

献给丹尼斯和比尔，
宇宙学家、绅士和教师，
彼于人们赐益良多

我们所见的固然美好

我们明了的愈加美妙

我们尚未悟彻的更是

不胜其美，美不可言
——尼尔斯·斯坦森
(尼古拉·斯坦诺)

前言

夜空虽然幽暗，却仍充满奇迹。千百年来，群星构成的奇丽图案一直撩拨着人们的心弦。这些图案错综复杂，足以令人心驰神往；然而，它们却难不住我们的大脑。它们为有关人类与人类起源的神话和传说增添了丰富的素材。宗教传说对此类事物的说教，远逊于其他许多想象或猜测。这些宗教传说的兴趣只在于人类的起源与人的禀性，对辉煌的天界却一带而过——只是偶而表现出对它的敬畏之情。

20 世纪是爱因斯坦的世纪。他在这一世纪头 20 年中的许多发现奠定了我们将宇宙作为一个整体来认识的基础。宇宙学从形而上学的王国进入了物理学的领地。未久，宇宙正在膨胀的预言即为观测所证实；多年以后，人们又看到了往昔既热且密的宇宙留下的残迹。如今我们还看到了来自宇宙历史上最初几分钟的辐射和核反应产物，皆恰如理论之预言。

撰写本书的目的，是为初学者们简明扼要地解说宇宙的起源。关于宇宙的早期历史，我们持有什么证据？关于宇宙如何肇始的最新理论又是什么？它们对于今天的我们有何影响？我们能否凭藉观测来检验它们？我们自身之存在与它们又有什么关系？这些是我们向着时间之始行进的旅途中将会遇到的部分问题。我们将给出关于时间的本质、“暴胀宇宙”和“蛀洞”的一些带有猜测性的最新理论，并顺带解释一下 COBE 卫星观测资料的重要性——人们在 1992 年春非常欣喜地迎来了这些观测结果。

我感谢宇宙学界的同事和合作者们，感谢他们使我有机会讲述关于现代宇宙起源理论的种种讨论与发现。安东尼·奇塔姆 (Anthony Cheetham) 和约翰·布罗克曼 (John Brockman) 由于构想出这项计划而特别值得提及；

尼尔斯·斯坦森 (Niels Steensen)，丹麦解剖学家和地质学家。1638 年 1 月 11 日生于哥本哈根，1686 年 12 月 5 日卒于德国什未林。世人更熟悉他的拉丁化名字尼古拉·斯坦诺 (Nicolaus steno)。他认识到肌肉由纤维组成，描述了腮腺的导管 (即斯坦诺管)，证实了动物也有松果体，指出化石由古代动物死后石化而成，描述了各种岩层，还提出了如今所称的“结晶学第一定律”——译者

COBE 是 CO smic Background Explorer (宇宙背景探测器) 的首字母缩略词，详指筹划和出版这套《科学大师佳作系列》丛书——译者

只有时间才能说明他们邀请我参加此项计划是否是明智之举。最使我感激不尽的是伊丽莎白 (Elizabeth)，她提供的巨大帮助使本书得以迅速完稿而又不至于过多地耽误其他事情。正如往常那样，在有关本书的每一件事情上我皆受惠于她。我们家庭中年幼的成员，戴维 (David)、罗杰 (Roger) 和路易斯 (Louise) 对这项计划始终好象格外地无动于衷。但是，他们对歇洛克·福尔摩斯确实是十分喜爱的。

作 者

1993 年 3 月于布赖顿 (Brighton)

《科学大师佳作系列》中文版序

人类正在迎接世纪之交。即将消逝的 20 世纪，科学技术又有了过去无法比拟的巨大发展与进步。科学上的重大发现，与技术发明、创造相互交替影响与促进，使人们对客观世界的认识更深入、更丰富多采了。

以“宇宙演化”这一课题为例，《科学美国人》杂志 1994 年 10 月号以“宇宙中的生命”为题的专刊，登载了詹姆士·皮博（P. James E. Peebles）等 4 位科学家的综述文章，介绍了近年来对宇宙起源的演化问题的研究成果——大爆炸标准模型。按照这一理论，宇宙是在大约 150 亿年以前从炽热而且稠密的物质与能量“大爆炸”而形成，随着它急骤膨胀、冷却，逐渐衍生成众多的星系、星体、行星，直至出现生命。人类生活于其中的太阳系，约在 50 亿年前才开始出现。这篇文章指出，研究宇宙学问题的还有哲学家、神学家、神秘主义者；然而，与他们不同的是，科学家们只接受经过实验或观测检验过的事实。文章还指出：“我们对宇宙起源与演化的认识，是 20 世纪科学研究的重大成就之一，这正是基于几十年的创新实验与理论研究的结果。用地面和发射到空间的现代望远镜，可探测到远在数十亿光年之外的星系发出的光，它告诉我们宇宙年青时是何种模样。用粒子加速器可探索宇宙演化初期其高能环境的基础物理学。用人造卫星可探测到宇宙早期膨胀后留下的本底射线，使我们在能观察到的宇宙最大尺度范围内勾画出它的大致图象”。当然，由于观察和实验受到条件和能力的局限，正如过去许多理论认识仅是客观真实的一种近似那样，也还有许多问题尚不能由这一理论作出回答，需要科学家们继续努力进行创新研究，并通过更多的观察、实验来解决。

江泽民同志近年来多次指出，各级领导干部要努力学习与掌握现代科学技术知识。1994 年 12 月，中共中央、国务院发出了《关于加强科学技术普及工作的若干意见》，要求从科学知识、科学方法和科学思想的教育普及 3 个方面推进科普工作。问题是：当代科学之发展如此迅速，其前沿领域又如此艰深，究竟能不能凭借通俗的语言，使广大干部和社会公众对当代科学成就取得比较中肯的了解？

这很不容易，但回答仍是肯定的。已故美国科普泰斗艾萨克·阿西莫夫（Isaac Asimov）曾经说过：“只要科学家担负起交流的责任——对于自己干的那一行尽可能简明并尽可能多地加以解释，而非科学家也乐于洗耳恭听，那么两者之间的鸿沟便有可能消除。要能满意地欣赏一门科学的进展，并不非得对科学有透彻的了解。归根到底，没有人认为，要欣赏莎士比亚，自己就必须能写出一部伟大的文学作品。要欣赏贝多芬的交响乐，也并不要求听者能作出一部同等的交响乐。同样地，要欣赏或享受科学的成就，也不一定非得躬身于创造性的科学活动。”

这番话很有道理。而美国布罗克曼公司组织编写的《科学大师佳作系列》（Science Masters Series）则堪称贯彻这一宗旨的上乘之作。该系列的作者们，既是当代科学前沿研究领域中有盛誉的专家，又是成绩卓然的科普作家。他们的这些作品内涵丰富，深入浅出，水准确实是很高的。同时，该系列的选题布局也很有特色：既有选择地抓住了当前科学发展的若干热点或焦点，又从整体上兼顾了学科覆盖面。这从该系列第一辑 12 本书和第二辑 10 本书的选题即可见一斑。

《科学大师佳作系列》是世界科普出版界的一项盛举：它将在全球范围内的数十个国家中，以二十几种语言出版。上海科学技术出版社与布罗克曼公司签约，取得了出版中译本的版权。为确保中译本早日问世，出版社邀请了 10 余位专家、学者组成中文版编译委员会，决定每拿到一本英语原著打字稿，即着手组织本学科领域中既有学术专长、又有著译和科普写作经验的学者翻译。经过编译委员会诸同仁和全体译、校、编者的共同努力，《科学大师佳作系列》中译本中首先推出的 3 本已呈献于读者面前，即《宇宙的起源》、《宇宙的最后三分钟》与《人类的起源》。这 3 本书也正好是我前面举例讲到的介绍“宇宙的起源与演化”课题的精辟之作。作为中文版编译委员会的主任，我对此委实是不胜欣喜的。

该系列的作者之一、哲学家丹尼尔·丹尼特说过：“我将这项计划（按：即出版《科学大师佳作系列》）视为向这个世界撒下了一张网，它捕获的将是我们这颗行星的下一代思想家和科学家。”但愿果真如此。与此同时，我也衷心地企盼我国的科学家、科普作家、出版家们能并肩奋斗，不懈努力，写作和出版一批足以雄视世界科普之林的传世佳作，为我国科学事业的长足进步作出更大的贡献。

谨序如斯，愿与读者共勉。

朱光亚

1995 年 1 月 20 日于北京

内容提要

《宇宙的起源》为美国约翰·布罗克曼公司组织世界著名科学家分别撰写，并于 1994 年开始推出的一套反映世纪之文科学前沿问题的《科学大师佳作系列》之一。全世界有 20 多个国家共同推出这套丛书的各种文本。本书以简洁、生动的语言，介绍了人类对宇宙起源问题的探索 and 认识过程，并着重介绍了目前在这一领域内存在的各种不同的学术观点，以及已取得的研究成果。这是一本非常精彩的科普读物。

宇宙的起源

第一章 繁星密布的夜空

“我真得感谢您，”歇洛克·福尔摩斯说，“能引起我对这件饶有兴味的案件的注意。”

引自《巴斯克维尔的猎犬》

当我还在学校念书的时候，人类开始登上了月球。破天荒第一次，人们看见了地球悬浮在太空中的彩色照片：云层披盖的纱幕下露出一颗蔚蓝色的行星，它孤单地独处于万籁俱寂的太空中。当时环境论 尚未流行。但我还是乐于思索：这绚丽多采、生气勃勃的首批地球照片，与荒芜贫瘠的月球、与酷热而毒雾弥漫的金星、以及与远离为生命提供温暖的太阳且运行迟缓的外行星形成了何等强烈的对比；这使人们开始潜心思考地球这颗行星是何等地宝贵。

自那时以来，我们对宇宙的探索已在不同的方向上腾飞。除了卫星和探空火箭外，我们还使用望远镜和显微镜，原子粉碎机和加速器，计算机和人类的思维，以扩展我们对于整个宇宙环境的认识。除了远离我们的外部空间世界——恒星、星系和宇宙中的巨大，我们对内部空间深处迷宫般的奥秘也已有所认识。在那里，我们发现了由原子核及其组成部分构成的亚原子世界，它们是物质的基本组分。它们数目如此之少，结构又如此简单，却能组合成我们周围所见的无比复杂的天地万物，我们自己则是其中的一个特殊部分。

我们认识的这两大前沿——物质基本组分的微小世界与恒星和星系的天文世界——近年来以始料未及的方式汇合到了一起。本来是在不同领域试图以不同的方式回答不同问题的科学家，现在他们的兴趣和采取的研究方法却紧密地交织在一起了。用深埋于地下的粒子探测器研究物质最基本的粒子，也许能窥透为什么会存在星系这一秘密；而用望远镜研究遥远的星光则有可能阐明那些基本粒子的身份。当我们寻觅宇宙年轻时代的“化石”残骸、以求再现宇宙的历史时，我们发现，将人们对物理世界之最大与最小这两方面的知识汇集到一起，结果就变得更为完满，给人留下的印象也就更为深刻了。如果我们要了解宇宙的开端，那么我们就必须透彻地理解近年来才开始的那种大与小的统一。

我们生活在宇宙生命史中比较晚的时期，在大多数非常激动人心的事作业已发生之后很久。我们凝视繁星密布的夜空，至多只能看见区区数千颗恒星而已，这就是古人对于宇宙所知的一切。随着人们建造出越来越大、分辨能力也越来越高的望远镜，一个巨大无比的宇宙渐渐映入了我们的视野。大量恒星聚集在一起，构成了我们称之为星系的宇宙之“岛”。然而，在众多的星系之间乃是一片无处不在的寒冷的微波之“海”，它是大约 150 亿年前那次大爆炸的“回声”。时间、空间和物质肇始于一次爆发性的事件，我们

《巴斯克维尔的猎犬》，福尔摩斯探案之一。这段引文为故事中福尔摩斯对摩梯末医生所言。此处寓意是本章提出了宇宙起源问题，它犹如一宗“饶有兴味的案件”——译者

“环境论”（environmentalism）认为环境是决定个体和群体发展的主要因素的学说。气遗传论相对——译者

“宇宙之‘岛’”原文为 is land of light，直译当作“光的岛屿”。该提法脱胎于德国大哲学家康德（Immanuel Kant）于 18 世纪率先使用的“宇宙岛”（亦译“岛宇宙”）一语，现代天文学中则以“星系”这一规范化的术语取而代之——译者

今天的宇宙即由是而生——在某种整体膨胀、徐徐冷却并不断稀化的状态中诞生和演化。起初，宇宙是一个充满辐射的“地狱”，它热得使任何原子或分子均不可能存在下去。数分钟后，它便冷却到能够形成最简单的氢原子核和氦原子核了。及至数百万年之后，宇宙才冷却到足以形成第一个原子，不久又形成了简单的分子。然后，只是到了数十亿年之后才出现了一系列复杂的事件，使得物质凝聚成恒星和星系，此后又形成了稳定的行星环境。在那些行星上，我们目前尚不清楚的那些过程孕育了种种复杂的生物化学产物。然而，这一系列微妙的事件是怎样、以及为什么会发端的呢？现代宇宙学家关于宇宙之开端应该告诉我们些什么？他们所说的这些与宇宙从何而来，以及宇宙缘何而生之类的传统论题又有着何种渊源？

大地来自天空，这是孩子们的想象；但它恰恰是天界的面目造就人的思想这种古老观念的现代翻版。夜空中群星的图案早已萦绕在世界各地诗人、思想家和幻想家们的脑际。它们激起了神话和宗教，引起了对于空间之浩瀚的疑虑与恐惧，并产生了对宇宙之广阔与壮丽的敬畏和仰慕。

对于许多古人而言，这乃是想要道出天与地如何诞生的刺激因素。在天地如何诞生的这出戏中，叙事者充当了明星，因为在这个故事本身的宏伟剧情中，人类有着相当的地位和重要性。若将这些叙述视为现代科学对世界作出的科学解释之先驱，那是不对的。古人并不打算预见有关宇宙的新事物，而只是把“未知”绣入一幅壁毯，在这幅壁毯上，他们可以将自己绣在中心位置上。尽管有许许多多原始文化都想创造一个宇宙如何诞生的故事，人们实际上所能编织的创世故事却只不过区区几类而已。在有些故事中，某种自然过程使世界从某些先已存在的状态中显现出来。它也许是从某个宇宙蛋中孵出的，也许是某个“宇宙之母”式的角色的后代。这些故事从人的生命源泉汲取灵感，而给予从原始发祥地——充满着水的混沌——诞生出秩序以理性的说明。该主题的另一种奇特表现形式是关于大地潜水者的神话：某位神灵一头扎进原始的水中，捞出第一块物质，整个宇宙就由这块物质长大而成。在这个故事中，水再次代表了原初混沌的初始状态，而在某个有秩序的新时期中诞生了生命与和谐。

在某些文化中，又以其他方式将宇宙起源与人的生长进行类比：世界作为其双亲的后代而出现，其双亲则产生于原始的混乱状态中。随后，这两位“世界的父母”又生了许许多多的神，以分别掌管不同领域的各种事宜。这些神乃是自然现象高度人格化的具体表现。在另一些说法中，两位天空之神相遇就不象是父母了。世界可以从两位交战的神祇的猛烈冲突中诞生。

古代的某些宇宙学暗示了有序的世界从虚空中创生，最著名的有希伯来人在犹太教—基督教传说中的那些众所周知的说法。首先出现了某种不宜于生命栖居的状态，然后出现某个专为男人和女人提供的居住地，然后又出现布满了这块土地的其他生命。在这些解释中，造物主通常总是万能的，并独处于世界由之产生的空间或虚空中。创世的模式是有序而被精心地筹划的，而且造物者的作为决不受制于他所处理的先在之物所处的状态。

还可以发现另外两类传说。有一种非常难得的想法：根本就没有什么开端，世界始终就象现在这样。另一种稍有变化的想法是轮回宇宙：它周期性地死去，又象火凤凰似地以新的表现形式再生。虽然这一过程可能从无限久远的过去一直持续下来，但却存在着某种整体性的循环变化，它反映了人类对于生与死，日与夜，播种与收获的经验。

这类传说很快就流行开来并令人遐想不已。现代宇宙学家们时尚在这些传说与有关宇宙结构的科学观念之间寻找平行的对应关系，以瞥见存在于原始想象中的超越时代的智慧之光。然而，透过现在的玫瑰色眼镜来观赏过去，只是一种如意算盘而已。我们必须反复重申，在任何现代的意义下，过去那些创世故事都不是什么科学理论。它们并不打算揭示有关世界结构的任何新东西。它们的目标只是从人类的想象中清除掉“未知”这个幽灵。听者将自身置于创世故事中，就可以将世界与他们自己联系起来，而免于对“未知”或“不可知”冥思苦想。现代的科学解释需要达到的目标则远胜于此。它们必须非常深刻，从而是以使其告诉我们的事情多于我们注入它们的事实。仅仅说雨神在哭泣，或许已足以使你不再为“雨从何来”而操心，但是它并未真正阐明雨的来源。现代的科学解释还必须足以预见新事物，这是对于它们解释已知事物的能力的一种检验。它们应该能将种种分散的事实有机地统一起来。

现代宇宙学家使用的方法是简单的，但对局外人来说却未必是一目了然的。他们只是假设制约我们地球上局部世界事态发展的自然定律同样适用于整个宇宙，直到发现不得不承认情况并非如此为止。具有代表性的事例是，在宇宙中——尤其是过去——的某些地方，会遇到非常极端的密度和温度环境，它们完全超出了我们在地球上的直接经验。有时我们预期自己的理论在这些领域内继续有效，而事实也确实如此。但在另一些场合，我们知道真正的自然定律适用的限度，并用对它们作出的种种近似来处理问题。当我们达到相应的极限时，就必须尝试建立新的近似，以适应我们发现的那些不寻常的新条件。确实，天文学上出现的新情况往往能为物质在新的极端环境下表现的行为提供很重要的线索。

宇宙学家们经常谈论构造“宇宙学模型”，也就是说他们想对宇宙的结构及其过去的历史作出简化的数学描述，这些描述能抓住宇宙的主要特征，就象一架航模飞机具备一架真飞机的某些（但不是全部）特征那样。我们也不指望一个“模型宇宙”能体现出宇宙结构的每一个细节，我们希望它能告诉我们，为什么存在着像星系和恒星那样的结构，为什么它们会以那样的方式聚集到一起。它并不能告诉我们为什么太阳系包含的行星和小行星的数目恰好就是我们所见到的那么多，而只能告诉我们为什么太阳系包含了我们所见到的、分布颇具特色的那些种类的天体。

我们的宇宙学模型有一个重要特征，那就是它们涉及到宇宙的某些性质——如它的密度或温度，后者的数值仍不能由导致该模型的过程来确定。它们的值是由观测得出的。一个模型只容许许多这样的物理量之观测值以某些特定的方式互相配合。于是，模型和真实宇宙之间的相容性就可以对照观测事实而予以检验。

科学解释最重要的特征之一是存在定义明确的近似和理想化过程，它们可以用来作为描述事物的最初尝试；这种特征将诸如物理学这样的“硬”科学与社会科学领域的“软”科学区分开来。从简单的起点出发，存在着一条不断改进的理想化途径。例如，如果我们想对一颗像太阳这样的恒星作出描述，那么我们在一开始可以假定它的形状是球形的，而且整个表面具有相同的温度。实际上的太阳并非如此——但是它几乎就像这样。我们既已得到一个球状的、等温的“模型”太阳，便可以着手引入对球状或对均匀温度的微小偏离，以改进我们所作的描述，逐步得出越来越好的模型。

当我们谈论对于宇宙的描述和宇宙模型时，我们必须明白，它们乃是迭经修订的最新版本。此外，我们的宇宙学模型是非常粗略、非常简练的。它们一开始把宇宙当作某种完全均匀的物质海来处理。物质聚集成恒星和星系全然被忽略了。只有当你专注于诸如恒星和星系那样的物质岛如何起源之类的更具体的问题时，才必须考虑与绝对均匀的偏离。采取这种策略的效果极佳。我们的宇宙最惹人注目的特征之一，就是采用物质均匀分布这种简单的理想化模型，竟能对可见宇宙作出如此成功的描述。

第二章 宇宙概说

“ ‘很有趣，但是很简单’，他在回到长沙发上他所喜欢的那一角时说”。

引自《巴斯克维尔的猎犬》

我们的宇宙是如何、为何、以及何时肇始的？它有多大？其形若何？又由何物构成？任何一个有好奇心的孩子都有可能会问这些问题；它们已使现代宇宙学家为作出回答而奋斗了好几十年。对于科普作家来说，宇宙学的一个诱人之处乃是其前沿领域中有那么多的问题都很容易表述。试看量子电子学、脱氧核糖核酸定序、神经生理学或者纯数学的前沿论题，你将会发现，要把专家们的问题翻译成大众化的日常语言那真是谈何容易。

直至 20 世纪早期，无论是哲学家还是天文学家都没有对下述想法提出过疑问：存在着一个固定的空间背景舞台，恒星、行星以及所有其他的天体都在这个舞台上表演它们的动作。虽然也可以看到一些变化，但是它们都被想象成相对于固定的空间而发生，犹如在桌面上滚动的台球一般。然而，在 20 世纪 20 年代，这种简单的图景发生了变化，造成这种变化的首先是一些物理学家，当时他们正在探究爱因斯坦对于引力的新解释会导致什么样的后果；然后则是美国著名天文学家爱德温·哈勃(Edwin Hubble)对遥远星系中星光颜色的新观测结果。

哈勃利用了波的某种简单性质，即如果波源离开接收者而远去，那么被接收到的波的频率就会降低。为了阐明这一点，可以将你的手指在一泓静水中上下颤动，并注视波峰远去而抵达水面上的另外某一点。现在，在你制造波的时候，将你的手指往远离刚才那个接收点的方向移动。这时，由于各个波峰被接收到的时候，彼此间要比产生它们时离得更远，所以它们被接收到的频率就降低了。现在，你再在制造波的时候将手指朝向接收点移动，波的频率就会增加。所有的波都具有这种性质。在声波的情况下，这种性质导致从你身旁驶过的火车的笛音变化；警车从你身旁经过时，报警器的音高变化也是出于同样的道理。光也是一种波；当光源离开观测者远去时，光波频率降低，这意味着观测到的可见光颜色稍稍变红。因此，这一效应被称为“红移”。当光源迎着观测者而来时，接收频率增高，可见光变得较蓝，这称为“蓝移”。

哈勃发现，他看见的来自星系的光呈现某种系统性的红移。将星系中特定原子发射的光的颜色与地球上实验室内同种原子发射的光进行比较，哈勃就可以确定光源正在以多快的速度退行。比较同一类型恒星（它们具有相同的固有亮度）的视亮度，他又能推算出它们与我们之间的相对距离。哈勃发现，光源越远，它离我们而去的速度也越快。这种趋势称为“哈勃定律”。图 2·1 是利用现今的数据给出的哈勃定律的示意图。图 2·2 给出了一个实例，以表明与实验室中同类原子发射的光相比，来自遥远星系的光信号所呈

参见第一章章首引语译注。此处引文中“他”是指福尔摩斯，叙述者是福尔摩斯的挚友兼助手华生医生。

“有趣”和“简单”指福尔摩斯刚从一位客人遗忘的手杖上发现了有助于推理的线索——译者

“视亮度”(apparent brightness)，天文学术语，意为表现亮度。固有亮度相同的天体，距离观测者越近的，视亮度就越大；距离观测者越远，视亮度就越小。因此，在一个天体的视亮度、固有亮度和距离三者之中，已知两个量即可求出第三个的数值——译者

现的光谱朝红端的移动。

哈勃发现的乃是宇宙的膨胀。取某种一成不变的背景——我们可以在这种背景上循踪行星与恒星在小范围内的“游荡”——而代之的是，哈勃发现遥远的恒星系统正在“逃离”我们而去：一切都处于某种动态的变化之中。这是 20 世纪最伟大的科学发现。这项发现证实了爱因斯坦的广义相对论对于宇宙所作的预言：宇宙不可能是静态的。众多的恒星和星系之间的引力作用将它们互相往一起拉，除非它们彼此分道扬镳、四散分离。在这两种情况下，宇宙都不可能静止不动。

如果宇宙正在膨胀，那么我们很快就能觉察到它正在发生变化；在某种意义上，它正在“变大”。倘若我们倒转历史的方向，即朝着回顾往昔的方向前进，那么我们就应该发现宇宙从某个更小、更密的状态——其尺度似曾一度为零——变化而来的证据。这种表观上的开端，已被人们称为“大爆炸”。不过，我们走得太快了一些。在我们开始钻研过去之前，关于宇宙现时的膨胀，还有一些重要的事情应该先弄清楚。

首先，究竟是什么正在膨胀？在电影《安妮·霍尔 (AnnieHall)》中，伍迪·艾伦坐在其精神病医师的躺椅上，述说他对宇宙膨胀的焦虑：“毫无疑问，这意味着布鲁克林正在膨胀，我正在膨胀，你正在膨胀，我们全都在膨胀……”。谢天谢地，他错了。我们并不在膨胀。布鲁克林并不在膨胀。地球并不在膨胀。太阳系也不在膨胀。事实上，银河系也不在膨胀。甚至我们称之为“星系团”的那些由成千上万个星系组成的集团也不膨胀。这些物质集合体都由化学力或引力束缚在一起，它们各个组成部分之间的这些力要比膨胀的力量更强大。只有当我们超出由成百上千个星系组成的巨大星系团的尺度时，我们才会看到这种压倒局部引力拉曳的膨胀。巨大的星系团是宇宙膨胀的标记。我们也许可以借助于一个正在胀大的气球表面上的尘粒，来简单想象一下这种膨胀的图景。这个气球将会越胀越大，那些尘埃将会互相远离，但每个尘粒本身却并不会以同样的方式膨胀。它们所起的作用有如橡皮拉伸程度的标记。与此相似，我们最好将宇宙的膨胀想象成星系团之间的空间在膨胀，如图 2·3 所示。

表 2·1 一些重要天体或天体系统的质量和尺度：

从地球型的行星直到整个可见宇宙		
天体	尺度(千米)	质量(克)
地球	6.4×10^3	6×10^{27}
太阳	7×10^5	2×10^{33}
星系	10^{16}	5×10^{44}
星系团	10^{18}	10^{47}
超(星系)团	10^{20}	10^{51}
可见宇宙	10^{23}	10^{56}

其次，我们也许会怀疑，哈勃的发现似乎意味着所有的遥远天体均在远

布鲁克林，美国纽约市的一个区——译者

离我们而去。为什么是“我们”呢？要是我们对科学史有所了解的话，就一定知道哥白尼（Copernicus）证明了地球并不位于宇宙的中心。肯定地说，要是我们认为一切都正在远离我们而去，那么我们岂非又把自己恢复到了无垠宇宙之中心位置上了吗？但是，情况并非如此。膨胀的宇宙并不象源于空间中某一点的一场爆炸。并不存在宇宙向其中膨胀的任何固定的背景空间。宇宙包容了客观存在的全部空间！

设想空间有如一块弹性膜，而不是一块平的桌面。在这个具有韧性的空间上，物质之存在与运动造成了这块弹性膜的凹陷与弯曲。我们的宇宙的弯曲空间，有如某个4维球上的3维表面。我们无法直观地看透这一点。设想我们的宇宙是一块只有2个空间维度的“平地”。这时，它就好像是某个不难描绘的3维球的表面。现在再设想这个3维球可以变大——如我们在下面描绘的膨胀气球。该气球的表面变大了，它是一个正在膨胀的2维宇宙。如果我们在它上面标出两个点，那么随着气球的膨胀，这两个点就会彼此朝后远退。现在在这个气球的整个表面作出许许多多的标记，并再次将它吹胀起来。这时，无论你停留在哪个标记上，你都将发现其他所有的标记仿佛都随着气球的膨胀而离你远去，当你观察其他标记的退行时，你将会看到某种哈勃膨胀律。这个例子告诉我们，该气球的表面代表了空间，但是气球膨胀的“中心”却根本不在那个表面上。在这个气球的表面上并不存在膨胀的中心，也不存在任何边缘。你不可能掉出宇宙的边缘：宇宙不是膨胀到任何东西里面去。它就是存在着的一切。

至此，我们可能会产生一个问题：我们目睹的这种宇宙膨胀，是否会无限地继续下去。如果我们朝空中扔一块石头，那么由于地球引力的拉曳，它将会落回地面。我们扔得越使劲，就是把越多的能量给了这块运动着的石头，这块石头在就会上升得越高。现在我们知道，如果以超过每秒11公里的速度发射一枚导弹，那么它就可以彻底摆脱地球重力的拉曳。这就是火箭的临界发射速度。空间科学家们称它为地球的“逃逸速度”。

类似的考虑适用于任何受重力拉曳而迟滞减速的爆发或膨胀着的物质系统。如果往外运动的能量超过往内的引力拉曳产生的能量，那么它就将超过其逃逸速度而一直保持膨胀。但是，如果重力在该系统各部分之间所施加的拉曳作用超过了往外运动的力量，那么膨胀中的物体最终将会重新回聚到一起，恰如前述的石块与地球之所为。正在膨胀的种种宇宙亦皆如此（见图2·4）。在它们膨胀之初也有一个临界“发射”速度。如果它们膨胀得比这更快，那么宇宙中全部物质的引力拉曳将永远也不能制止这一膨胀，宇宙将保持永远膨胀下去。另一方面，如果“发射”速度小于该临界值，那么到头来膨胀将会停止并转为收缩，直至收缩到尺度为零而告终——与其开初时的状态全然相同。介乎上述两者之间，存在着一种我称之为“英国式折衷宇宙”的情况，它正好具有临界发射速度，即能使其保持永远膨胀下去的最小速度值。关于我们的宇宙，最不可思议的事情之一，就是它目前正以极其接近于这种临界状态的方式膨胀着。事实上，我们还无法肯定地说出我们的宇宙处于这种临界状态的哪一边。我们不知道应该对我们的宇宙作出何种长期预报。

事实上，宇宙学家们认为，我们如此接近于临界状态这一事实，乃是我

“宇宙”原文用复数 universes，意谓理论上可能存在的、处于不同状态下的彼此互异的各种宇宙——译者

们这个宇宙的一项特殊性质，对于它，人们应该作出解释。这种情况是很难理解的，因为如果它不是精确地以临界“发射”速度肇始的话，那么随着宇宙的膨胀和成长，它就会离开该临界状态越来越远。这就成了一个很大的难题。我们的宇宙已经膨胀了大约 150 亿年，却依然如此接近于临界状态，以至于我们无法说出它究竟处于分水岭的哪一边。为了经历这么长的时间之后仍然如此接近于临界状态，宇宙的“发射”速度仿佛已经作过这样的“选择”：它与临界速度的差异不超过 10^{36} （1 后面跟着 36 个 0）分之一。这是为什么呢？往后我行将会看到，人们对宇宙膨胀的最初时刻可能发生过什么事情所作的研究，为这种似乎极不可能的事态提供了某种可能的解释。但是在这里，我们将局限于了解为什么任何一个有人的宇宙在膨胀上百亿年之后，必须仍然非常接近于那种临界状态。

如果宇宙开始膨胀的速度远大于临界速度，那么重力就永远不能将局部的物质岛拉曳到一起，以形成星系和恒星。恒星的形成乃是宇宙演化中至关重要的一步。恒星是聚集在一起的大堆物质，在其中心部分产生的压力大得足以启动自发的核反应。在恒星一生的历程中——我们的太阳正处在这一历程的中途，有一个漫长的稳定时期，在整个这一阶段中，恒星内部的氢燃烧而生成氦。但是在它们一生的最后阶段，恒星遇到了某种核能危机。它们经受某种快速变化的爆发阶段，在此期间氢燃烧而形成碳、氮、氧、硅、磷，以及一切在生物化学中起着至为重要的作用的其他元素。当恒星以超新星的形式爆发时，这些元素被洒入太空，并通过各种途径最终融入各种物质颗粒、行星、以及人体中去。恒星是种种复杂事物和生命赖以存在的一切化学元素的源泉。我们人体中的每一个碳原子核皆起源于恒星中。

这样，我们就看到，膨胀速度远大于临界状态的宇宙将永远不会产生恒星，从而也永远不能产生为造就像人类那样复杂的“活”物、或者以硅为基础的计算机所需的构件。类似地，如果一个宇宙以较临界速度慢得多的速度开始膨胀，那么在积累足够的时间以供恒星形成、爆发、并创造出生命物质的部件之前，它的膨胀就将逆转为收缩。这就再次留下了一个不能产生生命的宇宙。

于是，我们就得到一个令人惊异的结论：只有那些历经了数十上百亿年之后其膨胀依然十分接近临界状态的宇宙，才能产生出必要的“部件”，以供拼成足以被称为“观测者”的复杂结构。我们不应为发现自己的宇宙膨胀竟是如此接近于临界状态而惊奇。我们不能存在于任何其他种类的宇宙中（见图 2.5）。

现代宇宙学的主要目的是，利用在地球及其附近确立的物理学定律，或利用从这些局部成立的定律合乎逻辑地作出的推论，根据今天所得到的证据，详细地重现宇宙过去的历史。当然，我们在时间上回溯得越久远，宇宙环境就变得越极端，我们或许需要作出的外推与那些能在实验室中检验的物理学定律也就偏离得越远。事实上，这种情形往往会带来不少好处。如果一个人有独立的天文证据表明，我们重现的历史中有某一特定的部分正确无误，那么我们就可以通过考察这些假说对于天文观测会有什么后果，而用上述证据来检验有关物质在高密和高温下的行为的理论，或是检验存在着尚未探测到的物质新基本粒子之可能性。如果存在某种新型的基本粒子就会使宇宙早期阶段的膨胀大为改观，以至今日不可能存在任何恒星和星系，那么我们就不必花费巨额资金用粒子加速器来做庞大的实验，即可径直排除存在

那种粒子之可能。

我们关于膨胀宇宙图景的发展、及对其既往史之重现进展非常缓慢。在 20 世纪 30 年代，比利时牧师兼物理学家乔治·勒梅特 (George Lemaitre) 在此事的起步阶段起了带头作用。他的“原始原子”理论乃是我们如今所说的“大爆炸”理论的鼻祖。40 年代后期，一位移居美国的俄国人乔治·盖莫夫 (George Gamov) 与他的两位年轻研究生拉尔夫·阿尔弗 (Ralph Alpher) 和罗伯特·赫尔曼 (Robert Herman) 一起，又迈出了最重要的几步。他们开始认真考虑将已知的物理理论用于勾画宇宙早期阶段状况的可能性。他们认识到了关键之所在。如果宇宙肇始于遥远过去的某种既热且密的状态，那就应该留下某种从这个爆发式的开端洒落的辐射。更具体地说，他们认识到，过去应该存在着某个时候，其时宇宙的年龄仅为几分钟，它热得足以使每个地方都发生核反应。后来，更加详细得多的预言和观测结果应该说已经证实了这些重要的见地。

1948 年，阿尔弗和赫尔曼预言，从大爆炸散落的残余辐射由于宇宙膨胀而冷却，如今它所具有的温度约为绝对零度以上 5 K，或者说 5 开（绝对零度等于摄氏零下 273 度，即 -273 °C）。但是他们的预言并未引起人们的普遍重视，而被埋没在浩瀚的物理学文献之中。另外几位科学家考虑了一个热的膨胀宇宙之起源问题，但是他们谁也不知道阿尔弗和赫尔曼的论文。理由是很明白的。当时的通讯、交流无法与今天同日而语。在 40 年代和 50 年代，在大多数物理学家看来，再现宇宙早期史的细节并不是一种非常严肃的科学活动。但是多年以后，即 1965 年，美国新泽西州贝尔实验室的两位无线电工程师阿尔诺·彭齐亚斯 (Arno Penzias) 和罗伯特·威尔逊 (Robert Wilson) 却十分意外地发现了这种宇宙辐射场，当时他们正在为跟踪第一颗“回声号” (Echo) 卫星而校准一具很灵敏的无线电天线。与此同时，在附近的普林斯顿大学，由罗伯特·迪克 (Robert Dicke) 领导的一个科学家小组已独立地重新发现了阿尔弗和赫尔曼早先作过的预言，并着手设计一台探测器以供搜索大爆炸的残留辐射。他们听说了贝尔实验室这台接收器中存在着无法阐明的噪声，并立即将它解释为源自大爆炸的残余辐射。它相当于在电磁波谱的微波部分波长为 7.35 厘米的某种无线电波信号；如果假设它是热辐射，那么它所具有的能量就相应于 2.7K 的温度——这与阿尔弗和赫尔曼富于灵感的估计非常接近。它被称为“宇宙微波背景辐射”。作为其预言与发现始末的一项追记，我们应当提及：1983 年，人们开始获悉前苏联无线电物理学家什茂诺夫 (Shmaonov) 也许早在 1957 年就已发现了这种辐射，并用俄文公布了这一事实。什茂诺夫建造了一具对微波信号敏感的天线，并报道探测到了某种在天空中各个方向上均匀的信号，与之相当的辐射所具有的温度介乎 1K 和 7K 之间。当时无论是他本人或是其他任何人都不清楚这项发现的重要性。事实上，什茂诺夫直到 1983 年才闻知大爆炸的预言以及彭齐亚斯和威尔逊的发现，而这已经是后两人因 18 年前作出他们那项卓越的发现而荣获诺贝尔奖之后 5 年的事情了。

这项发现是人们开始认真地研究大爆炸模型的一种信号。渐渐地，人们对宇宙微波作了更多的观测，这些观测揭示了宇宙微波背景辐射的其他性质。这种辐射在所有的方向上都有相同的强度，精度至少高达千分之一。而且，人们在不同频率上测量了它的强度，开始揭示出其强度随频率变化的方式（即它的“谱”）具有纯热的特征。这样的辐射称为“黑体”辐射。不幸

的是，地球大气中的分子对于辐射的吸收和发射阻碍了天文学家去证实整个背景辐射谱确为热辐射谱。人们仍然怀疑，它或许是由宇宙开始膨胀之后很久发生的种种剧烈事件产生的，而并非产生于大约 150 亿年以前的膨胀之始。只有在地球大气外观测这种辐射才能消除这些疑虑，而这正是美国国家宇航局（NASA）的宇宙背景探测器（COBE）卫星于 1989 年开始从空间测量整个背景辐射谱的第一项巨大成就（见图 2.6）。那是人们在自然界中所曾见到的最完美的黑体谱，它非常引人注目地确认了宇宙过去曾比今天要热成千上万度。因为只有在如此极端的条件下，宇宙中的辐射才有可能呈黑体形式而达到如此高的精度。

人们利用高空飞行的 U2 型飞机进行了另一项关键性的实验，以证实背景辐射并非近期起源于宇宙中邻近我们的部分。这些早先的间谍飞机机身极小、翼展却很大，这使它们成了非常适合于进行天文观测的稳定平台。这时，它们是朝上测天而不再是往下观地了！它们探测到天空各处的辐射强度具有某种系统的变化。倘若这种辐射起源于遥远的过去，那么出现这种变化便在意料之中。如果这种辐射形成了某种均匀膨胀的“海洋”——它生成于宇宙的早期，那么我们就将是在这海洋中航行。地球环绕太阳运动，太阳环绕银河系中心运动，银河系又在本星系群中运动，如此等等；这一系列的运动意味着我们正沿着某个方向在背景辐射中穿行。当我们沿此方向观看时，辐射强度将显得最强，在与之相差 180° 的方向上辐射强度则显得最弱；在这两者之间，辐射强度应随角度而呈某种富有特征的余弦变化（见图 2·8）。这很像在暴雨中奔跑。你的胸前湿得最厉害，背后则湿得最少。这里，在我们运动的方向上被扫过的是微波。正如预期的那样，观测揭示了某种完美的“余弦式”变化。

接着，几项不同的实验证实了这一发现——它又被称为“天空大余弦”（The Great Cosine in the Sky）。它肯定了这样一个事实：我们，以及包含我们寓居其中的本星系团在内的那个区域，都正相对于宇宙微波海而运动。因此，背景辐射不可能是局部区域产生的，因为不然的话，它就会和我们一块儿运动，这样我们就不会看到其强度与温度的余弦变化了。

我们穿越来自大爆炸的背景辐射而运动，并不是造成其强度随方向稍有变化的唯一可能的原因。倘若宇宙在不同的方向上正以稍稍不同的速率膨胀，那么在膨胀得较快的方向上，辐射就将较弱较冷。类似地，如果在某些方向上存在着某些物质特别集中或特别匮乏的区域，那么这也将使我们从这些方向上接收到的辐射强度发生变化。发射 COBE 卫星的动机就是搜索这些变化；1992 年，这些变化之发现成了世界各国报纸的头条新闻。

当我们考察来自天空中不同方向的背景辐射强度时，我们就获悉了有关宇宙结构的大量引人注目的事情。我们发现，它正在所有的方向上以相同的速率膨胀，其精度优于千分之一。我们说这种膨胀近似地是“各向同性的”——也就是说，在每个方向上都相同。如果有人从某个“宇宙博览馆”中随机地挑选有可能存在的宇宙，那就会有无数个在某些方向上远比其他方向膨

“成千上万度”，原文 hundreds of thousands of degrees，仅具象征意义，故不宜直译为“数十万度”之类的具体数量——译者

原文为 Milkyway，直译作“银河”或意译作“银河系”均不确，故根据实际情况译为“银河系中心”——译者

胀得更快的宇宙品种，或者是以很高的速度旋转、或者甚至是在某些方向上收缩而同时又在其他方向上膨胀着的宇宙变种。我们的宇宙确实很特殊。它似乎处于某种安排得极为妥善的状态之下：在所有的方向上膨胀都以相同的速度进行下去，其精度非常之高。这就好像你回到家里发现所有孩子的卧室都极其整洁——一种非常不容易遇到的事情。这一定是施加了某种外界的影响。同样地，对于宇宙引人注目的各向同性而言，也必定存在着某种解释。

宇宙学家们长期以来都把宇宙膨胀之各向同性视为必须予以阐释的一大疑谜。为此所采用的某些方法可以说明在该领域内人们的思维方式，以及为阐明这种各向同性而寻求的解释的类型。最后，寻找这些解释又会把我们带回到宇宙本身的起源问题上去。

宇宙学家们在寻找这些解释时，构造了各种可能的宇宙史，它们能够说明已知的事实，并为尚未说明的性质提供解说。利用某一种假设，能对尚未说明的性质解释得越多，工作就做得越好。宇宙学家们最感兴趣的是这样的假设：它既能解释有关宇宙的令人困惑的特征，又能预言某些尚未探测到的宇宙新属性。搜索这种预期的特征，就可以凭藉观测来检验原先的假设，这恰如利用实验室中的实验来检验其他科学理论的预言。遗憾的是，我们并不能保证自己的仪器灵敏得足以进行我们想要的一切观测。由于这种现实的局限性，对于许多理论作出的预言，我们尚无法用观测来检验。确实，正是此类预言往往支配着未来将会发展何种新型的天文台或人造卫星。

可以采取的第一条途径是说宇宙就是各向同性地开始膨胀的。宇宙目前的状态只不过是其特殊的起始条件的某种反映。事情现在所以如此，乃是因为当初如彼。实际上，这解决不了什么问题。它什么也没有解释，也没有告诉我们任何新东西。当然，它也可能是对的。倘若果真如此，我们也许就可以指望，存在着某种更深刻的“原理”，它使宇宙必然（或者至少是以压倒优势的可能性）肇始于某种各向同性膨胀的状态之中。这一原理也许在较为局部的范围内还有着其他应用，据此便可以揭示其自身之存在。其令人不悦之处则在于，它把解释宇宙现状的重担完全置于未知的（而且也许是不可知的）宇宙起始状态之上。

第二条途径是将事物的现状考虑为在宇宙中进行的各种物理过程的结果。这样的话，也许无论宇宙的初始状态是多么地不规则，在历经数十亿、上百亿年之后，所有的不规则性均已刷尽，留下的则是某种各向同性的膨胀。这种做法有一个优点，即激励人们拟定某种确切的研究计划，以期发现它是否可能真的正确无误。是否存在这样的物理过程：它能够抹平膨胀中的非均匀性？“抹平”的过程历时多久？时至今日，它们能否摆脱所有的不规则性，抑或只是消除了其中的一小部分？不仅如此，这种做法还有一个令人满意的特点：它使我们对宇宙现状作出的假设尽可能少依赖于我们对未知的宇宙初始状态之了解。我们很乐于能够这么说：无论宇宙是如何开端的，在它的早期历史上必不可免地会发生一些物理过程，后者确保了宇宙在膨胀 150 亿年之后，看起来差不多就应该像它今天的那种模样。

这第二种哲学虽然听起来极富吸引力，但也有一个弱点。如果我们真能证明宇宙之现状确实与其起始时的条件无关，那么我们现在观测宇宙的结构也就不能告诉我们有关那些起始条件的任何情况了。因为这样的话，宇宙的现状便可与任何起始状态相容。但是，与此相反，如果宇宙目前的结构——其膨胀之各向同性、或是由星系成团性展示的结构图案——部分地反映了宇

宙开初的方式，那么就存在着这样的可能性：通过我们今天对于宇宙的观测，或许便能断定有关宇宙初始状态的某些情况了。

第三章 伟大的宇宙分类目录

“别人都是专家，而他的专长却是无所不知。”

引自《布鲁斯—帕廷顿计划》

我们对膨胀宇宙的描述，勾画出了 20 世纪最伟大的科学发现之一——且不论它是否就是最伟大的那项发现。它以许多方式渗入了我们的文化。本书的大部分读者将会对它有所知晓，以构成他们的整体知识的一部分。正是由于人所共知，才使我们对首次提出这种思想时的革命性实质视而不见。当爱因斯坦于 1915 年发表他的新引力理论——广义相对论时，人们并不普遍相信存在一个这样的天文宇宙，其中到处散布着由恒星组成的庞大“岛屿”——我们称它们为星系。当时人们广泛持有这样的观念：他们称之为“星云”的那些天文光源位于我们自己的银河系内。天文学家和哲学家均从未提出过这个多星的宇宙或许并不静止的任何想法。爱因斯坦则将他的新引力理论注入了这片智慧的乐土。爱因斯坦的理论包括并超越了牛顿对于引力的经典描述。广义相对论与牛顿的理论不同，它有一种很不寻常的功能，即能对整个宇宙（即使它们是无限延伸的）作出描述。对于爱因斯坦的方程式，人们还只是找到了最简单的那些解。幸运的是，正是这些简单解相当不错地描述了我们所见到的这个宇宙。

当爱因斯坦开始探索他的新方程将会揭示整个宇宙的何种性质时，他做了科学家们通常都会做的事情——简化问题以便求解。真实的宇宙繁复庞杂，致使刻板的学究们无从下手，于是他假设物质处处均匀分布，使事情得以简化。这就是说，他不考虑构成天体的物质密度在不同地方的微小变化。他还假设宇宙在所有的方向上看起来都相同。如今我们知道，对于我们的宇宙而言，这乃是极好的近似；至今宇宙学家们在打算推断有关宇宙整体演化的情况时，仍然会作这样的假设。但是，当初爱因斯坦十分懊丧地发现：他的方程要求这种宇宙随着时间的流逝不是膨胀便是收缩。这其实并没有什么特别神秘的地方，即使在牛顿对引力的描述中也是这样。如果你把一团尘埃粒子置于空间，那么它们之间将不存在压力，并且，它们将开始互相吸引与收缩。唯一的其他可能性是，它们也许受到某种爆发的驱使而“起跑”、并互相分离。它们不可能一成不变地维持原状，除非有某种别的力介入以与引力抗衡。当不存在另外这种力时，呈静态分布的恒星和星系之间的引力将会使它们互相落到一起。

爱因斯坦因其理论作出了这样的预言而深感困扰。他缺乏敢于预言宇宙并非静止的自信心。谁也没有想到过宇宙竟然不是静止的。确实，一个“膨胀的宇宙”看来真是非常古怪的想法。于是爱因斯坦开始探究怎样可以合理地修改其关于引力的新理论，以取消宇宙膨胀或收缩的可能性。他注意到，在数学上可以引入某种附加的斥力以对抗作用在物质上的引力拉曳。如果爱因斯坦将这种力包含在他的广义相对论中，那么他就会得到一个静态宇宙模

《布鲁斯—帕廷顿计划》，福尔摩斯探案之一。此处引文是福尔摩斯与华生交谈时，对其兄长迈克罗夫特·福尔摩斯——英国政府中一名才智超群的职员的评价——译者

“宇宙”原文用复数 universes，指理论探讨中可能存在的种种不同类型的宇宙，故后文括号中使用的代词是“它们”，而不是“它”——译者

型——其中的斥力恰好与引力的吸引相平衡。这就是所谓的爱因斯坦静态宇宙（见图 3.1）。

1922 年，一位出生于圣彼得堡的数学家和大气物理学家弗里德曼（Alexander Friedmann）研究了爱因斯坦所作的计算，并开始相信这位科学大师犯了一个关键性的错误。静态宇宙肯定是他作了修改后的方程的一个解；然而却不是唯一的解。还存在着别的解，它们描述的是膨胀宇宙，恰如爱因斯坦原先的方程所描述的那样。弗里德曼把他的结果寄给爱因斯坦。起初，爱因斯坦以为弗里德曼计算错了。但是，他很快就被说服了，并且认识到他修改原先的方程并不能保证得出一个静态的宇宙。爱因斯坦静态宇宙是相当不切实际的一类宇宙模型。只要对它作最微乎其微的更动，它就会开始膨胀或收缩。这就像一根尖头朝下竖立着的针，几乎不可能长时间地保持那岌岌可危的平衡。

爱因斯坦认识到，他引入那个额外的斥力——他称其为宇宙学常数——是没有意义的；多年以后，他把它称为“我一生中的最大失策”。由于引入了宇宙学常数，爱因斯坦便错失了作出宇宙正在膨胀这一惊人预言的良机。这一荣耀归于年轻的亚列山大·弗里德曼。令人痛惜的是，弗里德曼未能活到 7 年之后目睹哈勃的观测证实了他的预言，也未看到人们最终接受了膨胀宇宙的这一范例。1925 年，他死于过度的气象气球飞行造成的后遗症。终年仅 37 岁。

尽管爱因斯坦继承了静态宇宙的传统观念，这并不意味着他的先辈拒绝宇宙状态发生任何变化的可能性。虽然过去不存在膨胀宇宙或收缩宇宙的观念，但是却有过许多这样的猜测：宇宙可能正以某种方式逐渐陷入越来越混乱、或越来越无法居住的状态。这些想法是从对于热可以怎样用来作为动力源的研究引起的。19 世纪工业革命导致了科学与工程的重大进展，其中最重要的是机器和蒸汽发动机的设计以及对它们的理解。出于这些进展，将热作为一种能量形式的研究发展起来了。人们认识到它是某种守恒的东西，它既不能从虚无中创生又不能消灭，而只能从一种形式转化为另一种形式。不过，事情并非仅止于此。某些形式的能量要比另一些形式的更有用。它们的有用程度乃是其存在形式之有序性的某种量度：越无序者越无用。这种无序性称为熵，它在自然过程中似乎永远在增加。在某种程度上，这并没有什么神秘。你的办公桌和你孩子的卧室看来也总是从某种有序的状态向无序演化的——这永远也不会逆转！事情从有序转变为无序的途径，要比从无序转化为有序的途径多得不可胜数，以至于我们实际上看到的总是前一种趋势。这一想法深刻地体现在热力学“第二定律”中：整个系统的熵永不减少。鲁道尔夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）于 1850 年确立了该定律，“熵”这一术语也是他发明的。他还引入了宇宙“热寂”的概念，即由于熵总是在逐渐增大，直至达到其可能的最大值，所以在未来，“宇宙将处于某种一成不变的死寂状态”。此后，将不可能再发生任何变化。

后来，当膨胀宇宙的想法成为热门话题后，热寂的魅力又导致许多思想家将整个宇宙作为遵从相同的一些热力学定律的系统来考虑。这造成了多少

在理论上可以有种种不同的膨胀宇宙，或者说，一个宇宙可以按种种不同的方式膨胀；我们观测到的则是正在膨胀着的可见宇宙，故称“范例”——译者

弗里德曼因伤寒症不治身亡——译者

有点令人沮丧的长远前景，因为假如宇宙在永不停息地膨胀着，那么万事万物似乎都将变得极端乏味地处于某种全然没有结构的状态中，在这种状态下，宇宙的能量最终都将以最无用的形式而存在。这相当于万事万物都变成了一片均匀的热辐射之“海”。即不存在恒星，不存在行星，也不存在生命：所有的仅仅是随着膨胀的继续，热辐射变得越来越冷。这就是著名的“宇宙热寂”。20 世纪 30 年代，由于詹姆斯·金斯（James Jeans）和阿瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）这两位权威天体物理学家在他们广为流传的通俗读物中的普及宣传，宇宙热寂几乎变得尽人皆知。你可以发现，那时的许多神学和哲学作品中都充斥着热寂的悲观论调。人们甚至发现，在诸如多萝西·塞耶斯（Dorothy Sayers）那样的当代小说家的著作中，也有热寂学说的影子。它表明地球上的生命，以及别处的生命必不可免地将会灭绝。它证实了身挂广告牌的那个人的一段广告词：世界末日即便不是近在眼前，至少也是正在向我们走来。

早在 19 世纪 60 年代，在出现膨胀宇宙的概念之前很久，就有许多科学家对于能量退化为热持有异议，因为这似乎有悖于太阳系之继续存在。亥姆霍兹（Helmholtz）曾预见到一种完全静止的状态，在此状态下所有形式的能量均退化为热，所有的自然过程都将停止，用他的话来说就是：

“从那以后宇宙将被宣判永远处于某种静止的状态”。

其他一些人开始考察这一想法对于朦胧遥远的过去又有何种后果。它似乎意味着宇宙必定具有某种开端——某种最有序的状态。1873 年，英国科学哲学家威廉·杰文斯（William Jevons）申言：

“我们不能往过去无限地回溯……循踪宇宙的热历史。对于任意确定的一个负的[即过去的]时间值，该公式给出不可能的值，这表明存在着某种热的初始分布，它不可能是按已知的自然定律由任何早先的分布造成的……因此，热的理论将我们置于进退两难的境地：若不相信创世发生于过去某个特定的日子，就得赞成当初自然定律的运行发生了某种莫名其妙的变化。”

引人注目的是，这一论证要比膨胀宇宙观念早出现 50 年。20 世纪 30 年代，爱丁顿在谈论由爱因斯坦的引力理论导出的膨胀宇宙时，又重申了这一点。

“随着时间之回溯，我们在宇宙中发现了越来越多的有序性。如果我们不及早地停下来，那么我们会回溯到这样一个时期，当时宇宙的物质和能量具有可能达到的最大有序状态。再往前回溯是不可能的。我们抵达了时间的那一端——一个断端——只是按照我们的倾向我们才称它为“开端”……我看不出在接受当代科学理论对未来所作的结论——宇宙之热寂——时会有什么困难。它可能发生在成百上千亿年之后，但是时间总在缓慢然而无情地流逝。我并未从这一结论感觉到任何本能的恐惧……令人奇怪的是，物理宇宙正在衰亡的学说是如此经常地被上纲为悲观主义，从而有悖于宗教的追求。从什么时候开始，‘天地将死’的学说已经变成了为教规所不容的异端？”

爱丁顿是一位教友会教徒和有神论者。上述这段话的有趣之处在于：他着重说明了作为热力学第二定律的一项结论，宇宙不可避免地必有某种开端，以及他对热寂意味着末世的默许。可以将此与伯特兰·罗素（Bertrand Russell）这样的无神论者的态度作一比较。罗素将这种未来可能发生的热寂看作是对宇宙无欲的一种证实——因为

“宇宙”原文为 the world。在当时的天文学和哲学著作中，常用 world 一词代表“宇宙”或“天地万物”——译者

“人类创造的所有辉煌业绩注定都要在太阳系的大死亡中归于灭绝，人类成就的整座殿堂将不可避免地被埋葬在废墟中某个宇宙的碎片之下——所有这些事情，即使不是无可争辩的，也是几乎可以肯定的，以至于没有哪一种反对它们的哲学可能站住脚”。

有趣的是，杰文斯和其他人对于存在某种开端的论证并不很正确，当时却似乎并没有人察觉到其中的原因。诚然，当我们不断地回溯过去时，“第二定律”要求宇宙之熵越来越小，但是这并不意味着经过一段有限的时间后，宇宙就必然会达到熵等于零的某种状态（如图 3·2 所示）。熵有可能随着时间以指数的方式增加，于是当人们往过去回溯得越来越久远时，熵就会越来越接近于零，但是却永远不会真正地达到零（如图 3·3 所示）。

另一种可能性是，随着时间的流逝，整个宇宙的总熵可以不断地增加，而与此同时，宇宙中某局部区域中的熵却在减少。如今在许多地方都发生着这种情况。地球的生物圈从局部来说变得更有秩序了，它的熵减少的程度超过了考虑地球与太阳之间的热交换而造成的熵增加。如果你着手用一些木块来做一把椅子，那么在制作的过程中木块的有序程度就在增加，它的熵则在减少。这并不违背热力学第二定律，因为总的熵——它包括储存在我们体内的淀粉和糖中的能量之降解，以及我们做工时所消耗的能量——仍在增加。事实上，我们在周围见到的生命世界的复杂性，正是大自然能够以某些微妙的方式使局部范围内的熵减少的一种表现形式，而这种熵减少则为他处的熵增加所补偿。

我们之所以详述这些历史事实，其原因在于它们揭示了宇宙之熵不可抗拒地增加这一想法，如何导致了有关宇宙最终结局的悲观猜测，而且还为思考符合自然定律的宇宙起源提供了科学依据。

我们应该谈一下今天人们对这些热力学观念的看法。直到不久以前，宇宙学家们才开始认识到，并不应该预期永远膨胀的宇宙在未来会因熵达到某种极大值而发生传统观念中的热寂。虽然整个宇宙的熵将会不断地增加，但是在任何特定的时刻，宇宙可以具有的最大熵值却增加得更快。于是，宇宙可能具有的最大熵值与实际熵值之差就越来越大（如图 3·4 所示）。宇宙离开完全热平衡的“死寂”状态实际上是变得越来越远了。

当我们考察宇宙现时的熵是什么状况时，我们发现它居然低得令人吃惊；也就是说，我们可以想象宇宙中能量分布的形式可以远比其现状更加无序得多。因此，尽管我们的宇宙已经以熵增加的某种方式膨胀了 150 亿年，却依然处于高度有序的状态，这使人困惑。它意味着宇宙的起始状态必定是极其有序，因而是极端特殊的，它也许为某种“对称”或“经济”的大原理所制约。然而，人们业已证明，利用这些想法去发现那个原理乃是不可能的，因为我们并不知道宇宙结构与成分——它们可以充当熵的贮藏所——的所有方面。引力本身似乎携带了与其深层的量子特征相联系的熵。引力的热力学特征之本质乃是未来的宇宙学家们需要探讨的问题。我们将在本书结束时再次谈到它。

如果你对一个因熵的不断增加而将在未来变得毫无生气的永远膨胀的宇宙不感兴趣，那么你还可以选择另一类弗里德曼膨胀宇宙模型。相对于物质的引力拉曳而言，有些膨胀慢得足可为前者所制止，并转而往回收缩，直至遥远的将来尺度变为零。它们的最终状态亦将是某种彻底的热死——其温度和密度随着收缩的加强而无限地增大。但是，对许多人来说，宇宙演化的这种循环则使古代有关宇宙“轮回”的想法——即宇宙永无止境地从前一次死

亡的灰烬中重生——变得可以理解了（见图 3·5）。

有人设想，我们也许正生活在某个无限古老的振荡宇宙——它具有无限的将来——的某一轮膨胀之中（见图 3.5）。每当宇宙“大坍聚”并“反弹”至膨胀状态，所有的行星、恒星和星系就都将被毁灭。这对某些人来说，在哲学上是很有吸引力的，并且它还避免了——作为宇宙现时膨胀状态的一项必不可免的后果——宇宙具有某种开端的间断性；但与此同时，由于热力学第二定律的缘故，它也很容易遭到批评。美国宇宙学家理查德·托尔曼（Richard Tolman）首先论证道：如果宇宙的熵从一个循环到下一个循环无可抗拒地不断增加，而且在每次“反弹”时自然定律保持不变，那么宇宙每次膨胀至极大时的尺度就会递增，每一循环所经历的时间也会比上一个循环更长（见图 3.6）。于是，如果你逆着时间回顾一个振荡宇宙，那么它就会变得越来越小。当时（以及此后相当长的时间内）人们再次错误地得出结论：这意味着宇宙必定在过去某个有限的时刻从尺度为零的状态开始膨胀起来。另一些人则争辩道，如果宇宙在过去已经振荡了无限次，那么熵的增加将导致现今宇宙已经热寂。然而，由于任何人都对每次“反弹”的过程一无所知，所以这种争辩没有什么说服力。有些人猜想，物理常数，熵或者甚至自然定律本身在每次“反弹”时都有可能重新分配。这种猜想在今天同样没有什么份量，因为我们并不充分了解熵的所有载体。如果引力场以很不寻常的方式携带熵，那么宇宙的熵持续增加很可能就不会导致宇宙尺度和每一循环的延续时间在辐射不断累积之中增长不已。

当你与一位非天文学家，但曾对天文学深感兴趣的人交谈时，你可能会发现，当你提到大爆炸理论时，就会使他想起所谓的“稳恒态”宇宙理论。事实上，早在大约 25 年以前，宇宙学家们对稳恒态理论就不再感兴趣了；尽管如此，它作为大爆炸理论的竞争者却依然活在社会公众的心目中。它是托马斯·戈尔德（Thomas Gold），赫尔曼·邦迪（Herman Bondi），及弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）的“智力产儿”。他们于 1948 年观看了环幕电影“夜之死”，该片以诸事复归于开始时的状态而结尾，这使他们产生了稳恒态的想法。要是宇宙也像这样又会如何呢？他们这样问自己。他们知道宇宙正在膨胀，但是他们不喜欢膨胀似乎表明宇宙必有开端的想法。他们希望对于从过去到未来的所有时代的观测者而言，宇宙的总体面貌始终保持不变。于是他们构想了一幅这样的图景：宇宙在任何时候，平均说来始终保持相同的状态，而全然没有什么开端（见图 3·7）。

他们不主张物质似乎全部创生于过去某一特定的瞬间，而提议物质正以恰当的速率不断地创生着，这一创生速率刚好与因膨胀而使物质变稀的效果相平衡，从而使宇宙中的物质密度维持不变。这种状态从无限久远的过去一直存在至今，并将永远地继续下去。与此相反，膨胀宇宙的大爆炸图景的物质密度则在不断地减小，它有一个开端，而没有持续不断的创生。顺便说一下，稳恒态图景所要求的创生速率是非常小的（每 100 亿年中在 1 立方米的体积内大约创生 1 个原子），因此迄今为止全不可能直接观测如此之慢的创生过程。创生速率如此之小的原因是宇宙中的物质其实是非常稀少的。如果将今日宇宙中的全部恒星和星系平摊到一片均匀的原子“海”中去，那么在每立方米的空间中大约只能分摊到一个原子。这比地球上实验室中迄今所能产生的最高真空还要空虚得多。外层空间确实就是那样——几乎空空如也。

稳恒态方案的优点之一是它的明确性。它非常肯定地预言宇宙应该是什

么样子的，因而很容易遭受观测事实的质疑或反驳。情况正是如此。如果宇宙在任何时代看起来都是同样的，那么在宇宙史上就不能有什么特别的时期发生什么特别的事情，例如，星系开始形成，或者类星体盛行一时。第二次世界大战期间的雷达研究孕育了射电天文学这门新学科，它使天文学家们能够察看主要以射电波（而不是可见光）的形式辐射能量的天体。他们利用射电望远镜观测非常古老的星系——一些强大的射电波源，看看这类星系是否如大爆炸理论预期的那样，于某一特定的时期出现在宇宙中，抑或有如稳恒态理论之预期，在不同时代其多寡程度始终相同。20 世纪 80 年代后期，观测资料开始累积起来，它们表明宇宙在过去和今天不大相同，过去曾是强射电源的这一族天体随着宇宙历史的演进经历了剧烈的变化。它们在宇宙史上的不同时代多寡程度并不相同。

当我们观测遥远天体发来的光时，我们看见的是它们在过去的形象，即这些光在离开那些天体时的状况，因此，我们观测固有特征相似，然而位于不同距离处的天体，就能使我们考察宇宙在过去的不同时代分别呈什么状态。当然，人们仍有可能对这些观测究竟说明了什么问题提出争议，当观测家们试图确定宇宙在过去是像大爆炸理论预期的那样密度较大，还是像稳恒态所申言的那样始终如一时，天文学界内部曾经有过针锋相对的辩论。正是这场激动人心的辩论，于 50 年代在社会公众的心目中留下了“大爆炸与稳恒态”对抗赛的印记。1951 年，弗雷德·霍伊尔在英国广播公司作了一系列特别有影响的广播讲话，其总题目为“宇宙之本性”；正是他在这些讲话中，把宇宙由过去某个有限时刻的高密状态膨胀而成的宇宙学说嘲称为“大爆炸”——这原是一种贬义的用语。

1965 年，当彭齐亚斯和威尔逊发现微波背景辐射之时，这场辩论终于平息了下来。在稳恒态宇宙中不应出现这样的热辐射，因为它先前从未经历过异常致密的灼热状态。宇宙平均说来总是像今天那样寒冷而又宁静。随后，观测又表明宇宙中那些最轻的化学元素的丰度与大爆炸模型所预期的相符，并证实了它们由宇宙膨胀的最初 3 分钟内的核反应所产生的想法。稳恒态模型对这些丰度未提出自然的解释，因为它从未经历过在整个宇宙中到处都能发生核反应的极端高密高温的早期阶段。

这两项成就为稳恒态模型敲响了丧钟。对于我们的宇宙来说，稳恒态不再是一种有生命力的模型，只有它的某些发明人仍在尝试以各种方式对它进行修改。但是在公众心目中，它似乎仍作为大爆炸图景的强大对手而活着。实际上，大爆炸模型因与观测到的宇宙合拍业已确立了自己的中心地位。但是，必须认识到，“大爆炸”模型这一术语已被专门用于代表过去比现在更热更密的那类膨胀宇宙图景。在这个大类中，存在着许多不同的宇宙学说。宇宙学家们的工作就是要详述大爆炸宇宙膨胀的历史：确定星系是如何形成的；它们为什么会成团；为什么膨胀以这样的速率进行下去；解释宇宙的状态和存在于宇宙中的物质与辐射的平衡。

radio waves，通常称为“无线电波”，作为天文学术语则称“射电波”，两者的物理含义实际上相同。类似的术语还有“射电天文学”、“射电望远镜”、“射电源”等——译者

第四章 天体—粒子物理学

“长期以来，这始终是我的一条格言：小事情是最重要不过的了。”

引自《身份案》

我已择要概述了宇宙学家们发现的有关宇宙的某些事情，以及他们希望解答的某些问题。制约我们周围一切事物的因果链肯定了这一点：如果我们想要“解释”有关宇宙现状的某些事情，例如星系为何具有那样的形状和大小，那么我们就必须回顾过去，并追踪导致星系形成的一系列事件的证据。这就是宇宙学家们为什么总是对过去如此专注的原因：它是我们理解现在的关键。归根到底，那种专注使他们能勇于正视在宇宙起源问题上所处的进退维谷的境地。

我们逆着时间回溯，利用在密度和温度确定的条件下物质有何表现的知识，来再现宇宙过去的历史，依靠过去的事件留存于宇宙中的片断证据来检验我们的演绎推理。遗憾的是，事情并不那么简单。宇宙非常有效地覆盖了早先的痕迹，远古时代留存下来的原始遗迹简直微乎其微。然而最根本的是我们并不知道在极端的温度和密度下物质所能表现的一切行为。地球上的实验受到投资、规模以及可行性的限制，不可能充分地模拟宇宙膨胀史上最初百分之一秒期间所经历的种种条件。

这造成了某种非常引人入胜的态势。宇宙学家们指望基本粒子物理学家能阐述物质和辐射在非常高的温度下的表现，这样他们就能继续重现更接近于表观开端的宇宙既往史了。另一方面，粒子物理学家们却无法利用地球上的资源来做这件事。地球上的加速器既不能再生大爆炸的能量，他们的探测器也不能捕获那些最难捉摸的物质基本粒子。因此，粒子物理学家又指望宇宙的早期能成为检验其理论的一条阳关大道。如果他们将物质的所有组成成分统一为某种单一模式的最新方案导致一个收缩的宇宙，或者导致一个恒星不能存在于其中的宇宙，那么这种方案即可予以排除。然而，你可以看到人们正在实施某种非常微妙的平衡技巧，其中需要用到仅仅部分地（甚至全未）受过检验的物理学，以勾画出宇宙历史上最初一秒钟的可能状况。

你最好把“一秒钟”看作宇宙史上的一道分水岭。在此时刻以后，我们相信宇宙中的温度已经低到足可运用业经地球上的实验尝试与检验确立的物理知识，以获得一幅良好的宇宙态势鸟瞰图。但是在一秒钟之前，我们却对完整地重建主宰宇宙进程的物理过程与基本粒子无能为力，这就使我们再现的宇宙史有了不确定性。一秒钟又是我们业已观测到从宇宙早期留下了原子核的最早时刻。这并不意味着我们了解宇宙年龄大于一秒之后所发生的一切事件。诚然，我们了解在一秒钟之后制约宇宙中各种成分行为的一般物理原理和定律，但是，尽管如此，仍有许许多多与星系形成相关的极其复杂的事件，乃是我们必须详尽地再现的。这很像我们对于天气系统的了解。我们知道制约天气的全部物理学原理。你给出过去任意一系列的气候变化，我们都能对它作出解释。然而，我们却不能肯定地预言明天的天气，因为有无数的

《身份案》，福尔摩斯探案之一。此处引文为该案中福尔摩斯对其委托人玛丽·萨瑟兰小姐所言，后者提到了一些“小事情”。“小事情”原文为 little things，转义“小东西”，此处借喻本章所述的基本粒子至为重要——译者

因素在非常复杂而敏感地相互影响。它们共同决定着天气的现状。由于我们无法尽善尽美地获悉此种状况，所以我们的预报能力就受到了限制。

20 世纪 80 年代，对于构成物质的大多数基本粒子的研究，开始与天文学和宇宙学联系起来。经常发生这样的情况：倘若存在某种新型的亚原子粒子，即使其影响弱得连地球上的粒子对撞机实验都显示不出来，却有可能在天文学上造成种种后果。这样人们就可以利用天文证据来排除许多新型基本粒子存在的可能性。

位于日内瓦的欧洲核子研究中心（CERN）的高精度实验结果，与宇宙学对宇宙史上最初几分钟内的核反应研究，这两者之间的相互影响为宇宙学和基本粒子物理学研究的共生关系提供了一个非常精彩的例子。在这两方面的研究中，每一方都可以告诉我们被人们称为“中微子”的那类基本粒子具有多少不同的品种。中微子宛若“幽灵”，它在放射性衰变中出现。它们不受电力或磁力的影响，甚至也不为核力所左右。其结果是，它们与今天一切形式的物质的相互作用都极其微弱，以至人们几乎无法探测到它。事实上，就在这一瞬间，就有许许多多的中微子正在穿透你的大脑！有两种中微子是物理学家们早就知道的——电子中微子和 μ 子中微子，人们已经在无数次的高精度实验中探测到了它们。第三种中微子，即 τ 子中微子，只是通过其他粒子的衰变才间接揭示了它的存在；但是，产生这种中微子所需的能量极高，以至人们迄今尚未直接探测到它。这就提出了一个问题：我们能不能肯定这第三种（ τ 子）中微子当真存在？还有没有我们尚未见到的其他品种的中微子？到目前为止，还没有一种中微子理论对应该存在多少不同的中微子作出过预言或解释。我们还得拭目以待。

我们首先来看一下，我们对宇宙既往史的再现，如何使我们能将天文观测用来计算不同中微子的品种数目。然后我们可以将此结果与近来 CERN 直接测量中微子品种数的实验相比较。

自从 20 世纪 70 年代以来，宇宙学家们一直假设存在着、而且仅仅存在着 3 种中微子（电子型的、 μ 子型的以及 τ 子型的），并在阐明宇宙年轻时代组成成分的主要理论模型中，将其作为一个具体构成部分。对于宇宙学家说来，知道自然界存在多少种中微子是非常重要的，因为这能确定极早期宇宙中辐射和物质的总密度，并能决定宇宙膨胀的速度。他们将这一信息应用于研究宇宙年龄介乎 1 秒与 3 分钟之间的时候宇宙中事态的详细进程。宇宙在其历史上的这一阶段中，热得足以发生使中子和质子聚合而产生某些最轻的元素的核反应。在更早的时代，温度实在太高，以至于那些元素刚一形成就会立即瓦解；在更晚的时代温度又太低，核反应就不会发生。

为了预言这些核反应的后果，我们需要知道能供核反应结合成不同原子核的质子和中子的相对数目。例如，氢核由单独一个质子组成；氦核是一个质子加上一个中子，氦核则可以由 2 个质子和 2 个中子（称为氦 4）组成，也可以由 2 个质子和 1 个中子（称为氦 3）组成。当宇宙比 1 秒钟更年轻时，应该存在着等量的质子和中子，因为那时发生的所谓“弱”相互作用使质子与中子互相转化，并使它们的数目保持平衡。但是，当宇宙年龄到了 1 秒钟时，对于质子和中子之间的这些弱相互作用来说，膨胀的速率就变得太大了，以至于不能再维持质子和中子的完美无瑕的平衡。这时，一个质子转化为一个中子要比一个中子转化为一个质子稍稍困难一些，这是由于中子要比质子稍重一些，因此产生中子就要求有更多的能量。当那些弱相互作用停止下来

时，留下的中子与质子的相对数目具有一个确定的比值——1 比 6。大约 3 分钟以后，核反应开始启动，使这些中子和质子聚变为氦核、氦核和锂核。全部物质中大约有 22% 最终变成了氦，每个氦核则包含 2 个质子和 2 个中子。剩下的全部物质几乎仍保持为氢，仅有十万分之几属于同位素氦 3 和氘，还有百亿分之几归之于锂。

对宇宙各处的氦和氘、氦 3、以及锂等其他元素的天文观测，证实了上述丰度值的普适性。最简单的大爆炸模型和天文观测之间的一致性是很美妙的。事情很清楚，这种一致性是与自然界中仅仅存在 3 种中微子的假设联系在一起。要是存在 4 种中微子的话，那么早期宇宙的膨胀速率就会增大，当弱相互作用停止时，相对于质子而言就会留下更多的中子；早期宇宙中最终得到的氦丰度也会相应地增加。人们正在进行顾及全部观测结果及其不确定性的非常详尽的研究。据称，不会存在与我们已知的那 3 种相似的又一种中微子。

CERN 的实验肯定了这一预言。它产生了极其大量的短寿命粒子“Z 玻色子”。每个 Z 玻色子大约比一个质子重 100 倍，它一旦形成便迅速衰变成其他较轻的粒子，其中也包括中微子。中微子的品种越多，Z 玻色子衰变的途径也越多，它们就会消失得越快。

CERN 的实验家们精密地监测了大量 Z 玻色子的衰变，从而能够非常精确地确定它们究竟衰变成了多少种不同的中微子。考虑到实验中的不确定性，所得的答案是 2.98 ± 0.05 。所以一定存在着 3 种中微子。

这是一个非常美妙的例子，它说明了粒子物理学和宇宙学可以如何地相辅相成，并增进人们对于整个宇宙以及构成它的基本粒子的了解。对轻核素丰度的正确预言乃是大爆炸宇宙图景的最大成功。这项预言对宇宙在其年龄为 1 秒钟时的结构的微小变化相当敏感，从而使我们能对宇宙当时可能是什么模样得出重要的结论。例如，倘若宇宙在不同的方向上以不同的速率膨胀，或者整个空间包含着强烈的磁场，那么膨胀的速率就会增大，氦的丰度也会比我们所见到的大得多。因此，今天对于太空中轻核素的天文观测，乃是探测宇宙仅仅膨胀了 1 秒钟之后可能呈什么状态的最有力的工具。它们对过去的回溯要比观测微波背景辐射更为久远；同时，它们又表明宇宙学家何以能对他们再现的宇宙早期史作出详细的检验。

对早期宇宙中的核反应所作的这些研究，还有一个重要特点，它展现了大爆炸宇宙模型的一个重要的总体特征。宇宙年龄介乎 1 秒和 3 分钟之间时出现的那些物理过程产生了更多的元素，它们的丰度并不依赖于人类对宇宙如何开端的了解程度。质子和中子的丰度仅由它们相互反应终止时的宇宙温度所决定，因为在此之前，任何东西都处于与其他一切东西相平衡的状态。这是热大爆炸宇宙的非常引人注目的特征。这种热的“平衡”状态保证了温度精确地决定着不同的物质粒子和辐射粒子的相对丰度。人们直到 1951 年才明白了这一点。在此之前，许多宇宙学家认为，想要解释由宇宙极早期阶段的核反应造成的元素丰度，就必须知道宇宙开初时质子与中子的相对数目。但事情并非如此。在宇宙年龄为 1 秒以前，由于高温的平衡，质子数和中子数是严格相等的。有些事情无论往昔如何，而今皆是如此。

第五章 奇点

“异常现象几乎总是可以为你提供线索。可是，一个越是毫无特征、平平常常的罪行，就越难以确凿证明它系何人所犯。”

引自《博斯科姆比溪谷秘案》

膨胀宇宙图景意味着过去必定出现过某种灾变事件。如果我们逆转宇宙的膨胀，并沿着时间回溯，我们看来就会遇到某种“开端”，那时任何东西都会与其他一切东西撞在一起。宇宙中的全部质量都会挤压到某种无限致密的状态中。这种状态称为“初始奇点”，或者，有时就称为“大爆炸”。我们的过去存在“初始奇点”这个幽灵，激起了对现代宇宙学思想的形而上学和神学的形形色色的外推。根据今日观测到的宇宙膨胀速率，以及这种膨胀正在减缓的速率来判断，该初始奇点存在于仅仅约 150 亿年以前。我之所以说“仅仅”，是因为虽然从日常生活的角度来看，这一时间尺度已经长得惊人，但是它却不比下面这类事情的时间尺度大得太多：2 亿 3 千万年前恐龙在阿根廷漫游；在地球上发现的最古老的化石细菌大约已有 30 亿岁；格陵兰地幔中最古老的表层岩石的年龄是 39 亿岁；而从我们太阳系形成之初留下的最古老的残块年龄则约为 46 亿岁。我们与宇宙膨胀之始的距离，要比我们兴许猜想过的近得多。

在 20 世纪 30 年代初期，许多宇宙学家不愿意相信宇宙膨胀当真表明它具有某种密度无限的奇性开端。他们提出了两点异议。如果我们试图把一个气球的体积挤压得越来越小，那么我们会感受到气球内的空气分子所施加的压力，这种压力最终会使我们的努力以失败而告终。由于气体中的分子能够自由移动的体积变得越来越小，它们对气球壁的撞击就变得越来越有力了。宇宙的情况似乎与之相仿，我们也许会预期宇宙中的物质和辐射所施加的压力将阻止不断地挤压——阻止它挤压到体积为零。它们也许会像一大堆互相撞击的台球那样反弹开来。另一些人则断言，密度无限大的初始奇点这种想法之所以会出现，是由于我们采纳了在所有方向上都以相同的速率膨胀的图景。这样，当我们回溯宇宙的膨胀时，所有的东西就会步调一致地往一块儿跑，同时到达一个点。如果膨胀稍许有一些各向异性（事实当然如此），那么当我们回溯过去时，往一块儿聚集的物质彼此的步调就会有所参差；这样便有可能避免在一场“大坍聚”中形成一个奇点。

人们深入探讨了上述异议，发现它们并不能消除预期的奇点。事实上，鉴于爱因斯坦关于质量和能量等价（ $E = mc^2$ ）的著名发现，附加的压力其实是助长了奇点的产生。压力只不过是能量的另一种形式，所以它等价于质量；当它变得非常巨大时，就会产生一种与排斥效应——我们常将其与某些压力联系在一起——相对抗的引力。试图凭借增大压力来避免奇点实际上是弄巧成拙，就像企图拉住自己的靴带把你提起来一般。实际上，这反而使奇点变得更糟了。更有甚者，当人们把爱因斯坦的引力理论用于发现在不同方向上以不同速率膨胀，或膨胀状况因地而异的可能存在的其他各类宇

《博斯科姆比溪谷秘案》，福尔摩斯探案之一。引文系福尔摩斯对华生语，其中的“异常现象”一语原文为 singularity，后者在物理科学中作为专门术语，意为“奇[异]点”或“奇[异]性”。此处引用这段话显系语带双关，寓意是“奇点”可以为探索宇宙之开端提供某种线索——译者

宙时，奇点也依然存在。它不是由于采用具有特殊对称性的宇宙模型而造成的人为结果。看来，奇点是避免不了的。

反对初始奇点观念的最后一项异议则较为微妙。直到 1965 年人们才对它有了充分的了解。我们最好是利用大家比较熟悉的事例来对它作些解说。地理学家们给地球安置了经纬线网，它们可以用来标记地球表面任意一点的位置。人们称其为地图的“坐标”，据此可特地面上不同点的位置互相联系起来。当我们向地球的南极或北极前进时，经线就开始逐渐会聚，最后，子午线都将相交于南北两极（见图 5·1）。于是我们看到，在地球的两极地图坐标形成了“奇点”——虽然实际上在地球表面并不会造成什么灾难。我们由于选用了特定的地图坐标而导致了人为的奇点。我们总可以选用某种不同的坐标网络，使两极处并不发生任何糟糕的事情。我们怎么知道，膨胀宇宙开始时的表观奇点就一定不是因对发生在远古的事情描述不当而人为地造成的呢？

为了和这些反对意见打交道，宇宙学家们在对奇点下定义时必须非常谨慎。如果我们把宇宙的整个历史——所有的空间和所有的时间——想象成伸展在我们面前的一张硕大无朋的纸，那么我们就有可能在某些特殊的地方发现一种密度和温度都变得无限大的奇点。现在，假设我们沿着这些“病态”点的四周将它们剪去，我们就会得到一张穿了孔但是却不包含奇点的新纸，这将是可能存在的另一个宇宙。但是，我们会发觉自己受了这些花招的骗。确实，在某种意义上，这样一个宇宙乃是“几乎”奇（性）的。要是我们当真发现了一个无奇性的宇宙，我们又怎能知道发现它的过程并未以上述方式将奇点“剪去”呢？

如何摆脱这种进退维谷的境地？答案是放弃将奇点定义为“密度与温度无限之处”这种传统观念。取而代之的是，我们说：当任何光线穿越空间与时间的轨迹达于某个终点而不能继续延伸时，在该处便出现了一个奇点。还有什么能比这种艾丽丝漫游奇境式的经历更加“奇异”的呢？光线在其轨迹的尽头抵达了时空的边缘。它从宇宙中“消失”了。用这种方式定义一个奇点的妙处在于，如果密度当真在某处变成无限，那么由于时空被毁，就会导致光线轨迹的终止。但是，如果这样一个点已从宇宙中切除，那么光线在抵达留下的那个孔的周边时，照样也会终止。

奇点作为宇宙边缘的这种图景是极其有用的。它绕过了由宇宙的形状与压力、或者由于用坐标描述它的随意性而引起的所有问题。虽然这样一个奇点有可能与我们对膨胀大爆炸宇宙的直观想象一样，伴以极高的密度和温度，但是却并非必然如此。

我们关于宇宙开端的常识性观念还因此而发生了另一些变化。它不必在所有的地方同时发生。如果我们往回追溯不同光线轨迹的奇性开端，那就有可能发现它们开始于不同的时刻。

也许，宇宙中某些区域的密度在今天不如其他区域那么高这一事实，反映了它们较早地从奇点涌现出来，并较其他更密的区域膨胀了更长的时间，因而已经变得较为稀薄（见图 5.3）。

在 20 世纪 60 年代中期，彭齐亚斯和威尔逊发现微波背景辐射之后，人们开始认真地考虑大爆炸宇宙的想法了。宇宙学家们将注意力集中到宇宙是否具有某种奇性开端的问题。人们澄清了应该用什么来鉴别这种开端——不能再沿着时空继续回溯延伸的轨迹；接着就是要发现我们的宇宙过去是否包

含着这种类型的奇点——时间的某种开端。罗杰·彭罗斯 (Roger Penrose) 证明了这样的问题可以如何利用天文学家们早先从未使用过的新颖的几何学论证来回答。彭罗斯在纯数学方面坚实的基础和非凡的几何学直觉，使他能引进一些强有力的新方法，以攻克光线如何运动以及它们能否无限地向过去回溯的问题。后来斯蒂芬·霍金 (Stephen Hawking)，乔治·埃利斯 (George Ellis) 以及另一些人加入了他的行列。

彭罗斯证明，如果宇宙中的物质施加的引力总是表现为吸引，并且宇宙中存在着足够的物质，那么这些物质的引力效应就使人们不可能无限地沿着时间往回追踪所有的光线。某些（也可能是所有的）光线必定会到达一个终点——一个“奇点”，我们就用它来印证人们对于大爆炸的直觉预言（见图 5.4）。这些严格的数学推理的精妙之处在于，它们避免了所有关系到映射坐标和特殊对称性的不确定性。它们不需要我们过多地知道宇宙结构的详情，甚至不必知道引力定律。应该强调指出，它们是定理而不是理论。他们列出有关宇宙性质的特定假设；如果这些假设正确无误，那么仅仅依靠逻辑推理，就可以保证有一个过去奇点。如果发现这些假设在我们的宇宙中并不成立，那么我们也还不能得出不存在奇点的结论——这时我们根本不能对“开端”作出任何结论。此时，这些定律不再适用于我们的宇宙。

这两个特征——引力的特性是吸引，以及宇宙中存在着足够的物质——非常引人入胜，因为它们尽管是以数学的语言表达的，却可以由观测来检验。非常精彩的是，当时新发现的微波背景辐射正好满足可观测宇宙中存在着足够的物质这一要求。于是，就只剩下引力的特征是吸引这一个要求了。在 20 世纪 60 年代，这被认为是一个完全合理的假设。既没有任何观测证据反对它，也没有任何牢靠的物理理论预期该假设不能成立。事实上，它意味着物质的引力质量是正的，在日常的情况下，物质的质量就是它的密度乘以它所占据的体积，因此正的质量意味着正的密度。但是，当人们与压缩到极高密度的物质打交道、或者与运动速度接近于光速 c 的物质打交道时，那就必须再次考虑到爱因斯坦的公式“ $E=mc^2$ ”了。任何形式的能量 E 都具有一个等效质量 m ，因此它能感受其他物质的引力。压力是能量的一种形式（例如，它由气体中分子运动的能量所致），因而也会受引力作用。由于造成压力的粒子能在其中运动的空间共有 3 个维度，所以“引力的特性是吸引”这种约定也就是密度 ρ 加上 3 倍的压力 P 除以 c^2 为正值：

$$D = +3P/c^2 > 0$$

对于宇宙中人们熟悉的所有形式的物质——辐射、原子、分子、恒星、岩石等等——上式皆成立。有鉴于此，在 20 世纪 60 年代后期和 70 年代的大部分时间内，许多人都以为宇宙在时间上具有开端已经获得了证明。数学宇宙学家们的大部分工作都集中在弄清非常接近奇点时会发生什么情况，以及最复杂的奇点对它们周围的物质应该有何影响。

这里，我们对宇宙起源的上述推断作一插叙：它并不是为古老的宇宙轮回思想——宇宙周期性地收缩直至发生一次大坍聚，然后又像凤凰涅槃与再生那样以一次新的膨胀而出现——增添新的教义。如果我们回溯历史直至奇点，那就到了时间的开端，再也没有什么“以前”了；我们不可能将宇宙史追溯到某个更早的收缩状态，这种想法只能留在科学幻想小说的领域中。

如果宇宙当真从某个奇点开始，物质以无限高的密度和温度从该奇点出现，那么，倘若我们还想进一步发展宇宙学，那就会面临一大堆的问题。是

“ 什么 ” 决定了从奇点涌现出来的宇宙的类型？如果在那个奇性的开端之前空间和时间都不存在，那么引力定律、或者是逻辑学和数学又当如何呢？在奇点“ 之前 ” 它们存在吗？假如存在的话，我们似乎就必须承认：我们若将数学和逻辑运用于奇点本身，那么我们就必须接纳某种比物质的宇宙更宏大的理念。更有甚者，为了了解宇宙的现状，我们似乎不得不做这件不可能做到的事情——了解奇点本身。但是，这是一起独一无二的事件，它怎能经得起科学方法的检验呢？

起初，宇宙学家们着手考察两种可能的策略，这在前文中已作了描述：寻找可能决定奇点状况的原理，或者尝试证明这无关紧要——无论宇宙如何肇始，最后它看起来都会和今天的模样极为相似。

第六章 暴胀与粒子物理学家之介入

“毫无疑问，再没有什么像司空见惯的东西那样不自然的了。”

引自《身份案》

20 世纪 70 年代中期，宇宙学朝一个新的方向发展了。粒子物理学家开始逐渐介入。1973 年，他们成功地找到了一种关于物质在极端条件下呈现何种行为的理论。先前，他们有关物质行为的思想曾预言，当能量和温度增高时，物质的相互作用应变得越来越强，描述起来也愈来愈复杂。因此，他们对于研究由大爆炸的第一秒钟所提供的环境并不十分起劲，他们觉得还存在着更紧迫而又有可能解决的问题。然而，他们成功地对基本粒子间的高能相互作用作出的新描述却具有这样的特征：随着温度的上升和能量的增大，相互作用变得较弱、也较为简单了。这种性质称为“渐近自由”，因为如果能量无限增大的话，那么在此渐近过程中粒子之间的相互作用就消失了，它们的行为就仿佛像处于自由状态下一样。

基本粒子物理学家已开始寻找将不同的自然力纳入某种单一的“统一理论”的途径。1967 年，温伯格(Steven Weinberg)和萨拉姆(Abdus Salam)首先解决了电磁力和弱力(与放射性相伴的力)如何统一的理论。20 世纪 70 年代在欧洲核子研究中心发现了两类预期应当存在的新的基本粒子，从而出色地证实了上述理论。现在寻找的则是使强力也加入统一行列的理论，即包含上述三类力的某种“大统一理论”(见图 6.1)。

有关统一的这些尝试乍一看似乎是不会成功的，因为我们知道各种不同的自然力强度是极不一样的，它们对各种不同类别的粒子起作用。这些截然不同的东西怎么会是一回事呢？答案是：自然力的强度随环境的温度而变化。所以它们虽然在我们生活的低能世界中大不相同，但在我们所探索的高温条件下却会极其缓慢地变化。某些业已提出而颇有希望的理论预言(见图 6.2)：这 3 种力在非常高的能量下——超过 10^{15} 吉电子伏，相应于 10^{28} 开的温度——应变得大致相等；该能量远远大于任何可以设想的地球上的粒子对撞机所能产生的能量，而与宇宙本身肇始之后约 10^{-35} 秒所历经的能量相等。所以，我们也许可以凭借探索这些“大统一理论”导致的宇宙学后果，来检验它们是否具有物理意义。此外，宇宙学家可能还会发现，有关基本粒子行为的这些新预言将能解释原先尚未阐明的宇宙性质。

大统一理论认为力的强度随温度的增加而变化，从而解决了今天具有不同强度的力的统一问题。它们必须解决的另一个问题是：不同的力作用在不同类型的基本粒子上。为了全面地统一所有的粒子，它们就必须能相互转化。这就要求存在质量非常大的新的传递物，这些重粒子仅在宇宙热得足以使它们由粒子碰撞而产生时才大量地出现。这类理论预期，几乎不可避免地会出现两类新粒子。第一类我们称之为 X 粒子，它似乎是一种神赐之物。人们预期它具有任何已知的物质基本粒子皆不具备的某种性质：它可以将物质转变为反物质。只有能够发生这样的转化，才有可能存在一组关于基本粒子相互作用的真正统一的定律。

参见第四章章首引文译注。此处引文系福尔摩斯对华生语，寓意为我们所见的宇宙具有一系列似乎很难自然形成的特征，见本章正文——译者

这一特征使这些大统一理论能够为宇宙中某种奇怪的“一边倒”现象作出解释。自然界中的每一种基本粒子都有一种“反粒子”，它们两者之间的诸多性质（例如电荷）正好都取相反的值，即具有相反的正负号，恰似一块磁铁的北极正好与其南极相反一般。虽然粒子物理学的实验室实验产生粒子和反粒子时两者是完全平等的，但当我们观看宇宙空间或者收集宇宙线时，却发现只有物质而没有反物质。宇宙仿佛是由物质、而不是反物质占着主导地位。使事情显得更加令人费解的是，如果物质不能转化为反物质的话，那么宇宙中物质与反物质数量的总体不平衡就永远不会改观了。于是，如果今天宇宙中物质占据主导地位——人们已观测到了这种不平衡性，那么为了对此作出解释，我们就必须对宇宙的开端有所了解。面对这一结论，科学家们反躬自问：会不会存在着某个更自然或更对称的状态，人们可以想象它是由某种迄今尚未发现的自然原理挑选出来的。唯一“自然的”初始状态看来就是物质与反物质均等的状态。但是，如果物质不能转变为反物质的话，那么这样一种状态就不可能转变为我们今天所见的“一边倒”状态，完美无缺的初始平衡必须被保留下来。

这样，新的大统一理论就要求 X 粒子来充当救星了。X 粒子和它们的反粒子以不同的速率衰变为其他形式的粒子和反粒子。结果，物质与反物质之间完全平衡（相同数目的 X 粒子和反 X 粒子）的初始状态，就可以通过宇宙极早期阶段中的这些衰变，而自然转化为某种“一边倒”的状态。

1978 年，人们研究了这一类型中为数众多，而各有差异的大统一理论，并弄清楚了阐明宇宙中已观测到的物质—反物质不对称性并非难事。这可是个好消息。它在 1977 年到 1980 年间唤起了粒子物理学家对于研究极早期宇宙的巨大兴趣。但是，也有一些坏消息，人们却多半对它视而不见。X 粒子只是整个宇宙在最初时刻必不可免地产生的两类粒子之一。X 粒子很快就衰变成了其他粒子——如夸克和电子（它们今天置身于我们周围的原子中），另一类粒子却是人们既不需要而又驱赶不走的。

这些多余的粒子称为磁单极。它在下述的所有尝试中都是不可避免的副产品：这类尝试欲将各种自然力统一到某种大统一理论中去，而这些理论则须得出一个与我们自己的世界相似、包含人们熟悉的电力与磁力的世界。由于和电与磁有着这种联系，就不能凭借对理论作点小修小补而将磁单极取消掉。人们必须找到某种途径，使磁单极在早期宇宙中刚一形成即被消除，因为没有观测证据表明它们存在于今天。更糟糕的是，如果宇宙中到处都有磁单极的话，那么它们最终对于今日宇宙之密度作出的贡献，就会比恒星和星系中所有普通物质的贡献大 10 亿倍，这不是我们生活于其中的宇宙。如此巨量的任何形式的物质都将使宇宙的膨胀迅速地减慢——其减慢速率要比实际见到的快上 10 亿倍。不论是星系，还是恒星，或是人，都不可能存在。问题是很严峻的。人们怎样才能摆脱这些讨厌的磁单极，或者压低它们的产量？答案是我们对宇宙的思考要开辟新的一章，并且彻底改变我们探究宇宙可能如何起源的方法。为了弄清其深奥精妙之处，我们需要进行这样的探索：我们今日所见的这部分宇宙来自何方？它过去是怎样的？这为何又使它今日的状态变得如此神秘？

当我们谈论宇宙时，我们必须小心地界定一种重要的差别。这个宇宙 存

（这个）宇宙，英文是 the Universe，即 universe（宇宙）首字母 U 大写，前面加定冠词，特指我们置身

在着，它就是一切。它可能是无限延伸的，也可能是有限的，我们对此并不知晓。还有一个概念是我们所说的“可见宇宙”（见图 6·4），它是（这个）宇宙的一个有限部分，从宇宙开始膨胀起，光已经有足够的时间可以从上述这个部分到达我们这里。我们可以把可见宇宙想象为一个半径约 150 亿光年的球，我们自己就在球心。随着时间的流逝，我们的可见宇宙尺度也增大了。对宇宙的科学研究的观测部分仅限于对可见宇宙进行。为了超越这一范围，并对整个宇宙的性质说些什么，我们必须以不能由观测周围世界来检验的某种方式进行外推。

现在假设我们来回溯构成今日可见宇宙的那个区域的历史。它一直在参与宇宙的膨胀，因此它所包含的物质（多得足以构成今天的上千亿个星系）昔时必容纳在一个远较今日小得多的区域内。由于该区域的半径随膨胀而增长，所以按照众所周知而历经检验的热力学定律，该区域中辐射之温度反比于其体积而下降。这意味着我们可以利用辐射温度作为这一部分宇宙昔日大小的量尺。若其体积加倍，则其温度减半。

现在，让我们选一个非常早的时刻，在该时刻预期可以出现 3 种自然力强度的大统一。这是那样的一个时代：其时宇宙的温度高得足以产生 X 粒子和磁单极，因而具有确定的值；它相应于约 3×10^{28} 开。这是宇宙开始膨胀后仅约 10^{-35} 秒时的温度。

今天，即膨胀开始之后约 10^{17} 秒，辐射的温度已下降到了 3 开。所以，自从那个早期时刻以来，温度已经改变了 10^{28} 倍，今天的可见宇宙所包容的事物，当时容纳在一个半径比今日之可见宇宙小 10^{28} 倍的球中。可见宇宙今天的尺度由其年龄乘以光速而给出，约为 3×10^{27} 厘米。因此，在大统一的时代，我们这个可见宇宙内的一切东西都包容在一个半径为 3 毫米的球内（见图 6.5）！这听起来小得惊人，但问题却在于这实际上是太大了。因为，从宇宙开始膨胀直到那时，光能够行经的距离是光速（每秒 3×10^{10} 厘米）乘以年龄 10^{-35} 秒，即 3×10^{-25} 厘米。这是自从膨胀开始以来，任何信号所能传播的最大距离。它被称为视界距离。如果摩擦或其他起着平滑作用的过程正在熨平宇宙初始状态中的任何不规则性，那么视界就决定着任何时刻这种平滑作用的最大限度，因为它们的作用不可能快于光速。问题在于，后来膨胀成我们今天的可见宇宙的那个区域，在早先那个时刻不知比视界的尺度大了多少。这就产生了一种疑难和一个问题。

一种疑难是：要弄清楚，如果宇宙由大量彼此完全独立的分立区域构成（此处完全独立是指自从宇宙肇始以来，还没有足够的时间让光从其中的一个区域跑到另一个区域），那么我们又如何解释宇宙中不同地方、以及在天空中不同方向上的非常显著的规则性。如果没有足够的时间供热或能量发生转移以协调不同地方的状况，那么它们怎会具有相同的温度、膨胀速率、密度、以及相同的非均匀程度等等？我们似乎只能得出这样的结论：初始状态乃是到处都“创生”出同样的条件。

一个问题是：我们这些多余的磁单极“朋友”的遍在性。这些粒子出现在早期宇宙中微观能量场取向失配的地方。当宇宙年龄为 10^{-35} 秒的时候，无论何处只要微观能量场的指向存在某种失配，那里就会形成一个稳定的磁单极。该时刻的视界尺度是 10^{-25} 厘米，它向我们道出那些能量场可被排列、从

而可以避免失配的限度。但是，在那个非常早的时刻，日后将膨胀成为我们的可见宇宙的那个区域要比该视界尺度大 10^{24} 倍，故应含有极其大量的失配。结果，它将包含多得无法接受的磁单极。这就称为磁单极问题。

从这些细节反过来作一反思，并清理一下发生了什么事情，那将是很教益的。物理学家已经建立了在极高的温度下物质表现出何种行为的详细理论。因此，这样的理论应该能用于宇宙史的最初时刻。当人们用它们来再现那些最初时刻时，便导致了一些激动人心的新见解。它们提供了解释宇宙何以变得偏爱物质而不是反物质的可能性。但与此同时，它们又预言了宇宙间存在着大量被称为磁单极、而其实并不存在的新物质粒子。预期存在如此众多的磁单极原因在于下述事实：今天的整个可见宇宙由那样的一个区域膨胀而来，后者在磁单极产生的时候，远比光从膨胀开始以来所能行进的距离大得多。物理学家们是如此倾心于物质处于高温下的这些理论所获得的成功，以至于在面临磁单极问题时不是放弃这些理论，而是将问题搁在一边，并继续探索它们的性质，以期出现柳暗花明的新局面。事情果然如此。

1980 年，一位正在麻省理工学院工作的美国青年粒子物理学家古斯（Alan Guth）突然想出一种解决磁单极问题的办法，并使大统一的想法可与我们的有关宇宙的知识相兼容。从那时以来业已证明，古斯的暴胀宇宙概念乃是极早期宇宙研究中的焦点，并且它本身也已发展成一个新的分支学科，后者的主旨乃是研究可实现其基本思想的一切途径。

我们可以看到，磁单极问题乃是极早期宇宙中视界尺度过小造成的。大统一时期的视界尺度膨胀到今天也不过成为一个大小为 100 公里的区域。只要宇宙在较早的时期膨胀得较快，那么也许就能使像视界那样大小的区域膨胀为今天的可见宇宙所具有的尺度。这就是古斯的暴胀宇宙假说所提议的内容。它要求宇宙在极早期经历一个短暂的加速膨胀（“暴胀”）阶段。所需的这个阶段简直短极了——从 10^{-35} 秒加速到 10^{-33} 秒就可万事大吉。

如果出现这种加速，那么我们的整个可见宇宙就可以从早先光信号能到达的范围内的某一区域膨胀而来。它的平滑性和各向同性就变得可以理解了。但更重要的是，大量的磁单极将不复存在，因为我们的可见宇宙是从某个极小的区域膨胀而来，后者则小得只能包容一个导致磁单极的失配。磁单极问题是有可能解决的。

认识到这一点非常重要：这种方案并未制止磁单极的形成，也未能通过某种途径消除它们。所有的磁单极仍如原来设想的那样照样形成。事情只不过变成了我们的整个可见宇宙来自仅含一个磁单极（或一个也不含）的小区域。与此相似，我们观测到的宇宙的均匀性和各向同性也得到了解释：这并不是由于存在着某种新的机制抹去了所有的不均匀性，也不是由于存在着什么强令初始状态绝对秩序井然的原理，而是由于我们看到的只是一个极小的区域膨胀后的映象，这个区域小得足以在一开始就因那些将较热区域过剩的能量携往较冷区域的自然平滑过程而保持均匀。在我们目前的视界之外，依然可能存在着不均匀性。它们并没有被消除，而只是被清扫到了我们看不见的地方。

我们刚才已经看到，在膨胀宇宙的标准图景中作一点小小的修改所带来的好处，这种修改允许在宇宙的历史上有一个非常短暂的阶段，在此期间宇宙加速地膨胀。这听起来好像只是给预期的宇宙史作一个微不足道的注解，但是却具有意义深远的重大影响。先前，我们讨论了彭罗斯和霍金的奇点定

理，你还记得，它们是以下述假设为依据的：所有形式的物质皆对其他物质有引力吸引作用。这就要求给出宇宙中密度与压力之和的量 D 为正值。如果这一点成立，那么所有的膨胀宇宙就都会减速。无论它们开始时膨胀得多么快，也无论它们将永远膨胀下去、抑或最终将收缩到一次“大坍聚”，引力效应都会使膨胀渐渐变慢下来，因为所有的物质都将吸引作用施于其他物质。所以，要是你希望早期的宇宙经历一个短暂的加速膨胀阶段，那就必须使引力效应暂时变为排斥，因此量 D 也暂时变为负值。这便是暴胀宇宙假说的基础：它是对宇宙均匀性的一种解释，也是对磁单极问题的一种解决办法，它要求存在某种在大爆炸之后很快就能产生这一短暂的反引力阶段的物态。如果自然界中不存在这样的物质，那么这种理论也就失败了。但它确实是存在的，我们将在下一章中看到，宇宙中应该保留着某些残存的证据，作为过去那个暴胀时代的见证。

在 20 世纪 60 年代，人们相信完全有理由认为一切形式的物质都具有正的 D 值。20 世纪 80 年代，这一信念已被侵蚀到了这样的程度：如今宇宙学家们相信在高密状态下的物质一定经历着 D 为负值的条件。究竟因为发生了什么事情才造成了这种逆转？粒子物理学家再次为此开辟了新的可能性，他们的理论预言存在着能够经受极大张力的新型物质。这些张力相当于负的压力，它们的存在可以压倒正的密度，从而造成负的 D 值。倘若这些形式的物质当真存在，而不只是纸上谈兵，那么它们的强度就会随着宇宙的膨胀而极其缓慢地变化，并对这种膨胀施加排斥性的引力效应。宇宙的膨胀将开始加速。宇宙将会“暴胀”，直至与此有关的物质场衰变为 D 取正值而形式较为普通的物质与辐射。此时，膨胀将复归于标准的减速状态。这便是有关极早期宇宙演化的暴胀宇宙方案之精髓。它是为大爆炸宇宙膨胀图景写下的一条极其简短的注解。

对宇宙学家们来说，这种宇宙史图景的诱人之处是多方面的。我们已经看到它如何解决了磁单极问题，并使我们得以理解宇宙在我们今天观测到的最大尺度上的各向同性和相对平滑性。不仅如此，它还对可见宇宙的现状作出了两项进一步的预言，因此，如果它不对的话，我们完全可以舍弃它。

当加速膨胀阶段出现时，它持续的时间至少必须达到当时宇宙年龄的 70 倍，这样才能解决磁单极问题。这就是从一个原先仅 1 毫米的区域成长为我们的可见宇宙所需要的时间。加速膨胀阶段的一个重要结果是，它确保了宇宙在一个很长的时间内持续膨胀，也就是说，这种加速使得该膨胀宇宙非常接近于区分永远膨胀的宇宙与终将收缩到某种“大坍聚”的宇宙之临界状态。这为我们的宇宙何以如此接近今天观测到的这种临界状态提供了非常出色的解释。

如果加速膨胀阶段的持续时间长得足以解释为什么我们未见到任何磁单极，那么我们就应该发现现时的膨胀与临界状态的差异不会超出百万分之一。这也就意味着我们应当发现宇宙的平均密度与每立方厘米 2×10^{-29} 克的临界值相差不超过百万分之一。

有两点理由使人们对此发生兴趣。首先，如果这正确无误的话，那么它就意味着我们将永远不能确定我们的宇宙是开是闭。我们的观测永远也不能将宇宙的密度确定到百万分之一的精度，因为不同地方的密度变异远比百万分之一大得多。但是，更容易使人发生兴趣的还是第二种含义：人们观测到的宇宙中的发光物质密至多为临界水平的 $1/10$ 。如果暴胀理论正确的话，那

么宇宙中的大部分物质就必须以某种不发光的形式存在，而不是存在于发光的恒星或星系中。这是一个受欢迎的结论，因为天文学家们久已为下述事实所困惑：他们观测到的恒星和星系的运动表明，它们的速度远比用邻近的全部可见物质施予的引力所能解释的快得多。看来，必定还存在着许多看不见的暗物质，它们的引力拉曳影响着我们所见到的运动。

我们对于这本账的第一个反应，就是假设在恒星和星系之间肯定存在着非常多的暗物质——也许以极暗的星、或岩石、气体、尘埃、以及其他小碎片的形式而存在，它们未介入形成发光恒星的过程。换言之，宇宙中的光分布图并不是物质分布的良好指南。我们对这种情况并不陌生。如果我们从大空中观望地球，并为暗黑的地面绘制一幅人工照明分布图，那么我们会发现它并不能忠实地反映出地球表面的人口密度。与此相反，它倒有可能反映了财富的分布。西方的大都市也许会光耀夺目，第三世界的人口分布中心却可能相当昏暗。

遗憾的是，宇宙中的事情却未必如此直截了当。我们可能以为下述想法是言之成理的，即：宇宙中有大量普通原子物质和分子物质，它们随处散布，并以不发光的形式出现；但大自然的意見却与此相左。你还记得，有关膨胀宇宙的基石之一，乃是我们有能力详细预言宇宙年龄在 1 秒与 3 分钟之间理应出现的一系列核反应的后果。那些计算与氢、锂、氘、以及氦的两种同位素（氦 3 和氦 4）的观测丰度极为吻合。它们告诉我们，参与那些核反应的物质如今的贡献一定不超过临界密度的十分之一。如果核的密度大于此值，那么在大爆炸中摧毁这些元素的核反应就会进行得更快，从而使它们的丰度减少到低于今天的观测值。因此，如果宇宙具有隐匿着暗物质的临界密度，那么这些物质就不可能以普通原子和分子的形式存在；因为在普通原子和分子的原子核内包含着质子和中子，而质子和中子是参与核反应的。

由此，我们得出结论：如果发生暴胀，那么不仅暗物质的临界密度将在可见宇宙中占主导地位，而且暗物质必须以不参与核反应的形式而存在。这就意味着它必须以类中微子粒子（即与中微子相类似的粒子）的形式出现。我们在前面已经遇到过这些粒子，它们不带电荷，因而不受电磁力影响。它们也不受强核力的影响，只有引力和与放射性有关的弱力才能对它们起作用。

这些幽灵般的粒子对宇宙总密度的贡献取决于它们有多重。我们知道有 3 种不同类型的中微子，人们从未发现它们之中的任何一种具有非零的质量。不过，这样的证据并不是很严格的，因为中微子的相互作用极其微弱，所以很难做有关的实验，而且实验结果对于中微子可能具有的质量也是不很敏感的。但是，粒子物理学家还为我们提供了更多的东西。他们为致力于统一所有的自然力而建立的理论，预言存在着许多相互作用很微弱的其他的类中微子粒子（它们称为“大质量的弱相互作用粒子”，英文为 Weakly Interacting Massive Particles，取首字母缩略为 WIMPs），它们在地球上的实验室中尚未被探测到。日内瓦和美国的新一代粒子加速器和对撞机的目标之一就是发现一些这种类型的粒子。

如果 3 种已知的中微子具有质量——三者之和不超过约 90 电子伏（一个氢原子的质量约为 10 亿电子伏），那么散布在宇宙中的全部中微子所贡献的密度就会超过临界值，因而宇宙将会闭合，并且将来注定会归于坍缩，类似地，WIMPs 如果存在，并且具有 2 或 3 倍于氢原子的质量，那么它们的累积

密度就会超过使宇宙闭合所需的值。

如果宇宙主要由这些弱相互作用粒子的“海洋”构成，那么我们也许就会问：为什么我们不能直接探测它们，从而一劳永逸地解决问题呢？遗憾的是，如果暗物质以我们已知的中微子（它们即使具有质量也是微乎其微）的形式存在，那么我们就没有希望直接探测到它们。它们与我们的探测器的相互作用太微弱了。我们所能做的一切就是尝试在实验室中测量中微子的质量，预言这些粒子对发光物质之聚集成团应该起什么作用，对这种成团过程进行计算机模拟，并与观测进行比较以作检验。然而，如果构成暗物质的是WIMPs，那么事情就更加激动人心了。这些粒子要比人们所知的中微子可能拥有的质量大10亿倍，它们以远比中微子大得多的能量击中我们的探测器。事实上，要是暗物质的确由WIMPs构成的话，那么我们应该是有能力探测到宇宙中围绕着我们的这个粒子之“海”的。

现在英国和美国的几个实验小组正在建造地下探测器，希望能发现宇宙WIMPs海。当一个这样的粒子击中晶体内的一个原子核时，该粒子就会使这个原子核反弹，并因能量的积聚而使晶体稍稍变热，于是记录下一个信号。如果你为探测这些事件而监测1千克物质，那么你每天就应当发现大约1到10个事件。如果你能屏蔽掉所有其他的信号（来自宇宙线、放射性衰变、以及地球上其他事件的信号——否则它们就有可能把探测器淹没了），那就应该有可能确定WIMPs是否就在我们周围。将探测器深埋在地下可以形成这种屏蔽，再将它放在一个冷藏装置中，使它的温度下降到离绝对零度（相当于零下273摄氏度）只差百分之几度，并用吸收物质和传感装置将它围起来。

我们希望在今后几年中看到诸如此类实验的首批结果。它们有可能以意想不到的方式揭示有关宇宙的非凡事件。宇宙究竟是“开”是“闭”，也许就取决于最微小的物质粒子的性质，并且也许是在地球矿井的底部，而不是在注视天空的望远镜上确定这一点。巨大的星系团也许只是宇宙大洋中的区区一滴。也许多得足以使空间弯曲成闭合状态的那种物质，与我们业已在粒子加速器中探测到的物质，可能具有大不相同的形式。这将是有关我们物质宇宙状况的最后一次哥白尼式的大变革。我们不但不在宇宙的中心，而且甚至并不由在宇宙间占主导地位的那类物质构成。

第七章 “时间的印记”

“可是除了你是个单身汉、律师、共济会会员、哮喘病患者这些显而易见的事实以外，我确实对你一点也不了解。”

引自《诺伍德的建筑师》

1992年，全世界的新闻媒介都因美国国家宇航局发布的下述声明而变得异常兴奋：宇宙背景探测器（COBE）卫星已经观测到天空各处微波背景辐射温度的极微小的变化。COBE卫星是在地球大气外观测这些辐射的，从而避免了由地球大气造成的虚假变化，所达到的观测精度也比先前所有的地面实验结果更高。它的做法是不断地来回探测角间距大于约 10° 的天空区域（满月在天空中约占 2° 的范围），以测定来自不同方向的微波背景辐射光子的温度之差。所发现的这种差异仅约为十万分之一。它究竟意味着什么？人们又为何因此而激动不已（有些浪漫夸张的评论家甚至说它是史无前例的最重要的科学发现！）？

天文学家的任务之一是解释我们周围宇宙中的各种事物——例如行星、恒星和星系。行星和恒星用普通的方式来解释是不难理解的。如果我们从未见过行星和恒星，我们也几乎肯定能预期，在宇宙中的什么地方可能和应该存在这样的天体。它们是挤压物体的重力和亚原子的压力相抗衡的产物。恒星是比较富有戏剧性的天体。在恒星中，上述两种相反的自然力达到平衡，而压力则大得足以启动和维持一连串的核反应。当一个物质球大到其中心压力足以将物质加热至几百万摄氏度时，一颗恒星就诞生了。这就告诉了我们为什么恒星会有那么大。

因此，我们可以利用自己所了解的基本物理原理，来理解像恒星和行星之类的结构为何得以存在。但是谈论星系时，我们的知识就靠不住了。我们并不知道，一旦理清了不同自然力之间相平衡的情况，是否就足以解释星系和星系团为何具有所观测到的质量、形状和大小。几乎可以肯定这还不行。星系和星系团是宇宙中物质密度变得远大于外界平均物质密度的“岛屿”。对于我们太阳系置身其中的银河系来说，平均密度要比外部宇宙的平均密度大约高出一百万倍。宇宙中存在这种密度特别高的地方其实并不神秘。如果我们取某种完全平滑的物质分布，然后引进某种非常微小的不均匀性，那么它们就会像滚雪球那样变得越来越大。例如，在物质稍多的地方，引力拉曳比较强，就会将更多的物质从周围的低密度区曳往该处，于是它又更加容易曳引更多的物质，累积过程就这样继续进行下去。这一过程称为“引力不稳定性”（见图7·1）；300年前艾萨克·牛顿首先认识到了这种过程。无论宇宙是否膨胀，这种过程都起作用，只不过在膨胀宇宙中物质的集结要花费更长的时间，因为这种膨胀力图把正在集结的物质互相拉开。不言而喻，如果在最早的时刻宇宙各处的物质分布有极微小的差异，那么随着宇宙的膨胀和成长，这些不规则性就应该逐渐变得越来越显著。最后，与宇宙的其余部分相比，它们将会变得如此之密集，以至于不再随宇宙的普遍膨胀而膨胀。

《诺伍德的建筑师》，福尔摩斯探案之一。此处引文为福尔摩斯对其委托人、一位遭陷害的无辜青年约翰·赫克托·麦克法兰所言。福尔摩斯初遇这位素昧平生的年轻人，瞬息间便作出了这些准确的判断——译者

它们分离出来，成为稳定的物质岛；这些物质处于由其组成成分施予的重力拉曳与其内部运动的外向压力相平衡之中。然而，你可以看到，如果我们打算用引力不稳定性过程来解释星系的形成，那么我们就需要知道有关宇宙开始膨胀、或开始膨胀后不久的某些状况。因为引力不稳定性过程致使微小的初始不规则性增大，所以在未来任何一个给定的时刻，那些不规则性所达到的程度取决于它们一开始时的水平。

我们知道，今天存在着星系和星系团。我们对最遥远的星系和它们可能的祖先的观测，揭示出当宇宙膨胀到今日规模的五分之一时，像它们这样的过密区域即已存在。但是，我们真正需要了解的乃是在极遥远的过去（当时宇宙膨胀所及的尺度只有今日的千分之一，这一时刻要比人们所见的诸如星系和星系团之类的任何东西都早得多），密度过剩的程度有多大。这正是 COBE 卫星所能做的事情。

从膨胀宇宙灼热的早期阶段余下的辐射随着宇宙的膨胀而冷却。当膨胀大约持续了 1000 万年的时候，辐射已冷却到容许宇宙中开始形成简单原子和分子的地步。在更早的时候，原子和分子将因遭遇周围的高能辐射而旋即瓦解。在宇宙史上的 1000 万年之后，辐射的光子不再从电子上散射（因为后者被束缚于围绕着原子核的轨道上），它在空间和时间中自由地飞翔，而变成我们今天观测到的微波背景辐射。然而，当这些光子开始在宇宙中自由飞翔时，它们就会携带受到所经区域中环境影响的有关信息。在密度稍高于平均值的地方，辐射的温度要比它们穿过更稀薄的区域下降得稍慢一些。这意味着，如果我们能够画出今日天空中不同方向上微波辐射温度的变化图，那么它将能为我们提供一张宇宙年龄仅为 1000 万岁时——这要比足月怀胎的星系形成早得多——的物质分布“快照”。

在人们用地面探测器搜索多年而未获成功之后，COBE 卫星终于发现了背景辐射温度的这些涨落。它们是很小的——仅为十万分之一。这就告诉我们，从宇宙年龄为 1000 万岁直到第一个星系形成的时代（那时宇宙的年龄是数十亿岁），上述不均匀性需要通过引力不稳定性放大多少倍。这将使我们得以确定在上述时段内星系的形成过程。因此，人们为终于发现了这些涨落而激动，但是，宇宙学家们并不为此而特别惊讶。要是不存在这样的涨落，那倒是会令人大吃一惊的，因为那样的话，星系是形成了，但它们却没有留下从何而来的任何痕迹。

这种涨落的大小还向我们道出宇宙在其最初时刻的一些重要情况，并使我们有可能会对暴胀宇宙假说的各个方面作出检验。为了弄清楚这种可能性，我们必须更仔细地考察一下暴胀现象。

在引入暴胀概念以前，关于日后成长为星系的那些涨落的起源问题是很难解决的。没有什么原理能告诉我们涨落是怎样出现的，是何时出现的，以及如果它们确实出现了，那么又该有多大。人们所能做的一切，只是循踪今日的涨落水平，并假设先前出现了引力不稳定性，而逆着时间回溯，以确定在早先任何给定时刻涨落应该有多大。不幸的是，预期宇宙中任何时候都应存在的自然随机涨落幅度太小，远远不能提供为形成星系所需的那种不规则性。人们很快就认识到，暴胀概念提供了某种新的可能性。如果一个有因果联系的微小区域经历了一个加速膨胀的“暴胀”阶段，那么自然随机涨落也

就从微观尺度暴胀，而变成我们今日可见宇宙尺度上的不规则性的“种子”。这种涨落的强度取决于促成加速膨胀的那些物质具有何种形式。如果你将某种粒子作为所考虑的具体候选对象，那么你就可以预言在暴胀时代出现的涨落的大小。这乃是朝着弄清星系起源问题迈出的一大步。我们有了不规则性的起始水平，嗣后它又为引力不稳定性所放大。这里，我们并不需要知道宇宙是如何开端的，然而，却需要知道引发暴胀的、具有负 D 值的物质的具体种类，这是因为由此产生的不规则性程度相当灵敏地取决于物质的种类及其与自身和与其他普通物质相互作用的强度。COBE 信号的强度正告诉我们这些相互作用有多强。幸运的是，由此产生的不规则性还有一个更重要的特征，相对于驱使暴胀的那些物质“身份”之不确定性而言，这一特征就有力得多了。

当我们画出宇宙中星系和星系团的分布情况时，我们发现成团的程度依赖于我们巡视的尺度。当我们观测宇宙中越来越大的范围时，我们发现这种成团性在渐次变弱。反过来，它在较小的尺度上则变得越来越明显。所以当我们谈论宇宙中的不均匀程度时，就必须具体指明我们感兴趣的尺度。这种随尺度而变化的特征称为不规则性的谱。它可以通过下述观测而确定：考察星系成团性的模式，或者观测天空中一系列角间距上微波背景辐射的温度变化。

关于暴胀理论，颇具魅力的事情之一乃是：它预言有一种特殊的谱将会自然地形成。我们把在天空中两个方向上测出的温度之差除以平均温度称作相对温度变化；暴胀理论预言在两个测量方向之间的夹角增大时，这种相对温度变化本身不应表现出任何变化。这时我们就说谱是平的。

COBE 的观测具有带根本性的重要意义，因为它们最终发现了来自早期宇宙的、尚未充分发展的涨落，日后它们被放大而形成星系和星系团。但是对宇宙学家而言，最令人感兴趣的。还是确定这种涨落的谱，看看它是否与暴胀理论的预言相一致。COBE 卫星在几年之中分若干互相间隔的时段搜集观测资料。“原始”资料需要经过复杂的归算，以消除局部环境——电子仪器、卫星系统、月球、地球等等的已知影响。迄今为止只发表了第一轮观测资料；它们非常引人注目地表明：涨落谱的斜率在 -0.1 到 $+0.1$ 之间。

平谱的斜率为零。当其他观测大功告成时，斜率的测定将会改善，斜率值可能落于其中的区间将会显著地缩小。如果那些观测结果使涨落谱的斜率值向零靠拢，那就是对最简单的暴胀宇宙模型作出了极佳的认同。

COBE 卫星只能在 10° 或更大的角间距上比较背景辐射的温度，以检验谱的形式。扫描更小的角度所需的实验装置，要比能够送入太空的设备大得多。它必须驻留在地面上。目前，有许多高精度的实验在地球表面干旱的地方进行——在加利福尼亚的欧文斯谷。在特内里费，以及在南极，或是在飘浮的气球上。它们正在进行一场比赛，看谁能率先在小于 10° 的角度上发现微波背景辐射的温度变化。人们不在地面上一并探测天空中较大角间距的背景辐射温度差，其原因在于：在这样的角间距上，地球大气的变化实在太太，它会强烈地影响观测结果。当然，在空间进行观测就不成问题了，因此这需由 COBE 卫星来做。

特内里费 (Tenerife)，是大西洋东部加那利群岛中的一个岛屿，属西班牙，位于西经 $16^\circ 34'$ ，北纬 $28^\circ 19'$ ，是地球上优良的天文观测地之一——译者

现在我们来小结一下。我们发现，我们称之为“暴胀”的那个短暂的加速膨胀阶段，必然会造成宇宙各处具有某种特定谱型的密度变化。这种谱在微波背景辐射上留下自己的印记，因此我们可以检验 COBE 卫星观测到的谱是否与暴胀的预言相符。迄今为止，它确实是符合的。这种情况的非凡之处在于，我们有了某种直接的观测手段，来探测可能发生在宇宙年龄仅为 10^{-35} 秒时的物理过程。就此而言，我们应该感到庆幸。宇宙没有理由应该塑造得为我们的研究提供方便。我们并不清楚，单凭人类的思维是否就能发现所有的自然定律，或者是否就能拥有为阐明那些定律核心深处的数学结构所需的才智。但是，姑且假定我们真有这样的才能，那么，倘若我们还能找到用实验来检验这些思想的方法，那可真算是福星高照了。为什么就该有从宇宙的最初时刻留下的遗物，来供我们检验有关当时事态发展的想法呢？根本没有理由可以说为什么非得如此这般。关于宇宙深处结构和遥远过去的至为重要的观测事实是非常少的，但是，使我们惊讶的并不是这种遗物如此之少，而是居然还有此种遗物存在。

第八章 暴胀与宇宙之始

“这是要抽足二斗烟才能解决的问题；同时我请您在 50 分钟内不要和我说话。”

引自《红发会》

我们已经浏览了暴胀宇宙的思想及其在观测上可见的后果。关于宇宙在早期如何膨胀的这一图景，迄今为止在很可能取得成功的那些理论中依然居于领先地位。一旦研究了 COBE 卫星取得的更多结果，我们也许就能说出这一理论预言究竟是和宇宙背景辐射的强度变化相符还是相悖。但是，就像那些老练的理论家所做的那样，我们不妨假定宇宙学的这种研究方法正确可取，那么它对宇宙开端的问题又会有何影响呢？

首先，我们应该回想一下暴胀出现的条件——存在着 D 取负值的新物质，这正好与奇点定理中所假设的相反。在一个暴胀的宇宙中，著名的奇点理论不再适用，因此我们不能对宇宙的开端作出一般性的结论。它可能有奇点开端，但也可能并没有这样的开端。然而，尽管存在着这样的不确定性，暴胀仍以异乎寻常的方式使我们更充分地认识了整个宇宙早先可能曾是什么模样。

当我们讨论暴胀开始时，我们将此过程描述为：它在宇宙中处处以同样的方式出现，实际上，它在一处和下一处却是稍稍不同的。假定膨胀伊始，我们就把宇宙划分成许多区域，每个区域的大小都相当于光自从膨胀开始以来刚能越过它。每个区域中的条件都将与其他区域稍有差异，结果由这些物质场引发的暴胀阶段在每个区域中将会持续不同的时间。在某些区域中，暴胀持续的时间比另一些区域中长得多，那个小小的微观区域急剧地胀大，以至变得尺度至少达 150 亿光年。但是在另一些区域中，实际上并不出现暴胀，最初的那个小区域几乎完全没有长大。我们由此得到的随机暴胀宇宙图景如。

我们可以为宇宙——它可以是无限的——设想某种混沌的随机初始状态。某些空间区域中的条件容许出现相当规模的暴胀，以产生一个尺度恰如我们今日所见的可观测宇宙。在其他区域中则不然。如果我们一直能远眺到我们这个可见宇宙的视界之外，那么我们最终就会遇上另一些区域，它们各自经历了不同程度的暴胀。这些区域的密度和温度可能与我们自己可见的这部分宇宙大不相同。

这种宇宙观念使我们预期视界以外的情况将与我们这个可见宇宙很不相同。更有甚者，人们在考察某些暴胀宇宙模型时，还发现一个暴胀区域中的条件可以和另一个暴胀区域中具有更根本的差异。甚至空间的维数也有可能彼此互不相同。

这种随机暴胀宇宙的想法，是前苏联物理学家安德烈·林德（Andrei Linde）于 1983 年首先提出的。它将某种全新的考虑注入了极早期宇宙的整个研究工作。我们已经说明，宇宙的巨大尺度及其如此高寿并非偶然的巧合。它是被我们称为“观测者”的那种生物化学复合体能够存在的必要条件。因此，在经历了不同程度暴胀的所有微观区域中，只有暴胀程度足可使其尺度

《红发会》，福尔摩斯探案之一。故事中，毕生听完委托人对案情的离奇陈述后，问福尔摩斯准备怎么办，后者作了章首引文中的回答。此处寓意本童内容精微艰深，须敛神凝思——译者

达百亿光年的那些区域，其存在时间才会长得足以形成恒星和比氦更重的元素，后者对生命复合体来说则是必不可少的。从这一剖析中，我们知道了一件很重要的事情。即使那些微观区域不太可能经历一场如此大规模的暴胀，我们也不能仅用“简直不可能”寥寥数字就把这整个暴胀图景都排除在外，因为我们必定会发现我们自己正栖身于某个“不太可能”的大区域之中。此外，如果宇宙是无限的，那么就一定会有某些区域经历足够的暴胀，而形成类似于我们这个可见宇宙的区域，它的尺度和年龄都大得足可维持生命。

林德还注意到，这种随机暴胀图景还有一个始料未及的特征。如果我们将注意力集中于某一个暴胀区域，那么其内部的微观随机涨落就能确保它的某些部分本身也将满足暴胀的条件；因此这些部分又会暴胀，如此等等，以至无穷。暴胀一旦开始，它似乎就会永远继续下去。在我们的视界以外，必定存在着仍在经历暴胀的区域。看来，这一过程可能并没有什么开端，不过这仍是一个尚未解决的问题。

“随机”暴胀和“永恒”暴胀（见图 8.2）这两种方案阐明的是，暴胀宇宙的思想以何种方式拓宽了我们的时空观念。它引导我们领悟到：整个宇宙不知要比我们称之为可见宇宙的这一小部分复杂多少。在引入暴胀宇宙理论以前，讨论这样的可能性只是一种玄学上的东西。暴胀宇宙模型则基于科学的粒子物理模型，将这些不寻常的可能性转化为在宇宙早期阶段完全言之成理的条件产生的可能后果。在提出暴胀之前，我们认为下述想法是相当可取的：即平均说来可见宇宙与宇宙的其余部分是很相像的。现在我们可不这么想了。

然而，尽管暴胀宇宙学为我们提供了这些引人入胜的新的可能性，但它们毕竟是处于种种不确定的氛围之中。暴胀能使我们了解，为什么我们观测到的这部分宇宙呈现出与其如何开端无关的种种性质。这是一个非常有力的特征。它使我们能在对过去的一切未必了如指掌的情况下理解并预言现在的状况。然而，这也有它的弊端。如果现状并不强烈地依赖于宇宙怎样开始膨胀的具体性质，那么我们就不能凭借观测今日的宇宙来推断其起源的具体细节了。

但是，如果从来就没有发生过暴胀，那又会怎样呢？或者，如果对于上述那些永远暴胀的区域，我们只是专注于其中某一个区域的历史，情况又会如何？如果我们对它逆着时间往回追溯，我们又可能会发现什么？当然，我们可能会再一次发现一个密度和温度均为无限大的奇点。但是，还存在着许多别的可能性。图 8.3 展示了彼此差异颇大的 4 种可能性，它们皆与我们所知的宇宙相符。它们描绘了下述的假想情景：

* 时空和物质的宇宙并非出现于某种密度无限大的状态，它一诞生就具有有限的密度，并在某种膨胀状态中继续下去。

* 宇宙从早先的某种收缩状态，经过某个密度达于极大值的最小尺度而“反弹”到某种膨胀状态。

* 宇宙从无限久远的过去一直保持着的某种静止状态突然开始膨胀。

* 宇宙越往过去尺度越小，但其尺度永远不会变成零。它没有开端。

我们的知识为什么如此靠不住呢？为什么将我们的理论往回外推到这最后几分之一秒钟、以决定它们会不会导致某种明确的宇宙开端，竟然是如此困难呢？我们已在前文中勾画出膨胀宇宙历史上的几个关键性阶段。在膨胀

1 秒钟之后，宇宙的条件已冷到足以用人们熟悉的、在地球上尝试和检验的物理学来描述，而且我们还拥有从那时遗留下来的直接证据，可供检验我们再现的宇宙史是否正确。回溯到膨胀开始之后仅约 10^{-11} 秒，我们遇到了与今日地球上最大的粒子对撞机中相仿的条件。在此时刻之前，宇宙所处的条件就不是我们能在地球上模拟的了。此外，在这样的能量水平下，我们关于自然定律的知识同样也是不确定的。因为我们还正在建立关于物质的基本粒子、关于这些基本粒子怎样相互联系、以及关于它们对宇宙膨胀过程将会有何种影响的正确而完整的理论。所有这些研究都是在爱因斯坦引力理论能很好地描述整个宇宙的膨胀这样一个前提假设下进行的。诚然，爱因斯坦的理论已经非常成功地通过了迄今对它所作的全部观测检验。但是，当回溯到膨胀之始时，它就不是那么畅行无阻了。正如牛顿对引力的描述在面对接近光速的运动、以及面对极强的引力场产生的力时不再奏效那样，我们同样预期会遇到一个连爱因斯坦的优美理论在其中也会最终失效的世界。如果我们试图探测膨胀之初的 10^{-43} 秒，那么就会遇到这样一个世界。这一时代称为“普朗克时期”。在普朗克时期，整个宇宙将变得为量子不确定性所主宰，我们必须寻找自然定律的最后的综合形式：引力将与描述物质基本粒子和辐射的 3 种力统一到某种包罗万象的“全能理论”中去。如果我们要确定膨胀究竟有没有任何意义上的“开端”，那么我们就必须了解在该时期中引力的行为举止。这种举止正好反映了物质的量子特征。

我们可以回忆一下过去 70 年间建立的微观世界量子图景之详情，来理解普朗克时期有何等奇特的性质。那既是物理学中最为精确的部分，也是我们周围技术上的奇迹——从计算机到人体扫描仪都建筑在量子力学的基础之上。当我们试图观测非常小的东西时，观测行为本身就会显著地干扰我们正在测量的状态。其结果就从根本上限制了同时测量一件东西的位置与运动的精度。在微观世界中，我们不能预言测量或其他相互作用的肯定结果——而只能预言观测到某种特定结果的概率。人们通常指出物质和光——我们常将它想象为微小的粒子——在某些情况下呈现出波的性质。这样就开启了种种很奇特的新的可能性。例如，如果你将两个位相不同的波相迭加，那么其中一个波的波峰就有可能与另一个波的波谷相抵消。然而，你应该设想这些粒子波仿佛是“情绪波”，而不是水波。也就是说，它们是信息波。如果某种情绪波扫过了你的邻人，这就意味着在那里更有可能发现某种情绪行为。与此相似，如果一个电子波到达你的探测器，那就意味着你将更容易在那里探测到一个电子。量子力学告诉我们每个物质粒子的波动行为是什么样的，以及该物质表现出某种特定行为的可能性如何。

每个物质粒子都有一个与其类波量子特征相联系的特征波长。当事物的尺度远大于它们的量子波长时，就所有的实际目的而言，人们通常都可以忽略由它们的量子波性质引入的不确定性。对于像你我这么大的物体，量子波是非常非常小的；当我们过马路的时候，我们完全可以非常放心地忽略汽车的类波特征。

“全能理论”，原文 Theory of Everything，目前尚无定译——译者

乔治·盖莫夫（George Gamov）为向消闲的读者解释物理学思想而写的《汤普金斯先生奇遇记》（The Amusing Adventures of Mr Tompkins）是一本极有趣味的书。书中对于假如物体的量子波接近于物体本身的真实大小时世界看起来会是什么模样作了非常出色的说明。对于汤普金斯先生来说，玩台球变成了一次

假设我们将上述考虑用于整个可见宇宙，今天，它的尺度不知要比它的量子波长大了多少，所以我们在描述它的结构时可以全然忽略量子不确定性的微乎其微的影响。但是当我们逆着时间回溯时，在过去的每一个时刻，可见宇宙的尺度都比较小，这是因为当宇宙年龄为 T 的时候，可见宇宙的尺度就是光速乘以年龄 T 。普朗克时期 10^{-43} 秒是很重要的，因为当我们达到这一极早的时刻，可见宇宙的尺度就会变得小于它的量子波长。整个宇宙变得被量子不确定性所左右。当量子不确定性压倒一切时，我们就不知道粒子的位置，也不能确定空间的几何学，这样我们也就不可能定出粒子究竟是在什么地方！我们陷入了某种恶性循环。

这种情况激励宇宙学家们去尝试创造某种新的引力理论，在这种理论中，要充分包含引力的量子特征，并用它来发现可能的量子宇宙。我们将探讨从这些大胆的研究中涌现出来的某些想法，它们不是故事的结局，而可能只是结局的一小部分。但可以肯定，最终的故事在处理我们对于宇宙本性所钟爱的种种想法时，至少也会是同样地不寻常、同样地带有根本性。

我们在图 8·3 中展示了膨胀宇宙开端的可能图景，图中说明了昔日之宇宙大小可能如何的种种情形。在某些情况下，空间和时间、以及一切的一切，皆存在着某种位于奇点的表观开端。在另一些情况下，空间和时间始终存在。但是，还存在一种更微妙的可能性。假定时间的本性随着趋近于普朗克时期而发生了微妙的变化。那么，宇宙之开端与时间自身的根本属性岂不就成了你中有我、我中有你、彼此难分难解的两个问题？

第九章 时间——一部更简明的历史

“迈克罗夫特兄长就要来啦。”

引自《布鲁斯—帕廷顿计划》

关于时间的真正属性，存在着一个历时久远的难题。在数千年的历史中，许多不同文化的思想家们都面临着这同一个问题，那就是人们应该将时间想象为超越任何事物的亘古不变的背景舞台——种种事件都在这个舞台上演出，抑或它本身就是那些事件，所以要是什么也没有发生的话，那么时间也就不复存在了。我们之所以对这种差异感兴趣，那是因为第一种图景将迫使我们谈论物理宇宙在时间上的创生。另一种图景则设想时间与物理宇宙同时诞生。宇宙开端“之前”是不存在的，因为从前并不存在时间。

我们关于时间的日常经验，是用一系列自然事件来量度的：在地球引力场中摆的运动；太阳光在日晷上投下的影子随地球自转而移动，或者是铯原子的振动。除非说出我们是怎样测量的，否则我们就无法谈论时间“是”什么。时间经常是用事物变化的方式来定义的。如果这种想法的确接近于事情的真相，那么当我们遇到存在于大爆炸后最初时刻的那些非常条件时，我们就可以预期时间的本质会出现某些相当不寻常的情况。

17 世纪，牛顿的宇宙图景给时间以超越任何事物的地位。时间均匀而无情地流逝，完全不受宇宙中的事物和事件的影响。爱因斯坦的时间图景与此根本不同。空间的几何学和时间流逝的速率均为宇宙中的物质成分所决定。爱因斯坦的时间观还建立在这样的前提之上：任何人观测到的宇宙与他人相比都不占有特殊的优越地位。无论你在何处，无论你怎么运动，你都应该从实验中演绎出相同的物理学定律。你看到的事件也许和别人不一样，但是它们从它们之间推演出来的因果关系链却必须服从同样的自然定律。

在爱因斯坦的广义相对论中以平等的方式对待不同的观测者，这意味着在宇宙中不存在优先的计时方式。谁都没有测量过被称为“时间”的那些东西。他们测量的是宇宙中某些物理变化的速率。它可以是蛋形计时器中沙子的下落，可以是钟面上指针的移动，或者是水龙头的滴水。存在着无数种可能的变化，皆可用以定义“时间”的流逝。例如，在宇宙的尺度上，散布于宇宙各处的观测者皆可用正在下降的背景辐射温度来计时。在测量变化的种种不同方法中，似乎哪一种也不比其他方法更具有根本性。

在考察一个完整的空间与时间（在爱因斯坦的理论中这称为一个“时空”）的宇宙时，有一种富于启发性的方法，那就是将它看作一大摞空间的切片（为了直观起见，我们想象空间是 2 维、而不是 3 维的），这一握中的每一个切片各代表在不同时刻的整个空间。时间是识别这一摞中每一个“时间一切片”的标签。但是，如果我们将注意力集中于这整块时空的话，我们就会看到，它可以用许多不同的方式切成一叠“时间一切片”。我们可以从各种各样的角度将这块东西（时空）切成片。每种可能的切片方式都给出一种定义时间的不同方式。这块时空混合物不受所选择的时空切片方式影响，

参见第三章章首引文译注。此处引文系福尔摩斯接到其兄迈克罗夫特告知行将来访的电报后所语；此处比喻极重要的事情即将发生——译者

“时间一切片”，原立“timeslice”——译者

所以这块时空乃是我们需要潜心考察的、比单独的空间或时间更为基本的实体。

在爱因斯坦对空间和时间的描述中，时空的形状是由寓居其中的物质和能量决定的。这意味着“时间”可以用每块切片的某种几何属性（诸如曲率之类）内在地定义，因而又可以用每块切片上的物质密度和分布来确定，于是，我们开始看到，将时间（包括它的开端和结束）与宇宙中物质和能量的某种属性联系起来是有可能的。

尽管广义相对论对于时间的属性有这些精言要义，但它却未能取消具体说明宇宙初始状态的要求。我们的时空切片堆始终有一块第一片，它决定了擢于其上的其他切片看来是何情状。

在量子理论中，时间的状况就更神奇了。如果我们在实际操作中利用宇宙的其他属性来定义时间的话，那就会间接地受到我们对于量子不确定性了解得如何的限制。因此，对整个宇宙作出某种量子描述的任何尝试，对于我们的时间观念都可能具有极不寻常的后果。人们已谈及的最不寻常之处是：可以将量子宇宙学解释为描述了一个从无创生的宇宙。

忽略实在世界之量子属性的简单宇宙学模型，可以从过去某一确定的时刻开始，而这一时刻又可以利用某种类型的钟来确定。决定那个宇宙的全部未来行为的起始条件必须在一开始就予以规定。为了描述当量子力学对于整个宇宙几乎没有什么影响时的宇宙状况，人们已经发展了这些模型。但是，如果我们打算在接近普朗克时期的条件下使用这些模型的话，那么我们就必须了解计入量子效应后会对时间的描述产生怎样的影响。

在量子宇宙学中，时间概念并不是很清晰地出现的。时间乃是宇宙中的物质成分及其位形的构成物。因为我们拥有这样的方程式：它们可以描述顺次观看一块块空间切片时物质的位形如何变化，所以在这里要是再有什么叫做“时间”的东西，那就是多余的了。这种情况和摆钟的情况并没有太大的差异。钟面上指针的位置完全保留着钟摆晃动了多少次的记录；并不必要再提及被称为“时间”的任何东西——除非我们想这么做。与此相似，在宇宙学的舞台上，我们利用为“时空”堆中的每块切片“造型”的物质位形作标签，而将这些切片互相区分开来。量子理论只是从统计上告诉我们有关物质分布的这种信息。当我们进行测量时，我们将会发现它可以处于无穷多种可能的状态之中。量子力学告诉我们发现它处在每种状态下的概率有多大。这些概率包含在某种数学实体之中；这种数学上的东西现在已被大家称为宇宙波函数，我们在后文中将简称它为 Ψ 。

目前宇宙学家们相信，他们有了一条发现 Ψ 的具体形式的可能途径。正如我们早先着重指出的那样，将来说不定会证明这是一条死胡同，或者是将真实情况简化到了面目全非的地步。但比较乐观的想法是，我们希望它至少有可能是通往某种新的更好的近似的一块指路牌。这条拟议的途径用到了美国物理学家约翰·A·惠勒（John A. Wheeler）和布赖斯·德威特（Bryce DeWitt）首先发现的一个方程。这个惠勒—德威特方程描述了 Ψ 的演化。它是统辖普通量子力学波函数的著名的薛定谔方程在这一问题中的具体表现形式，但是纳入了广义相对论的弯曲空间特征。如果我们知道了目前 Ψ 的形式，那么该方程就会告诉我们：人们发现所观测到的宇宙具有特定的大尺度特征的概率应该有多大。我们希望最终将查明，对于某些特定的状态，这种概率大得就象日常生活中的宏观事物那样，具有确定的特征而不必考虑其量子力

学的微观不确定性。如果最大概率值正好对应于在我们的宇宙中观测到的情况（例如，预言某种特定形式的星系成团性，或微波背景辐射的某种特定的温度变化），那么许多宇宙学家将会因我们的宇宙乃是所有可能的宇宙中最“可能的”之一而感到满意。然而，为了将惠勒—德威特方程用于求出我们今天观测到的冷而低密的宇宙之 W ，仍然要求我们知道当宇宙具有极大密度和温度时——也就是它“开始”时—— W 是什么情况。

在处理和研究 W 时，所涉及的最有用的量是跃迁函数，它告诉我们宇宙的状态可能发生什么样的特定变化。我们将跃迁函数记作 T ，于是

$$T[X_1, t_1 \rightarrow X_2, t_2]$$

便给出“若宇宙在早先某时刻 t_1 处于某状态 X_1 ，则它在此后的某时刻 t_2 处于某状态 X_2 的概率，此处“时间”由宇宙的某种状态特征具体指明，例如由宇宙的平均密度来表示。

在非量子物理学中，自然定律预言过去某个特定的状态将导致未来某个确定的状态，而不必谈及什么概率。但是在量子物理学中，理查德·费曼（Richard Feynman）告诉我们，未来状态是由历史在空间和时间中前进时，有可能走过的所有路径取某种平均而决定的（见图 9·3）。这些路径中可能会有一个得天独厚地受非量子的自然定律管辖。我们称它为经典路径。在某些情况下，量子描述具有一个主要由经典路径决定的跃迁函数，其他跃迁函数则互相结合，并像位相互错开的波峰和波谷那样互相抵消。

有一个很深刻的问题，那就是：对于一个密度极高的量子宇宙而言，是否所有可能的起始状态都会导致一个与我们自己这个宇宙相类似的宇宙。当我们的宇宙膨胀得相当大时，其中的量子不确定性就变得很小，因而人们在日常经验中能够清晰地感受到“时间”的流逝。人们也许会查明，这乃是一些非常苛刻的要求，这些要求也是存在有生命的观测者所必须的。它们从所有可能的世界中，将我们的宇宙作为特例标示出来。如果这正确无误的话，那么它就意味着只有凭借研究其宇宙学后果，我们才能完整地理解量子力学。

实际上， W 取决于在这堆时空的某一特殊切片上宇宙中全部物质和能量的分布位形，并取决于这一切片形状的某种内在特征（例如它的曲率）——后者有效而唯一地标记了它的“时间”。这就——区分了这堆时空中的每块切片。于是，惠勒-德威特方程就告诉你：内在时间取某值时的波函数，与另一内在时刻的波函数形式是怎样联系起来的。当我们在经典路径附近时，这样发展起来的波函数可直接解释为对通常的经典物理学的小小修正。但情况并非永远如此，当最可能的路途远离经典路径时，要在任何意义上将量子演化说成出现在时间之中就变得越来越困难了。这就是说，惠勒-德威特方程给予我们的空间切片集合并不堆垛得看上去像一个时空。尽管如此，仍然可以找到告诉我们宇宙从一种状态过渡到另一种状态的概率的跃迁函数。这样，寻找宇宙起源就可以类比为量子理论中的初态波函数问题了。

跃迁函数告诉我们宇宙从一种几何位形（物质因在其中具有某种特殊的布排而区别于其他位形）发生一次跃迁的概率。图 9·4 是从一种位形发展为另一种位形的图解。

我们可以设想从一个点而不是从某个初始空间切片开端的宇宙。它们看起来像圆锥而不像如图 9·4 所示的圆柱。图 9·5 展示了这种情况。

这并不算什么真正的进展，因为非量子宇宙学模型中的任何奇点都将表

现为经典量子路径的某种奇异特征，我们似乎只是在挑选某种特殊的初始条件（没有充分的理由可以说明为何要这样挑选），后者正好描述了从事先存在的某个初始点创生出了宇宙。

现在我们来考虑一种重要的路径。应该强调指出，也许今后会查明它根本没有任何物理意义，它是由美学引导的某种信仰上的东西。注意某种初始条件 g_1 是如何与“管子”或“圆锥”在 g_2 处的空间状态相联系的。也许，我们可以用某种方式使 g_1 和 g_2 处位形的边界相结合，从而使它们描述某个单一的平滑空间（如图 9·6 所示），后者则不再包含令人难堪的奇点？

我们知道在 2 维情况下（例如球面）这是有可能的；球面是平滑的，不存在任何像圆锥顶点那样的奇点。因此我们可以设想 4 维时空的整个边界不是 g_1 和 g_2 ，而是一个平滑的 3 维表面。它好像寄寓于 4 维空间中的一个球面。这些表面具有大小有限却无边界的有趣特征：球面具有有限的面积（只要用有限数量的油漆就可以漆遍它），但是当你在球面上移动时，你永远也不能走出“边界”、也不会遇到像圆锥顶点那样的尖点。对于球面上的居民来说，它是没有边界的；对于宇宙的初始状态而言，我们也可以想像可与之类比的情况。然而——现在我们到了关键的一步——我们用来作为简单实例的那个球占据着某个 3 维的空间，并具有一个 2 维的表面。对于我们的量子边界，我们需要 4 维空间——而不是 4 维时空——中的一个 3 维表面。因此，斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）和詹姆斯·哈特尔（James Hartle）提出：在这种量子宇宙学的格局中，我们通常的时间概念不再适用，它变成了又一维的空间。

其实，这并不像听起来那样神秘而不可思议，因为在通常的量子力学中，物理学家们也经常使用这种“将时间变为空间”的花招来解决某些特定的问题，尽管他们并不想像时间当真就像空间一样。他们在结束计算时仍会回到通常的解释上来：存在着一维的时间，以及另外 3 个在质上不同的维度，后者就是我们所称的空间。这样做就好像暂时使用另一种语言讲话。

现在让我们说几句题外的话。关于这种重要的想法，最令人感兴趣的事情之一就是：要在“通俗”的水平上设法讲清楚那究竟是怎么回事，该是多么地困难。斯蒂芬·霍金所著《时间简史》乃是对此所作的第一次尝试。科学普及曾经意味着用形象化的简单类比图象来解释复杂的数学抽象概念。科学作家们用小球之间的碰撞来描绘基本粒子之间的相互作用，或者用橡皮筋来描绘超弦，如此等等。事实上，在本世纪初，某些法国数学家对物理学家们作了相当严厉的批评，认为后者直到自己能滚动球、轮子、以及弦之类的可怜图景来想象事态如何发展之前，对于自己的理解总是不能感到快慰。科普作家总是利用这样一个事实：在宇宙所做的比较深奥的工作和我们经验中的其他简单事件之间，存在着简单的类比。但是，时间变成另一维空间看来却找不到什么贴切的通俗类比。人们可以读“时间变成另一维空间”这个句子，可以了解其中每一个单词是什么意思，但是对于这句话想说的究竟是什么却无法真正理解。对于《时间简史》的读者而言，缺乏现成的类比可能是造成困难的原因之一。我们曾经以为，宇宙结构的最深刻的方面——在基本粒子的内部空间，或在黑洞和星系的外部空间将会具有局部性的简单类比，其实却可能不然。缺乏类比性也许是一种好的征兆，它可能表明我们正在触及真实宇宙的某些无法比喻的事实，而不只是在调整和简化我们所熟

悉的那些老概念。

对时间所作的这种量子处理的根本特征，是把时间当作在大爆炸的极端量于引力环境下当真像空间一样。当你刚刚从宇宙的开端出发时，情况可以想像为：量子效应将开始以某种毁灭性的方式起作用，随着波峰与波谷相遇，人们预期宇宙以越来越高的精度沿着经典路径发展。在普朗克时期之后的一刹那间，“时间乃是有别于空间的概念”这种常规观念开始成型。与此相反，当你朝宇宙的开端回溯时，这种传统的时间图景便消失了，时间与空间变得不复可分。

哈特尔和霍金之所以提出宇宙的原始量子状态无时间，乃是由于其输入假设显得如此之经济，并且避免了起始状态的奇点。正因为这样，所以它被说成了“没有边界条件”。更确切地说，“没有边界”这一点，要求宇宙的波函数由限于下述4维空间的那些跃迁取某种平均来确定：这种4维空间具有如前所述的球面那样的单一、平滑而有限的边界。

我们关心的是导致这样一个宇宙的跃迁概率：该宇宙的波函数由处于某种空间几何学中的物质所确定，上述“配方”为存在这样一个宇宙所提供的跃迁概率具有这样的形式：其中全然不为任何先验的“初始”状态留下丝毫的余地。因此，这往往被说成给出了一幅“从无创生”的图景，其中T给出从无创生出某种特定类型的宇宙的概率。“时间变成空间”这一假设的效果在于，没有确定的创生时间或地点。

从这类量子开端得到的整体图景是，惠勒-德威特方程给出描述波函数 W 如何变化的自然定律。空间的几何学可以用来作为时间的量度，当你远离大爆炸时，对此是颇为熟悉的。但是当你往回朝我们称之为零时刻的那一瞬间看去时，时间概念便渐渐淡化了，直至最终不复存在。这类量子宇宙并不是一直存在着的，它也像具有奇点的非量子宇宙学那样出现了，但是它并非始于一次物理量取无限值，并且需要进一步给出具体初始条件的大爆炸。无论是在有奇点的情况下，还是在量子创生的情况下，都不存在有关它们从何而来或者它们“为何”出现的任何信息。

我们应该再次强调，这是一个带有根本性的方案。它有两个要素：第一是“时间变成空间”；第二是再加上“没有边界”，这对于宇宙的状态来说，乃是一帖起着双重作用的处方，它们既相应于传统图景中的初始方程，又相应于自然定律。即使你采纳了上述的第一个要素，即关于“时间变成空间”的想法，也还是有许多不同的选择可以用来代替“没有边界”这个条件，以具体确定一个从无到有的宇宙的状态。

图9·7给出在用到“没有边界”这个条件时，宇宙的波函数 W 随宇宙密度（它好比就是“钟”）的变化，也给出了使用阿历克斯·维伦金（Alex Vilenkin）提出的另一种可能的边界条件时的情形，它的行为与前者有相当大的差异。大的 w 值相应于高的概率。于是我们看到，“没有边界”这个条件意味着出现密度很高的宇宙乃是极不可能的：与此同时，在维伦金条件下则非常可能出现密度很高的宇宙。某些批评者觉得，这样的话，“没有边界”这一条件就极不可能导致一个足够密和热、从而得以在后来经历暴胀的极早期宇宙了。

宇宙波函数的研究尚处于起步阶段。在完成这一理论之前，有关它的种

“上述‘配方’”，仍指哈特尔和霍金提出的“宇宙原始量子态无时间”——译者

种想法无疑还会以种种方式发生改变。“没有边界”这一条件也还有不少缺点。它包含的信息也许太少，因而不能描述真实宇宙——它包含着诸如星系那样的不规则性——的全部观测特征。它必须补充有关宇宙中的物质场、以及它们如何分布的附加信息。它可能是对的，也可能是半对半错的，还可能是错的。现在谈论这些为时尚早。悲观论者甚至可能会说我们将永远无法谈论它，因为宇宙有可能以某种方式变革翻新，而不留下对于我们今天的观测，从而对检验我们的想法是否符合实际十分重要的量子起源的痕迹。

我们思考宇宙演化的传统方式，总是要谈到起始条件，而这些起始条件则受到变化定律的影响。我们从前述分析能够得到的重要教益是，考虑宇宙演化的这种传统方式有可能错误到了何等地步。它有可能是我们从一个量子引力效应小得微乎其微的自然王国获得的经验导致的假象。如果某种关于自然界的理论真正实现了统一，那么我们也许可以预期，它会利用由宇宙的物质组成来计时这样一种可能性，这样，就可以将大自然的组成成分连同统辖其变化的那些定律，都与时间本身的性质结合到一起了。然而，我们还可以选择边界条件，它将对诸如宇宙波函数之类的东西施予制约性的影响。无论“没有边界”这一条件究竟有多“经济”，一个不可避免的事实是：它和各种与之竞争的方案因其简单性或便于计算而被挑选出来了。就我们所知，人们尚未追究它们是否有悖于量子宇宙内在的逻辑一致性。

起始条件独立于自然定律的见解，在讨论整个宇宙的初始状态时，必须重新予以评估。如果宇宙是独一无二的——因为这是逻辑上一致的唯一可能性——那么初始条件便是唯一的，从而它们本身就变成了一条自然定律。另一方面，如果我们相信存在着许多可能的宇宙——甚至可能确是许多实在的宇宙，那么初始条件就毋须具备特定的状态。它们可以是被理解为“某种状态”的一切东西。

传统的观点认为初始条件是神学家研究的事情，变化定律则是物理学家探索的内容。现在，这种观念似乎有了疑问——至少暂时如此。宇宙学家们如今正在潜心研究初始条件，以冀发现是否存在着某种初始条件的“定律”，在这些初始条件中，“没有边界”的假说应该只是一个可能的实例。这种思想无疑是带有根本性的，但它可能还不够彻底。人们正在担心，现代量子宇宙学图景中使用的诸多概念和想法——“从无创生”、“时间随宇宙同生”——也许只是沿袭已久的人类直觉和中世纪神学家们喜闻乐道的种种思想的精制的翻版。自不待言，正是这些历时久远的观念，驱使人们寻找甚至发现了现代宇宙学理论中的许多概念——尽管如今披上了数学的外衣。“时间变成空间”的假说则是一个真正彻底的要素，我们在前人的哲学和神学遗产中全然找不到它的踪影。有人猜测，在真实的图景浮现出来以前，也许还有更多习以为常的概念尚须予以变革。

尽管现代宇宙学的旋风已席卷到宇宙本身的起源问题——这方面的研究论文甚至用上了“宇宙从无创生”之类的题目，我们却必须谨慎行事。所有这些理论为了能言之有物地说东道西，都必须在一开始就假设存在着远比人们关于“无”的日常概念更多的事物。必须存在自然定律（在我们的讨论中就是惠勒—德威特方程）、能量、质量、几何学，当然，还有支承所有这一切的东西——无所不在的数学与逻辑世界。对于宇宙所作的任何完整的解释，在能被建立与证实之前，都要有一个庞大的推理结构。大多数现代神学家被问及上帝在宇宙中的作用时，着重强调的都是这种基本的合理性，而不

是简单地把上帝说成宇宙膨胀的伟大推动者。

试图将宇宙之存在解释成由绝对地无构成的某种先在状态之结果，这个研究方案与我们对诸如“不存在免费午餐之类的东西”的直觉大相径庭。非科学家都明白，在生活中你不可能做出无米之炊。科学家们发现自然定律（它们描述什么变化是容许的）等价于如下的陈述：世界的某些特征永远保持不变，从而支持了上述的直觉和经验。自然定律在空间的每一个方向上、以及在任意的时刻都相同，这分别等价于在任何物理过程中的总旋转量（即所谓的“角动量”）守恒和总能量守恒。人们已在所有的物理过程中观测到，这两个量以及总电荷量乃是绝对守恒了，它们作为守恒量已与整个物理学上层建筑深深缠结在一起了。

如果你建议对宇宙之诞生给出某种科学解释，那么立即就可能出现这样的异议：你是在企图从无中得到什么东西，因为你必须突然产生出一个具有能量、角动量和电荷的宇宙。这就违背了自然定律——后者将上述这些量的守恒奉为信条，因此宇宙从无创生不可能是那些定律的结果。

这话当然没错，它相当有说服力。然而当人们开始提出下述问题时情况就不同了，问题是：宇宙的能量、角动量和电荷大概会是什么样的。如果宇宙具有角动量，那么在最大的尺度上，膨胀就兼有旋转。最遥远的星系在直接退离我们的同时，还应该在天穹上移动。实际上，即使宇宙有显著的旋转，这后一种运动也将因为太慢而使我们无法探测到。然而，还有更灵敏的东西可以指示这种转动。如果我们考虑地球自转的效应，我们看到这导致了地球两极处稍稍变扁，所以地球在赤道处的半径大于两极处的半径。如果宇宙正在其最大的尺度上自转，那么也会发生类似的情况。沿自转轴的方向上膨胀得比其他方向稍慢。结果，来自自转轴方向上的微波背景辐射就应该最热，在与其相交成直角的方向上则最冷。在十万分之一的测量精度上，在所有的方向上辐射温度都相同这一事实意味着：如果宇宙当真具有大尺度的自转，那么这种旋转也必定要比宇宙尺度的膨胀慢一万亿倍以上。这个数值是如此微小，以至于使人想到宇宙的净自转和角动量也许就等于零。与此类似，没有证据表明宇宙具有任何整体性的净电荷。如果任何宇宙结构由于其中的（比方说）质子数和电子数（这两种粒子具有正负相反的等量电荷）之间的不平衡而拥有了某种电荷，那么这种不平衡就会产生某种非常引人注目的效果，这是因为电的力量要比使这些结构维系为一体的引力强得多。事实上，爱因斯坦的引力理论有一个很惊人的结果：如果一个宇宙是“闭”的，它最终将会收缩到某个未来奇点，那么它的总电荷就必须为零。它所包含的全部物质携带的各别电荷——正的以及负的，统统累加起来得出的整体电荷一定等于零。最后，宇宙的能量又如何呢？这是人们不能“无中生有”的最直观的熟悉事例。然而，令人惊异的是，如果宇宙是“闭”的，那么它的总能量同样必定为零。其理由可循踪到爱因斯坦的著名公式“ $E = mc^2$ ”，它提醒我们质量和能量是可以互换的，因此我们应该统一考虑质（量）—能（量）守恒，而不是单单考虑能量守恒或质量守恒。重要的是，能量的形式与质量不一样，它有正的和负的两种。如果我们将一个闭宇宙中的全部质量相加，那么它们就会对总质—能作出很大的正贡献。但是，那些质量彼此间还施加引力影响。那些引力等价于负的能量——我们称它为“位能”。如果我们手中拿着一个球，那么它就拥有了这种位能；如果这个球掉到地上，那么位能就会变成正的动能。引力定律确保了宇宙中所有质量之间的（负的）引力位能，必定永

远和与每个质量 m 相关联的（正的）能量 mc^2 的总和大小相等、符号相反。因此，总的结果永远准确地等于零！

情况就是如此地令人惊异。看来，阻止我们从无得到什么东西的那 3 个守恒量也许全都等于零。关于这一点的全部含义目前尚不清楚。然而，妙不可言的是，守恒定律似乎并未为宇宙从无创生（或者复归于无）造成什么障碍。

为了结束对宇宙从无创生这一科学流派的讨论，我们还得回到早先的那种想法上来：宇宙始于时空的奇点。量子宇宙学的“没有边界”这一条件设法避免了诸如此类的灾变性开端，因而目前在宇宙学家中非常流行。然而，你应该留心这样一个事实：量子宇宙学的许多研究工作，动机是设法避免密度无限的初始奇点，因此这些研究往往专注于有可能避免奇点的各种量子宇宙学理论，而忽视了也许包含有一个奇点的那些量子宇宙学。值得注意的是，从奇点出现大爆炸宇宙这种传统图景，严格地说，乃是从绝对的无中创生宇宙。它既没有给出任何原因，也未对所出现的宇宙具有何种形式作出任何限制。没有先存在的时间，没有先存在的空间，也没有先存在的物质。量子创生模型则希望从某种不可避免的量子状态出发，通过对某个极可能存在的宇宙所作的跟踪描述，而使我们获知宇宙何以会具有那么多不寻常的特征。遗憾的是，目前的那些特征中有许多似乎起源于某个暴胀的膨胀阶段，而暴胀则似乎是大量不同初始量子状态的结果。

这些研究仿佛侵入了传统的神学领地。在过去，正统的基督教神学家们一直对大爆炸图景给出的全部宇宙学感到满意。有些人已对该传统图景提供的奇点表观开端作了许多发挥。奇点定理指出宇宙需要某种开端，尽管它对为何会出现那个开端、或者该开端是像什么样子根本无可奉告。这诱使某些宗教思想家对此种状况采取了“天堑神司”的朴素信念，即相信宇宙之始乃是科学事业永远无法填平的一道鸿沟。与此适成对照的是，量子宇宙学事业对许多神学家来说似乎并不很有吸引力，因为它试图用科学定律来描述创生过程本身，或是证明在某种意义上它是不可避免的。它威胁着就要填平这最后一道鸿沟。

第十章 进入迷宫

“太好了，华生，太好了！”

引自《银色马》

我们周围所有的东西，从白菜到国王，都具有密度和硬度，事情之所以如此，是因为宇宙的这些造物都具有某些恒定不变的特征。这些不变的特征称为“自然常数”。它们出现在我们的自然定律中，使诸如引力强度、物质基本粒子的质量、电和磁的强度、或真空中光速之类的量具有确定的值。如果它们不能用其他自然常数来表示，那么就称为“基本常数”。这些物理量中，绝大多数都可以用非常高的精度予以测量。这些常数所具有的特定数值，则将我们的宇宙与我们可能想象到的、服从同一些定律的其他宇宙区分开来。然而，尽管这些常量出现在所有的自然定律中，但是从根本上说它们却是有关宇宙结构的最深刻的谜题。为什么它们具有我们测量到的特定值？物理学家们总是梦想提出某些完整的物理学理论，在这些理论中可以对基本常数的值作出预言或阐释。已经有许多大科学家对此作了尝试，然而可悲的是，他们都未能在这一问题上取得任何进展。

近年来，竭力为宇宙及其初始条件作出某种量子描述的尝试，出乎始料地解释自然常数之值提供了一条可能的途径。

由哈特力和霍金首先提出的寻找宇宙波函数的总体想法，是假定在整个宇宙的量子特征变得占压倒优势的密度下，宇宙的表现行为像一个4维的球。但这时有些宇宙学家就开始发问了：如果这个球的表面并不那光滑可爱，那又会发生什么情况？假定在它的表面凿洞，并用把手和管子将这表面的一部分与另一部分相连。这些管状的连接物称为“蛀洞”。它们是当不存在这些管子时原本离得很远、或者不能互相交往的时空区域之间的联系物。

这样的精心琢磨有几方面的动机。动机之一是物理学家们具有这样的倾向：适当改变他们所持有的世界图景中的某些东西，探索由此造成的后果，以便发现会不会出现能为某些未解的自然之谜提供某种解释的新事物。但是，还有一件更具体的当务之急，关于在 10^{-43} 秒的普朗克时期，以及在此之前空间和时间的状态，现有的直观图景认为它像一个由量子不确定性主宰的激烈骚动的泡沫。及至 10^{-43} 秒时，光已行进的距离为 10^{-33} 厘米，存在着这种尺度的蛀洞，便是对这种空间杂乱地互相连结的状态的某种记录。

对于空间全局性质图景的这种增补，使整个宇宙可能具有的复杂性增长得令人大吃一惊。它可以由为数巨大（甚至无限）的、通过蛀洞与自身相连、或彼此相连的空间区域组成。在图10·2所示的情形中，有一个大的区域——“母宇宙”——与大量较小的“孩儿宇宙”相连。为了理解在此类情况下会发生什么事情，有必要仅仅考虑最简单的那类蛀洞连接——只容许蛀洞连接“各个宇宙”，而不容许蛀洞本身彼此相连。

这种简化称为“稀薄蛀洞近似”，因为它和适用于描述普通气体行为的

《银色马》，福尔摩斯探案之一。故事中福尔摩斯在向华生简介案情时，后者插问了一个关键问题，于是福尔摩斯发出了章首所引的感叹语。此处寓意为本章触及了一些极其关键而又微妙的问题——译者

“母宇宙”英语原文 mother universe；“孩儿宇宙”原文 babyuni Verse，目前不但尚无既定译名，而且甚至很少有人将其译成中文。现暂作此译——译者

某种简化假设——即“稀薄气体近似”相似。稀薄气体近似的前提是承认下述事实：气体中的分子在运动时会互相碰撞，但是分子在两次相继的碰撞之间行进的时间，要比碰撞过程本身花费的时间长得多。当这一点不成立时（例如气体正在凝结为液体），气体的行为就变得非常复杂。许多分子同时在相互作用。稀薄蛀洞近似是在相互作用存在于诸“宇宙”之间的情况下所作的简化。

它假设蛀洞仅仅连接大的平滑区域。这意味着它们决不分裂成两个蛀洞管，也不会将蛀洞与其他蛀洞相连（图 10·3）。

如果事情只是像表面看来那样——只是为了推广而推广，那么它纵然美妙也无济于事。但它实际上提供的东西还要多得多。存在于任何大“宇宙”区域上的自然常数值，可能为与该区域相连的涨落着的蛀洞联络网所决定。但是，由于这种蛀洞联络具有量子不确定性的全部特征，所以这些常数并不是精确地、而是从统计上确定的。

可供研究的最简单的情形是，处理引力定律中著名的“宇宙学常数”项，爱因斯坦曾引入这一项以得到一个静态的宇宙模型，但后来又舍弃了。它产生某种长程的斥力，与质量间的引力吸引相抗衡。虽然人们可以像宇宙学家们通常所做的那样，完全忽略在普通的引力定律中添加这一项的可能性，但是并没有理由说明它为何应当可以忽略。这种不知其所以然的局面颇为令人不悦。对宇宙膨胀速率所进行的天文观测表明，宇宙学常数即便存在的话，也必定小得出奇。它若表示为一个纯数，则必定小于 10^{-120} ！这意味着可能有什么未知的自然定律要求这个数实际上为零。然而，对早期宇宙中基本粒子和能量场的行为所作的研究，似乎全都导致相反的结果，它们不仅预言应该期望存在着某个对引力行为起一定作用的宇宙学常数，而且还预言它是非常巨大的——远比我们今天观测到的膨胀所容许的值大得多，也许甚至要大 10^{120} 倍！这是一个大问题。我们称它为宇宙学常数问题。

美国物理学家西德尼·科尔曼 (Sidney Coleman) 作出了一项惊人的发现。如果某个宇宙开始时具有一个对引力强度有一定贡献的宇宙学常数，那么它对蛀洞的效应乃是产生某种相反的应力，后者可中和宇宙学常数的效应，而达到固有的量子确定性水平。结果，有了蛀洞涨落便导致如下的预言：当母宇宙变大（如今天我们的可见宇宙）时，宇宙学常数占绝对优势的可能值就是零——准确到极高的精度（见图 10.4）。

迄今为止，这一成就尚未被推广到预言诸如电子质量或电荷那样的非零自然常数值。然而，考虑这类预言可能具有何种性质却极富于启迪意义。

假定我们能够计算给出今日宇宙中电与磁强度的那个常数的概率分布，则结果也许会像图 10·5 呈示的某种形式。

在第一种情况下，取所有的值都有着同样的可能性，故该理论不能作出可与所讨论的基本常数观测值相比对的预言。在第二种情况的宇宙中，所讨论的常数值处于图中峰值时的可能性远大于取任何其他值。大多数宇宙学家将这样一个峰值解释为我们理应观测到的状况，因为它标识了最可能出现的情形。如果牛顿引力常数值的预期概率分布在观测值附近有很强的峰，那么我们就将视其为一项惊人的成就。我们似乎也应当能用对自然常数的观测结果来探索普朗克时期之前的量子引力理论。不幸的是，迄今的努力业已证明，要从理论上作出这样的预言那委实是太困难了。

许多物理学家相信，对所有的自然定律必定存在着某种单一的描述，它

可以将我们所知关于引力、电、磁、放射性和核物理的所有不同的力全都统一起来。人们已为自然定律的这一最终表达形式起了一个谥名叫做“全能理论”。物理学家对它的希望之一是，它将使自然常数具有、而且仅仅具有一组逻辑上相容的值。如果我们能够发现那个“全能理论”，那么它就应该告诉我们这些基本常数的值。这将是此种理论的最终检验。然而，即使某种“全能理论”确定了自然常数在每个“孩儿”宇宙和“母”宇宙上的初始值，它们之间的蛀洞联络仍会造成使那些常数值偏移的涨落。它们的测量值将漂离一开始给定的值。因此，今天它们的观测值并不一定与全能理论给出的那些值相符。

现在我们来考虑图 10·5 的 3 种情况中的最后一种(c)。这里，可能值在很大范围上具有相当均匀的概率分布。有一个最可能的值——但是很勉强。它道出了所有各种棘手的问题。为什么要将对我们的宇宙的观测结果与对“最可能的”宇宙所作的预言相比较？我们是否应该预期，在某种量子的意义上，我们的宇宙亦跻身于“最可能的”之列？我们将会论证，有许多理由应该预期，我们的宇宙不在最可能之列。

在本书的开头几章，我们引入了膨胀宇宙的概念，并说明它怎样造成了一个其尺度与我们本身之存在密切相关的宇宙。为了造就恒星，需要一个古老的宇宙；恒星产生为相继演化出复杂事物和“观测者”所需的比氢更重的核素。这类思考可以进一步发展到考虑这样的问题：存在着像我们（或者甚至不像我们）这样的观测者，如何要求自然常数之取值与其观测值相去不远。自然界的引力强度如果稍有一点差异，或者电磁力的强度稍稍遭到扰动，那么稳定的恒星可能就不复存在，原子核、原子和分子的种种精确地平衡着、并能形成生命的性质亦将毁于一旦。生物学家们相信，生命的自然演化需要有碳存在，碳具有异乎寻常的灵活性，所以它成了生命体中像脱氧核糖核酸和核糖核酸那样的螺旋分子的基础。碳的存在不仅依赖于宇宙的年龄和大小，而且还依赖于决定着原子核自然能级的那些自然常数值之间令人惊异的表观巧合。当恒星中的核反应将氦（具有两个中子和两个质子）与氢结合成铍时，这与再加上一个氢核而形成碳就只有一步之遥了（见图 10.6）。

氦核 + 氦核 = 铍核

铍核 + 氢核 = 碳核

碳核 + 氢核 = 氧核

图 10·6 氦核聚变为铍核，然后又聚变为碳核和氧核的核反应链

但是，要在宇宙中产生多得举足轻重的碳，上述核反应就显得太缓慢了。这一确确实实存在着的事实，促使弗雷德·霍伊尔早在 1952 年就作出了一项惊人的预言。他预言碳原子核必定具有一个始料未及的能级，其位置正好略高于氦核和铍核的能量之和。这种情况造成某种特别迅速的反应，因为在恒星中相结合的这两种粒子的能量造成了某种所谓的“共振态”，它正好具有一个人们所盼望的自然能级。事实证明霍伊尔是正确的。核物理学家们惊奇地发现这个能级准确地处于他所预言的位置上。后来由于对整个核天体物理学作出巨大贡献而荣获诺贝尔奖的威廉·福勒(William Fowler)说过，正是霍伊尔的预言使他确信自己应该投身于这一领域的工作。要是有人能告诉他，单单凭着对恒星的思索就可以在某处发现一个核能级，那么归根到底，在天体物理学这一行当中就必定有事可干。

这种情况还具有更进一步的重要性。如果自然常数稍稍有一点差异，那

么共振态就将不复存在，我们自身同样也就不会存在，因为这时宇宙中就不会有足够数量的碳。然而，事情还不止于此。碳产生之后，还得由碳与又一个氦核发生核反应而转化为氧。可是，这种反应并不是共振的——仅相差更加微乎其微的那么一点儿。碳和氦的能量比氧的自然能级刚刚高一些，因此碳勉强地刚好留存了下来。

这些例子告诉我们什么呢？它们说明宇宙中之所以存在复杂的结构，可能是由自然常数值种种表观巧合互相结合所致。倘若这些值有了些微的变化，那么演化出具有意识的观测者的可能性便将消失。我们并不能从这种值得庆幸的事态引伸出任何伟大的哲学结论或神学结论。我们不能因此就说宇宙是为有生命的观测者而“设计”的，或者说生命非得存在不可，或者说在宇宙中的其他什么地方一定存在着生命，甚至也不能说生命将继续不断地存在下去。这些猜测中的任何一个，或者是所有这些推测，都既有可能是对的、也有可能是错的。眼下我们全然无可奉告。我们需要认识到，为了使一个宇宙包含有生命的观测者（或者只是包含原子和原子核），自然常数（无论如何，即便不是全部、也是其中的绝大部分）都必须取非常接近于观测到的值。

记住这一点，我们再来看一下图 10·5(c)。容许逐渐演化出生物学复合体的那些常数取值范围是很狭窄的，这可以在图中标出来。容许出现观测者的范围不仅非常之小，而且或许与理论预期的最可能值相去甚远。这样的话，将理论与观测进行比较就变得非常困难。我们并不当真对这些常数的最可能值都感兴趣。我们感兴趣的，应该只是容许演化出观测者的那些最可能值。夸张一点说，如果由引力强度的最可能值导出的宇宙只能存在十亿分之一秒钟，那么我们就决不会正生活在最可能的宇宙中。

我们已经懂得了一件非常重要的事情。当我们有了从宇宙的量子起源直到对宇宙结构作出统计预言的某种宇宙学理论时，为了对照观测事实以检验这些预言，我们就必须知道为演化出观测者而预言某量必取某值的一切途径（见图 10·7），某量容许生命存在的取值范围可能是非常小的，因而从某种绝对的观点来看是极不可能的。尽管如此，我们还是不得不看到自己正寓居于这样一个不太可能的宇宙中，因为我们不可能是存在于别的宇宙中。我们穿越蛀洞的迷宫，前往时间之开端，这曲曲折折的旅行径直将我们引向这样一个事实：我们自身之存在，乃是我们寻求宇宙起源及其全部非凡特征的重要论据。逃避这些结论的唯一办法，是假定“生命”乃是一种普遍现象，它不顾自然常数为何值而千方百计地出现了。这很难与我们关于生命的知识和经验相调和。即使具备了我們所有的那些常数值，要演化出具有意识的生命（而不只是复杂的分子）看来也是很成问题的。生物学家们强调指出：有不计其数的演化途径都是通往死胡同。我们并不在意宇宙中是否存在种种其他形式的生命，但是我们相信，如果它们是自然进化而来的，那么它们必定是以原子——尤其是以碳原子为基础的。其他类型的生命当然也可以存在，例如我们正在尝试产生以硅为基础的简单生命形式，尽管它们并没有自然地进化出来，但我们却已向它们伸出了援助之手。

当前，研究“人工生命”（与“人工智能”相对）是一个非常引人入胜而日见兴旺的研究领域。它使物理学家、化学家、数学家、生物学家和计算机科学家聚集到一起，以研究那样一些复杂系统的性质，这些系统具有我们常将其与“活的”东西联系在一起的部分或全部性质。大多数此类研究工作都用到快速计算机成图，以模拟复杂系统与环境相互作用的行为、以及它们

自身的成长发展与复制等等。最后，这类研究必将为弄清那些错综复杂的条件作出十分重要的贡献：对于出现足可称为“具有意识的观测者”那样的复杂结构而言，此类条件乃是至为重要的。

第十一章 新的维度

“我不是已经对你说过多少次了吗，当你把绝不可能的情况都排除以后，剩下的——不管它是多么难以置信——就必定是真情了。”

引自《四签名》

自 20 世纪 80 年代中期以来，在寻找“全能理论”方面——它把自然力全部统一到某种包罗无遗的通则中去，“超弦”理论占了主导地位。早先在寻找粒子物理的终极定律时，在人们潜心研究的数学描述中，最基本的实体乃是无大小的点；超弦理论则将能量的线或环——所谓的“弦”——作为最基本的构成成分。冠以“超”字，说明这些弦具有某种特殊的对称性，正是这种对称性使得超弦理论有可能统一描述自然界的物质与辐射。最基本的粒子像是小小的环，这种想法似乎很奇特，不过，这些环更像橡皮筋，它们具有取决于环境温度的某种张力。在低温下，这种张力很强，小环将会收缩，其行为与点几无二致。因此，在今日宇宙所具有的那种相对而言较为温和的条件下，可以很精确地说弦的行为与点无异，因此，对于低能物理学，我们应该作出与现有的基本粒子点状描述同样成功的全部预言。然而，人们早就知道，若将点状图景用于高能或高温条件下，则会导致无意义的结果，此外，点状图景也断然不容人们将引力与另外 3 种力——电磁力、放射性力（弱力）和核力（强力）——融为一体。与点状图景截然相反，超弦理论在高温下的表现相当出色。引力实际上不是被排除在外，而是被要求与其他自然力携手联合。基本粒子物理学所有可观测的性质原则上都可以由这一理论计算出来（虽然至今还没有人聪明得能够做到这一点），无意义的回答将不复存在。此外还可以确定，由它得出的统一自然定律之形式，必为某些具体的特定理论之一。所有这些听起来都妙不可言，但是却存在着某种隐患。在我们所熟悉的宇宙中，空间的维数是 3。超弦理论却似乎仅在空间维数远大于 3 的宇宙中才具有人们所渴求的上述那些性质。为此而构造的首批模型要求具有 9 个或 25 个空间维度！然后，人们开始寻找出现于普朗克时期的某种自然过程，它有可能保证如果宇宙开始时具有（比方说）9 个同等膨胀的空间维度，那么其中有 6 个维仍将拘留于当时的宇宙尺度（即 10^{-33} 厘米）内，另外的 3 个维则继续膨胀至今，从而比上述那 6 个维大了 10^{60} 倍（见图 11.1）。按照这一理论，那些额外的维如今的尺度依然囿于普朗克长度上，所以在日常经验中、以及在高能物理实验迄今所能创造的事件中，均无法察觉它们的影响。

这种“拘留”可能是怎样发生的？这仍是一个悬而未决的问题。如果这当真发生了，那么它将使极早期宇宙的研究变得更加困难。也许，存在着某种深刻的自然原理，它要求有 3 个、而且仅仅是 3 个空间维度继续膨胀，从而变得很大——正如我们今天在自己这个宇宙中所经历的那样。或者不然的话，大维的数目也可能是相当随机地确定的。它甚至可能在宇宙的某个区域与相邻区域中具有不同的数值。

在宇宙中可能出现什么情况这个问题中，空间的大维数目扮演了某种关

《四签名》，福尔摩斯探案之一。引文系福尔摩斯在现场作出种种分析判断时，对困惑不解的华生所言，引文在此的寓意甚为明显，读者可细细品味——译者

“大维”，原文 large dimensions，指继续膨胀、从而尺度变得很大的那些维——译者

键性的角色。引人注目的是，具有 3 个空间大维的宇宙是很特殊的。如果大维数超过 3，那就不能存在稳定的原子，恒星周围也不可能存在任何稳定的行星轨道。波在 3 个维度中也具有独一无二的行为方式。如果空间维数是诸如 2, 4, 6.....等等的偶数，那么波信号就会混响，这也就是说，不同时刻发出的波信号可在同一时刻到达。在奇数维中则不发生这种情况，波信号是无混响的。然而，在所有不同于 3 的奇数维中，波信号都将畸变。只有在 3 维空间中，它们才以轮廓鲜明而无畸变的方式传播。有鉴于此，物理学家们早已认识到，具有 3 个空间维度的宇宙存在着某种非常独特的性质。事实上，有生命的观测者也许只能存在于具有 3 个大维的宇宙中（尽管已有在 2 维中可能如何的种种有趣猜测），因为在其他宇宙中不存在由自然力束缚在一起的任何结构（例如原子）。

我们看到，如果由于某种深刻的自然原理而存在 3 个空间大维，那么我们真可以说是万幸。如果世界的这一特征是近乎宇宙开端的那些事件的某种随机结果，或该特征在今天我们这个可见宇宙的视界之外随处变化，那么情况就与由蛀洞涨落决定自然常数颇为相似。我们也许能确定“我们发现存在着 3 个空间维度”的概率，而不论这个概率可能会有多小。我们知道，我们必然会发现自己正在观测一个精确地具有 3 个空间大维的宇宙，因为只有在这样的宇宙中我们才会演化出来。

宇宙学和高能物理学前沿的理论探索正在各个方向上不断推进，它们对于新的数学理论分支的探索，已经勾画出当代宇宙学的一项总体特征。它与为科学下定义的传统做法已经不尽相符。像卡尔·波珀（Karl Popper）这样的科学哲学家极其强调为了使陈述是“有意义的”或“科学的”，它就应该能以某种方式来检验。在以实验室为研究基地的科学中，这几乎不会造成什么问题。在原则上，你可以设想施行你所选择的任何实验，虽然实际上对于你想做的事情可能存在着经费上的、法律上的、或者伦理上的种种限制。

在天文学上，情况却颇为不同。我们不能随心所欲地对宇宙做实验。我们可以观测它，但不能对它施行实验。我们不是操持实验，而是寻找事物之间的联系。如果我们观测到许多星系，那么我们就可以看看，是不是很大的星系全都很亮，或者，是不是旋涡状的星系所含的气体和尘埃都比其他星系多。然而，在宇宙学中，总的情况与地球上的科学不同：在宇宙学中，我们对于宇宙的观测存在着偏倚，而偏倚的方式又使之无法纠正。我们已经说明，为什么我们必定生活在宇宙一生中甚迟的时期，以及我们何以只能看见整个（可能是无限的）宇宙的一部分。我们正在探索宇宙性质随处可见、因而只能在特定的区域中演化出观测者的某些后果。宇宙学是这样的一种研究工作：在它那里所能获得的资料将永远不能满足人们的愿望。而且，我们拥有的某些资料是有偏倚的。亮星系比暗星系更容易看见。可见光比 X 射线更容易探测。作为一名优秀的观测天文学家，其本领正在于能了解搜集资料的过程可能将哪些偏倚引入了你的观测。

记住宇宙学的这些特征，再来看看宇宙起源研究中某种正在增长的趋势，那将是非常有趣的。我们在前面曾着重指出，在下述两种人之间如何始终存在着歧见：第一种人企求用宇宙开始时的状态来解释今天观测到的宇宙结构；第二种人则试图证明宇宙现在的结构乃是宇宙中正在进行的那些物理过程的必然结果，它与宇宙如何起源完全无关。暴胀宇宙图景是这第二种看法的最充分的表现形式。它论证了无论宇宙如何开端，总会有某个区域由于

物质和辐射之间的相互作用而保持平滑，它将经历一个加速膨胀阶段。由此造就的宇宙看起来与我们自己的这个宇宙非常相象：古老，巨大，不包含磁单极，正在以十分接近于“开宇宙”与“闭宇宙”之临界状态的方式膨胀。但是近年来，也已经有人在潜心研究上述第一条途径。科学家们已经开始研究，是不是存在什么“原理”以决定宇宙的初始状态是什么模样。事实上，人们正在寻找某种新型的自然“定律”，它不是管辖世界肇始后的状态从一个时刻到下一个时刻容许有何变化的定律，而是管辖初始条件本身的定律。

有几个这种类型的实例，它们都很有趣。其中之一我们已经遇到过，那就是哈特尔和霍金提出的“没有边界”这一条件。它是对于宇宙初始量子态的具体说明。对于初始状态的具体化，还有着可与之抗衡的其他方案。有一种是维伦金提出的，如图 9.7 所示。我们可以想象在另一种意义上似乎很自然的另一类初始状态——某种完全随机的状态。最后，罗杰·彭罗斯还提出了另一种方案。它主张整个宇宙的引力场存在着某种无序程度——某种“引力（的）熵”。而且，这种熵应该正以类似于热力学第二定律所描述的方式增加着。看来，这样一种熵极有可能当真存在。斯蒂芬·霍金已经证明，黑洞的引力场具有热力学性质，但是黑洞并不像宇宙那样随着时间而膨胀，同时人们也尚未发现是什么决定着一个膨胀宇宙的引力熵。对于黑洞而言，答案是简单的：它就是黑洞边界的表面积。它遵守热力学的“第二定律”。如果两个黑洞合并，那么由此产生的新黑洞的表面积必定大于原先那两个黑洞的面积之和。彭罗斯以及其他人已提出：宇宙规则性的某种量度也许能够充当引力熵的角色。如果宇宙膨胀的速率在每个地方和每个方向上都相同，那么熵将是非常小的。如果宇宙的膨胀在不同地方和不同方向上杂乱无章互不相同，那么熵就会相当高。

无论引力熵具有何种确切身份，我们都可以看到，如果它确实是某种熵，并随时间而增加，那么这就意味着宇宙的初始状态必定是引力熵或者为零，或者小得微不足道，或者至少也是很小的状态。如果我们能准确地辨认出宇宙的哪个方面决定了这个引力熵，那么我们就有可能推测，从宇宙开端时引力熵非常小的状态出发，往后将会出现一些什么样的结果。迄今我们尚未能做到这一点。

我们介绍这些据信支配着“宇宙起源必似何状”的大“原理”，并不是想推荐其中的任何一个作为解决宇宙学中最重大问题的唯一途径。所有这些都是高度猜测性的，也是高度不确定的。它们是为了解决“怎样出主意”的问题而出的主意。不过，从某种支配宇宙初始状态的大“原理”出发来解释我们今天观测到的宇宙结构的任何尝试，都存在着一个非常重要的附带条款。

请回想一下，我们已经将整个宇宙与它的下述有限部分作了区分：自宇宙肇始至今的时间，已足以让光从该区域中的任何地方传到我们这里。这就是我们所称的“可见宇宙”。可见宇宙的尺度必然是有限的。当我们说，我们打算阐明观测到的宇宙结构时，我们指的是打算阐明我们观测到的可见宇宙的形式。然而，宇宙的延展既可能是有限的，也可能是无限的。我们永远不得而知。如果它是无限延伸的，那么可见宇宙便将永远只是整个宇宙的一个无穷小的部分。

这些局限性给大原理的有效性画上一个巨大的问号。如果我们为宇宙的膨胀画一幅图，那么今天的可见宇宙就是从初始状态的某一点或某个极小的区域膨胀而来，如图 11·2 所示。今日可见宇宙的结构只是存在于初始状态

的某一极小区域中的条件经过膨胀后的映象。另一方面，大“原理”则向我们提供了关于宇宙整个初始状态的某种一般性的指示。这种指示纵然可能是正确的，却并不是我们为了解今日之可见宇宙所必需的。我们需要知道的是，存在于初始状态中、日后长大为可见宇宙的那个特定区域内的特定的局部事态。这一区域就某些方面而言可能并不具备典型性，因为它业已膨胀到了能够演化出观测者的状态。我们已经看到，这要求它具备许多很不寻常的性质。宇宙可能肇始于具有极小引力熵的某种状态，但是这种知识看来未必能解释可见宇宙的结构。因为，这一区域有可能起源于偏离平均状态的某种涨落之膨胀，而极小熵条件则并不适用于这种涨落。此外，我们还看到，人们通过观测所了解的宇宙仅限于它的可见区域，这意味着我们永远不可能检验为整个宇宙的初始状态开出的“处方”所导致的结论是否正确。我们看到的只是极小一部分初始状态的演化结果。也许有朝一日我们将能对邻近的宇宙发表一些真知灼见，但是我们永远也无法知道整个宇宙的起源。最佳的保密乃是秘密本身隐而不露。

