·费因曼的多重历史观念，这些不可居住的历史可有相当高的概率。

事实上，可以存在多少不包含智慧生命的历史根本没有什么关系。我们只对智慧生命在其中发展的历史的子集感到兴趣。这种智慧生命可以一点都不像人类。小绿色外星人也可以。事实上，他们也许更优秀。人类的智慧行为的记录并不非常光彩。

作为人择原理威力的一个例子，考虑空间中的方向数目。我们生存在三维空间中，这是一个常识。那也就是说，我们可以用三个数代表空间中的一点的位置，例如纬度，精度和海拔高度。但是为何空间是三维的呢？为什么不像科学幻想中的那样为二维的，或者四维的，或者甚至是其他的维呢？在 M-理论中，空间有九维或者十维，但是人们认为其中六七个或七个方向被卷曲成非常小，只留下三个大的几乎平坦的方向。

为何我们不生活在八维被卷曲得很小只留下二维可让我们察觉到的历史中呢？一只二维动物要消化食物非常困难。如果它有一个穿过自身的肠子，它就把动物分离成两部分，而这可怜的生灵就一分为二了。这样两个个年吨秒年的方向对于任何像智慧生命这样复杂的东西是不够的。另一方面，如果存在四个或者更多个的几乎平坦的方向，那么两个物体之间的万有引力在它们相互靠近时就增加的越快。这就意味着行星们没有围绕其太阳公转的稳定轨道。它们要么会落到太阳中去，要么逃逸到黑暗和寒冷的太空去。

类似的，原子中的电子的轨道也不稳定，因此我们所知的物体边不存在。这样，尽管多重历史的思想允许任何数目的几乎平坦的方向，只有具有三个平坦方向的历史才包括智慧生命。也只有具有三个在这种历史中才会提出这样的诘问：“为何空间具有三维？”

宇宙在虚时间中的最简单的历史是一个圆球面，正如地球的表面那样，只是多了两个维。它确定了宇宙在我们所经历的实时间中的历史，在这个历史中宇宙在空间的每一个点上都相同，而在时间中膨胀。它在这些方面和我们生活其间的宇宙很相象。但是其膨胀率非常快速而且踏它不断地越来越快。这种加速膨胀成为暴胀，因为它就像价格以一直上升的速率增长的方式。

一般而言，价格的暴胀被认为是糟糕的事，但是在宇宙的情形下，暴胀是非常有用的。其巨大的膨胀将早期宇宙也存在的坑坑洼洼全部抹平。随着宇宙膨胀，它从引力场借得能量去创造更多的物质。正的物质能量刚好和负的引力能量相互平衡，这样使总能量为零。当宇宙的尺度加倍，物质和引力能都加倍——这样，零的两倍仍为零。如果银行业这么简单该多好！

如果宇宙在虚时间中的历史是完美的圆球面，那么在实时间中的相应的历史就会是继续以暴胀方式永远膨胀的宇宙。当宇宙在暴胀时，物质不会落到一起形成星系和恒星，而且生命，更不用说像我们这样的智慧生命能够发展。这样，尽管多重历史思想允许在虚时间中完美圆球面的宇宙历史，它们不是对特别有趣。然而，在虚时间中球面南极处忽略平坦些的历史和我们更加相关。

在这种情形下，在实时间中的相应的历史首先以加速暴胀的方式膨胀。但是这种膨胀接着开始缓慢下来，而且星系能够形成。为了让智慧生命得以发展，南极处变平的程度必须是及其微小的。这将意味着宇宙将首先膨胀一个巨大的倍数。两次世界大战之间德国的通货膨胀创造了记录，价格上升了几十亿倍，但是在宇宙中发生的暴胀至少有一亿亿倍。

由于不确定性原理，包含智慧生命的宇宙不仅只有一个历史。相反地，在虚时间中的历史将为一整族稍微变形的球面。每一个对应实时间中宇宙长时期但非无限久膨胀的历史。然后我们可以问这些允许的历史中的哪一个是最可能的。终于发现最可能的历史不是完全光滑的，而是具有微小的起伏的。在最可能历史中的涟漪实在是非常微小的。它和光滑的偏离只有十万分之一的数量级。尽管它们及其微小，我们已经设法观察到它们。这正是从太空不同方向到达我们这儿的微波的细小变化。宇宙背景探险者在 1989 年发射并且画出了天空的微波图。

不同颜色表示不同温度。但是从红到蓝的整体范围仅仅大约为一度的万分之一。然而，这种早期宇宙中不同区域之间的变化已足以在更密集的区域产生额外的引力吸引，去阻止它们永久膨胀下去，而使它们在自身的引力下重新坍缩，从而形成星系和恒星。这样，至少在原则上，COBE 图是宇宙的所有结构的蓝图。

和智慧生命的出现相容的宇宙最可能历史在未来将如何行为呢？依宇宙中的物质的量而定，似乎存在不同的可能性。如果物质密度超过某一临界值。则星系之间的引力吸引就会使它们之间的分离减缓下来，而且最终阻止它们相互飞离。然后它们将开始相互下落，并在一次大挤压中都碰撞到一起。大挤压是在实时间中宇宙历史的终结。

如果宇宙密度低于临界值，则引力太弱，不足以阻止星系永远相互飞离。所有恒星都燃烧殆尽，而宇宙将变得越来越空虚，越来越冷。这样，事情又要完结，但是以一种不那么戏剧性的方式。不管是哪种方式，宇宙将要继续在生存好几亿年。

宇宙中除了物质，还可以包含所谓“真空能量”的东西。这种能量甚至存在于表现空虚的空间之中。按照爱因斯坦著名的方程，这种真空能量具有质量。这意味着它对宇宙膨胀具有引力效应。但是，非常引人注意的是，真空能量的效应和物质效应相反。物质使膨胀率缓慢下来，并最终能使之停止而且反转。另一方面，真空能量使膨胀加速，正如暴胀那样。事实上，真空能量恰恰如在第一章中提到的宇宙常数那样行为。那是爱因斯坦在 1917 年意识到，他的原先的方程不能允许一个代表静态宇宙的解时，加到方程上去的。在哈勃发现了宇宙膨胀之后，将这一项家到方程上的动机即不复存在，而爱因斯坦将宇宙常数当作一项错误的拒绝。

然而，着也许是根本就不是错误。正如在第二章中描述的，我们现在意识到，量子论意味着时空中充满了量子涨落。在一中超对称的理论中，这些基态起伏的无限大的正的和负的能量被完全抵消，甚至连小的有限的真空能量都不遗留下来。仅有的令人惊讶的是，真空能量这么接近于零，这一点在不久前还没有这么显明。这也许是人择原理的另一个例子。具有更大的真空能量的历史不会形成星系，也就不包含能够询问这个问题的生物：“威吓真空能量这么低？”

我们从各种观测可以试图确定宇宙中物质和真空的能量。我们可以用一张图来表明此结

果，水平方向代表物质的密度而垂直方向表示能量。点线显示智慧生命能够发展的区或边缘。

在这张图上分别标出对应于超星系，物质成团和微波背景的观测区域。幸运的是，这三个区域有一个共同的交集。如果物质密度和真空能量处于这个交集，它意味着宇宙膨胀在长期变缓慢之后已开始重新加速。看来暴胀可能是自然的一个定律。

我们在这一章中已经看到，如何按照浩渺宇宙在虚时间中的历史来解释它的行为。这个虚时间中的历史是细小的略微平坦的球面。它酷似哈姆雷特的果壳，然而这个果壳把在实时间中发生的一切都作为密码储存在它上面。这样哈姆雷特是完全正确的。我们也许是被束缚在果壳之中，而仍然自以为无限空间之王。

第四章 预言未来

霍金

黑洞中的信息丧失如何降低我们预言未来的能力。

人类总是想控制未来，或者至少要预言将来发生什么。这就是为何占星术如此流行的原因。占星术宣称地球上的事件和行星划过天穹的运动相关联。如果占星家们胆敢冒险并作出可被检验的确定的预言的话，这便是或者将会是科学上可以检验的假使。然而，他们识相的很，所做的预报都是这么模糊，使得对任何结果都能左右逢源。诸如“个人关系可能紧张”或者“你将有一个高报酬的机会”等等断言永远不会被证伪。

但是科学家不信占星术的真正原因不是因为科学证据或者噤毋宁说缺乏科学证据，而是它和已被实验检验的其他理论不协调。在哥白尼和伽利略发现行星围太阳而非地球公转，而且牛顿发现制约它们运动的定律后，占星术变成极其难以置信。为什么从地球上看到其他行星相对于天空背景的位置和较小行星上的自称为智慧生命的巨分子有任何关联呢？而这正是占星学要让我们相信的。在本书描述的某些理论和迄今经受住检验的理论相协调，所以我们相信它们。

牛顿定律和其他物理理论的成功导致科学宿命论的观念。它是在 19 世纪初去法国科学家拉普拉斯侯爵首次表述的。拉普拉斯建议，如果我们知道在某一时刻宇宙所有粒子的位置和速度，则物理定律应允许我们预言宇宙在过去或将来任何时刻的状态。

换言之，如果科学宿命论成立，我们在原则上边能够预言将来，而不必借助于占星术。当然在实际上甚至简单得像牛顿引力论那样的东西也会导出对于多于二个粒子的情形都不能得到准确的方程。况且，方程经常具有所谓混沌的性质，这样在某一时刻位置或速度的微小变化会导出在将来完全不同的行为。《侏罗纪公园》的观众都知道，在一处很小的扰动会在另一处引起巨变。一只蝴蝶在东经鼓翼会在纽约中央公园引起巨大雨。麻烦在于，事件的序列是不可重复的。蝴蝶一下回鼓翼时，一大堆其他因素将会不同并且也影响天气。这就是天气预报这么不可靠的原因。

这样，虽然在原则上，量子电动力学定律应该允许我们去计算化学和生物学中的一切，

我们在从数学方程预言人类行为方面并没有长足长进。尽管这些显示的困难，大多数科学家仍然自我安慰，认为在原则上，将来是可以预言的。

起初看来，宿命论似乎还受到了不正确性原理的威胁。不正确性原理讲，我们不能在同一时刻准确地测量一个粒子的位置和速度。我们把位置测量得越精确，就把速度确定越不准确，反之亦然。而拉普拉斯的科学宿命论坚持，如果我们知道在某一瞬间的粒子位置和速度。但是，如果不确定性原理阻止我们同时准确知悉一个时刻的位置和速度，我们甚至无从开始。无论我们呢有多么好的计算机，如果我们输入糟糕的数据，我们将得到糟糕的语言。

然而，在一种合并了不确定性原理的称作量子力学的新理论中，宿命论以一种修正的方式得到恢复。粗略地讲，人们在量子力学中可以精确地语言在经典的拉普拉斯观点中所期望的一半。一个粒子的量子力学中不具有很好定义的位置和速度，但是它的状态可由所谓的波函数代表。

波函数是在空间的每一点上的一个数，它给出在那个位置上找到该粒子的概率。波函数从一点到另一数在空间的特定点有尖锐的高峰。在这些情形下，粒子在位置上只有小量的不确定性。但是我们在图上还能看到，在这种情形下，波函数在这点邻近变换的很快速，一边上升一边下降。这意味着速度的概率在很大的范围散开，换句话说，就是速度的不确定性越大。另一方面，考虑一系列连续的波。现在在位置上存在大的不确定性，但是在速度上存在小的不确定性。这样，由波函数描述的粒子不具有很好定义的位置或速度。它满足不确定性原理。现在我们意识到波函数就是我们能够很好定义的一切。我们甚至不能设想粒子具有上帝知晓的位置和速度，而我们是被蒙蔽了。这种“隐变量”理论预言的结果和观察不相符。甚至上帝也受不确定性原理的限制，而不能知悉位置和速度；也只能知道波函数。

波函数随时间的变化率由所谓的薛定谔方程给出。如果知道某一时刻的波函数，我们就能够利用薛定谔方程去计算在过去或将来任时刻的波函数。因此，在量子理论中仍存在宿命论，但它是处于一种减缩的形式。取代同时预言位置和速度的能力，我们只能预言波函数。这就允许我们预言位置，或者预言速度，但是二者不能同时准确预言。这样，在量子理论中进行准确预言的能力只是在经典的拉普拉斯世界观中的一半。尽管如此，在这种限制的意义上讲，人们仍然可以宣称存在宿命论。

然而，利用薛定谔方程在时间前进的方向去演化波函数隐含地假定时间在所有地方永远光华地流逝。在牛顿物理学中这肯定是正确的。时间被定义为绝对的，这意味着在宇宙的历史中的每一事件都被一个称作时间的数标志着，而且时间标志的系列从无限的过去圆滑地连续到无限的将来。这也许可以被称作常识时间观，而且这还是大部分人甚至大部分物理学家下意识的时间观。然而，正如我们看到的，绝对时间的概念在 1905 年被狭义相对论所抛弃。在狭义相对论中时间不再是自身独立的量，而只不过是称作时空的四维连续统中的一个方向。在狭义相对论中，不同的观察者以不同的速度在不同的途径穿越时空。每一位观察者沿着他或她遵循的途径具有自己的时间测度，并且不同的观察者在事件之间测量到的时间间隔是不同的。

这样，在狭义相对论中不存在我们可用以给事件加标签的唯一绝对的时间。然而，狭义相对论的时空是平坦的。这意味着在狭义相对论中，由任何自由运动观察者测量的时间在时

空中从负无穷至正无穷光滑地流逝。我们可以在薛定谔方程中使用其中的任一时间测度去演化波函数。因此，在狭义相对论中我们仍然拥有宿命论的量子版本。

在广义相对论中情形便不同了。这里时空不是平坦的，而是弯曲的，并且它被其中的物质和能量所变形。时空的曲率在我们的太阳系中是如此之微小，至少在宏观的尺度上，它和我们通常的是观念不冲突。在这种情形下，我们在薛定谔方程中仍然可用这种时间去得到波函数的决定性的演化。然而，我们一旦允许时间弯曲，则另外的可能性就会出现，即时空具有一种不允许对于每一观察者都光滑增长的时间结构，这一点正是我们对于合理的时间测量所期望的性质。例如，假设时空像一个垂直的圆柱面。

圆柱面的垂直往上方向是时间测度，对于每位观察者它从负无穷流逝到正无穷。然而，取而代之我们将时空想象策划能够一把手的圆柱面，这个把手从圆柱面分叉开来又合并回去。那么任何时间测量都在把手和圆柱面接合处有一停滞点：这就是时间停止之点。对于任何观察者而言，时间在这些点不流逝。在这样的时空中，我们不能用薛定谔方程去得到波函数的决定性来演化。谨防虫洞：你永远不知道从它们那儿会冒出什么来。

黑洞是我们认为时间对任何观察者并非总是增加的原因。1783 年人们首次讨论黑洞。一位剑桥的学监，约翰·米歇尔进行了如下的论证。如果有人垂直向上射出一个粒子，譬如炮弹，它的上升并返回落下。然而，如果初始往上的速度超过称作逃逸速度的临界值，引力将永远不够强大到足以停止该粒子，而它将飞离远去。对于地球而言逃逸速度大约为每秒 12 公里，对于太阳则大约为每秒 100 公里。这两个速度都比真正的炮弹速度高出许多，但是它们和光速相比就显得很可怜，后者是每秒 3000000 公里。这样，光可以从地球或者太阳轻而易举地逃逸。然而，米歇尔论断，可以存在比太阳更大质量的恒星，其逃逸速度超过光速。因为任何发出的光都被这些恒星的引力施曳回去，所以我们就不能看到它们。这样，它们就是米歇尔叫做暗星而我们现在叫做黑洞的东西。

米歇尔暗星的思想是基于牛顿物理学。牛顿理论中的时间是绝对的，不管发生任何事件它都正常流逝。这样，在经典的牛顿图象中它们不影响我们预言将来的能力。但是，在广义相对论中情形就非常不同，大质量物体使得时空弯曲。

1916 年，即广义相对论被提出之后不久，卡尔·施瓦兹席尔德，找到广义相对论中场方程的代表一个黑洞的解。在很多年里施瓦兹席尔德找到的东西没有得到理解或者重视。爱因斯坦本人从不相信黑洞，而且大多数广义相对论的元老认同他们的态度。我还记得有一次去巴黎作学术报告，那是关于我发现的量子理论意味着黑洞不完全黑的。我的学术报告彻底失败，因为那时候在巴黎几乎无人相信黑洞。法国人还觉得这个名字，如他们翻译的，*trou noir* 具有可疑的性暗示，应该代之以 *astre occlu* 或“隐星”。然而，无论是这个还是其他提议的名字都无法像黑洞这个术语那样能抓住公众的想象力。这是美国物理学家约翰·阿契巴尔德·惠勒首先引进的，他激发了这个领域中的大量的现代研究。

1963 年类星体的发现引起有关黑洞的理论研究以及检测它们的观察尝试的进发。这里就是已经呈现的图景。考虑我们所相信的具有 20 倍太阳质量的恒星历史。这类恒星是由诸如猎户座星云中的那些气体云形成的。当气体云在自身的引力下收缩时，气体被加热上去，并且最终热到足以开始热聚变反应，把氢转化成氦。这个步骤产生的热量制造了压力，使恒

星对抗住自身的引力，并且阻止它进一步收缩。一个恒星可以在这种状态停留很长时期，燃烧氢并将光辐射到太空中去。

恒星引力场影响从它发出的光线的途径。人们可以画一张图，往上方向表示时间，水平方向代表离开恒星中心的距离。在这张图上，恒星的表面由两根垂直直线代表，在中心的两边各有一根。时间的单位可选为秒，而距离单位选择光秒——也就是光在一秒钟内旅行的距离。当我们使用这些单位时，光速为 1，也就是光速为每秒一光秒。这意味着远离恒星极其引力场，图上的光线的轨迹是一根和垂直方向成 45° 角的直线。然而，邻近恒星处，由恒星质量产生的时空曲率变化了光线的轨迹，使他们和垂直方向夹更小的角。

大质量恒星将比太阳更快速度的多地把它们的氢燃烧成氦。这意味着它们可以在短到几亿年的时间内把氢耗尽。此后，这类恒星面临着危机。它们能把氢燃烧成诸如碳和氧等等更多的元素，但是这些核反应不会释放出大量能量，这样恒星失去支持自身对抗引力的热量和热压力。因此它们开始变得更小。如果它们质量大约比太阳质量的两倍还大，其压力将永远不足以停住收缩。它们将坍缩成零尺度和无限尺度，从而形成所谓的奇点。在这张时间对离开中心距离的图上，随着恒星缩小，从它表面发出的光线轨迹会在起始时间和垂直直线夹越来越小的角度。当恒星达到一定的临界半径，其轨迹就变成图上的垂线，这意味着光线将在离恒星常距离处逗留，永远不能离开。光线的临界轨迹掠过的表面称做事件视界，它把时空中的光线能够逃逸的区域和不能逃逸的区域或隔开。在横行通过其事件视界后，从它表面发射的光线将被时空曲率向里面弯曲。恒星就成为一个米歇尔的暗星，或者用我们现在的的话讲，就是黑洞。

如果光线不能从黑洞逃出，你何以检测它呢？其答案是黑洞正如坍缩之前的物体那样，仍然把同样的引力拉力施加在周围的对象上。如果太阳是一个黑洞面且在转变成黑洞之前没有损失任何质量，则行星将仍然像现在这样围绕着它公转。

因此搜索黑洞的一种方式寻找围绕着似乎是看不见的大质量物体公转的物体。若干这样的系统已被测到。发生在星系和类星体中心的巨大黑洞也许是最令人印象深刻的。

迄此讨论到的黑洞的性质还未触犯宿命论。一位落进黑洞并撞到奇点上去的的航天员的时间将会结束。然而，在广义相对论中，人们可以在不同的地方随意地以不同的速率来测量时间。因此，人们可以在航天员接近奇点时加快他或她的手表，使之仍然记下无限的时间间隔。在时间距离图上，这个新时间的常数值的表面将会在中心拥有在一起，刚好在奇性出现的点的下头。但是它们在远离黑洞的几乎平坦的时空中和通常的时间测度相一致。

人们可以在薛定谔方程中使用这个时间，如果他知道初始的波函数，便能计算后来的波函数。这样，人们仍然有宿命论。然而，值得注意的是，在后期波函数的一部分处于黑洞之内，它不能被外界的人观察到。这样，一位明知地不落入黑洞的观察者不能往过去方向演化薛定谔方程并且计算出早先时刻的波函数。为了做到这一点，他或她就需要知道黑洞之内的那一部分波函数，这包含有落进黑洞的物体的信息。因为一个给定质量和旋转速度的黑洞可由非常大量的不同的粒子集合形成，所以这可能是非常大量的信息。一个黑洞与坍缩形成它的物体的性质无关。约翰·惠勒把这个结果称为“黑洞无毛”。对于法国人而言，这正好证实另外他们的猜疑。

当我发现了黑洞不是弯曲黑的时候，和宿命论的冲突就产生了。正如我们在第二章中看到的，量子理论意味着，甚至在所谓的真空中场也不能够精确地为零。如果它们为零，则他们不但有精确的值即位置为零，而且有精确的变化率即速度亦为零。这就违反了不确定性原理。该原理讲，不能同时很好地定义位置和速度。相反地，所有的场必须有一定量的所谓的真空起伏。真空起伏可以几种似乎不用的方式解释，但是这几种方式事实上在数学中是等效的。从实证主义观点，人们可以随意选择任何对该问题最有用的图象。在这种情形下，使用下述的图象来理解真空起伏是非常有助的。在时空的某处同时出现的虚粒子对相互分离，在回到一块而且相互湮灭。“虚的”表明这些粒子不能被直接观测到，但是它们的间接效应能被测量到，而且它们和理论预言相符合的精确度令人印象深刻。

如果黑洞在场的话，则粒子对中的一个成员可以落入黑洞，留下另一个成员自由地逃往无穷远处。从远离黑洞的某人的观点看，逃逸粒子就显得是被黑洞辐射出来。黑洞的谱干刚好是我们从一个热体所预料到的谱，其温度和视界——黑洞的边界上的引力场成正比。换言之，黑洞的无度依赖于它的大小。

一个具有几倍太阳质量的黑洞的温度大约为百万分之一度的绝对温度，而一个更大的黑洞之温度甚至更低。这样，从这类黑洞出来的任何量子辐射完全被湮灭在热大爆炸遗留下的2.7度的辐射，也就是我们在第二章中讨论过的宇宙背景辐射之中。人们也许可能检测到从小很多即热很多的黑洞来的辐射，但是似乎它们在附近也不很多。这是一个遗憾。如果有一个被发现，我就要得到诺贝尔奖。然而，我们拥有这种辐射的间接观测证据，它来自于早期宇宙。正如在第三章中描述的，人们认为宇宙的早期历史经历了一个暴胀时期。宇宙在这一时期以不断增加的速率膨胀。这个时期的膨胀如此之快，以至于有些物体离我们太远，连它们的光线都从未抵达我们这里；在光线向我们传来时，宇宙已膨胀得太太多太快了。这样，在宇宙中存在一个视界，正如黑洞的视界那样，把已光线能抵达我们的区域和不能抵达的区域分离开来。

非常类似的论证表明，如果存在从黑洞视界来的辐射那样，也应该存在从这个视界来的热辐射。我们已经知道如何在热辐射中预期密度起伏的特征谱。在这种情形下，这些密度起伏会随着宇宙而膨胀。当它们的尺度超出事件视界的尺度时，它们就被凝固了，这样它们作为从早期宇宙残留下来的宇宙背景辐射的温度中的小变化，今天可被我们观测到。这些变化的观测和热起伏的预言相互一致的程度令人印象深刻。

尽管黑洞辐射的观测证据有些间接，所有研究过这一问题的人都一致认为，为了和其他观测上检验过的理论相一致，它必然发生。这对于宿命论具有重要的含义。从黑洞来的辐射将带走能量，这表明黑洞将失去质量而变得更小。接下去，这意味着它的温度会上升，而且辐射率将增加。黑洞最终将到达零质量。我们不知如何计算在这一点所要发生的，但是仅有的自然而又合理的结果似乎应是黑洞完全消失。那么，波函数在黑洞里的部分以及它挟持的有关落入黑洞物体的信息的下场如何呢？第一种猜想是，当黑洞最后消失时，这一部分波函数，以及它携带的信息将会涌现。然而，携带信息不能不消费，正如人们到电话帐单时意识到的那样。

信息需要能量去负载它，而在黑洞的最后阶段只有很小的能量留下。内部信息逃逸的仅有的似乎可行的方式是，它连续地伴随着辐射出现，而不必等待到最后阶段。然而，根据虚

粒子对的一个成员落进，而另一成员逃逸的图象，人们预料逃离粒子也落入粒子不相关，或者前者不携带走有关后者的信息。这样，仅有的答案似乎是，在黑洞内的波函数中的信息丢失了。

这种信息丧失对于宿命论具有重要的意义。让我们从头开始，我们注意到，即便你知道黑洞消失后波函数，你也不只能把薛定谔方程演化回去并计算在黑洞形成之前的波函数，它是什么样子会部分地依赖于在黑洞中丢失的那一点波函数。我们习惯地以为，我们可以准确地知道过去。然而，如果信息在黑洞中丧失，情况就并非如此。任何事情都可能已经发生过。

然而，一般说来，人们诸如占星家和他们的那些咨询者对预言将来比回溯过去更感兴趣。初看起来，似乎落到黑洞中的波函数部分的丧失不应妨碍我们语言黑洞外的波函数。但是，结果是这一丧失的确干扰了这一预言，正如我们在考虑爱因斯坦，玻里斯·帕多尔斯基和纳珍·罗森在 20 世纪 30 年代提出一个理想实验时能够看到的。

想象一个放射形原子衰变并在相反方面发出两个都有相反自旋的粒子。一位只看到其中一个粒子的观察者不能预言该粒子是往右还是往左自旋，但是如果观察者测量到它往右自旋，那么他或她就能确定地往左自旋，反之亦然。爱因斯坦认为这证明了量子理论是荒谬的：另一个粒子现在也许在星系的另一边，而人们会立即知道它自旋的方向。然而，其他大多数科学家都同意，不是量子理论，而是爱因斯坦弄混淆了。爱因斯坦-帕多尔斯基-罗森理想实验并不表明人们能比光更快地发送信息。那正是荒谬的部分。人们不能选择其自己的粒子将被测量为向右自旋。

事实上，这个理想实验正好是黑洞辐射所发生的。虚粒子对有一波函数，它预言这两个成员肯定具有相反的自旋。我们想做的是预言飞离粒子的自旋和波函数，如果我们能够观察到落入的粒子，我们便能做到这一点。但是那个粒子现在处于黑洞之内，不能测量得到它的自旋和波函数。正因为这样，人们无法预言逃逸粒子的自旋或波函数。它可具有不同的自旋和不同的波函数，其概率是各式各样的，但是它不能具有唯一的自旋或波函数。这样看来，我们语言将来的能力被进一步削减了。拉普拉斯的经典思想，即人们能同时预言粒子的位置和速度，因为不确定性原理指出人们不能同时准确地测量位置和速度，必须被修正。然而，人们仍然能准确测量波函数并且利用薛定谔方程去预言未来应发生的事。这是人们根据拉普拉斯思想所能预言的一半。我们能够确定地预言粒子具有相反的自旋。但是如果一个粒子落进黑洞，那么我们就不能对余下的粒子作确定的预言。这意味着在黑洞为不能确定预言任何测量：我们作出确定预言的能力被减低至零。这样，也许就预言将来而言，占星家和科学家定律是半斤八两。

许多物理学家不喜欢这种宿命论的降低，因而建议可以某种方式从黑洞之内将信息取出。多少年来人们相信可以找到保存这信息的某种方法，可惜这仅仅是一种虔诚的希望而已。但是 1996 年安德鲁·斯特罗明格和库姆朗·瓦法获得重大进展。我们采取把黑洞考虑成由许多称为 p -膜的建筑构件组成的观点。

回想一下，可以把 p -膜认为是一张三维空间以及我们没注意到的额外七维的运动的薄片。在某些情形下，人们可以证明在 p -膜上的波的数目和人们预料的黑洞所包含的信息量相同。如果粒子打到 p -膜上，它们便会在膜上激起额外的波。类似地，如果在 p -膜上不同方向的波在某点相遇，它们会产生一个如此大的尖峰，使得 p -膜的一小片破裂开去，而作

为粒子离开。这样， p -膜正如黑洞一样，能吸取和发射粒子。

人们可以将 p -膜当做有效理论；也就是说，我们不需要相信实际上存在平坦时空中运动的薄片，黑洞可以似乎像它们是由这种薄片组成的那样行为。这正如水，它是由亿亿个具有复杂的相互作用的 H_2O 分子构成。但是光滑的液体是非常好的有效模型。由 p -膜构成黑洞的数学模型给出的结果和早先描述的虚粒子对图象很相似。这样，从实证主义的观点看，至少对于一定种类的黑洞，它是一个同样好的模型。对于这些种类， p -膜模型和虚粒子对模型对发射率的预言完全一样。然而，这里存在一个重要差别：在 p -膜模型中，关于落入黑洞物体的信息将被储存的 p -膜上的波的波函数中。 p -膜被认为是平坦时空中的薄片。因为这个原因，时间会平滑地向前流逝，光线的轨迹不会被弯折，而且波里的信息不会丧失。相反地，信息最终来自 p -膜来的鼓舌中从黑洞涌现。这样，根据 p -膜模型，我们可以利用薛定谔方程去计算将来的波函数。没有任何东西丧失，而时间将光滑地推移。在量子的意义上我们具有完整的宿命论。

那么其中哪种图象是正确的呢？部分波函数是否在黑洞中丢失了，或者正如 p -膜模型建议的，所有信息再次跑出来？这是当代理论物理的一个突出的问题。许多人相信，新近的研究表明信息没有丧失。世界是安全和可预言的，而且不会发生任何以外事件。但是这不清楚。如果人们认真地对待爱因斯坦的广义相对论，人们必须允许时空自身打结，而信息在折缝中丧失的可能性。当星际航船《探险号》穿越一个虫洞，发生了一些意料之外的事。因为我正搭乘该船，并和牛顿，爱因斯坦和达他玩扑克，所以我知道此事。我大吃一惊。只要看看我的膝盖上出现了什么。

第五章 护卫过去

霍金

我的朋友兼合作者帕基·索恩和我打过许多赌。他不一个人云亦云的物理学家。这种品格使他具有勇气成为实际的可行性来讨论时间旅行的第一位严肃的科学家。

在公开场合思考时间旅行是很微妙的。他要么面临反对把公币浪费在这么荒谬的规划上的浪声，要么被要求把研究归于军事用途。无论如何，怎么保护我们自己免受拥有时间机器的人的攻击呢？他们也许能改变历史并且统治世界。我们之中只有很少的几个人鲁莽地啊、研究这种在物理学圈子里政治上不明智的题目。我们利用技术术语描述时间旅行来做掩饰。

爱因斯坦的广义相对论是所有现代有关时间旅行讨论的基础。正如我们在早先章节中看到的，爱因斯坦方程描述宇宙中的物质和能量如何将空间和时间弯曲和变形，从而使空间和时间变成动力量。在广义相对论中某人尤其腕表测量的私人是总是增加，这正像在牛顿理论或者狭义相对论的平坦时空一样。但是现在有了时空可能弯曲得那么厉害使你在乘空间飞船出发之前即已返回的可能性。

如果存在虫洞，也就是在第四章中提到的连接空间和时间不同区域的时空管道，它就成为可能发生此事的一个方式。其意思是，你驾驶你的空间飞船进入虫洞的一个口，而在不

同地方和不同时间处的另一个口出来。

虫洞，如果它们存在的话，将会是空间中解决速度极限问题的办法：正如相对论要求的，空间飞船必须以低于光速的速度旅行，这样要穿越星系就需要几万年。但是你可能在一餐饭的工夫通过虫洞到达星系的另一边并且返回。然而，人们能够证明，如果虫洞存在，你还可以利用它们在你发出之前即已返回。这样，你会以能做一些事，譬如首先炸毁发射台上的火箭，以阻止你出发。这是祖父佯谬的变种“如果你回过去在你父亲被怀胎之前将你祖父杀死，将会发生什么？

当然，只有你相信当你回到时间的过去时，你具有自由意志为所欲为，这才成为佯谬。本书不进行自由意志的哲学讨论。取而代之，它只集中讨论物理定律是否允许时空被卷曲得如此之甚，使得诸如空间飞船的宏观物体能回到自己的过去。根据爱因斯坦理论，空间飞船必须以低于光的局部速度旅行并沿着所谓的类时轨迹通过时空。这样，人们可以用技术术语来表述这个问题：时空是否允许封闭的类时曲线——也就是说，它会一次又一次地返回其出发点吗？我将把这类路径称为“时间圆环”。

我们可以试图在三个水平上回答这个问题。首先是爱因斯坦的广义相对论，它假定宇宙具有定义很好的没有任何不确定性的历史。我们对这一经典的理论有相当完整的图象。然而，正如我们已经看到的，因为我们观察到物质遭受不确定性和量子起伏的制约，这个理论不能是完全正确的。

因此我们能够在第二水平，也就是在半经典理论上搜索有关时间旅行的问题。在这个水平上，我们按照量子理论来考虑物质的行为，它具有不确定性和量子起伏，但是时空是很好定义的经典的。这里的图象不甚完整，但是我们至少有了如何进展的一些概念。

最后，存在完整的量子引力论，而不管其最终是什么样子的。在此理论中，不仅物质而且时间和空间自身都是不确定的而且起伏涨落，甚至连如何去提出时间旅行是否可能的问题都不清楚。也许我们充其量做到的知识询问，在几乎经典的并摆脱了不确定性的时空区域的人们会如何结实他们的测量。他们会认为在强引力和大量量子涨落的区域中已经发生了时间旅行吗？

从经典理论开始：狭义相对论不允许时间旅行，早先知道的弯曲的时空也不行。所以当1949年发现歌德尔定理的库尔特·歌德尔发现了一个时空时，爱因斯坦大吃一惊。这个时空是充满了旋转的物质，通过每一点都有时间圆环的宇宙。

歌德尔解需要一个宇宙常数，自然中时候存在宇宙常数仍不清楚，但是接着找到了其他无需宇宙常数的解。特别有趣的一个解是两根宇宙弦相互快速穿越的时空。

宇宙弦不应该和弦理论中的弦相混淆，虽然它们并非完全无关。它们是具有长度并有微小截面的物体。在某些基本粒子的理论中预言它们会发生。一根单独的宇宙弦外面的时空是平坦的。然而，这是切割去了一个楔子的平坦空间，弦处于楔子的锋刃端点。它像是一个圆锥。这代表了宇宙弦存在的时空。

请注意，因为圆锥的表面是你开始使用的同样的平坦纸张，除了尖端外，你仍然可以称它是“平坦的”。围绕有尖顶的一个圆周长更短，换言之，因为失去了块，所以围绕尖顶的圆周比平空间中的同样半径的圆周更短。这个事实证明，圆锥尖顶有曲率。

类似的，在宇宙弦的情形下，从平坦时空取走楔形缩短了围绕弦的圆周，但并不影响时间或者沿弦的距离。这意味着围绕着一跟单独的弦的失控不包含任何时间圆环，所以不可能旅行到过去。然而，如果还存在第二根相对于第一根运动的弦，其时间方向将是第一根弦的时间和空间方向的组合。这表明，从和第一根弦一道运动的人看来，由于第二根弦被切走的楔形缩短了空间距离和时间间隔。如果两根宇宙弦以接近光速作相对运动，则围绕着两跟弦运动的时间可被节省得那么厉害，使得还未出发即已到达。换言之，存在时间圆环使人们可以旅行到过去。

宇宙弦失控包含有正能量密度的物质，这是和我们知道的物理学相一致。然而，这种产生时间圆环的卷曲一直延伸到空间的无穷处，并且回到时间的无限去。这样，这些空间是和它们在其中的时间旅行一道被创生的。我们没有理由相信我们自己的宇宙是以这种卷区的方式创生的，况且我们没有来自将来的访客的可靠证据。因此，我假定在遥远的过去，更准确地讲，在我称为 S 的通过失控的某个面的过去不存在时间圆环。这个问题就变成：某种先进的文明能建造时间机器吗？也就是说，能不能把 S 未来的时空修正，使时间圆环出现在有限的区域内？我说有限区域是因为不管该文明变得多么先进，它大抵也只能控制宇宙的有限部分。

在科学中，问题的正确表述通常是解决它的钥匙，而这就是一个好例子。为了定义一台有限的时间机器意味着什么，我回到自己早期的某些研究。在存在时间圆环的时空区域是可能进行时间旅行的。时间圆环是以低光速旅行，但由于时空的卷曲仍能回到出发的地方和时间的路径。由于我已假定在遥远的过去没有时间圆环，就必须存在我称作时间旅行的“视界”，这是把时间圆环区域和没有它们的区域分隔开来的边界。

时间旅行视界和黑洞视界很相像。黑洞视界由刚好不落入黑洞的光线形成，而时间旅行视界由与自身相遇的光线的边缘形成。我把以下作为我撑作时间机器的有限生命视界的判据，也就是全部从一个界区域出现的光线成的视界。换言之，它们不是起源于无限处或奇点处，而是起源于包含时间圆环的有限区域，这是我们先进文明正要创造的那一类区域。

我们采用这个定义作为时间机器的基点，有利于使用彭罗斯和我在研究奇点和黑洞时发展的技巧。我甚至不用爱因斯坦方程就能证明，一般来讲，一个有限生成视界包含一个实际上和自身相遇的光线——也就是一根不断地返回到同一点的光线。光线每绕一圈就被蓝移一次，这样就像越变越蓝。光脉冲的峰波越来越拥挤，而光线用来绕一圈的时间间隔越来越短。事实上，以光粒子自身的时间测度来定义，它只有有限的历史，即使它在有限的区域内不断转圈而且不；碰到曲率奇点上去。

这些结果与爱因斯坦方程无关，但是只依赖于在有限区域中时空卷曲产生时间圈环的方式。然而，现在我们可以诘问，先进文明必须使用何种物质去卷曲时空，以建成一台有限尺度的时间机器。它能处处均有正的能量密度，正如我早先描述过的宇宙弦时空中那样吗？宇宙弦时空不满足我的时间圈环在有限区域中出现的要求。然而人们会以为这仅仅是因为宇宙弦是无限长的。他也许会想象用有限长宇宙弦劝环建造一个有限的时间机器，而且处处能量密度为正。使像帕基这样想回到过去的人失望是很遗憾的事，可惜处处能量密度为正的条

下，这是实现不了的。我能证明，你需要负的能量才能建造有限时间机器。

在经典理论中能量密度总是为正，这样在这个水平上有限尺度的时间机器就被排除了。然而，在半经典理论中情形就不同了。在半经典理论中人们认为物质行为受量子理论制约，而时空是很好定义并且是经典的。正如我们已经看到的，量子理论的不确定性原理意味着，场甚至在表现上空虚的空间中也总是上下起伏，并且具有无穷的能量密度。这样，为了得到我们在宇宙中观察到的有限的能量密度，人们必须减去一个无限大的能量。着一减除可以使能量密度至少在局部上为负。甚至在平坦空间中，人们找到能量密度在局部为负的量子态，虽然其中能量是正的。人们也许极想知道，这些负值究竟能否使时空以适当的方式卷曲从而建造有限时间机器。但是它们似乎理当如此。正如我们在第四章中看到的，量子起伏意味着甚至表现上空虚的空间也充满了虚粒子对，它们同时出现，相互分开，然后回到一起并相互湮灭。虚粒子对的一个成员将具有正能量，而另一成员负能量。当一个黑洞存在时，负能量成员能够落进，而正能量成员能逃向无限远，它在那里作为从黑洞携带走正能量的辐射而出现。负能粒子的落进引起黑洞损失质量并慢慢蒸发，其视界的尺度在缩小。

具有正能量密度的通常物质具有吸引引力效应，而且弯曲时空，使光线向相互方向弯折——正如在第二章中橡皮膜上的球总是使小滚珠往她滚去而从不往外滚开一样。

这意味着黑洞视界面积只能随时间增加，而决不缩小。为了使黑洞视界的尺度缩小，视界上的能量密度必须是负的并且在建造时间机器需要的方向上弯曲时空。这样我们可以想象，某一非常先进的文明能将事情安排妥当，使能量密度足够负，从而形成诸如空间非常那样的宏观物体能利用的时间机器。然而，在黑洞视界和时间机器视界之间有一重要差别。前者是由一直不断前进的光线组成，而后者包含有不断转圈的闭合光线。一个沿着这种闭合轨道运动的虚粒子会不断重复地把它基态能量带回到同一点。因此，人们可以预料，在视界——也就是时间机器的边界上的能量密度是无限的。时间机器是人们可以旅行到过去的区域。在一些简单得可做准确计算的背景中的直截明了的计算中，这一点得到了证实。这表明穿过视界进入时间机器的人或者空间探测器会被辐射爆所毁灭。这样，就时间旅行而言未来是黑暗的——或者毋宁说是令人眩目的白？

物体的能量密度依它所处的态而定，所以先进的文明也许可以把不断围绕一个闭合圆环运动的虚粒子“逐出”或取掉，使得时间机器边界上能量密度变成有限的。然而，这样的时间机器是否稳定仍然不清楚：最小的扰动，譬如某人穿过视界进入该时间机器，可能激活了循环的虚粒子并引发闪电。这是一个物理学家应该能自由讨论而不被嘲笑的问题。即使结果是时间旅行不可能，我们也理解了为何如此，而这一点是重要。

为了确定地回答这个问题，我们不仅需要考虑物理场的，而且也要考虑时空本身的量子起伏。人们也许预料到，这些会引起光线的轨迹以及整个时序概念上的朦胧模糊。的确，因为时空的量子起伏意味着视界不是准确定义的，人们可以把来自黑洞的辐射认为是漏洞。因为我们还没有量子引力的完整理论，很难说时空起伏的效应应是怎样的。尽管如此，我们能指望从在第三章中描述的费因曼对历史求和中得到一些提示。

每一个历史都是弯曲时空以及其中的物质场。由于我们打算对所有可能的历史，而不仅是那些满足一些方程的历史求和，这个求和应当包含卷曲到足以旅行到过去的时空在内。这

样，问题就变成，为何时间旅行不到处发生呢？其答案是，时间旅行的确发生于微观尺度上，但是我们察觉不到。如果人们将费因曼的历史求和思想应用于一个粒子上，他就必须包含粒子旅行的比光还快甚至向时间过去旅行的历史。尤其是，存在粒子在时间和空间中的一个闭合圈环上不断循环的历史。这就是影片《圣烛节》中的记者必须不断地重复过同一天一样。

人们不能用粒子检测器来直接观测这种处于闭合圆环历史中的粒子。然而，在许多实验中已经测量到他们的间接效应。有一个实验是由在闭合圆环中运动的电子引起的氢离子光谱微小的位移。另一个实验是两片平行金属板之间的很小的力，这是由于可适合于平板之间的闭合圈环历史比适合于外面区域的微少这一事实引起的——卡米西尔效应的另一种等效解释。这样，实验验证了闭合圈环历史的存在。

人们在许会争辩道，由于闭合圈环历史甚至在固定的背景诸如平空间中发生，它们和时空卷曲有何相干。但是近年我们发现物理学中的现象通常具有对偶的同样成立的描述。人们可以等价地说，粒子在给定的背景中沿一个闭合圈环运动，或者粒子固定不动而空间和时间围绕着它起伏。这只不过是你是首先对粒子轨道求和然后再对弯曲时空求和，还是以相反的顺序求和的问题。

因此，量子理论看来允许在微观的尺度上的时间旅行。然而，这对于科学幻想，诸如你回到过去去杀死你外祖父的目的没有多大用处。因此，问题就变成：在对历史求和中的概率能否在具有宏观时间圈环的时空附近取得锋值呢？

人们可以这样研究这个问题，考虑在一系列越来越接近允许时间圈环首的时空背景中的物质场的历史求和。人们预料，在时间圈环首次出现时会发现某种戏剧性事件，而这正是被我和我的一名学生迈克·卡西迪研究的一个简单例子所证实的。

在我们的一系列研究的背景时空和所谓的爱因斯坦宇宙紧密相关。当爱因斯坦相信宇宙在时间上是静止不变，既不膨胀也不收缩时提出了这种时空。在爱因斯坦宇宙中时间从无限的未来走向无限的将来流逝。然而，空间方向是有限的并且自身闭合，如同地球的表面一样，只是多了一维。人们可以把这时空画成一个圆柱，长轴是时间方向，而截面是三个空间方向。

因为爱因斯坦宇宙不膨胀，所以它不代表我们在其中生活的宇宙。尽管如此，因为它简单，人们可以作对历史的求和，所以在讨论时间旅行时利用它作为背景很方便。暂时忘记一下时间旅行，考虑在爱因斯坦宇宙中围绕某个轴旋转的物质。如果你位于轴上，你可以留在空间中的同一点，正如你站在儿童旋转木马的中心。但是如果你不在轴上，你就以围绕着轴旋转的方式在空间中运动。你离开轴越远，就运动的越快。这样，如果宇宙在空间上是无限的，则离开轴足够的地方必须旋转得比光还快。然而，因为爱因斯坦宇宙在空间撒谎能够是有限的，所以就存在一个旋转的临界速度，低于这个临界速度时宇宙任何部分都旋转得比光慢。

现在考虑对一个旋转的爱因斯坦宇宙中的粒子历史求和。当旋转很慢时，对于给定的能量粒子历史可以采用许多路径。这样对在这样背景中的所有粒子求和就会得到大的幅度。这意味着，在对所有弯曲时空的历史求和中这个背景的概率是高的，也就是说，它是更可能的历史之一。然而，随着爱因斯坦宇宙的旋转速度达到临界值，似的它外缘的运动速度达到光

速，在边缘上只存在一个经典允许的粒子路径，也就是以光速运动的路径。这意味着对粒子历史的求和将很小。这样，对所有弯曲的时空历史求和中这些背景的概率很低。也就是说，它们是最不可能的。

旋转的爱因斯坦宇宙和时间旅行以及时间圈环有何相干呢？其答案是，它们和其他允许时间圈环的背景是数学上等价的。这些其他背景是在两个空间方向膨胀的宇宙。该宇宙在第三个空间方向不膨胀，这个方向是周期性的。这也就是说，如果你在这个方向走一定的距离，就会回到出发点。然而，每次你在第三个空间方向走一圈，你在第一和第二方向的速度都被加快上去。

如果加快得很小，就不存在时间圈环。然而，考虑一个加快不断增加的背景的序列。当加速达到某一临界值时时间圈环就要出现。这一临界加快对应于爱因斯坦宇宙的临界旋转速度，这是可以想见的。由于在这些背景中对历史求和计算是数学上等效的，人们可以得出结论，当这些背景达到现实时间圈环需要的圈曲时，它们的概率趋向零。这就支持了我在第二章末提到的所谓的时续防卫猜测：物理定律协同防止宏观物体的时间旅行。

虽然历史求和允许时间圈环，其概率极为微小。基于我早先提及的对偶性论证，我估计帕基·索恩能回到过去并杀死其祖父的概率小于一后面更一万万亿亿亿亿亿亿个零分之一。

那是相当小的概率，但是如果你仔细观察帕基的像，你可以在边缘上看到一点模糊。那对应于某个私生子从未来回来并杀死其祖父，因此他并不真的在那里的微弱可能性。

作为赌徒，帕基和我会认为此而打赌，麻烦在于我们不能互相打赌，因为现在我们两人都站在一边。另一方面，我不愿意和其他任何人打赌。他也许来自未来并且知道时间旅行的可能性。

你也许想知道这一章是否为政府包庇时间旅行的一部分。你也许是对的。

第六章 我们的未来？《星际航行》可以吗？

因为《星际航行》是未来的安全而舒适的幻影，所以广受欢迎。我自己也就算是一名《星际航行》迷，这样便很容易被说服去客串了一集。在那一集中我和牛顿，爱因斯坦以及达他航长玩扑克，我把他们全打败了。可以报警出现，所以我从未收到我赢的钱。

《星际航行》战线了一个在科学，技术和政治组织远比我们先进的社会。在现时和那时之间一定会有巨大的改变以及与之相伴随的紧张和混乱，但是在戏剧中描述的时期，科学，技术和社会组织据说已达到几乎完美的水平。

我想质疑的是这种场景并诘问，我们是否会在科学和技术上达到一种最终的稳定的状态。从上一次冰河时期迄今的大约一万年左右人类知识和技术一直在演化着。也出现过一些挫折，例如在罗马帝国崩溃之后的黑暗时代。但是世界人口，作为我们维持生命和养活自己的技术能力的测度一直在稳步上升，除了一些诸如黑死病的小起伏。

在前两个世纪，它的增长变成指数式的，也就是说每年的人口增加同样的百分比。这个增长率现在大约为每年百分之一一点九。听起来这似乎不很多，但是它意味着世界人口每 40

年要加一倍。

电力消耗和科学论文的数目是近代技术发展的另外的测度。它们也是指数增长的，并在短于四十年间加倍。没有任何迹象表明，在最近的将来科学技术的发展会缓慢下来甚至停止——直至《星际航行》时代这肯定不会发生。这个时代被认为在不那么遥远的将来。但是如果人口到 2600 年将会到达擦肩摩踵的程度，到那时地球会因大量使用电力而发出红热的光芒。

如果你把正在出版的所有新书一本本地堆放，比必须至少以每小时 90 海里的速度运动才能追赶它的尽头。当然，到了 2600 年新的艺术和科学著作将以电子形式出版，而不用书报。尽管如此，如果继续这种指数增长，在我的理论物理领域每秒种就有十篇新论文，根本来不及阅读。

很清楚，目前的指数增长不可能无限继续下去。那么将会发生什么呢？一种可能性是我们被某些灾难，譬如核战争毁灭殆尽。有一个黑色幽默讲，我们之所以未被外星人接触，是因为当一种文明达到我们的水平时，就变得不稳定而且毁灭自身。然而，我是一名乐观主义者。我相信，人类达到今天这样的境界，事物变得这么有趣，绝非仅仅为了把自己毁灭。

《星际航行》对未来的想象，也就是我们达到先进的但是本质上静态的水平，就我们对制约宇宙的基本定律的知识而言，是可以实现的。正如这个终极理论存在的话，它将要确定《星际航行》式的翘曲飞行能否实现。按照现在的观念，

我们必须以一种缓慢和冗长乏味的方式探索星系，利用运动得比光还慢的空间飞船；但是由于我们尚未拥有完整的统一理论，我们还不能完全排除翘曲飞行。

另一方面，我们已经知道在除了最极端情形外都成立的定律：制约《探险号》全体职员定律，如果不包括制约空间飞船本身的话。但是我们在利用这些定律上或者利用它们所产生的系统的复杂性上，似乎永远不会达到一种恒定的状态。本章的期于部分正是讨论这种复杂性。

我们迄今为止所有的最复杂系统是我们自身的生命。生命似乎起源于太初海洋之中，太初海洋在 40 亿年前覆盖着地球。我们不知道这是怎么发生的。也是原子间的随机碰撞构成了宏观分子，这些宏观分子能复制自己并且将自己聚成更复杂的结构。我们能确切知道的是，到 35 亿年之前，高度复杂的 DNA 分子已经出现。

DNA 是地球上所有生命的基础。它具有双螺旋结构，犹如螺旋状楼梯，它是在 1953 年于剑桥的卡文迪许实验室由弗朗西斯·克里克和詹姆·沃特森发现的。双螺旋的两缕由核酸对连接，正如螺旋楼梯中的踏板。存在四种核酸：胞嘧啶，鸟嘌呤，酪氨酸和腺嘌呤。不同核酸沿着螺旋楼梯发生的顺序携带遗传信息，他使 DNA 分子在它周围集合有机体并复制自己。当 DNA 复制自身时，在核酸沿着螺旋的顺序会偶尔出错。在大多数情形下，复制的错误使 DNA 要么不能要么更少可能去复制自己，这意味着这种遗传误差或者被称作突变的会死去。但是在一些情形下，这误差或者突变将会增加 DNA 存活和繁殖的机会。遗传密码的这种改变是很有利的。这就是包含在核酸序列中的信息逐渐演化并且变得更复杂的过程。

因为生物演化基本上是在所有遗传可能性空间中的随即漫游，所以它非常缓慢。其复杂性或者被编码于 DNA 中的信息的比特数粗略地为分子中的核酸数目。在最初的 20 亿光年左右，其复杂性增加率应该是每百年一个比特信息的数量级。DNA 复杂性增加率在最近的几

百万年里逐渐地上升到每年一比特左右。但是后来，大约 6000~8000 年以前，发生了重大的新的进展。我们发现了书写语言。这意味着，信息从这一代向下一代转移，不必等待非常缓和的随即突变和自然选择把它编码到 DNA 的序列的过程。复杂性的量被极大地增加。单独的一本浪漫小说就够储存关于猿和人类 DNA 差别的那么多信息，而 30 卷百科全书可以描述人类 DNA 的整个序列。

更重要的是，书中的信息可以快速地更新。现在人类 DNA 由于生物进化引起的更新率超过每秒 100 万比特。当然，大部分信息都是垃圾。但是即使 100 万中只有一比特是有用的，那仍然比生物进化快 10 万倍。

这种通过外部的非生物手段的资讯传递使人类凌驾与世界之上并使人口指数地增长。但是我们现在处于新时代的启始，在这新时代里我们不需等待生物进化的缓慢步骤就能增加我们内部纪录即 DNA 的复杂性。在最近的一千年我们很有可能将其完整重新设计。当然，许多人说人类遗传工程应该被禁止，但是我们能否防止它是很另人可疑的。为了经济的原因将允许植物和动物的遗传工程，而有些人一定会对人类进行尝试。除非我们有一个极权的世界政府，某些人在某处将设计改良人种。

很清楚，创造改良的人种相对于未改良的人种会产生巨大的社会和政治问题。我不想将人类遗传工程当作必须的发展来辩护，我只不过是说，不过我们要不要，它都可能发生。这就是为什么我不相信《星际航行》那样的科学幻想，在那里四百年后的未来人们和我们今天本质上是相同的。我认为人种及其 DNA 将相当快速地增加其复杂性。我们应该认识到这很可能发生，而且考虑如何去应付这种局面。

如果人类要去应付它周围日益复杂的世界和遭遇到诸如太空旅行这样的新挑战的话，它必须改善其精神与体温。如果生物系统想领先电子系统的话，人类也需要增加自己的复杂性。电脑在现时具有速度的优势，但是它们毫无智慧的迹象。这并不奇怪，因为我们现有的电脑比一根蚯蚓的大脑还简单。蚯蚓是一种智力微不足道的物种。

但是，计算机服从所谓的穆尔定律：它是那些显然不能无限继续的指数增长之一。然而，它也许会继续到电脑具有类似于人脑的复杂性为止。某些人说电脑永远不能显示真正的智慧，不管这智慧是何止而言。但是我似乎觉得，如果非常复杂的电子路线也能使电脑以一种智慧的方式行为。而且如果它们是智慧的，它们也应该能设计出甚至具有更大的复杂性和智慧的电脑。

生物和电子复杂性的这种增加会永远继续下去吗？还是存在一个自然的极限？在生物方面，迄今的人类智慧的极限被通过产道的大脑尺度所定。我目睹我三位孩子的出世，知道让头出来是如何困难。但是，我预料在一百年内，我们将能够在人体之外养育婴儿，这样这个极限就被消除了。然而，通过遗传工程增加人脑尺度最终会遭遇到这样的问题，即身体中负责我们精神活动的化学信使运动较慢。这意味着，进一步提高大脑的复杂性将会以速度为代价。我们可能才思敏捷或者非常智慧，但是二者不可能兼。我仍然认为，我们可能比《星际航行》中的大部分人有智慧的多，那不是什么困难的事。

电子线路具有和人脑一样的复杂性对速度的问题。然而，在这种情形下讯号是电子的，而不是化学的，它以光速运动，速度快多了。尽管如此，光速已经是设计更快速电脑的实际

极限。人们可以进一步降低线路尺度以改善这种局面，但最终将有一个由物质原子性质设下的极限。我们在遇到这个障碍之前仍有一段路可走。

电子线路在保持速度之际增加其复杂性的另一种方法是去复制人脑。大脑不具备单独的CPU——中央处理器——它顺序处理每一个指令。相反地，人脑有几百万个同时一道工作的处理器。这种大规模平行处理也将是电子智慧的未来。

假定我们在以后的一百年不自身毁灭，我们将很可能首先分散到太阳系的行星去，然后再到邻近的恒星去。但是不会像在《星际航行》或《巴比伦5》中那样，在几乎每一个恒星系统都有接近人类的新种族。我们人种以它目前的形式仅仅存在了从大爆炸以来的一百五十亿年左右中的两百万年。

这样，即使生命在其他恒星系统发展，在其可以认出的人类阶段邂逅它的机会非常迷茫。我们将遭遇到的外星人的生命很可能要么更新为原始的多，要么更为先进的多。如果它更先进，为何不分散到整个星系并且造访地球影片《外星人》不如说更像影片《独立日》。

那么，如何理解我们没有地球外的来客呢？可能是在那里存在有先进有先进的种族，它知悉我们的存在，但是让我们在底水平上自做自爱。然而，如此照应低等的生命形式是另人可疑的：我们中的大多数人忧虑过在脚下踩死了多少昆虫或者蚯蚓吗？更合理的解释应该是，不管是在其他为我们宣称自己是智慧的，尽管如此没有什么根据，我们倾向于把智慧看成进化的不可避免的后果。然而，人们可以对此设疑。不清楚智慧是否具有更多的存活价值。细菌虽然没有智慧，但是存活得很好。如果我们所谓的智慧在一场核战争中毁灭自身的话，细菌仍然存活。但是我们不太可能找到我们的生物。

科学的未来不会像在《星际航行》中描绘的那么令人宽慰的图景：一个充满了许多有人类特征的种族的，具有先进的但本质上静止的科学技术的宇宙。相反地，我认为我们将独自地但是快速地发展生物的电子的复杂性。在以后的一百年间这方面的发展不会太多，这就是我们所能可靠预言的一切。但是，如果我们能存活到下一个千年之末，那时候我们和《星际航行》的差别将会是根本的。

第七章 膜的新奇世界

膜的新奇世界(霍金讲演词)

我想在这次演讲中描述一个激动人心的新机制，它可能改变我们关于宇宙和实在本身的观点。这个观念是说，我们可能生活在一个更大空间的膜或者面上。

膜这个字拼写为 **BRANE**，是由我的同事保罗·扬森为了表达薄膜在高维的推广而提出的。它和头脑是同一双关语，我怀疑他是故意这么做的。我们自以为生活在三维的空间中，也就是说我们可以用三个数来标明物体在屋子里的位置，它们可以是离开北墙五英尺离开东墙三英尺还比地板高两英尺，或者在大尺度下，它们可以是纬度、经度和海拔。在更大的尺度下，我们可以用三个数来指明星系中恒星的位置，那就是星系纬度、星系经度以及和星系中心的距离。和原来标明位置的三个数一样，我们可以用第四个数来标明时间。这样，我们就可以

这样把自己描述成生活在四维时空中，在四维时空中可以用四个数来标明一个事件，其中三个是标明事件的位置，第四个是标明时间。

爱因斯坦意识到时空不是平坦的，时空中的物质和能量把它弯曲甚至翘曲，这真是他的天才之举。根据广义相对论，物体例如行星企图沿着直线穿越时空运动，但是因为时空是弯曲的，所以它们的路径似乎被一个引力场弯折了。这就像你把重物代表一个恒星放在一个橡皮膜上，重物会把橡皮膜压凹下去，而且会在恒星处弯曲。现在如果你在橡皮膜上滚动小滚珠，小滚珠代表行星，它们就围绕着恒星公转。我们已经从 GPS 系统证实了时空是弯曲的，这种导航系统装备在船只、飞机和一些轿车上。它依靠比较从几个卫星来的信号而运行的。如果人们假定时空是平坦的，它将会把位置计算错。

三维空间和一维时间是我们看到的一切。那么我们为什么要相信我们不能想起不能观察到的它的额外维呢？它们仅仅是科学幻想呢，还是能够被看到的科学后果呢？我们认真地接受额外维的原因是，虽然爱因斯坦广义相对论和我们所作的一切观测相一致，该理论预言了自身的失效。罗杰·彭罗斯和我在讨论广义相对论时预言时空在大爆炸处具有开端，在黑洞处有终结。在这些地方广义相对论失效了。这样人们就不能够预言宇宙如何开端，或者对落进黑洞的某人将会发生什么。

广义相对论在大爆炸或黑洞处失效的原因是没有考虑到物质的小尺度行为。在正常情况下，时空的弯曲是非常微小的，并也是在相对场的尺度上，所以它没有受到短距离起伏的影响。但是在时间的开端和总结，时空就被压缩成单独的一点。为了处理这个，我们想要把非常大尺度的理论即广义相对论和小尺度的理论即量子力学相结合。这就创生了一种 TOE，也就是万物的理论，它可用来描述从开端直到终结的整个宇宙。

我们迄今已经花费了三十年的心血来寻找这个理论，目前为止我们认为已经有了个候选者，称为 M 理论。事实上，M 理论不是一个单独的理论，而是理论的一个网络，所有的理论事物都在物理上等效，这和科学的实证主义哲学相符合。

在这哲学中，理论只不过是一个数学模型，它描述并且整理观测。(Positivist Philosophy---A theory is just a mathematical model, that describe and codifies the observations) 人们不能询问一个理论是否反映现实，因为我们没有独立于理论的方法来确定什么是实在的。甚至在我们四周，被认为显然是实在的物体，从实证主义的观点看，也不过是在我们头脑中建立的一个模型，用来解释我们视觉和感觉神经的信息。当人们把贝克莱主教的“没有任何东西是实在的”见解告诉约翰逊博士时，既然他用脚尖踢到一个石头并大声吼叫，那么我也就驳斥这种见解。

但是我们也许都和一台巨大的电脑模拟连在一起，当我们发出一个马达信号去把虚拟的脚摆动到一块虚拟的石头上去，它发出一个疼痛的信号。也许我们也就是外星人玩弄的电脑游戏中的一个角色。不再开玩笑，关键在于我们能有一种不同的对于宇宙的描述，所有的这些理论都预言同样的观察。我们不能讲一种描述比另外一种描述更实在，只不过是对一种特定情形更方便而已。所以 M 理论网络中的所有理论都处于类似地位。没有一种理论可以声称比其余的更实在。

令人印象深刻的是，**M** 理论网络中的许多理论的时空维数具有比我们经验到的四维更高。这些额外维数是实在的吗？我必须承认我曾经对额外维持迟疑的态度。但是，**M** 理论网络配合得天衣无缝，并且具有这么多意想不到的对应关系，使我认为如果不去相信它，就如同上帝把化石放进岩石里，误导达尔文去发现进化论一样。

在这些网络的某些理论中，时空具有十维，而在另一些中，具有十一维。这使如下事实的又一个迹象，即时空以及它的维不是绝对的独立于理论的量，而只不过是一个导出概念，它依赖于特殊的数学模型而定。那么对我们而言，时空是显得四维的，而在 **M** 理论是十维或者十一维的，这是怎么回事呢？为什么我们不能观察到另外的六或七维呢？

这个问题的传统的，也是迄今仍被普遍接受的答案是，额外维全部被卷曲到一个小尺度的空间中，余下四维几乎是平坦的。它就像人的一根头发，如果你从远处看它，它就显得像是一维的线。但是如果你在放大镜下看它，你就看到了它的粗细，头发的确是三维的。在时空的情形下，足够高倍数的放大镜应能揭示出弯卷的额外维数，如果它存在的话。事实上，我们可以利用大型粒子加速器产生的粒子把空间探测到非常短的距离，比如在日内瓦建造的大型强子碰撞机。至少，迄今我们还没有探测到超出四维的额外维的证据。如果这个图象是正确的，那么额外维就会被卷曲到比 1 厘米的一百亿亿分之一还小。

我刚才描述的是处理额外维的传统手段。它意味着我们有较大的机会探测到额外维的仅有之处是宇宙的极早期。然而最近有人提出更激进的设想，额外维中的一维或者二维尺度可以大的多，甚至可以是无限的。因为在粒子加速器中没有看到这些大的额外维，所以必须假定所有的物质粒子被局限在时空的一个膜或面上，而不能自由地通过大的额外维传播。光也必须被限制在膜上，否则的话，我们就已经探测到大的额外维，粒子之间的核力的情形也是如此。

另一方面，引力是所有形式的能量或质量之间的普适的力。它不能被限制于膜上，相反地，它要渗透到整个空间。因为引力不仅能够耗散开，而且能够大量发散到额外维中去，那么它随距离的衰减应该比电力更厉害。电力是被限制在膜上的。然而我们从行星轨道的观测得知，太阳的万有引力拉力，随着行星离开太阳越远越下降，和电力随距离减小的方式相同。

这样，如果我们的确生活在一张膜上，就必须有某种原因说明为何引力不从膜往很远处散开，而是被限制在它的附近。一种可能性是额外维在第二张影子膜上终结，第二张膜离我们生活其中的膜不远。我们看不到这张影子膜，因为光只能沿着膜旅行，而不能穿过两膜之间的空间。然而我们可以感觉到影子膜上物体的引力。可能存在影子星系、影子恒星甚至影子人，他们也许正为感受到从我们膜上的物质来的引力而大大惊讶。对我们而言，这类影子物体呈现成暗物质，那是看不见的物质。但是其引力可以被感觉到。

事实上，我们在自身的星系中具有暗物质的证据。我们能看到的物质的总量不足以让引力把正在旋转的星系抓在一起。除非存在某种暗物质，该星系将会飞散开。类似地，我们在星系团中观测到的物质总量也不足以防止它们散开，这样又必须存在暗物质。当然，影子膜并不是暗物质的必要条件。暗物质也许不过是某种很难观测到的物质的形式，例如 **wimp**（弱相互作用重粒子），或者褐矮星以及低质量恒星，后者从未热到足以使氢燃烧。

因为引力发散到我们的膜和影子膜之间的区域，在我们膜上的两个邻近物体间的万有引

力随距离的下降会比电力更厉害，因为后者被局限于膜上。我们可能在实验室中，利用剑桥的卡文迪许爵士发明的仪器测量引力的短距离行为。迄今我们没有看到和电力的任何差异，这意味着膜之间距离不能超过一厘米。按照天文学的标准，这是微小的，但是和其他额外维的上限相比是巨大的。正在进行短距离下引力的新测量，用以检测“膜世界”的概念。

另一种可能性是，额外维不在第二张膜上终结，额外维是无限的，但是正如马鞍面一样被高度弯曲。莉萨朗达尔和拉曼桑德鲁姆指出，这种曲率的作用和第二张膜相当类似。一张膜上的一个物体的引力影响，将不会在额外维中发散到无限去。正如在影子膜模型中，引力场长距离的衰减正好用以解释行星轨道和引力的实验室测量，但是在短距离下引力变化的更快速。然而在朗达尔-桑德鲁姆模型和影子膜模型之中存在一个重大的差别。物体受引力影响而运动，会产生引力波。引力波是以光速通过时空传播的曲率的涟漪。正如光的电磁波，引力波也必须携带能量，这是一个在对双脉冲星观测中被证实的预言。

如果我们的确生活在具有额外维的时空中的一张膜上，膜上的物体运动产生的引力波就会向其它维传播。如果还有第二张影子膜，它们就会反射回来，并且被束缚在两张膜之间。另一方面，如果只有单独的一张膜，而额外维无限的延伸，就像朗达尔-桑德鲁姆模型中那样，引力波会全部逃逸，从我们的膜世界把能量带走。这似乎违背了一个基本物理原则，即能量守恒定律。它是讲总能量维持不变。然而，只是因为我们对所发生事件的观点被限制在膜上，所以就显得定律被违反了。一个能看到额外维的天使就知道能量是常数，只不过更多的能量被发散出去。

只有短的引力波才能从膜逃逸，而仅有大量的短引力波的源似乎来自于黑洞。膜上的黑洞会延伸成在额外维中的黑洞。如果黑洞很小，它就几乎是圆的。也就是说它向额外维延伸的长度就和在膜上的尺度一样。另一方面，膜上的巨大黑洞将会延伸成“黑饼”。它被限制在膜的邻近，它在额外维中的厚度比在膜上的宽度小得多。

若干年以前，我发现了黑洞不是完全黑的：它们会发射出所有种类的粒子和辐射，它们就如热体一样。粒子和象光这样的辐射会沿着膜发射，因为物质和电力被限制在膜上。然而，黑洞也辐射引力波，这些引力波不被限制在膜上，也向额外维中传播。如果黑洞很大，并且是饼状的，引力波就会留在膜的附近，这意味着黑洞以四维时空中所预想的速度损失能量和质量。因此黑洞会缓慢地蒸发，尺度缩小，直至它变得足够小，使它辐射的引力波开始自由地逃逸到额外维中去。对于膜上的某人，黑洞就相当于在发散暗辐射，也就是膜上不能直接观察到的辐射，但是其存在可以从黑洞正在损失质量这一事实推出。这意味着从正在蒸发的黑洞来的最后辐射暴显得比它的实际更不激烈些，这也许是为什么我们还未观测到伽马线暴，后者由正在死亡的黑洞产生。

虽然还存在另一种乏味的解释，就是说不存在许多这样的黑洞，其质量小到不迟于宇宙的现阶段蒸发。这真是遗憾，因为如果发现一个低质量的黑洞，我就会获得诺贝尔奖。

对于膜世界的产生有几种理论。一种版本是称为 **Ekyrotic** 宇宙的影子膜模型。**Ekyrotic** 这个名字有点绕嘴，但是它是从希腊文来的，意思是运动和变化。在 **Ekyrotic** 场景中，人们认为我们的膜以及影子膜存在了无限久。他们是在无限的过去在静态中启始的。膜之间一个非常小的力就使他们相互运动，膜就会碰撞，并且相互穿越，产生大量的热和辐射。这一

碰撞被认为是大爆炸，也就是宇宙热膨胀相的启始。

关于膜是否能够碰撞以及如此这般行为，存在许多未解决的技术问题。但是，即是膜具有所需要的性质，以我的意见，Ekpyrotic 场景也是不能令人满意的。它要求膜在无限的去启始时，处于一种以不可思议的精度调准的位形之中。膜的初始条件的任何微小变化，都会使碰撞变得乱糟糟的，产生一个高度无规的膨胀宇宙，一点也不像我们现在观察到的这个几乎光滑的宇宙。如果膜从它们的基态或者最低能态启始，初始条件被精确指定便是很自然的了。但是如果存在最低能态，膜将会停留在那儿，而永不碰撞。但事实上，膜从一个非稳态启始，必须人为地让它处于这种态。这必须是一只相当稳定的手，才能使初始条件那么精确。但是，但是如果一个人能够做到这一点，他能够使膜从任何方式启始。

按照我的意见，膜世界启始的更远为吸引人的解释是，它作为真空中的起伏而自发产生。膜的产生有点像沸腾水中蒸气泡的形成。水液体中包含亿万万个 H_2O 分子，它们在最靠近的邻居之间耦合，并且挤在一起。当水被加热上去，分子运动得更加快，并且相互弹开。这些碰撞偶然赋予分子如此高的速度，使得它们中的一群能摆脱它们的键，形成热水围绕着的蒸气小泡泡。泡泡将以随机的方式长大或缩小，这时液体中来的更多的分子参与到蒸气中去，或者相反的过程。大多数小蒸气泡将会重新塌缩成液体，但是有一些会长大到一定的临界尺度，超过该临界尺度泡泡几乎肯定会继续成长。我们在水沸腾时观察到的正是这些巨大的膨胀的泡泡。

膜世界的行为很类似。真空中的起伏会使膜世界作为泡泡从无中出现。膜形成泡泡的表面，而内部是高维空间。非常小的泡泡将重新塌缩成无。但是一个由量子起伏成长的泡泡超出一定的临界尺度，很可能继续膨胀。在膜上，也就是在泡泡的表面上的人们（例如我们）会以为宇宙正在膨胀。这就像在气球的表面上画上星系，然而把它吹涨，星系就相互离开，但是没有任何星系被当作膨胀的中心。让我们希望，没有人持宇宙之针将泡泡放气。随着膜膨胀，内部高维空间的体积会增大。最终存在一个极其巨大的泡泡，它被我们生活其中的膜环绕着。膜也就是泡表面上的物质将确定泡泡内部的引力场。

平等地，在内部的引力场也将确定膜上的物质。它就像一张全息图。一张全息图是一个三维物体被编码在一个二维表面上的象。我对全息图的全部知识是，在一张图上是星际航行的一集中的场景，我本人与牛顿和爱因斯坦在一起。（之后是一段黑白短片，在一个飞船舱内三位巨匠和一位类似于船长的人在打牌，讨论着些事情，由于是英文对白，本人水平有限，未能得其意思。）类似于，我们认为是四维时空的也许只是五维泡泡内部区域所发生的事件的一张全息图。

这样，什么是实在的呢？是泡泡还是膜？根据实证主义哲学，这是没有意义的问题。因为不存在独立于模型的实在性的检验，或者说什么是宇宙的真正维数是没有意义的，四维和五维的描述是等效的。我们生活在三维空间和一维时间的世界中，我们对这一些自以为一清二楚。但是我们也许只不过是闪烁的篝火在我们存在的洞穴的墙上的投影而已。但愿我们遭遇到的任何魔鬼都是影子。

膜世界模型是研究的热门课题，它们是高度猜测性的。但是它们提供了可供观测验证的新行为，它们可以解释为什么万有引力为什么这么弱。在基本理论的基础中，引力也许相当的强大但是引力在额外维散开意味着，在我们生活其中的膜上的长距离引力变弱了。如果引

力在额外维中更强，那么在高能粒子碰撞时形成小黑洞就容易得多。这也许在日内瓦建造中的 LHC 也就是大型强子碰撞机上可能实现。一个微小的黑洞不会吃掉地球，不像报纸中绘声绘色的恐怖故事那样。相反地，黑洞将会在“霍金辐射”的“扑”的一声中消失，而我将得到诺贝尔奖。LHC 加油！我们可以发现一个膜的新奇世界。