

宇宙的最后三分钟

保尔·戴维斯 著

上海科学技术出版社·科学大师佳作系列

前言	1
第一章 “世界末日”	4
第二章 走向死亡的宇宙	8
第三章 最初三分钟	14
第四章 恒星的末日	23
第五章 黑夜降临	29
第六章 给宇宙过磅	37
第七章 悠悠岁月	45
第八章 慢道上的生命	54
第九章 快道上的生命	64
第十章 暴卒与再生	69
第十一章 世界无尽头吗	77

前言

60 年代初，在我还是个学生时就对宇宙的起源问题产生了非常浓厚的兴趣。大爆炸理论诞生于 20 年代，但直到 50 年代才引人注目。当时这种理论虽已广为流行，但远未使人信服。稳恒态学说与大爆炸理论相悖，它断然否认宇宙存在着起源问题。在半个多世纪里，稳恒态学说是最为流行的理论。1965 年，罗伯特·彭齐亚斯（Robert Penzias）和阿诺·威尔逊（Arno Wilson）发现了宇宙背景热辐射。这一发现，使大爆炸理论被更多的人所接受。那么，这能否被看作是宇宙在炽热的猛烈爆炸中突然诞生的确实证据呢？

宇宙学家们异常兴奋地在探索这一发现的意义。大爆炸 100 万年后的宇宙有多热？大爆炸 1 年之后、1 秒钟之后情况又如何？在原初的炽热状态中曾出现过多少种物理过程？是否可能找到宇宙诞生时的遗物，而这种遗物还保留着当时曾压倒一切的极端条件的痕迹？

1968 年，我曾参加了一次有关宇宙学的讲座。那次讲座对我来说依然记忆犹新。在即将结束演讲时，那位教授根据背景热辐射的发现这一事实，评估了大爆炸理论。“一些理论家已开出了宇宙化学成分的清单，”他微笑了一下说道，“这份清单的根据是大爆炸最初三分钟发生的核反应过程。”所有的听众哄然大笑。这给人一种印象，即试图描述宇宙刚诞生时的状态似乎是极其荒谬的。甚至就连那位异常仔细地研究了《圣经》之后宣称宇宙诞生于公元前 4004 年 10 月 23 日的詹姆斯·厄谢尔（James Ussher）大主教，也没有胆量列出宇宙最初三分钟所发生的事件的准确顺序。

在宇宙背景热辐射发现约 10 年之后，最初三分钟的理论已在大学里进行讲授，这是科学的进步。美国物理学家和宇宙学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）在 1977 年写了一本畅销书，书名为《最初三分钟》（The First Three Minutes）。此书被公认为科普读物的里程碑。作为一位知名的权威和专家，温伯格在书中向世人描绘了一幅完全令人信服的宇宙起源图，包括在大爆炸之后仅仅数秒或几分钟内出现的详细过程。

当大众还陶醉于那些令人兴奋的成就时，科学家们却已在向前迈进。他们的注意力开始从对“早期宇宙”（大爆炸后数分钟）的研究转向了对“极早期宇宙”（大爆炸后极短暂一瞬间）的研究。约过了 10 年后，斯蒂芬·霍金（Stephen Hawking）大胆地在《时间简史》（A Brief History of Time）一书中提出了关于大爆炸后最初一万亿亿亿亿分之一秒时的最新观念。现在看来，1968 年那次讲座结束时听众发出的哄笑显得是多么无知。

随着大爆炸理论逐渐被大众和科学界所充分接受，人们越来越注重对宇宙未来的研究。我们现在已有了宇宙如何诞生的很好的概念，但宇宙将如何结束呢？它最终的命运又将如何？宇宙是否会以爆炸或抽搐的形式终其一生，或甚至永久消失？那时人类又将

如何？人类或其后裔——无论是机器人还是人类自己——能否幸免于难而永复存在？

即使哈米吉多顿（Armageddon）正好不在附近，对这类事情如果不产生好奇是不可能的。由于近来因人为危机的困扰，我们不得不思考现实宇宙学尺度时，我们为在地球上生存下去而奋争便成为备受欢迎的新内容。《宇宙的最后三分钟》正是一本描述宇宙未来的书。此书根据一些著名物理学家和宇宙学家的最新研究成果，并尽我们所能来对宇宙的未来作一番预测。这种预测绝非基督式的启示。事实上，经验的发展和累积蕴育着空前的潜能，而宇宙的未来使这种潜能充满了希望。然而，我们决不能忽视物之有生亦必有死的事实。死亡或许正是为创生而不得不付出的代价。

这本书是为普通读者撰写的，阅读时无需具备专业知识，也不需要数学。然而，在书中我有时不得不讨论一些很大或很小的数字。使用一种简洁的数学符号来表示这些数字是很有用的，这种符号就是“10 的幂次方”。这里介绍一下它的用法。一个数，例如 1000 亿，完整地写出来是 100000000000，这是相当麻烦的事。在这个数里 1 后面跟着 11 个零，因此我们可以用 10^{11} 来表示。类似地，100 万为 10^6 ，10000 亿是 10^{12} 。当幂指数增加时，这种符号会掩盖数字的增大速度。例如， 10^{12} 比 10^{10} 大 100 倍，前者是个大得多的数，尽管看上去它们几乎相同。也可以用 10 的负幂指数来表示很小的数。例如，十亿分之一，即 $1 / 1000000000$ 可写成 10^{-9} ，因为这个分数的分母为 1 后面有 9 个零。

最后，我要忠告读者，本书无疑在很大程度上是推测性的。宇宙的基本演化图象是建立在相当科学的基础上的，它先从大爆炸起源，随后膨胀并向某种物理终态退化冷却，或可能是灾变性地坍缩。但是，对于在所涉及的无限时标上可能会出现什么样的起支配地位的物理过程我们还很不清楚。天文学家对普通恒星的总体命运已有清晰的观念，对 neutron 星和黑洞的基本特征也理解得越来越深刻。但是，如果宇宙能存在好几万亿年或更长的时间，或许会存在一些非常微妙的、我们仅能推测其存在的物理作用，而这种作用最终会变得极为重要。

既然我们面对着因对自然规律一知半解而产生的问题，因而试图推演宇宙最终命运的最好方法就是，利用现有最完善的理论来演绎出合乎逻辑的结论，然而问题在于，许多与推测宇宙最终命运有重大关联的理论仍有待于实践的检验。我在这里讨论的一些物理过程，如引力波发射、质子衰变和黑洞辐射等，虽然理论家已深信不疑，但这些过程至今尚未观测到。更重要的是，毋庸置疑还存在着一些我们一无所知的其他物理过程，这些过程或许会大大地改变我的结论。

这些不确定因素在技术领域以及宇宙智能生命的作用方面显得更为突出，在这一点上，我们将一起进入科学幻想的王国。不仅如此，我们还不能忽视这样一种情况：经过千秋万代之后，生命体或许能极大地改变空前巨大尺度上物理系统的特性。在本书中，我打算把宇宙中的生命体作为一个议题，这是因为就许多读者来说，对宇宙命运的关注

哈米吉多顿是圣经《启示录》中 3 个魔鬼聚集天下众王的总称，作为世界末日的代名词或预言家——译者注

是与他们对人类及其后裔的命运的关注紧密相连的。我们应该始终记住，科学家们还远没有真正认识人类意识的本质，以及能容许意识活动在宇宙遥远的未来继续下去所必需的物质需求。

在编写本书时，我曾与约翰·巴罗（John Barrow）、弗兰克·蒂伯勒（Frank Tipler）、贾森·特瓦姆利（Jason Twanley）和罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）就本书的主要内容进行了有益的探讨，在此表示诚挚的谢意，并要感谢本系列丛书的编辑杰里·莱昂斯（Jerry Lyons）对书稿一丝不苟的评阅。

第一章 “世界末日”

日期：公元 2126 年 8 月 21 日，世界末日。

地点：地球。

绝望的人们在整个地球上四处寻觅藏身之处，数以十亿计的人已走投无路。一些人绝望地在寻找废弃的矿井、洞穴，甚至潜水艇，恐慌之中想在地下深处找到逃生之地，但另一些人却毫不在意，他们横冲直撞，杀气腾腾。然而，大多数人只是痴呆而静悄悄地坐着，等待死神的降临。世界末日来临了。

高空中，一道巨大的闪电印在天幕上。初时，一条轻絮般细管形辐射状星云逐日膨胀，形成一股气旋，翻滚着向空寂的天宇涌去。长条形气旋的顶部是一个外形狰狞、令人恐惧的黑团，这是一颗彗星，虽然头部不大，却携带着与其很不相称的、具有毁灭性的巨大能量。它夹带着 1 万亿吨冰块和岩石，以每小时 6.4 万公里，即每秒近 18 公里的惊人速度逼近地球。

人类唯一能做的就是坐以待毙。面对着已注定了的命运，科学家们早就抛弃了他们的望远镜，悄然地关上计算机。对灾难无休止的模拟，结果仍然模棱两可，而他们的结论又使人惊恐万分，无法公诸于世。一些科学家利用普通老百姓所没有的尖端技术优势，精心准备好了逃生计划。另一些科学家则打算尽他们所能来仔细观察这世界的末日，并把观察数据传至深埋于地球内部的时代信息密封器。他们在最后一刻，仍然起到一个真正的科学家应起的作用。

撞击时刻临近了。全世界成千上万的人都在紧张不安地看着手表。这正是宇宙的最后三分钟。

爆心投影点正上方的天空被劈开了，掀起几千立方公里的气浪。一条比城市还宽的灼热火焰沿弧线冲来，15 分钟之后急速击中地球。一万次地震才具有的巨大力量使地球不停地震颤。空气被挤压而产生的冲击波横扫地球表面，沿途所有建筑被夷为平地，一切的一切都被碾成粉末。撞击点周围的平地升起一个几公里高的液态环形山，在 100 多公里直径的撞击坑穴中，地球内层暴露无遗。熔岩壁波浪式地向外涌出，地面颠簸起伏，宛如一条因受拍打而缓慢蠕动的毛毯。

坑穴内部数以万亿吨计的岩石被汽化，而数量比这多样多的物质则被高高抛起，其中一部分直接抛入太空，更多的则被扔过半个大陆，暴雨般地撒落在数百乃至数千公里以外。受害之地万物尽遭严重毁坏。急射而出的熔岩一部分会落入大洋，激起巨大的海啸，从而加剧了悲剧的蔓延。大量的尘埃碎屑在地球大气中飘散，导致全球遮天蔽日。不过，当抛入太空的物质返回大气层时，照射地面的将不是阳光，而是由数以十亿计流

星所发出的炫目不祥之光，这种强光所带来的无情的酷热将使大地变为焦土。

上述景象也许会发生，也许并不会发生。天文学家已经算出，一颗名为斯威夫特 - 塔特尔(Swift-Tuttle)的彗星，在公元 2126 年 8 月 21 日与地球相撞的概率为百万分之一。假若真的发生了，全球性的毁灭是不可避免的。全部人类文明便有可能毁于一旦。要是没有相撞，人类便会宽慰地舒一口气，并安心返回工作岗位。但是，斯威夫特 - 塔特尔彗星或者别的某个类似的天体早晚会的撞击地球。人们作过估计，至少有 2 万颗直径为半公里或更大一些的天体的运动轨道与地球轨道相交，这些天外来客起源于寒冷的太阳系外部区域，有些来自位于火星和木星之间的小行星带，另一些则是彗星的残骸，后者可能是从一个极其巨大的碎片团中分离出来的。这个碎片团距太阳约 1 光年之远，称为奥尔特(Oort)云，它是以荷兰天文学家奥耳特的名字命名的。

许多这类天体所能造成的破坏比全世界所有核武器所能造成的破坏的总和还大。因此，问题仅在于某个天体撞击前人类究竟还有多少时间作准备。要是真的发生这种事，对人类来说将是个糟透了新闻：人类的历史将会发生前所未有的突发性中断。然而，对地球来说这只是件颇为寻常的事。平均说来，这种量级的彗星或小行星撞击地球的事件每几百万年便会发生一次。人们普遍认为，6500 万年前的一次或数次这类事件的发生结束了恐龙时代。下一次轮到的可能就是人类了。

对世界末日深信不疑的观念深深扎根于大多数宗教和文化之中。圣经《启示录》中有一段关于死亡和毁灭的生动描写：“又有闪电、声音、雷轰、大地震。自从地上有人以来，没有这样大、这样厉害的地震……列国的城池都倒塌了……，众山也不见了。又有大雹子从天落在人身上，每一个约重 1 他连得。因为这雹子的灾难极大，人就亵渎上帝。”（注：该段引自《新约全书》启示录的第十六章。文中 1 他连得即 100 镑，约 45 千克——译者注。）

宇宙中到处都有剧烈活动，地球只是宇宙中一个微不足道的天体，因而地球上以前很可能发生过许多可怕的事情。不过，我们的行星保持适宜生命的环境至少已有 35 亿年了，因而宇宙并非完全充满敌意。

我们在地球上得以生存的秘密在于空间——巨大无比的空间。我们太阳系只是在茫茫宇宙海洋中的一个极小的活动岛。距太阳最近的一颗恒星远在 4 光年之外。为了认识一下这段距离有多远，想一想光只需 8 分半钟就可从太阳超越约 150 百万公里到达地球。而在 4 年的时间内，光将越过 37 万亿公里的距离。

太阳是我们的星系——银河系中一个典型区域里的一颗典型恒星。银河系约包含 1000 亿颗恒星，它们的质量从太阳质量的百分之几到太阳质量的 100 倍。这些恒星，连同许多气体云和尘埃，还有不计其数的彗星、小行星、行星及黑洞一起，缓慢地绕银河系中心旋转。只要考虑到银河系可见部分的尺度达 10 万光年这一事实，这个巨大的天体集团就不会给人以银河系处处拥挤不堪的印象。银河系的形状像个盘子，中心部分

鼓起，几条由恒星和气体组成的旋臂从中心向外伸展。我们的太阳位于一条旋臂之中，离银心约 3 万光年。

据目前所知，银河系毫无特殊之处。在仙女座方向上有一个名叫仙女星系的类似星系，它位于距地球 200 万光年之远处，它看上去像个模糊的光斑，肉眼勉强可见。点缀在可观测宇宙中的星系有好几十亿个之多，有的呈旋涡状，有的呈椭圆形，也有的很不规则。它们的距离非常遥远。高倍望远镜能够观测到几十亿光年远的单个星系的像。某些星系发出的光到达我们这里所需的时间比地球的年龄(40 亿年)还要长。

这样大的空间意味着宇宙中碰撞是罕见的。对地球的最大威胁可能来自我们自己的家园。小行星的轨道一般不靠近地球。大部分小行星都位于火星和木星之间的一条带上。但是，木星的巨大质量会干扰小行星的轨道运动，偶而将其中某个小行星推向太阳，从而对地球构成威胁。

另一种威胁来自彗星。人们认为，这些看上去很壮观的天体起源于离太阳约 1 光年远的一块观测不到的云团。彗星对地球形成的威胁并非源自木星，而是来自过路的恒星。银河系不是静止不动的，这是因为随着恒星绕银河核心作轨道运动，因而银河系呈现缓慢的自转。太阳连同它的行星小伙伴们每 2.5 亿年绕银心运动一周，沿途它们会有许多奇遇。附近的恒星或许会掠过彗星云，把一些彗星引向太阳。当彗星穿入内太阳系时，彗星的某些易挥发物为太阳所蒸发，而后又被太阳风吹成长流，形成壮观的彗尾。在非常偶然的情况下，某颗彗星在内太阳系的逗留期内会与地球相撞。这颗彗星便造成了对地球的破坏。但是，真正的罪魁祸首应是那些过路的恒星。幸运的是，由于恒星间的距离相隔很远，这种恒星间交会是不多的。能造成全球性严重破坏的彗星撞击事件充其量也不过几百万年发生一次。

其他天体在环绕银心运转的途中也会穿越我们的轨道。当巨大的气体云缓慢地从附近飘过时，尽管它们比实验室里的真空还要稀薄，但仍会极大地改变太阳风或影响来自太阳的热流。更可怕的也许是潜伏在黑沉沉太空深处的那些天体。游离漂泊的行星、中子星、棕矮星、黑洞，所有这些天体可能会无声无息地向我们突然袭来，造成太阳系的浩劫。

要是换一种情况，威胁或许更为凶险。有些天文学家认为，我们的太阳可能与银河系里大多数恒星一样实际上是个双星系统。太阳的这颗伴星——我们称之为复仇女神或死亡之星，可能因为太暗又太远，至今尚未被发现。但是，从引力效应上仍可察觉它的存在。在它绕太阳作缓慢转动的过程中，会周期性地影响那个遥远的彗星云，导致约每 3000 万年一次的彗星风暴，并进而引发一系列蹂躏地球的碰撞。幸好，太空再次成为我们的保护屏。银河系里的天体密度非常低，因而来自太阳系外的引力扰动尽管不是绝无可能，但也毕竟极为罕见。

更往远处看，天文学家可以观测到似乎正在碰撞中的两个星系所组成的系统。银河

系与另一个星系碰撞的可能性有多大呢？某些快速运动恒星的存在证明，银河系也许已经与附近一些小星系发生过碰撞，受到了扰动。但是，两个星系的碰撞不一定会使其中的个别恒星招致灾难。星系内部恒星分布极其稀疏，星系可以彼此并合，却不发生恒星之间的直接碰撞。

大多数人为世界的末日——世界突然遭到大规模破坏——而惊慌失措。不过，与缓慢地衰亡相比，暴卒产生的恐惧要更少些。有许多种情况会使地球环境逐渐变得不宜居住。生态的缓慢退化，气候的变迁，太阳输出热量的少许变化，所有这些假如会使人类不能生存下去的话，那么都会令生活在这脆弱行星上的人寝食不安。

然而，这些变化发生在几千年甚至百万年的时间尺度上，人类有可能运用新技术与之搏斗。例如，只要有足够的时间采取措施去重新组织我们的活动，一个逐渐开始的新冰川期便不会招致人类种族的大灾难。如果我们认真地推测一下，在未来的几千年里技术得以继续飞速发展，则有理由相信，人类或者他们的后代将能控制越来越大的物理系统，并最终能避免哪怕是天文尺度上的灾难。这是否意味着人类原则上能够万劫不朽吗？这是可能的。但是，我们将看到，永存并不那么容易实现，也许还可证明那是不可能的。宇宙作为整体必定受物理定律的支配，因此它也有自己的生命循环：诞生，演化，以及可能还有死亡。我们自己的命运不可避免地会与恒星的命运纠缠在一起。

第二章 走向死亡的宇宙

1856 年,德国物理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹(Herman vonHelmholtz)作过一项调查,以图了解在科学史上哪一个预言可能最令人灰心丧气。亥姆霍兹声称,那就是宇宙正在走向死亡。这种启示式断言的根据来自所谓热力学第二定律。这一定律(现在常简称为“第二定律”)最早是在 19 世纪初提出的,当时此定律专门用于说明热机的效率。人们不久就认识到它有着宇宙学意义:事实上也差不多就是宇宙的结局。

以最简洁的方式来说,第二定律认为热量从热的地方流向冷的地方。当然,对于物理系统来说,这是众所周知和显而易见的特性。无论是煮饭或让一杯热咖啡冷却,都可认识到这条定律在起作用:热量从温度高的地方流向温度低的地方,对此丝毫没有神秘奥妙可言。物质的热量以分子的无规则运动表现出来。在空气之类的气体中,分子作无规则运动并相互碰撞。在固体中,原子通常被束缚在一定的位置上,尽管如此,原子同时又在这一位置附近作强烈的振动。物体越热,分子运动的能量越大。要是让两个不同温度的物体相互接触,温度高的物体中比较强烈的分子运动很快会把它的活动性传递给温度低的物体的分子。

热流的这种方向性并非仅仅是冷的区域缺乏热能的缘故。例如,一个房间拥有大量的热能,但你决不会指望任何热能会自发地流入一杯热咖啡里而将它煮沸。我们会把这种逆向事件看作一种奇迹。强迫热量从冷处流向热处是可能的(这就是冰箱的原理),但是,要做到这一点就必须不停地消耗能量。热量是不会自发地“误入歧途”的。

因为热量沿一个方向(由热到冷)流动,所以这种过程在时间上是不对称的。要是放映一部记录热量从冷处流向热处的影片,那看上去就像河水流上高山,或者雨滴上升到云层一样荒唐可笑(参见图 2-1)。所以,我们可以对热流确定一种基本的方向性,通常用从过去指向未来的箭头来表示。这种“时间箭头”表明了热力学过程的不可逆性,物理学家曾为此迷惑了 150 年。亥姆霍兹和其他一些学者发现了一个称为“熵”的物理量。在最简单的热流情况中,熵等于被传递的热能除以温度。当热量自发地从热处流向冷处时,熵便增加。当驱使热量从冷处流向热处时,系统的熵就减少,但由于外部媒介需要消耗能量,结果是媒介熵的增加比系统熵的减少要多,因而一个封闭系统的总熵总是增加的。这就是第二定律的本质。

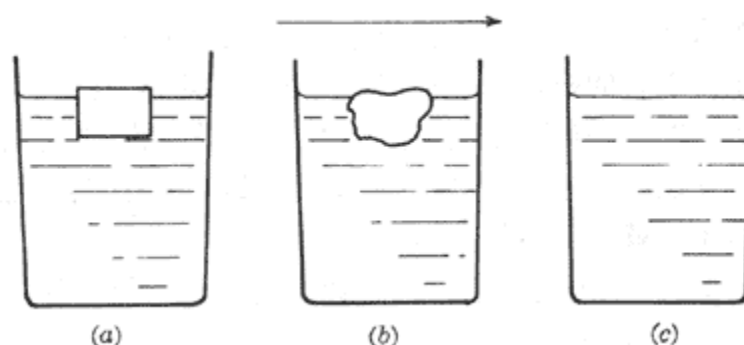


图 2-1 时间箭头 冰块的融化决定时间的方向：热量从温水流向冷水。要是一部影片按(c)、(b)、(a)的顺序放映，人们立刻会认为是一种特技摄影。这种不对称性是用一个称为熵的物理量来描述的。冰融解时熵增加。

如果你把宇宙看作一个整体，多数地方的熵是不断增加的。若哪个地方的熵在减少的话，作为代价，总有另外一个地方的熵要增加。总之，宇宙的熵始终是增加的。一个很好的例子就在我们的家门口，那就是太阳。太阳（它是热的）每天把热量倾入太空（它是冷的）。这些热量消失在宇宙深处，永不返回，因此这是一个十分壮观的不可逆过程。

一个明显的问题是：熵会永远不断地增加下去吗？想象一个绝热封闭容器，内有两个相互接触的热物体和冷物体。热量从热物体流向冷物体，熵便增加，最后是冷物体温度升高，而热物体的温度会下降，直到它们达到相同的温度。一旦到达这种状况，就不再会有热交换。容器内的系统便达到某个均匀的温度，这种稳定状态称为热动平衡。一旦热动平衡建立了，熵就不再增加，它代表最大熵状态。

只要系统保持与外界隔离，就不会再有进一步的变化。但如果通过某种方式对物体进行干扰，譬如从容器外向内再注入热量，那么热交换又将继续发生，熵也会增加到一个新的更大的最大值。这时，只要没有来自系统外部的任何干扰，熵就不会再继续增加。

对于太阳和大多数恒星来说，热量外流可以持续好几十亿年，但这种热量不是用不完的。太阳的热量产生于太阳内部的核过程。正如我们将会看到的那样，太阳最终会耗尽燃料，只要没有意外变故，它会一直冷却下去，直至与周围空间的温度相同。

虽然亥姆霍兹对热核反应一无所知（太阳巨大能量的来源在当时还是个谜），但是，他认识到这样一个普遍性原理：宇宙中所有的物理活动都是朝着热动平衡，或者说朝着最大熵这个最终状态发展的，随后，很可能再也不会发生任何有意义的活动。早期的热力学家已经认识到这种向平衡态的单向变化过程，并称之为宇宙的“热寂”。单个系统也许可能通过外界干扰可使它复生，但整体宇宙按其定义不存在“外界”，所以没有东西可以挽救宇宙免遭万劫不复的热寂之难。这是无法逃避的。

宇宙正按这一方式走向死亡，这是热力学定律不可抗拒的推论。这项发现曾使几代科学家和哲学家为之悲观失望。例如，伯特兰·罗素（Bertrand Russell）在《为什么我不做个基督教徒》一书中写下了一段悲观而感人的评述：“……一切时代的结晶，一切信仰，一切灵感，一切人类天才的光华，都注定要随太阳系的崩溃而毁灭。人类全部成就的神殿将不可避免地会被埋葬在崩溃宇宙的废墟之中——所有这一切，几乎如此之肯定，任何否定它们的哲学都毫无成功的希望。唯有相信这些事实真相，唯有在绝望面前不屈不挠，才能够安全地筑起灵魂的未来寄托。”还有许多作者委婉地提到热力学第二定律和正在死亡中的宇宙的含义，断言宇宙的前景渺茫，认为人类的生存到头来也是毫无价值的。我将在第十章再回到这类悲观的议题上来，讨论这类带有悲观色彩的评论是否会是一种误解。

关于宇宙最终热寂的预言不仅使我们对宇宙的未来有了某种了解，也暗示了宇宙在过去的一些大事件。显然，如果宇宙一直在以某一有限速率不可逆地衰退，那么它不可能永远存在。理由很简单：假如宇宙无限老，那它应早就已死亡了。以有限速率演变的某种事物显然不可能永远持续下去。换句话说，宇宙必定是在某个有限时间之前诞生的。

值得注意的是，这个有深远意义的结论却没有被 19 世纪的科学家们很好地认识。宇宙以大爆炸形式突然起源的思想只能依托于 20 年代的天文观测，但是纯热力学研究似乎早已强烈暗示了宇宙的年龄有限，它是在过去的某个时刻诞生的。

不过，因为这个简单的事实没有深入人心，19 世纪的天文学家，如海因里希·奥伯斯（Heinrich Olbers）就曾为一个难以理解的宇宙学佯谬而困惑不解。这个佯谬涉及一个简单却又十分重要的问题：夜空为什么是黑暗的？初看起来这个问题似乎不值一提。夜空之所以是黑色是因为恒星离我们很远，光线又很弱。然而，要是空间无限，就会有无限多颗恒星。无限多颗暗弱的恒星可以迭加产生大量的光芒。

假设有无限颗恒星，它们没有光变，而且大体呈空间均匀分布，那么要计算这些恒星所产生的累积星光强度并不困难（见图 2-2）。恒星的亮度与距离的平方成反比。这意味着距离增大一倍，星光减弱为四分之一；距离增大 3 倍，亮度减小为九分之一，依次类推。另一方面，给定距离越远，你看到的恒星数目就越多。事实上，简单的几何学就可以证明这一点。譬如说，200 光年远处的恒星数是 100 光年远处恒星数的 4 倍，而 300 光年远的恒星数则是后者的 9 倍。因此，恒星数按距离的平方增加，而亮度则按距离的平方减少。这样，两个因素相互抵消，便引出一个简单的结果：来自给定距离上所有恒星的累积星光强度全都一样，与距离远近无关。200 光年远恒星的总亮度与 100 光年远恒星的总亮度是相同的。当我们把各种距离上全部恒星的光累加时，问题就来了。如果宇宙没有边界，地球上所接收到的总的星光量好像是无限的。夜空根本不会是黑的，而应当是无限地亮。



图 2-2 奥伯斯佯谬 设想有一个不变的字宙，其中的恒星在某个平均密度之下作随机分布。图中表示的是选了一批恒星，它们位于一个以地球为中心的薄球壳空间内（图中略去球壳以外的恒星）。射到地球上的星光总流量中有一部分来自这个球壳中的恒星星光。某一颗恒星的光强度随球壳半径的平方而减小，但球壳内的总星数与球壳半径的平方成正比。因此这两个因素相互抵消，而该球壳的总光度便与它的半径无关。对一个无限宇宙来说有无限多个球壳。显然，到达地球的光流量就会是无限大。

要是考虑到恒星实际上有一定的大小，情况会稍有改善。虽然肉眼看来恒星都是一些光点，但实际上都是些球体。离地球越远，恒星的视直径越小。如果两颗恒星位于相同的视线，则近的一颗便会遮住较远的那颗。在一个无限宇宙中，这种情况会出现无限多次。考虑到这一点，前面计算的结论就变了，到达地球上的光通量不再是无限大，而只是很大而已。事实上，这等价于把太阳圆面充满整个天空。这种情况相当于把地球放在离太阳表面一百万公里的地方一样。这实在是个十分不好适的地点！地球会很快被酷热所汽化。

一个无限宇宙应当是一个宇宙熔炉这个结论，实际上是前面讨论过的热力学问题的另一种表现形式。恒星把热量和光辐射倾注入太空，这种辐射慢慢地在真空中堆积起来。假如恒星可以一直燃烧下去，那么这种辐射看来必定会达到无限大的强度。但有些辐射在太空中旅行时，会因碰到其他恒星而被再吸收（注意这等价于近距恒星遮挡住远距恒星的星光）。因此，一旦建立起某种平衡，辐射的强度便不再上升，这时发射率正好同吸收率相平衡。当空间中辐射达到恒星温度（几千开）时，就会出现这种情况，即处于热动平衡状态。因此，整个宇宙应当充满温度为几千开的热辐射，夜晚的天空应当在这个温度上发光发热，而不是漆黑一片。

奥伯斯提出了解决这个问题的方法。他注意到宇宙中存在大量的尘埃，指出这种物质会吸收大部分的星光，因而天空就变黑了。遗憾的是，他的思想虽然富于想象力，

然而从根本上说是不能成立的。这种尘埃最终也会热起来，并开始发光发热，其强度与它们吸收的辐射强度相同。

另一种可能的解决办法是放弃宇宙空间上无限的概念。假定恒星很多，但数量有限，这样宇宙便由一个巨大的恒星集团组成，四周为无限的黑暗真空所包围。于是，大部分星光会通过流往外部空间而损失掉。

可惜，这个简单的解答也有致命的缺陷。对于这一点，事实上在 17 世纪艾萨克·牛顿(Issac Newton)就已很熟悉了。问题涉及到引力的本质。每颗恒星通过引力作用吸引其他所有恒星，这样，在这个集团中所有恒星会一起向引力中心跌落、集聚。因此，如果宇宙有一个确定的中心和边界，它似乎一定会自行向内坍缩。一个无支撑的、有限而静止的宇宙是不稳定的，不能阻止引力坍缩。

以后本书还要讨论这个问题，这里我们只要注意一个巧妙的方法。牛顿就是试图用它来回避困难，其推理方式如下：宇宙会向它的引力中心坍缩，仅仅是因为假定它有一个引力中心。如果宇宙既是无限延伸的，而平均来说恒星又处于均匀分布，那么宇宙将既无中心也无边界。某颗恒星会受到它周围许多相邻恒星来自四面八方的引力作用，这情况就好比一场巨大的、四周全是绳子的拔河游戏。平均说来，所有的拉力会彼此抵消，结果恒星保持不动。

因此，如果我们接受牛顿关于坍缩宇宙佯谬的解答，我们就会再次退回到一个无限的宇宙，出现奥伯斯佯谬的问题。看来我们必然面临进退维谷的两难境地。但是，利用以后的认识，我们可以在进退两难的夹缝中找到一条出路。错的并不是假定宇宙在空间上无限，而是假定它在时间上无限。火焰般天空的佯谬是由于天文学家假定宇宙不变而产生的，即假定恒星是静止的，并以相同的强度永恒燃烧。但是，现在我们知道，这两个假定都是错误的。首先，宇宙不是静止的，而是在不断膨胀，对此后面我还要略作解释。其次，恒星不能永恒燃烧，尽管它们在用完燃料后还会长久存在。它们现在正在燃烧的事实意味着宇宙必定诞生于过去某个确定的时刻。

如果宇宙年龄有限，奥伯斯佯谬马上可以解决。为了说明这一点，不妨考虑一颗非常遥远的恒星。因为光以有限的速度（每秒 30 万公里）穿越空间，我们看不到今天的这颗恒星，看到的只是光离开它时的星象。例如，亮星参宿四位于约 650 光年处，所以现在我们看到的其实是大约 650 年前的星象。如果宇宙诞生于 100 亿年以前，那么我们不可能看到任何离地球距离远于 100 亿光年的恒星。宇宙在空间范围上也许是无限的，不过要是它的年龄有限，那么在任何情况下，我们都不能看到某个有限距离以外的东西。因此，有限年龄而无限数目的恒星所累积的星光应是有限的，而且可能很微弱。

从热力学角度得到了同样的结论。恒星的热辐射充满空间，并达到相同的温度所需要的时间非常之长，原因在于宇宙空间茫无边际。简单地说，从宇宙创生至今还没有足够的时间来达到热动平衡。

因此，所有的证据表明：宇宙的寿命是有限的。它诞生于过去某个确定时刻，虽然现在充满着活力，但正不可避免地朝未来某个阶段将发生热寂的方向衰退。然而，这立刻会产生一大堆问题。末日何时来临？末日的形式怎样？末日是缓慢地到来还是突然降临？再则，按科学家现在对热寂说的认识，是否可以想象出结果也许证明它是错误的呢？

第三章 最初三分钟

像历史学家一样，宇宙学家认识到开启未来的钥匙在于过去。前一章已经解释了热力学定律是如何指出宇宙寿命是有限的。整个宇宙起源于大约 150 亿年前的一次大爆炸，而且这个事件确定了宇宙朝着它最终归宿演变的方式。这已是几乎所有科学家公认的观点。只要考虑到宇宙是怎样开始的，再研究一下原初阶段出现的各种过程，就可找到有关遥远未来的一些关键性线索。

宇宙并非永恒存在，而是从虚无创生的思想在西方文化中可以说是根深蒂固。虽然希腊哲学家曾考虑过永恒宇宙的可能性，但是，所有西方主要的宗教一直坚持认为宇宙是上帝在过去某个特定时刻创造的。

大爆炸理论的科学性令人不得不信服。最直接的证据来自对遥远星系光线特征的研究。20 年代，天文学家埃德温·哈勃(Edwin Hubble)研究了维斯托·斯里弗(Vesto Slipher)所作的观测。他注意到，远星系的颜色比近星系的要稍红些。哈勃仔细测量了这种红化，并作了一张图。他发现，这种红化是系统性的，星系离我们越远，它就显得越红。

光的颜色与它的波长有关。在白光光谱中蓝色光位于短波端，红色光位于长波端。遥远星系的红化意味着它们的光波波长已稍微变长了。在仔细测定许多星系光谱中特征谱线的位置后，哈勃证实了这个效应。他认为，光波变长是由于宇宙正在膨胀的结果。哈勃的这个重大发现奠定了现代宇宙学的基础。

膨胀中宇宙的性质使许多人困惑不解。从地球的角度来看，好像遥远的星系都正飞快地远离我们而去。但是，这并不意味着地球是宇宙的中心。平均而言，宇宙不同地方的膨胀图象都是相同的。每个星系，或更准确地说每个星系团都彼此远离。我们最好把它想象成星系间的空间在伸长或膨胀，而不是星系在空间中运动。

空间可以伸长这一事实看上去似乎离奇古怪，不过这却是 1915 年爱因斯坦广义相对论发表以来科学家们早就熟知的概念。广义相对论认为，引力实际上是空间（严格地说是时空）弯曲或变形的一种表现。从某种意义上来说空间是有弹性的，可以按某种方式弯曲或伸长，具体情况取决于引力的排列。这种思想已为观测所充分证实。

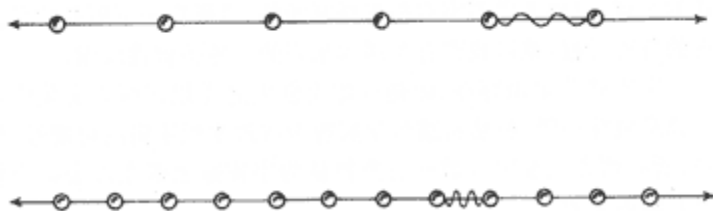


图 3-1 一维膨胀宇宙模型 钮扣代表星系，橡皮带代表空间，橡皮带伸长时钮扣彼此远离，伸长所起的作用是使沿橡皮带传播的波的波长变长。这对应于哈勃所发现的光的红移。

膨胀空间的基本概念可通过一项简单的模拟来加以理解。想象在一条松紧带上缝有一排钮扣（图 3-1）。现在假定从松紧带的两端把它拉长，结果所有的钮扣都彼此远离。不论我们选择从哪个钮扣来看，它邻侧的钮扣似乎都在远离，而且这种膨胀是处处相同的，不存在特殊的中心。当然，我们在画这排钮扣时，它有一个中心钮扣，但这与系统的膨胀方式毫不相干。只要把这条带钮扣的松紧带无限加长，或环成一个圆圈，这个中心点便不存在了。

从任意一个钮扣来看，离它最近的钮扣以某种速度退行，再下一个钮扣则以 2 倍速度退行，依次类推。在你看来，钮扣离得越远，它退行得越快。因此，这种膨胀意味着退行速率与距离成正比——这是一个极为重要的关系。借助这个图象，我们现在就可想象出光波是如何在膨胀空间中或星系间传播的。当空间伸长时，光波波长也跟着变长，这就解释了宇宙学红移现象。哈勃发现，红移量与距离成正比，同这个简单的图象模拟结果完全一致。

如果宇宙正在膨胀，它在过去必定比较小。哈勃的观测和后来进行的大量更好的观测提供了测量膨胀速度的方法。如果能倒放这部“宇宙影片”，我们会发现，所有的星系在遥远的过去是聚合在一起的。根据现在的膨胀速度，我们可推断这种聚合状态必定出现在好几十亿年前。不过，这个数字要说得准并不容易。原因有两个。首先，因受到各种误差的影响，很难测得精确。即使现代望远镜已大大扩展被研究星系的数目，但测定膨胀速度仍有上下一倍的不确定性，而且这还是个有激烈争议的问题。

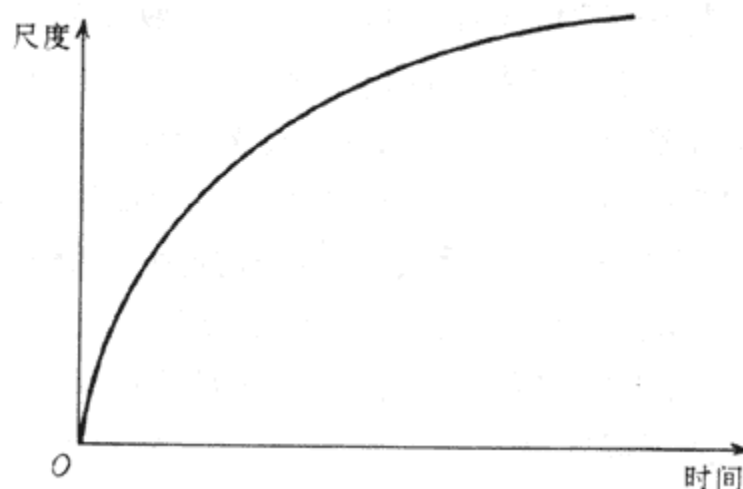


图 3-2 宇宙膨胀速度大致按图示的方式随时间逐步减小。在这个简单模型中，时间轴上标上 0 的那一点的膨胀速度为无限大，它对应着大爆炸。

其次，宇宙膨胀的速度会随时间而发生变化，这一点与引力有关。引力作用于星系之间，实际上它作用于宇宙中一切形式的物质和能量之间。引力起刹车的作用，阻止星系往外跑，这使膨胀速度随时间逐渐变小。结论是宇宙在过去必定比现在要膨胀得快。如果就宇宙某个代表性区域画出一张尺度对应时间的关系图，我们便得到一条由图 3-2 表示的普通曲线。从这幅图我们可以看出，宇宙从高度压缩的状态开始十分迅速地膨胀，随着时间的推移，物质密度会因体积的增大而逐渐减小。如果把这幅图一直追溯到宇宙创世时刻（图中原点），它意味着宇宙起源时尺度为零，而膨胀速度为无限大。换句话说，组成今天我们见到的所有星系的物质都是从一个点以极快速度爆炸而产生的！这是对所谓大爆炸理论的理想化描述。根据这一观点，今天我们所观测到的宇宙膨胀是原初爆炸的某种遗迹。

把这条曲线一直追溯到宇宙创世时刻是不是有道理呢？许多宇宙学家对此深信不疑。根据我在上一章中讨论过的，假定宇宙曾有过一个开端，那么大爆炸肯定是真实的。如果确实如此，则曲线的起点所标志的不仅仅是一次爆炸。记住这里图中所表示的爆炸是空间本身的爆炸，所以零体积并不意味着物质被压缩至无限大的密度，而是指空间被压缩到不复存在。换句话说，大爆炸是空间的起源，也是物质和能量约起源。最重要的是要认识到，事先并不存在使大爆炸得以发生的空虚的东西。

现在把同样的基本思想用到时间上来。物质的无限大密度和无限压缩的空间也标志着时间的边界，其理由是，在引力的作用下，时间和空间都拉长了。这个效应也是爱因斯坦广义相对论的结论，并已得到实验验证。大爆炸时的条件意味着时间的无限弯曲，所以，时间（还有空间）的实际概念不能外推到大爆炸之前。看来我们不得不得出这样的结论，即大爆炸是一切——空间、时间、物质和能量的最初开端。如果要问（许多人就是这样问的）大爆炸以前发生了什么，或者问什么引起了大爆炸，这显然是没有意义的。不存在以前。在没有任何时间的地方，也没有任何常识中的因果关系。

如果大爆炸理论仅仅依托于宇宙膨胀这单一证据的话，那末很可能许多宇宙学家会抛弃它，因为这种宇宙起源理论有着奇特的内涵。然而，1965 年出现了另一个支持大爆炸理论的重要证据，即发现宇宙沐浴在一种热辐射之中。这种辐射以相同的强度从空间的各个方向射向地球。它的谱与达到某种热动平衡态的熔炉内的发光情况精确相符。这种辐射就是物理学家所熟知的“黑体”辐射。由于符合程度非常之好，因而不可能是一种巧合。由此我们得出这样的结论：宇宙曾一度处于平衡状态，处处都有相同的温度。

对背景热辐射的测量表明，它的温度大约比绝对零度（约等于 -273 度）高 3 开，但这个温度随时间在缓慢变化。随着宇宙的膨胀，它按一个简单的公式冷却；半径增加一倍，温度下降一半。这是红移效应的另一个结果，它表明辐射波长随宇宙膨胀而变长。平均而言，低温辐射的波长比高温辐射来得长。还有，要是把这部影片往回放，宇宙在过去必然要热得多。大爆炸后 30 万年左右，宇宙的温度约为 4000 开，这足以使所有物质汽化，并创造出热平衡所必需的熔炉条件。宇宙背景热辐射至今仍然保持完美的黑体谱这一事实表明，从大爆炸后的 30 万年以来，辐射几乎一直在平稳地传播着，没有

受到任何干扰。与大爆炸后已过去的 150 亿年左右的历史比起来,30 万年是很早的时期。这意味背景热辐射是宇宙原初阶段的直接遗迹,可以把它看作为宇宙诞生时炽热光焰的余辉。

宇宙背景辐射的特性不仅仅是有黑体谱的形式,而且在整个天空中它极其均匀。这种辐射的温度和强度在空间不同方向上的变化之小甚至不超过十万分之一,表明宇宙在大尺度上必定是极其均匀的,因为在某个空间区域或某个特殊方向上有任何系统性的物质成团,都会通过温度的变化反映出来。另一方面,我们知道宇宙不是完全均匀的。物质集聚成星系,星系常常形成星系团。这些星系团又进一步构成超星系团。在好几百万光年的尺度上,宇宙呈一种泡状结构,也就是在一些巨大的空洞周围包围着星系膜和星系纤维。

必定有某种原因使宇宙的大尺度成团性从非常均匀的原始状态成长起来。虽然科学家们提出过各种可能的物理机制,但最可能的解释也许是引力的缓慢吸引作用。如果大爆炸理论是正确的,我们可望找到隐匿在宇宙背景热辐射中初期成团过程的某些证据。1992 年,美国宇航局的 COBE 卫星(宇宙背景探测卫星)指示这种辐射并不是完全均匀的,在天空的不同区域,它们无疑有着强度的起伏或者说变化。这些极小的不规则性看来就是超级成团过程温和的开端。背景辐射可靠地保存了极早时期原初凝聚的痕迹,它所记录的内容证明了宇宙并不是始终以我们今天所见到的特定方式构成的。物质聚集成星系和恒星是一个演化过程,从几乎完全均匀的原初状态开始便长时间来一直在发生着。

最后还有一个证实炽热高密度宇宙起源理论的证据。只要知道今天热辐射的温度,很容易计算出宇宙诞生后约 1 秒时各处的温度约为 100 亿度,这对现有的原子核的合成来说也是太高了。那时,物质必定被撕裂成最基本的成分,形成一锅基本粒子汤,诸如质子、中子和电子。但是,随着这锅汤变冷,核反应就可能出现了。特别是,中子和质子就很容易成对聚合在一起。接下来,这些粒子对便合成元素氦的核。计算表明,氦核的活动延续了大约 3 分钟(这就是温伯格一书书名的由来),并大约有四分之一物质的质量聚合成氦。这个过程用完了所有可利用的中子。余下的核子——没有聚合的质子——自然就成了氢原子核。因此,这一理论预言宇宙应当由大约 75% 的氢和 25% 的氦组成,这与天文测量结果极为吻合。

原初核反应也可能产生极少量比较重的元素,如锂和碳。重元素的总量不到宇宙物质的百分之一,但它们大多数并不是大爆炸的产物。相反,它们的形成要晚得多,而且是在恒星内部形成的,形成方式我将在第四章中进行讨论。

把宇宙膨胀、宇宙背景热辐射和化学元素的相对丰度综合在一起,便成为支持大爆炸理论的强有力的证据。不过,还存在许多悬而未决的问题。例如,现在宇宙为什么恰恰以这样的速度在膨胀,换句话说,大爆炸为什么如此之大?早期宇宙为什么如此均匀?空间各个方向和不同区域中的膨胀速度为什么这样类同?宇宙背景辐射探测卫星

所发现的少量密度涨落对星系形成至关重要，而这又是如何起源的？

近年来为揭开这些奥秘，人们付出了巨大的努力，所采取的途径是把大爆炸基本理论与高能粒子物理的最新概念相结合。需要强调的是，这种“新宇宙学”所依赖的科学基础，其可靠性还远不及前面所讨论的话题。特别是，这些饶有趣味的过程所对应的粒子能量大大超过了迄今任何已直接观测到的结果，而涉及的宇宙时期所对应的是宇宙刚诞生后远小于一秒的极短暂时刻。那时的条件很可能异常极端，因而唯一合适的途径就是几乎完全只根据理论思想来建立数学模型。

这种新宇宙学的关键假设是，可能发生过一种称之为暴胀的过程。它的基本思想是，在第一秒刚开始的某一时刻，宇宙的尺度突然急剧猛增（暴胀）。为弄清楚这个假设带来些什么，再看一下图 3-2。图上的曲线始终是向下弯的，这表明尽管任意给定的某个空间区域的尺度在增加，但这种增加的速率在减小。与此相反，暴胀意味着在一个很短的时期内，膨胀速度实际上在加快。图 3-3（不按比例地）表示了这种情况。最初，膨胀是缓慢的，然后它加快速度，有一小段曲线笔直向上，最后曲线恢复它的正常走向。但是，图中表示的空间区域的尺度大大超过图 3-2 曲线上同一位置的尺度（比这里面的大得多）。

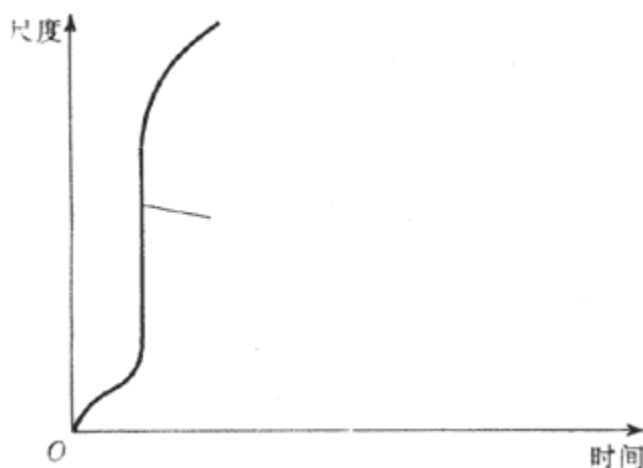


图 3-3 暴胀演化图象 按这个理论，宇宙在大爆炸中起源后不久，它的尺度便突然增大。图中的垂直方向比例已被大大缩小。暴胀相之后，膨胀速度不断减小，其变化方式与图 3-2 所示的情况非常相似。

为什么宇宙表现出这样诡异的行为？请记住，曲线向下弯曲是由于引力的吸引对膨胀起刹车作用的结果。向上弯曲可设想成一种反引力，或斥力，它造成宇宙的尺度增长得越来越快。虽然反引力似乎是一种异端邪说，但一些近代纯理论研究表明，在极早期宇宙由于极端温度和极端密度条件占主导地位，这种效应可能曾经出现过。

在讨论暴胀是怎么回事之前，先说明一下为什么能用暴胀说来解开前面列举的一些

宇宙难题。首先，逐步升级的膨胀可以令人信服地说明大爆炸为什么如此之大。反引力效应是一种不稳定过程，即失控过程，这就是说宇宙尺度呈指数式增加。从数学上说，这意味着一个给定的空间区域在每个固定时间周期里尺度扩大一倍，我们称这种周期为 1 个滴答。2 个滴答之后尺度增大到 4 倍；3 个滴答，尺度增加到 8 倍；10 个滴答，这个空间区域膨胀到 1000 倍以上。因此，一个给定空间区域以逐步升级的速率如气球般地膨胀。计算表明，暴胀纪元末的膨胀速度非常接近于测量值（我将在第六章中严格地解释它的含义）。

暴胀造成的尺度急剧猛增也为宇宙均匀性提供了一种现成的解释机制。任何初始不规则性会被这种空间扩展平滑掉，这非常像一只汽球，当它胀大时其上的皱纹便会消失。同样，不同方向上早期膨胀速度的任何变化也很快被暴胀所淹没，因为暴胀在各个方向上都有相同的作用力，最后，宇宙背景辐射探测卫星所揭示的微小不规则性可用暴胀也许并不是处处都在同一瞬间结束这一事实得到解释（其理由后面马上就要讨论），所以某些区域比其他区域会暴胀得稍多一些。

现在来举一些数字。在最简单的暴胀理论中，暴胀力（反引力）变得异常之强，使得大约每隔 100 亿亿亿亿分之一秒（ 10^{-34} 秒）宇宙尺度就扩大一倍。这几乎是个无限小的时间间隔，它就是前面所说的 1 个滴答。仅仅 100 个滴答后，一个原子核大小的区域就会暴胀到大约 1 光年的直径。这足以轻而易举地解决上面讨论的各种难题。

人们运用亚原子粒子物理理论发现了几种会导致暴胀行为的可能机制。所有这些机制都用到被称为量子真空的概念。为了理解什么是量子真空，首先必须知道量子物理的某些知识。量子理论是自发现诸如热和光之类电磁辐射性质的时候开始发展起来的。虽然电磁辐射以波的形式在空间中传播，然而有时它会表现出类似粒子的行为，特别是光的发射和吸收以一份份微小能量或量子的形式出现。电磁波情况下的量子称为光子。这种波和粒子性质的奇特混合有时称为波粒两象性。现已证明，这适用于原子尺度和亚原子尺度上的一切物理实体。因此，通常认为是粒子的东西，如电子，光子和中子，或者甚至整个原子，都会表现出类似于波的行为。

量子理论的基本原则是沃纳·海森伯（Werner Heisenberg）的不确定原理。根据这一原理，量子物体的所有属性都不具有完全确定的值。例如，一个光子或一个电子不可能同时具有确定的位置和确定的动量。对一确定的时刻，它也不可能有确定的能量。这里我们关心的是能量不确定性。尽管在宏观世界里能量是守恒的（它既不能创造也不会消失），但是在亚原子量子领域里这个定律就失效了。能量可随时自发出现无法预言的变化。所考虑的时间间隔越短，这种量子随机涨落就越大。实际上，粒子可以从我们不知道的某个地方借来能量，只要这份能量马上归还就行。海森伯不确定原理的准确数学形式要求大宗的能量借贷必须很快归还，而少量的借贷则可保留较长的时间。

能量的不确定性会引出一些奇怪的效应，诸如光子那样的粒子可以突然从虚无中生成，不过过后它又马上再度消失，出现这种现象的概率便是上述奇怪效应中的一种。这

种粒子依靠借来的能量，因而也是依靠借来的时间得以生存。我们看不到它们是因为它们只是闪电般地一现即没，但是又确实在原子系统的特性中留下它们曾存在过的痕迹，而这些痕迹是可以测量的。事实上，通常认为的真空确实充满着川流不息的一群群这类瞬时存在的粒子，它们不仅有光子，还有电子、质子相别的所有粒子。为了把这种瞬时粒子与我们比较熟悉的永久粒子相区别，前者称为“虚”粒子，而后者则称为“实”粒子。

除瞬时性外，虚粒子与实粒子是完全相同的。实际上，如果用某种方法从外界补充足够的能量偿还海森伯能量借贷的话，那么虚粒子就有可能升格为实粒子，而且与其他同种实粒子没有任何区别。例如，一个虚电子在典型情况下只能存在大约 10^{-21} 秒。在它短促的生存期中，虚电子并非静止不动，它在消失之前可以走过 10^{-11} 厘米的距离（作为比较，原子的直径约为 10^{-8} 厘米）。如果这个虚电子在这么短的时间内得到能量（譬如说从电磁场），它就未必会消失，而是可以作为一个完全普通的电子继续存在。

尽管看不见这些虚粒子，但它们实实在在存在于真空之中。这不仅因为真空包含一个潜在的永久性粒子库，还因为尽管它们以半真半虚的形式出现，这些幽灵般的量子实体依然会留下它们的活动痕迹，而且可以探测到。例如虚光子的效应之一是使原子的能级发生极少量的偏移。它们也能使电子磁矩发生同样细微的变化。这些细微然而却很重要的变化已用光谱技术精确地测量到。

考虑到亚原子粒子一般不自由移动，但要受到各种与粒子种类有关的力的作用，对上述简单的量子真空图象要作些修正。这种种力也在相应的虚粒子之间发生作用。因此，也许存在不止一种真空态。许多可能的“量子态”的存在是量子物理的普遍特征。最为熟知的是原子的各种能级。这里，一个绕原子核转动的电子可以有某些非常确定的能态，而这些能态又对应着确定的能量。最低的能级称为基态，它是稳定的。较高的能级称为激发态，它们是不稳定的。如果一个电子闯入一个较高的能态，它会向下跃迁返回基态，而跃迁的途径可以不止一种。这种激发态有很确定的“衰变”半衰期。

类似的原理适用于真空。它可以有一种或多种激发态。这些激发态有各不相同的能量，不过它们的实际表象完全相同，即都是真空。最低的能态，也就是基态，有时称为“真”真空，以反映它是稳定态这一事实，大体上对应今天宇宙的真空区域。激发真空则称为“伪”真空态。

应当说，伪真空态仍然是一种纯理论的观念，其性质在很大程度上取决于所用的特定理论。但是，伪真空态很自然地出现在现今所有试图统一各种自然力的理论中。现在已确认的基本力看来有 4 种：日常生活所熟悉的引力和电磁力，以及两种短程核力——弱力和强力。这份清单过去还要长些。例如，电和磁就曾被看作是截然不同的东西，

电与磁的统一过程开始于 19 世纪初。当时，汉斯·克里斯琴·奥斯特(Hans Christian Oersted)发现电流产生磁场，而迈克尔·法拉第(Michel Faraday)则发现运动的磁铁会产生电流。很清楚，电与磁是有内在联系的。但是，直到 19 世纪 50 年代，詹姆斯·克

拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell)才指示了这种联系的细节。麦克斯韦通过一组数学方程精确描述这些“电磁”现象，并预言电磁波的存在。不久，人们便意识到光也是这种波的一个例子，而且还应当存在其他形式的波，如射电波和 X 射线。因此，表面上两种不同的自然力——电力和磁力——原来是单一电磁力的两种表现，它有着自身特有的一些现象。

最近几十年来，这种统一过程有了更深入的发展。根据现在的认识，电磁力和弱核力是有联系的，是单一“电弱”力的组成部分。许多物理学家相信、作为所谓大统一理论的一部分，将来也会证明强力与电弱力有联系。不仅如此，所有 4 种力可能在某种足够深的层次上合成为单一的超力。

企图统一电弱力和强力的一些大统一理论预言了一种最有前途的暴胀力。这些理论的一个关键特征是，伪真空态的能量大得惊人：典型情况是，1 立方厘米的空间含有 10^{87} 焦耳的能量！甚至一个原子的体积也会拥有 10^{62} 焦耳的能量。一个受激原子却只具有 10^{-18} 焦耳左右的能量，两者相比，后者简直是微乎其微。因此，要激发真空，需要极大的能量，而在今天的宇宙中我们不企望会找到这种状态。另一方面，一旦有了大爆炸的极端条件，这些数字就比较说得通了。

与伪真空联系在一起的巨大能量具有强大的引力效应。这是因为能量具有质量，这一点爱因斯坦已经为我们指出了，所以它可以像正常物质一样受引力吸引。量子真空的巨大能量拥有巨大的吸引力：1 立方厘米伪真空的质量重达 10^{64} 吨，这比今天整个可观测宇宙的质量（约 10^{48} ）还大！这种异常的引力对暴胀的产生毫无用处，后者要求某种反引力过程。但是，巨大的伪真空能量是和同等巨大的伪真空压力联系在一起的，而正是这种压力起着奇妙的作用。通常，我们并不把压力看作为引力源，但这种压力却是一种引力源。在一般物体中，物体压力的引力效应与物体质量的引力效应相比是微不足道的。例如，人体重量中只有不到十亿分之一是由地球内部压力产生的，不过，这种效应确实存在，而且在一个压力极其巨大的系统中，压力引力可以与质量引力相比拟。

在伪真空的情况下，既有巨大的能量，又有与之相仿的巨大压力，它的相互争夺对引力的支配权，但是，关键的性质在于压力是负的。伪真空起的作用不是排斥而是吸引。现在，负压力产生负引力效应，这就是所谓的反引力。因此，伪真空的引力作用归结为它的能量的巨大吸引效应和它的负压力的巨大排斥效应之间的竞争。最终压力获得了胜利，其净效应是产生一种非常大的排斥力，它可以在一刹那间把宇宙冲开。就是这种庞大的暴胀推力，使宇宙的尺度以极快的速度即每 10^{-34} 秒增大一倍。

就内禀性质来说，伪真空是不稳定的。像所有的激发量子态一样，它要发生衰变以回到基态——真真空。在几十个滴答之后，它就可能衰变。作为一种量子过程，它必然表现出上面讨论过的无法避免的不可预测性和随机涨落，这些性质都与海森伯不确定原理有关。这意味着衰变的发生就整个空间而言不是均匀的，而是会有涨落。某些理论家认为，这些涨落可能就是宇宙背景辐射探测卫星观测到的强度起伏的缘由。

在伪真空衰变后，宇宙重新恢复它正常的减速膨胀，由暴胀进入爆炸。封闭在伪真空中的能量得以释放，并以热的形式出现。由暴胀产生的巨大膨胀使宇宙冷却，直到温度十分接近绝对零度，然后暴胀的突然结束再次把宇宙加热到 10^{28} 度的极高温度。今天，这个巨大的热库已几乎完全消失，残留下来的就是宇宙背景热辐射。作为真空能量释放的副产品，量子真空中的许多虚粒子获得其中的一部分能量，并转变成实粒子。这些粒子的遗骸留存至今，成为组成你、我、银河系和整个可观测宇宙的 10^{48} 吨物质。

许多一流宇宙学家相信，暴胀宇宙的演化图象是正确的。如果是这样，那就意味着仅经过 10^{-32} 秒之后，决定宇宙基本结构和物理成分的过程，便已告完成了。宇宙在暴胀后肯定经受过亚原子层次上的许多附加变化，使原初物质发展成粒子和原子，而正是这些粒子和原子组成了现代宇宙的原材料。这些进一步的附加变化一直是重点研究的课题。但是，大多数附加的物质过程仅在约最初三分钟后便告完成，这一点已经解释过了。

最初三分钟与最终结局有什么关联？正像射向靶子的子弹，其命运主要取决于枪瞄得是否准，宇宙的命运则完全取决于它的初始条件，两者完全一样。下面我们将会看到，宇宙从初始原点开始膨胀的方式，及大爆炸产物的性质，是怎样决定了宇宙的最终命运。宇宙的创生和终结是不可分割地相互交织在一起的。

第四章 恒星的末日

1987 年 2 月 23 日的夜晚,加拿大天文学家伊恩·谢尔顿(Ian Shelton)正在智利安第斯山上的拉斯坎珀纳斯天文台工作。他的智利籍夜间助手在户外走了一会儿,漫不经心地望了望黑暗的夜空。由于熟悉星空,他很快注意到一件不寻常的事。在大麦哲伦云(LMC)的明亮云块边上有一颗星,它并不特别亮,大约和猎户腰带上其他星的亮度差不多。引起他注意的是以前那里并没有这颗星。

这位助手的发现引起了谢尔顿对这颗星的注意。在几小时内,谢尔顿和他的这位助手发现了一颗超新星的消息闪电似地传遍了整个世界。这是自 1604 年开普勒(Kepler)记录到超新星以来第一颗肉眼可见的这类天体。一些国家的天文学家马上把他们的望远镜对准了大麦哲伦云。随后几个月里,人们对超新星 1987A (译注:超新星以发现的年份加英文字母命名,英文字母 A 表示该年份发现的第一颗超新星)的变化作了最详尽的观测和记录。

在谢尔顿的轰动性发现前几小时,在完全不同的另一个地方——日本神冈地下深锌矿里记录到了又一件不寻常的事件。那个地方一些物理学家正在雄心勃勃地实施一项长期实验,他们的目的是要测试一切物质的基本成分——质子的极限稳定性。70 年代发展起来的一些理论预言,质子也许并不绝对稳定,它们偶而会衰变成某种异乎寻常的放射性变种。如果预言正确,那么这种现象对宇宙的命运将具有深远的意义。我们在以后会看到这一点。

为测试质子衰变,日本实验学家在一个极大的容器中灌满了 2000 吨纯度极高的水,容器周围放置了一些高灵敏度的质子探测器。这些探测器的用途是要记录可能是由单个衰变事件的高速产物所引起的闪烁次数。为减少宇宙射线的影响,实验放在地下进行,不然的话探测器所记录到的就全是虚假事件了。

1987 年 2 月 22 日,神冈探测器突然在 11 秒内触发了不下 11 次。在地球的另一侧,美国俄亥俄州一座盐矿里安装的一个类似的探测器也记录到了 8 次事件。因为 19 个质子的质量同时自行消失是不可思议的,这些事件必有另外的起因。物理学家很快找到了这个原因。他们的仪器所记录下的质子毁灭必定是由另一种更为普遍的过程造成的,这就是质子与中微子的碰撞。

中微子是亚原子粒子,在我的故事中扮演着关键角色,所以值得先对它作一番较为详尽的了解。1931 年,沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)在考察称为 β 衰变的放射性过程中首次推测有中微子存在。在一次典型的 β 衰变事件中,一个中子衰变成一个质子和一个电子。相对来说电子的质量很轻,却携带可观的能量。问题是,每次衰变事件产生的电子似乎有着不同的能量。因为在任何情况下可利用的总能量必然相同,于是看上

去似乎末能量可以与初能量不同。这是不可能的，因为能量守恒是物理学的基本定律，所以泡利认为失去的能量被一种看不见的粒子带走了。所有企图捕获这种粒子的努力都告失败，于是人们开始清楚地认识到，如果存在这种粒子，那么它们必定具有惊人的穿透力。因为任何带电粒子很容易被物质所捕获，所以泡利粒子一定是电中性的，并由此取名为中微子。

虽然当时没有人真正找到过中微子，理论学家却能推算出它的许多性质， β 衰变事件常常会抛出一个带走近乎所有可用能量的电子，几乎什么能量也没留给中微子。这意味着中微子实际上能够以几乎为零能量的形式存在。按爱因斯坦的著名公式 $E = mc^2$ ，能量 E 和质量 m 是等效的，所以零能量意味着零质量。这表明中微子可能是没有质量的，即一种以光速运动的无质量粒子。

还有一个基本性质涉及到亚原子粒子的自旋方式。人们发现，中子、质子和电子总有自旋。这种自旋的大小有固定的值，而且事实上它对所有这 3 种粒子来说都是相同的。自旋是角动量的一种形式。与能量守恒定律一样，角动量守恒也是一条基本定律。一旦中子发生衰变，它的自旋必定保留在衰变产物中。自旋与能量不同，能量始终是相加的，而自旋则可加可减：如果两个粒子自旋方向相同，它们的自旋就相加；如果转动方向相反，它们的自旋便相减。无论哪种方式，只有一个电子和一个质子时，有关自旋的帐就总不能平衡。如果把它们的自旋相加，得出两倍的中子自旋，而两者相减时结果为零。只要中微子带有与其他粒子相同的单位自旋，便能巧妙地克服这一困难。

因此，尽管物理学家以前一直没有检测到中微子，却已经推断它必定是一种零电荷、与电子有相同自旋、没有或几乎没有质量的粒子，它与普通物质的相互作用极其微弱，因而在穿过物质时几乎不留下任何痕迹。简而言之，这是一种会旋转的幽灵。所以，在泡利预言中微子存在之后，过了大约 20 年时间才在实验室里最终得以证实也就毫不奇怪了。核反应堆中所产生的中微子数量极多，因此尽管它们极其难以捉摸，还是能偶而地被检测到。

在神冈铅矿中中微子暴的到达与超新星 1987A 出现决不是某种巧合，于是被科学家用来作为超新星理论的最重要验证。事实上，中微子暴正是天文学家在超新星事件中所预期出现的现象。

虽然“nova”(译注：超新星 supernova 由前缀 super- 和词根 nova 组成)这个词在拉丁文中是“新”的意思，但超新星 1987A 却不是新诞生的一颗星。事实上，它是一颗老年恒星走向死亡前的一次宏伟壮观的爆发。这颗超新星出现在大麦哲伦云中，那是一个 17 万光年远的小星系。它离银河系相当近，因而成为我们银河系的一个卫星系。在南半球肉眼可以见到这个星系，但只表现为一个模糊的光斑，要看清其中一颗颗恒星则需要用高倍望远镜。就在谢尔顿的发现之后几个小时，澳大利亚天文学家已经能在组成大麦哲云的几十亿颗恒星中，证认出哪一颗恒星发生了爆发。这项成就是他们在仔细检查了这个天区的早期底片后完成的。这颗恒星原来是颗典型的 B3 型蓝超巨星，直径

约为太阳的 40 倍，它甚至还有个名字：桑杜里克(Sanduleak) - 69202。

50 年代中期，弗莱德·霍伊尔(Fred Hoyle)，威廉·福勒(William Fowler)和伯比奇夫妇(Geoffreg and Magreet Burbidge)首先研究了恒星爆发理论。为了理解一颗恒星为何会遭受这样一场浩劫，必须知道它内部活动的情况。我们最熟悉的恒星是太阳。与大多数恒星一样，太阳看上去是不变化的。然而事实并非如此。实际上太阳一直在与毁灭它的力作不停的斗争。所有恒星都是些靠引力维持在一起的气体球。如果唯一起作用的力只有引力，那么恒星会因自身巨大的重量很快向内坍缩，要不了几小时便会消亡。没有发生这种情况的原因在于向内的引力被恒星内部压缩气体产生的向外的巨大压力所平衡了。

气体压力与温度之间存在着一个简单的关系；一定体积的气体在受热时，压力以正比关系随温度而上升，反之，温度下降时压力也下降。恒星内部压力极大的原因在于温度高，达几百万开。这种热量是由核反应产生的。在恒星的大半生中，氢聚变成氦是为恒星提供能源的主要核反应，这种反应要求很高的温度以克服作用于核之间的电斥力。聚变能可以使恒星维持几十亿年，不过核燃料迟早会越来越来少，从而使恒星反应堆开始萎缩。发生这种情况时压力支撑已岌岌可危，恒星在这场与引力的长期搏斗中开始溃退。从本质上说恒星已是在苟延残喘，只是通过调整它的核燃料储备来推迟引力坍缩的发生。但是，从恒星表面流出并进入大空深处的能量都在加速恒星的死亡。

依靠氢的燃烧估计太阳可以生存 100 亿年左右。今天，太阳的年龄约为五十亿年，它已消耗了一半左右的核燃料储备。今天我们完全不必惊慌失措。恒星消耗核燃料的速度极大程度依赖于它的质量。大质量恒星核燃料的消耗要比小质量恒星快得多，这是毫无疑问的，因为大质量星既大又亮，因而辐射掉的能量也就多。超额的重量把气体压得很密，温度又高，从而加快了核聚变的反应速度。例如，10 个太阳质量的恒星在 1 千万年这么短的时间内就会把它的大部分氢消耗殆尽。

让我们来观察一下这样一颗大质量恒星的命运。大多数恒星最初主要由氢组成。氢“燃烧”使氢核（质子）聚变成氦核，后者由两个质子相两个中子组成。详细过程是很复杂的，不过在这儿无关紧要。氢“燃烧”是最为有效的核能源，但却不是唯一的核能源。如果核心温度足够高，氦核可以聚变成碳，并通过进一步的核聚变生成氧、氖以及其他一些元素。一颗大质量恒星可以产生必要的内部温度——可达 10 亿开以上，从而使上面的一系列核反应得以进行，但随着每一种新元素的慢慢出现产能率下降。核燃料消耗得越来越快，恒星的组成开始逐月变化，然后逐日变化，最后每小时都在变化。它的内部就像一个洋葱，越往里走，每一层的化学元素以越来越疯狂的速度依次合成。从外部看来，恒星像气球那样膨胀，体积变得十分巨大，甚至比整个太阳系还大。这时天文学家称之为红超巨星。

这条核燃烧链终止于元素铁，因为铁有特别稳定的核结构。合成比铁更重元素的核聚变实际上要消耗能量而不是释放能量。因此，当恒星合成了一个铁核，它的末日便来

临了。恒星中心区一旦不能再产生热能，引力必然会占尽上风。恒星摇摇晃晃地行走在灾变不稳定性的边缘，最后终究跌进它自己的引力深渊之中。

这就是恒星内部所发生的事，而且进行得很快。由于恒星的铁核不可能再通过核燃烧产生热量，因而也就无法支撑它自身的重量，它便在引力作用下剧烈压缩，甚至把原子都碾得粉碎。最后，恒星核区达到原子核的密度，这时一枚顶针的体积便可容纳近 1 万亿吨的物质。在这一阶段，恒星的典型直径为 300 公里，而核物质的坚硬性格引起恒星核区的反弹。由于引力的吸引作用极强，这种强力反弹所经历的时间只有几毫秒。当这场戏剧性事件在恒星中心区展现之际，外围各层恒星物质在一场突发性的灾变中朝核区坍缩。数以万亿吨计的物质以每秒几万公里的速度向内暴缩，与正在反弹着的比金刚石壁更为坚硬的致密恒星核区相遭遇，发生极为强烈的碰撞，同时穿过恒星向外发出巨大的激波。

同激波一起产生的还有巨大的中微子脉冲。这些中微子是恒星在最后核嬗变期间从它的内区突然释放出来的。在这次核嬗变中，恒星内原子的电子和质子紧紧地挤压在一起而形成中子，恒星核区实际上成了一个巨大的中子球。激波和中微子两者一起携带着巨额能量穿过恒星外部各层向外传递。被压紧了的物质的密度非常之高，即使是极其微小的中微子也得费尽周折才能冲开一条出路。激波和中微子携带的能量有许多为恒星外层所吸收，结果导致恒星外层发生爆炸。这是一场核浩劫，其剧烈程度是无法想象的。在几天时间内恒星增亮至太阳光的 100 亿倍，不过再经过几个星期后又渐渐暗淡下去。

在像银河系这样的典型星系中，平均每百年出现 2 至 3 颗超新星，历史上天文学家对此已有所记载，并深感惊讶。其中最著名的一个是由中国和阿拉伯观测家于 1054 年在巨蟹座中发现的。今天，这颗已遭毁灭的恒星看上去就像一团很不规则的膨胀气体云，称为蟹状星云。

超新星 1987A 爆发时，不可见的中微子闪光充斥了整个宇宙。这是一个强度极大的脉冲。虽然地球离爆发点有 17 万光年之远，但每平方厘米仍能穿过 1000 亿个中微子。十分幸运的是，地球上的居民丝毫没有察觉到自己曾在顷刻间被来自另一个星系的数以万亿计的粒子所穿透。不过，位于神冈和俄亥俄州两地的质子衰变探测器却拦截了其中 19 个中微子。要是没有这种仪器，中微子便会像 1054 年事件那样在毫无察觉之中逝去。

虽然超新星会给有关恒星带来死亡，但是爆炸也会带来积极的一面。巨大能量的释放使恒星外层得以加热，这种加热非常有效，因而就有可能在短暂时期内发生进一步核聚变反应，不过这些核反应是吸收而不是释放能量。比铁更重的元素，如金、铅和铀，就是在最后而又最强的那个恒星熔炉中冶炼出来的。这些元素，连同该聚变早期阶段产生的较轻元素（如碳和氧）一起被抛入太空，并且在那儿同许许多多其他超新星的碎屑混合在一起。在数以十亿年计的漫长时光中这些重元素也许会被掺入下一代的恒星和行星中。要是没有这些元素的产生和传播，就不可能有地球一类行星。使生命得以出现的

碳和氧，我们戴的金戒指，屋顶上的铅板以及核反应堆中的铀棒，它们之所以能在地球上存在，都得归功于一些恒星在濒临死亡时所发出的呻吟，而这些恒星甚至在太阳诞生之前就消匿不见、无影无踪了。一种令人感兴趣的观点认为，组成我们身体的原材料归根结底来自早就死亡了的恒星的核灰烬。

超新星爆发不一定会彻底摧毁一颗恒星。虽然大多数物质随这场灾变而消散，触发这场事件的暴缩核还留在原地。但是，它的命运也是危如累卵。如果核质量很小，比如说只有一个太阳质量，那么它会形成一颗小城市那么大小的中子球。这颗“中子星”非常可能作极快的旋转，也许每秒钟转数会高达一千多圈，也就是说它的表面线速度达到光速的百分之十。这是因为暴缩极大地加快了原始恒星相对缓慢的自转速度，其原理与溜冰运动员收起双臂时会使自转加快的道理一样。天文学家已探测到许多这类快速自转的中子星。但是，随着天体能量的损失，自转很快会慢下来。例如，蟹状星云中央的中子星现在已减慢到每秒只转 33 圈。

如果核的质量更大些，如几倍太阳质量，它就不可能以中子星的形式安居下来。引力实在太强了，即使中子物质（现在所知最结实的物质）也不能抵抗进一步的收缩。这时必然出现比超新星更可怕、更具灾变性的事件，恒星核继续坍缩，用不了 1 毫秒，它就消失在一个黑洞之中，彻底湮没。

因此，大质量星的命运是把自身撕成碎片作为遗迹留下一颗中子星，或一个黑洞，而外面则包围着抛射出来的弥漫气体。没有人知道已经有多少颗恒星以这种方式寿终正寝。但是，仅仅在银河系内可能就有数十亿颗这类恒星残骸。

我在童年时就为太阳也许会发生爆炸而提心吊胆。不过，太阳根本不可能变成一颗超新星，这是因为它太小了。小质量恒星的命运与它们的大质量兄弟完全不同，远远没有后者那么剧烈。首先，吞食燃料的核过程进行得比较温和。事实上，处于恒星质量范围低端的一颗矮星可以持续发光 1 万亿年。其次，一颗小质量恒星所能产生的内部温度是不够高的，不足以合成铁，因此不会出现一场灾变性的暴缩。

太阳是一颗典型的质量不大的恒星，它平稳地燃烧自身的氢燃料，并把核区转变成氦。目前，就有些核反应来说它的内核是不活泼的，因此内核无法提供足够高的热能以维持太阳不出现毁灭性的引力收缩。为了防止坍缩的发生，太阳必须使它的核区活动向外扩展，以寻找未经反应的氢。同时，氦核逐步收缩。因此，尽管在过去几十亿年中太阳内部发生了一些变化，其外貌却几乎没有任何的改变。它的体积将会膨胀，但表面温度却略有下降，颜色也会变得红一些。这种趋势一直要持续到太阳变成一颗红巨星，那时它的直径也许会增大 500 倍。天文学家对红巨星是很熟悉的。夜间天空中几颗很著名的亮星，如毕宿五（金牛 α ）、参宿四（猎户 α ）和大角（牧夫 α ）都属于这一类。红巨星阶段标志着小质量恒星生命结束期的开始。

虽然红巨星相对来说温度比较低，但是它的直径很大，因而有着巨大的辐射表面，

这意味着总光度更大了。随着热流量增强并袭击太阳系行星时，这些行星将面临一个艰难的时期，这一阶段大约要延续 40 亿年。在这一阶段结束之前，地球早就变得不适应人类居住了，海洋因蒸发而干涸，大气也都被剥离。随着太阳不断地膨胀变大，它首先会吞没水星，接着是金星，最后连地球也都落入熊熊燃烧着的太阳壳层之内。即使经历了彻底的焚烧和葬礼，我们的行星缩成一堆灰烬之后，它仍然固守着自己的运动轨道。太阳那红色炽热的体密度非常之低，接近于真空，因而对地球的运动几乎不会产生任何阻力。

我们能在宇宙中生存，这件事情的本身得归功于太阳一类恒星的极端稳定性。它们可以在几十亿年时间内稳定地燃烧而几乎没有发生任何变化，这段时间之长已足以使生命进化并繁荣起来。但是，随着红巨星阶段的到来，这种稳定性便不复存在。太阳一类恒星在其生涯中红巨星后的各个阶段情况复杂，活动激烈而又变化无常；相对而言它的行为和外貌会发生较快的变化。上了年纪的恒星可能会经历几百万年时间的脉动，或抛掉外层气体。恒星核区中的氦可能会点燃，生成碳、氮和氧，并提供能使恒星维持较长一段时间所必须的能量。一旦外壳被抛入太空，恒星便不再继续剥落，最后露出的是它的碳氧核。

在这一复杂活动时期以后，小质量和中等质量恒星不可避免地会向引力屈服，并开始收缩。这种收缩是不可逆转的，并一直要进行到恒星被压缩至小的行星那么大为止。恒星变成一个天文学家称之为白矮星的天体。因为白矮星非常之小，所以极其暗弱，尽管它们的表面温度实际上要比太阳表面温度还高得多。在地球上只有用望远镜才能看到它们。

白矮星就是太阳遥远未来的归宿。当太阳到达那一阶段时，它仍能在好几十亿年时间内维持炽热状态。它的绝大部份密度非常高，结果内部热量被有效地封闭起来，其绝热性能比我们现在已知道的最好的绝热体还要好。但是，热辐射在向寒冷的外部空间缓慢地泄漏，而由于内部核熔炉永久性地关闭，因而再也不能指望有任何燃料贮备来补充这种热辐射。我们曾经拥有过的太阳现在成了白矮星残骸，它将非常非常缓慢地冷却下来并变得越来越暗，直到进入它的最终变化形态。在这一过程中它逐渐变硬，成为一种刚性极好的晶体。最终，它会继续变暗直至完全消失，销声匿迹于黑暗的太空之中。

第五章 黑夜降临

银河系闪烁着 1000 亿颗恒星的光芒，它们中的每一个又都必然面临末日的到来。在 100 亿年后，我们现在所见到的大多数恒星将会从视线中消失，因缺乏燃料而死去，成为热力学第二定律的牺牲品。

但是，银河系将依然星光闪烁，因为即使一些恒星死亡了，新的恒星会生而代之。在银河系的旋臂，如太阳目前所在的旋臂中，气体云在引力作用下收缩、坍缩和碎裂，并触发一连串的恒星诞生。看一下著名的猎户座，就会发现这种恒星苗圃中的活动情况。猎户“佩剑”（在北半球看来它好像被挂在腰带的下方），中央有一团黑糊糊的绒毛状光斑。实际上它不是一颗恒星而是一团星云。在这个巨大的气体云中散布着一些明亮的年轻恒星。天文学家最近通过观测红外辐射（而不是可见光），已窥察到那儿处于最初形成阶段的恒星，它们仍然被气体和尘埃所包围，亮度也就降低了。

只要有足够的气体，在我们星系的旋臂中将会继续形成新的恒星。银河系气体一部分是还没有聚集成恒星的原初物质，而另一部分气体则是从老年恒星以超新星碎屑、星风、小爆发和其他一些过程的形式抛出来的。显然，这种物质的再循环过程是不可能无止境的。当老年恒星死亡并坍缩成白矮星、中子星或黑洞时，便不能再对星际气体进行补充。原初物质会一点一点地并入新生的恒星，直到全部用完。当最后一代恒星走完它们的生命轮回而死亡时，星系便不可避免地开始变暗。这种变暗过程会拖得很长，要经过好几十亿年之后，最小最年轻的恒星才能结束它们的核燃烧，并收缩成白矮星。但是，作为缓慢而痛苦挣扎的结局，永恒的黑暗终将来临。

类似的命运等待着所有散布在广袤空间中的其他星系。现在，整个宇宙因核动力的丰富能量而显得绚丽多采，但它终将把这种宝贵的能源消耗殆尽。光辉时代总要永恒地结束，一去而不复返。

但是，当宇宙之光熄灭的时候，宇宙的末日还不会来临，因为还存在另一种比核反应更强大的能源。引力，这种在原子层次上最弱的自然力，在天文尺度上可以变成占绝对优势的力。引力的效应也许是相对温和的，但是这种力却是百折不挠，永远存在。在几十亿年时间里，恒星借助核燃烧来维持自己，抵抗自身的重量。但是，每时每刻引力都在寻求机会，以图把恒星压得粉碎。

原子核中两质子间的引力仅仅是核力的 10 万亿亿亿分之一 (10^{-37})。不过，引力具有累积的特性。恒星中每增加一个质子，总重量就会增加，最终引力会变得压倒一切。正是这种压倒一切的力为我们提供了打开巨大能库的钥匙。

没有一种天体能比黑洞更生动地说明引力的威势了。这里，引力获得绝对的胜利，

恒星被压得荡然无存，要说留下痕迹也只是使周围时空变得无限弯曲。关于黑洞，有一个绝妙动人的思想性实验。想象有一小球，譬如一个普通的台球，从远处落入黑洞。这个球钻入黑洞后会从视野中消失，它就这样丢失了，再也找不回来。但是，它在黑洞的结构中会留下曾经存在过的一丝痕迹。作为黑洞，吞没这个球的结果是会变得稍稍大一点。计算表明，如果这个球从静止状态直接落向黑洞中心，黑洞增加的质量将等于小球原来的质量，任何能量或质量都没有逃逸出去。

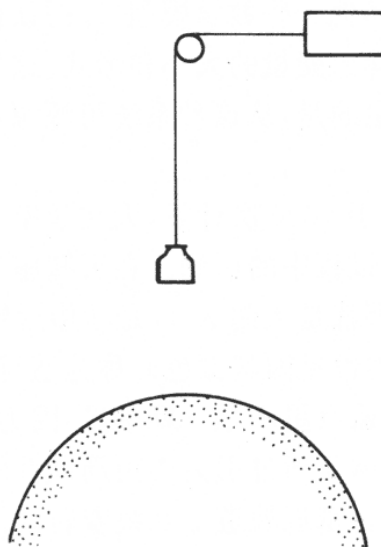


图 5-1 在这项理想化的假想性实验中，绳子系住的重物用一固定的滑轮系统（图中未画出固定装置）朝黑洞表面慢慢下降。结果，下降的重物会做功，并把能量释放给盒子。当重物接黑洞表面时所释放的总能量便趋近于重物的全部静止质量能。

现在来考虑另外一个实验，实验中的小球是慢慢地向黑洞下降，用一根带子系在小球上就能做到这一点。把这根带子穿过滑轮连到一个可使带子放松的滚筒上（图 5-1，假设这根带子没有弹性，也没有重量。这只是一种习惯假定，以避免讨论的复杂化）。小球下降时会释放出能量，如通过与滚筒连在一起的发电机的转动便能做到这一点。小球越靠近黑洞表面，黑洞对小球施加的引力越强。因此小球的重量增加，而它对发电机所作的功便越来越大。简单的计算可以求出小球在到达黑洞表面之前总共可以把多少能量赋予发电机。在这种理想情况下，答案是相当于这个小球全部静止质量的能量。

回想一下爱因斯坦的著名公式 $E = mc^2$ ，它告诉我们质量 m 所相当的能量为 mc^2 。利用黑洞，人们原则上可以收回这份能量。对一个重 100 克的台球来说，这份能量意味着约 10 亿千瓦时的电功率（光速 c 为每秒 30 万公里）。作为比较，太阳通过核聚变燃烧 100 克燃料，所释放的能量还不到这个数字的百分之一。所以，原则上引力能的释放比作为恒星能源的热核聚变强 100 倍以上。

当然，上述两种假设情况完全是不现实的。毫无疑问，天体在连续不断地落入黑洞，

但决不是准确地沿径向下落,也绝对不会以最有效的汲取能量方式悬挂在滑轮上。因此,实际发射的静止质量能量介于零和百分之一百之间,具体来说究竟有多大比例则取决于物理环境。在过去的几十年里,天体物理学家进行了广泛的计算机模拟,并研究了其他一些数学模型,以图认识气体在旋入黑洞时的行为,并估计所释放能量的大小和形式。这里涉及的物理过程非常复杂,但可以肯定的是,从这种系统可源源不断地输出巨大的引力能。

一次观测等价于 1000 次计算,天文学家一直在广泛地搜索可能正处于吞食物质过程中的黑洞。在天鹅座有一个看来很令人相信是黑洞的系统,那就是天鹅 X-1,光学望远镜发现了一个巨大而又炽热的恒星,这类恒星因其颜色而称为蓝巨星。天文学家从它的光谱可以知道这颗蓝巨星不是一颗单星,因为它表现出节律摆动,说明附近有一个天体正通过引力作用周期性地牵制它。很明显,这颗星和另一个天体在密近轨道上互绕着转动。但是,光学望远镜怎么也看不到它的伴星;它要么是个黑洞,要么是颗很暗的致密星。它是个黑洞只是一种可能,而决不是证据。

进一步的线索来自对这个暗天体质量的估计。只要知道蓝巨星的质量,暗天体质量便可按牛顿定律导出。为了做到这一点,可利用恒星质量和它的颜色之间所存在的密切关系:大质量恒星往往温度很高,因而呈蓝色。计算表明,这颗不可见伴星的质量为几倍的太阳质量。很清楚,这不是一颗普通的暗小恒星,所以它必定是一个已经历了坍缩过程的大质量星,如白矮星、中子星或黑洞。但鉴于一些带根本性的物理学原因,这个大质量致密天体不可能是白矮星或中子里。问题在于,它有很强的引力场,而这种引力场会力图把这个天体挤压得粉碎。要避免完全坍缩成一个黑洞,必须内部存在某种压力,而且强度要足以同重力的镇压力相抗衡。但是,如果这个坍缩天体有几倍太阳质量,那么,就现在所知,没有一种力可抵挡这种能压碎一切的物质重量。事实上可以证明,如果恒星核区足够坚硬而不会被压碎,则核区物质中的声速必然会超过光速。因为这是违背相对论的,所以大多数物理学家和天文学家相信,在这种环境下黑洞的形成是必然的。

但是,决定性证据完全来自另一项观测。正如天鹅 X-1 的名称所示,这个系统是一个强 X 射线源,而 X 射线可用特别设计的星载传感器来加以探测。根据天鹅 X-1 的暗伴天体是一个黑洞的假设,理论模型令人信服地给出了它的 X 射线流量。通过计算得出的黑洞引力场很强,因而能从蓝巨星中吸取物质。这些掠夺过来的气体在拉向黑洞并最终湮没的过程中,系统的轨道转动会使这些下落物质绕黑洞作涡旋式运动,并形成盘。这种盘不可能完全稳定,因为近中心的物质绕黑洞的转动比外边缘附近物质的转动快得多,而粘滞力则力图消除这种转动差异。结果是气体被加热,最后所达到的温度很高,因而不仅能发射可见光,而且能发射 X 射线。这相当于损失轨道能量,从而使气体缓慢地旋入黑洞。

因此,关于天鹅 X-1 中存在黑洞的证据,有一系列相当长的推理过程。它既涉及观测细节,也用到理论模型。这也正是近年来许多天文学研究的典型特点。任何单一的证据不能令人信服,但是把对于天鹅 X-1 和许多其他类似系统的各种研究综合起来考

虑，便有力地说明了黑洞存在的可能性。可以肯定地说，黑洞解释是最简洁也是最自然的。

对于更大黑洞的活动，可以预期会出现更为壮观的效应。现在看来，许多星系的核心很可能包含超大质量黑洞，其证据是在这些星系核中观测到恒星在很快地运动，并且明显趋向一个有很强引力作用的高度致密天体。对这种天体质量的估计表明，它们可能包含了相当于 1000 万到 10 亿个太阳的物质，这么大的质量使它们对任何漂泊到附近的物质有一种贪婪的吞食本能。恒星、行星、气体和尘埃都可能为这类怪物所捕获。物质下落过程有时很可能非常激烈，以致会改变星系的整体结构。天文学家对各种各样活动星系核十分熟悉。有些星系的外貌确实确实呈现有爆发活动，许多活动星系是强射电源、强 X 射线源，或其他能量形式的强源。最与众不同的是一类具有巨大气体喷流的活动星系，喷流可长达数千甚至几百万光年。某些这类天体的能量输出之大简直令人难以置信。所谓类星体（或者说类似恒星状的天体）是一些极其致密的天体，直径可能只有 1 光年，所以它们看上去像是一些恒星，但所发出的辐射能却与数以千计的普通星系的辐射一样多。

许多天文学家相信，这类受到严重扰乱的天体的中央发动机是一些巨大的旋转黑洞，它们正在摄取附近的物质。任何一颗恒星只要靠近黑洞，就很可能首先为黑洞的引力所撕裂，或者因与其他恒星发生碰撞而碎裂。这些被撕裂的物质可能形成一个热气体盘，它绕着黑洞旋转，并慢慢地向内沉落，这跟天鹅 X-1 的情况一样，只是尺度要大得多。于是，随着物质的内沉，大量的引力能沿黑洞的自转轴方向释放出来，从而产生一对方向彼此相反的喷流。这种能量释放机制和喷流的形成可能是很复杂的，它们不仅涉及引力，还涉及电磁力、粘滞力和其他一些力的作用。这一领域一直是理论和观测工作的重点研究课题。

银河系又会怎样呢？是不是我们的银河系也会以这种方式遭到破坏呢？银河系中心位于人马座，离开我们有 30000 光年之远。它的内区被大量的气体尘埃云所遮蔽，但是利用射电、X 射线、 γ 射线和红外辐射探测器，天文学家已经能够识辨出在那儿有一个高度致密而又蕴藏巨大能量的天体，称为人马 A^* 。尽管人马 A^* 的尺度不会超过几十亿公里（按天文标准，这是很小的），但却是银河系中最强的射电源。它的位置与一个很强的红外源相重合，而且同一个 X 射线天体靠得很近。虽然情况十分复杂，但那里隐藏着一个黑洞的可能性看来正在增大，而且用它至少可以解释若干观测现象。不过这个黑洞的质量可能不大于 1000 万倍太阳质量，正好处于超大质量范围的下限。没有任何证据表明它有其他某些星系核中所出现的那种大规模的能量发射和物质抛射的现象，但这也可能是由于这个黑洞目前正处于相对平静阶段。未来的某个阶段，也许在接收到更多的补充气体后，它可能会被激活。如果是这样的话，银河系核会变成激烈活动的星系核，虽然它不大可能会像我们所知道的其他许多星系那样遭到严重破坏。现在还不清楚这种激活对位于银河系旋臂上的恒星和行星会有什么样的影响。

只要附近还有物质供应给它，黑洞就会继续释放被吞食物质的质量能。随着几十亿

年时光的流逝，越来越多的物质被黑洞所吞噬，结果使黑洞变得更大，食欲更旺盛。这种魔鬼般的黑洞会通过其强大的引力场使偶尔靠近的天体快速地吞噬入其空腹之中，而且由于引力辐射，一种极其微弱但最终起决定性作用的引力过程，最终也会使在很远的轨道上绕其旋转的恒星难逃厄运。

在 1915 年提出广义相对论后不久，爱因斯坦发现引力场有一个引人注目的特性，即这些引力场方程预言存在具有波动性质的引力振荡，它们的传播速度就是真空中的光速。这种引力辐射使人想起电磁辐射，如光波和无线电波。不过，尽管引力辐射可以携带很多能量，但在物质作用的程度上它不同于电磁辐射。无线电波很容易被像金属丝网那样的小巧结构所吸收，而引力波的作用则非常微弱，它可以畅通无阻地穿过地球而几乎毫无损耗。如果能做成一个引力激光器则需要 1 万亿千瓦的射束才能煮沸一壶水，效率只相当于 1000 瓦的电热丝。引力辐射是相当微弱的，究其原因在于事实上引力是自然界内各种已知力中最微弱的一种。例如，原子中引力与电力之比约为 10^{-40} 。我们之所以会注意到引力的唯一原因完全在于它的累积效应。因此，它对行星这种较大天体起着决定性的作用。

引力波的效应是极其微弱的，它们的产物也毫不显眼。原则上说，只要质量受到扰动，就会产生引力波。例如，地球绕太阳的运动将发射出一系列连续的引力波并进入银河系，但输出的总功率仅有 1 毫瓦。这份能量损耗会造成地球轨道的减小，但减小的速率慢得出奇：每 10 年大约减小 1000 万亿分之一厘米。

但是，对于以接近光速运动的大质量天体来说，情况便截然不同了。有两种现象可能导致重要的引力辐射效应。一种是突发性的激烈活动事件，如超新星爆发。或恒星坍缩形成黑洞。这类事件的结果是发射短暂的脉冲式引力辐射，也许只能持续几个微秒，但通常会携带 10^{44} 焦耳能量（与太阳所输出的热量相比，后者约为每秒 3×10^{26} 焦耳）。另一种是大质量天体彼此作高速互绕转动时的那种比较慢也比较规则的运动。例如，一对密近双星会产生大流量的引力辐射。如果其中的两颗恒星是坍缩天体，如中子星或黑洞，那么这一过程便特别有效。天鹰座里有两颗作互绕轨道运动的中子星，相距仅为几百万公里。它们的引力场极强，每转动一周所需要的时间还不到 8 个小时，因此这两颗恒星的运动速度同光速相比也是相当可观的。这种非同寻常的奔跑极大地放大了引力波的发射率，结果，轨道的每年减小量便可以测量出来（运动周期约改变 75 微秒）。随着这两颗恒星向内盘旋接近，发射率将逐步上升，这就注定它们在 3 亿年后会彼此相撞。

天文学家估计，每个星系大约每 10 万年发生一次这类双星系统的合并事件。这种天体密度非常大，引力场极强。在恒星碰撞前的最后时刻，它们将以每秒几千圈的速度互绕转动，同时引力波的频率则急剧升高，并发出持有的吱吱声。爱因斯坦的公式预言，引力的输出功率在这最后阶段中将是异常惊人的，而且轨道会迅速坍缩。恒星的形状会因彼此间的引力牵拉而严重变形，因而在接触前的瞬刻，它们看上去就像一根急剧旋转的巨型雪茄。最后的合并将是乱糟糟的，两颗恒星并合成一个复杂而疯狂跳动的团块，

它会发出大量的引力辐射，到它安定下来之时已大致成为球形。这个球就像一个怪铃，以一种特殊的振动方式摇晃、颤动。这种振荡也会产生引力辐射，这样就会进一步消耗天体的能量，直至它最后安宁下来，变成毫无生气的天体。

虽然引力辐射过程相对来说是缓慢的，但很可能对宇宙的结构具有深远的长期效应。因此，科学家们力图通过观测来证实他们关于引力辐射的思想，而这一点是极为重要的。对天鹰座中那个双中子星系统的研究表明，它们的轨道正在减小，而减小的速率恰好与爱因斯坦理论的预言相一致。因此，这个系统提供了发射引力辐射的直接证据。但是，更具有决定性意义的试验要求在地球上的实验室里探测到这种辐射。许多研究小组已建造一些设备用以记录引力波爆发那稍纵即逝的信息，但到目前为止所有这类装置都不够灵敏，无法探测到引力辐射；很可能我们只有在新一代探测器诞生之后才能完全证实引力波的存在。

两颗中子星的合并可能会产生一颗更大的中子星或者一个黑洞。一颗中子星和一个黑洞的合并，或两个黑洞的合并，则必定产生一个黑洞，这一过程同样会伴有引力波能量损失，接着是复杂的振颤或运动，而这种运动会因引力波能的损失而慢慢地衰减下去。

探讨两个黑洞合并时所释放的引力能的理论极限是很有意义的。在 70 年代早期，罗杰·彭罗斯(Roger Penrose)、霍金、勃朗顿·卡特(Brandon Carter)、雷莫·鲁菲尼(Remo Ruffini)、拉里·斯玛尔(Larry Smarr)和其他一些人已经完成了有关这些过程的理论工作。如果两个黑洞有相同的质量，并且无旋转，那么能释放出大约 29% 的总静止质量能。如果以某种方式对这两个黑洞加以巧妙的处理，那么这些能量不一定完全以引力辐射的形式出现。但是，对于自然并合体，大部分能量就应当以这种极其难以察觉的形式释放出来。如果黑洞以物理定律所允许的最大速度（粗略地说就是光速）在自转，而且以反向旋转的方式沿着它们的自转轴并合，那么就会有 50% 的质量能发射出来。

即使有这么大的比例也还不是理论极限。可能存在带电荷的黑洞。一个带电黑洞既有电场又有引力场，两者都可以储存能量。如果一个带正电的黑洞遇上另一个带负电的黑洞，就会发生“放电”，在这一过程中所释放的不仅有引力能而且还有电磁能。

事实上，给定尺度（或质量）的黑洞只能携带不超过某个极大值的电荷量，因此这种放电存在某个极限。对无自转黑洞，这个极大值可由如下的考虑来决定。设想有两个带有等量电荷的相同黑洞，黑洞的引力场会在它们之间产生吸力，而电场则产生斥力（类似于电荷相斥）。当荷质比达到某个临界值时，这两种相反的力恰好平衡，于是在两个黑洞之间便不存在净力。正是这个条件决定了黑洞可以包含的极限电荷量。你也许不知道，如果设法增加黑洞的电荷使之超过这个极大值，将会发生什么情况。要做到这一点的一种途径是强迫更多的电荷注入黑洞。这种做法会起到增加电荷的作用，但为克服电斥力做功就要施加能量，这份能使传递给了黑洞。因为质能相当（记住 $E = Mc^2$ ），黑洞的质量就增大，体积也随之变大。简单的计算表明，在这一过程中质量的增加要比电荷增加得更多，结果荷质比实际上减少，而企图超过这个极限的努力终告失败。

带电黑洞的电场对黑洞的总质量是有贡献的。对携带最大允许电量的黑洞来说，电场代表了一半质量。如果两个无自转黑洞都带有极大电荷，但电荷的符号相反，那么它们彼此间存在两种吸引力：引力吸引和电磁吸引。当它们并合时，电荷中和，而电能就能被提取出来。理论上说，它能达到这种系统总质量能的 50%。

如果两个黑洞都在自转，并带有极大相反电荷，那么所提取的能量便达到绝对上限。这时，总质量能的三分之二可以释放出来，这个比例是很高的。当然，这种数值只有理论上的意义，因为实际上黑洞不可能携带大量的电荷，两个黑洞也不可能以这种最佳方式并合，除非有一个技术发达的社会能对它们实施巧妙的人为控制。然而，即使两个黑洞的低效率合并也可能把这两个天体总质量能的可观部分几乎在瞬息之间释放出来。在它好几十亿年的生涯中，恒星依靠核燃烧大约释发了百分之一的质量，相比之下可谓微不足道。

这些引力过程的意义在于，在恒星的核燃烧结束后，它的死亡之旅仍是漫漫无期的。作为一个坍缩后的残骸，它还有潜力通过引力释放能量，而且远远超过当它还是个灼热气体球时由热核过程所放出的能量。当这个事实大约在 20 年前被人们认识之时，物理学家约翰·惠勒（John wheeler，他是最早提出“黑洞”这个词的人）设想有那么一个文明世界，由于它们对能量的需求不断增加，结果便放弃了自己的恒星，并在一个自转黑洞周围安居下来。每天，这个社会的废物被装上载重卡车，并通过一条经仔细计算过的弹道送往那个黑洞。在接近黑洞时，卡车上的废物就卸下来倒入黑洞。通过这种方式，废物便一劳永逸地处理掉了。下落的废物沿着与黑洞自转方向相反的路径飞行，它会影响黑洞的自转，使自转速率稍稍减慢。于是，黑洞的自转能就释放出来，而文明世界便可以利用它为自己的工业提供能源。因此，这个过程具有彻底销毁一切废物并把它们完全转变成能量两大优点！文明世界可以在需要的时候通过这种方式，从死亡之星获取能量，而且能量的供应要比恒星在核燃烧阶段所发出的大得多。

虽然利用黑洞能是一种科学幻想，但是，许多物质将会在黑洞内自然地寿终正寝。它们可以是坍缩恒星的一部分，也可以是偶然相遇而被吞食的碎片。凡是在我作黑洞讲演的时候，人们老是要问进入黑洞的东西会发生什么情况。简单的答复是：我们不知道。老实说，我们对黑洞的认识几乎完全基于理论考虑和数学模型。事实上，按黑洞的定义，即使我们非常靠近黑洞来进行观测（这是做不到的），我们不能从外部世界观测到黑洞的内部，也永远不可能知道它里面发生什么情况。然而，首先用来预言黑洞存在的相对论，也可以用来预言宇航员在掉进黑洞时的经历。下面便是这种理论推测的大致情况。

黑洞的表面实际上只是一种数学图象，那里没有真正的一层“膜”，而只是一无所有的空间。那位下落中的宇航员在进入黑洞时，看不到任何在物理学意义上特别与众不同的情景。但是，这个表面确实有着某种引人注目的物理学含义。黑洞内部的引力非常强，能俘获光，也就是把向外跑的光子重新拉回来，这意味着光无法逃离黑洞。黑洞之所以从外面看上去是黑的就是这个原因。因为没有一种物体或者信息可以比光跑得更快，所

以任何东西一旦进入黑洞就没法逃出去。黑洞内所发生的事件对外部观测者来说永远是个秘密。因此，黑洞的表面被称作“事件视界”，因为它把从远处可以目睹的外部事件与不可目睹的内部事件分隔开来了。但是，这个效应仅是事情的一个方面。当宇航员进入事件视界以内的区域，他仍然可以看到外部世界，尽管在外面的任何入永远也不能再见到他。

当宇航员越来越深入黑洞时，引力场变得更强了。有一种效应使他的身体变形。如果他下落时脚在前面，那么他的双脚就比他的头更接近黑洞中心，因而脚所处的引力更强些。结果、他的脚所受到的往下拉的力会比头部更利害，这样一来他就拉长了。与此同时，他的双肩会沿着向中心会聚的方向拉向黑洞中心，所以他的两边便要受到侧向的挤压。这种拉长和挤压的过程有时称作拉面过程(Spaghettification)。

理论研究表明，在黑洞中心引力的增强是没有上限的。因为引力场表现为时空的弯曲，或者说翘曲，所以随着引力的不断增强，时空扭曲也就无止境地越来越利害。数学家把这种特征称作时空奇点。它代表空间相时间的边界（或者说边缘），穿过这个边界，正常的时空概念不再连续。许多物理学家相信，黑洞内的这个时空奇点名副其实地代表了空间和时间的终结，与它相遇的任何物质将会完全湮没。如果情况确实如此，那么组成宇航员身体的原子甚至会在 1 纳秒的超级拉面过程中在这个奇点内化为乌有。

要是黑洞的质量为 1000 万个太阳质量，即与银河系中心可能存在的黑洞质量差不多，那么，这位宇航员从事件视界向湮没奇点下落所经历的时间大约为 3 分钟。这最后的 3 分钟会是很不舒服的。实际上，早在到达奇点之前，拉面过程就已把这个不幸的人杀死了。在这最后阶段，他是无论如何也见不到那个即将完全毁灭他的奇点的，因为光不可能从奇点逃逐出来。只有一个太阳质量的黑洞其直径大约为 1 公里，对于这样黑洞，从事件视界到奇点的旅程只需要几微秒。

虽然从这位下落宇航员的参考系来看，毁灭前的时间只是一瞬间，但从远处来看，黑洞的时间扭曲使得宇航员最后的旅程表现为一种慢动作。当宇航员接近事件视界时，在他附近事件发生的过程对遥远的观测者来说似乎变得越来越慢。事实上，宇航员似乎必须要经过无限长的时间才能到达事件视界。所以，宇航员仅仅在一阵疾驰中便经历了相当于外部宇宙中无穷无尽的时间，就这个意义上说，黑洞是通往宇宙尽头的门槛，是一条宇宙死胡同，它代表了再也没有通路的最终实体。黑洞是包含了时间尽头的狭小空间区域。谁要是对于宇宙尽头感到好奇的话，只要跳进一个黑洞就可以得到亲身体验了。

虽然引力是自然界最微弱的力，但是它在不知不觉中累积起来的作用不仅决定了单个天体，而且也决定了整个宇宙的最终命运。压碎恒星的那种残酷无情的吸引力，同样作用在尺度要比恒星大得多的整个宇宙上。这种万有引力的结局完全取决于产生引力的物质总量。为此，我们必须称出宇宙的重量。

第六章 给宇宙过磅

人们常说有上必有下。引力对抛向天空的物体所起的作用是要阻止物体的飞行，并把它拉回地球。但是，事情并不总是如此。如果物体的运动速度足够快，就可以完全摆脱地球的引力，结果它就能飞入太空而永不返回。发射行星际空间飞船的火箭就能达到这么高的速度。

临界“逃逸速度”大约为每秒 11.2 公里（每小时 4 万公里），这相当于协和式飞机速度的 20 倍以上。临界速度可以从地球的质量（地球所包含的物质的数量）和半径导出。对一定质量的物体来说，直径越小，表面引力越大。脱离太阳系意味着要克服太阳的引力。太阳的逃逸速度为每秒 16.7 公里。想要脱离银河系向外逃逸就得有每秒几百公里的速度。在另一个极端，如对于中子星一类致密天体，逃逸速度为每秒几万公里，而对黑洞来说逃逸速度就是光速（每秒 30 万公里）。

脱离宇宙的速度有多大呢？在第二章中我已指出，宇宙看来没有边界，也就无从逃离。不过要是我们暂且假定有这样的边界，而且它处于我们的观测极限处（约离我们 150 亿光年），那么，逃逸速度大约要达到光速。这是一个极有意义的结果。因为大多数遥远的星系看上去正在以接近光的速度远离我们退行，要是就取这个数值，那么星系看上去正在以很高的速度向远处运动，因而实际上它们恰好可以“逃离”宇宙，或者至少它们是在相互远离，并且“永不返回”。

事实上，膨胀宇宙尽管没有十分明确的边界，它的行为却同地球上抛起的物体十分类似。如果膨胀速度足够大，退行中的星系就会克服宇宙中所有其他物质的总引力而逃逸出去，于是膨胀将会永远持续下去。另一方面，如果膨胀速度太低，膨胀最终会停下来。接着宇宙便开始收缩。那时，星系将再次“掉回来”。随着整个宇宙的坍塌，按理而来的便是宇宙的最后一次大灾难。上述两种景象中我们面临的是哪一种呢？答案取决于两个数字的较量。一方面是膨胀速度，另一方面是宇宙的总引力，后者实际上就是宇宙的重量。吸引力越大，宇宙必须膨胀得越快才能将之克服。天文学家可以直接从红移效应对第一个量加以测定。我在第一章中已经解释过，这个答案仍然存在某种争议，所以在撰写本书之时保守一点说，现在所知道的数值可能有上下 1 倍的误差。但是，第二个量的问题就要大得多了。

怎样称出宇宙的重量呢？这个问题看上去令人束手无策。很清楚，我们不可能直接做到这一点。然而，我们也许能借助引力理论来推算出它的重量。要得出这个值的下限并不难。从太阳对行星的引力可以称出太阳的重量。我们知道，银河系包含大约 1000 亿颗其质量类似太阳质量的恒星，这就大致给出了星系质量的下限值。现在我们可以估计宇宙中一共有多少个星系。把它们逐个累加起来是不可能的，因为数目太大了。但是，

一种合理的估计是 100 亿个。于是就得出总重量为 10^{21} 太阳质量,或者说约 10^{48} 吨。只要知道这个星系超级大家庭的半径,我们便可计算宇宙逃逸速度的极小值:答案是约为光速的百分之一。由此我们可以得出这样的结论:如果宇宙的重量仅仅来自恒星,它便可以解脱自身引力的束缚,永恒地持续膨胀下去。

许多科学家对此确信无疑,但不是所有的天文学家和宇宙学家都相信这样求和的办法是正确的。我们看到的物质同实际存在的物质相比,显然估计过低,因为宇宙中的天体并不都是发光的。诸如暗星、行星和黑洞一类的暗天体,大多数我们都没有注意到。更有大量的尘埃和气体,它们绝大部分都难以察觉。此外,也难以想象星际空间完全空无一物,那里也许有大量稀薄的气体存在。

然而,这几年来一种更有吸引力的可能性激起了天文学家的浓厚兴趣。宇宙起源于大爆炸,而大爆炸不仅是我们所看到的一切物质的本源,也是我们现在看不到的许多物质的本源。如果宇宙最初是一种灼热的亚原子粒子汤,那么除了人们所熟悉的电子、质子和中子(它们构成了你、我以及我们周围的其他普通东西)之外,也必然生成过粒子物理学家最近才在实验室内识别出来的所有其他各种粒子,而且数量很大。人们发现这些其他种类粒子中的大多数是很不稳定的,很快就发生衰变,但有一些也许便作为原初宇宙的遗骸而留存在今天的宇宙中。

在这些遗骸中主要是中微子,现已证实这种幽灵般的粒子在超新星中极为重要(见第四章)。据我们迄今所知,中微子不能衰变成任何别的东西(实际上,有 3 种不同类型的中微子,它们之间也许能相互转变,不过这里我们不考虑这种复杂情况)。因此他们认为宇宙应当沉浸在大爆炸留下的宇宙中微子海洋中。只要假定大爆炸的能量对所有各类亚原子粒子均分,就能计算出总共应有多少个宇宙中微子。由此,得出的结果是大约每立方厘米空间有 100 万个中微子,或者说每立方分米约有 10 亿个中微子。

我始终对这个惊人的结果极感兴趣。在任意给定的时刻,你的身体里就有大约 1000 亿个中微子,它们几乎全是大爆炸的遗骸,并且自最初存在的 1 毫秒以来就保存了下来,而且基本上没有受到任何破坏。因为中微子以光速或接近光速的速度运动,它们闪电般地穿过你,结果每秒钟就有 1 万亿亿个中微子穿透你的身体。由于中微子与普通物质间的作用极为微弱,完全可以忽略不计,因此这种不停顿的侵袭丝毫不为我们所察觉,而且在你的一生中甚至可能没有一个中微子会留在你的身体里。尽管如此,在看上去似乎空无一物的宇宙空间里有这么多中微子存在,这对宇宙的最终命运具有深远的影响。

虽然中微子的相互作用异常微弱,但它们确实与所有的粒子一样会产生引力。它们或许并不直接对周围的其他物质产生推和拉的作用,但有可能证实它们的间接引力效应对增加宇宙的总重量是至关重要的。为确定中微子的贡献有多大,必须对它们的质量作一番了解。

以快速运动的粒子来说，质量是个难以捉摸的概念。那是因为物体的质量并不是一个固定不变的量，而是取决于物体的速度。例如，如果 1 千克的铅球以每秒 260000 公里的速度运动，便会重 2 千克。这里的关键因素是光速。物体的速度越接近光速，它的质量就越大，而且质量的这种增大是没有极限的。因此为了不至发生混淆，物理学家在谈到亚原子粒子的质量时，都是指静止质量。如果粒子以接近光的速度运动，它的实际质量也许是它的静止质量的很多倍。例如，在大型粒子加速器内部，作回旋运动的电子和质子的质量可达到它们静止质量的好几千倍。

至于重力，它是实实在在的，而不是算出来的静止质量。尽管中微子的静止质量可能非常小，但由于中微子以接近光的速度运动，它们也许有很大的质量。事实上，它们甚至可能有零静止质量，而运动的速度正好等于光速。达时，它们的实际质量必须根据它们的能量来确定，而对于残留下来的宇宙中微子来说，后者又可以通过理论计算从在大爆炸中所获得的能量推导出来，同时必须考虑宇宙膨胀的衰减效应并加以修正。这种做法所得出的具有零静止质量的中微子对宇宙的总重量并没有重大的贡献。

另一方面，我们不能肯定中微子确实具有零静止质量。从理论上说，我们今天对中微子的认识并不排除它具有有限的静止质量。因此，这就变成了一个需要判别究竟是哪一种情况的实验问题。第四章中已经提到，如果中微子有静止质量，那么它肯定是非常小的，要比其他任何已知粒子小得多。但是，宇宙中有这么多的中微子，即使是微小的静止质量也会使宇宙总重量发生重大变化。这是一个需要仔细权衡的问题。即使质量小到电子（已知最轻的粒子）质量的万分之一，也足以产生重大的影响：中微子的总质量会超过所有恒星的总重量。

要探测这么小的静止质量十分困难，实验得出的各种结果既混乱而又相互矛盾。碰巧，人们探测到了超新星 1987A 发出的中微子，它提供了一条重要的线索。如果中微子有零静止质量，那么所有的中微子必定都以严格相同的速度（光速）运动。另一方面，如果中微子有很小的非零静止质量，那末速度可能就有个范围。超新星发出的中微子可能具有很高的能量，所以即使它们确实具有非零静止质量，也会以非常接近光的速度运动。但是，因为这些中微子要在太空中作长时间的旅行，即使有微小的速度变化，也会引起到达地球的时间上的变化，而这种变化是可以测量出来的。研究来自超新星 1987A 的中微子在时间分布上的跨度，可以得出中微子静止质量的上限为电子质量的三万分之一。遗憾的是情况要比这来得复杂，因为已经知道存在着不止一种中微子。大多数有关静止质量的测定工作都是指泡利最初假定的那种中微子，但自从这类中微子发现以来，已经找到第二种中微子，并推断有第三类中微子存在。所有这三类中微子在大爆炸中都会大量地产生出来。直接确定另外两类中微子的质量范围是很困难的。实验表明，可能取的数值范围依然很宽。不过最近理论学家的流行观念正转为反对中微子可能在宇宙质量中占主导地位。但是，这种观念可能得容易被新的中微子质量实验测定结果所推翻。

问题的复杂性还不止这些，因为在谈到对宇宙重量的估计时，中微子并不是唯一可能存在而应加以考虑的宇宙遗骸。大爆炸时还会产生其他稳定的弱相互作用粒子，也许

它们会有相当大的质量（如果质量太大，粒子就无法产生了，这是因为产生高质量粒子需要大量的能量）。它们通称为弱相互作用重粒子（Weakly Interacting Massive Particles，缩写成 WIMP）。事实上，理论学家已经有了一份假设的弱相互作用重粒子检验单，它们有着堂吉珂德式名字，如引力微子，希格斯微子以及光微子。没有人知道它们是否真的存在，但如果确实存在的话，它们可能会对宇宙重量的确定起关键性的作用。

值得注意的是，也许有可能通过弱相互作用重粒子与普通物质相互作用的方式来直接检验这类粒子的存在。这种相互作用预期是很弱的，但由于弱相互作用重粒子的质量较大，这使它们能有比较大的活力。英国科学家已在英格兰东北的一座盐矿里设计了一项实验，以期发现通过那儿的弱相互作用重粒子。假定宇宙中充满弱相互作用重粒子，那么任何时到都会有数量极大的这类粒子穿过我们身体（还有地球）。这项实验的目标是令人吃惊的：要探测出一个弱相互作用重粒子击中原子核时所发出的声音！

实验用仪器由放在致冷系统中的锗晶体或硅晶体组成。如果有一个弱相互作用重粒子击中晶体内的一个原子核并与之相互作用，它的动量便会引起原子核的反冲。这种突如其来的冲击产生一种很弱的声波，也就是晶体振动。随着波向外传播，它会衰减下来并转变成热能。这项实验的设计就是要探测与这种衰减声波联系在一起的极小的热脉冲。由于晶体冷却到接近绝对零度，探测器对注入的任何热能极为敏感。

理论学家猜想，银河系沉浸在一大群呈团块状而运动又较为缓慢的弱相互作用重粒子之中，粒子的质量介于 1 个质子质量到 1000 个质子质量之间。当太阳系在银河系中作轨道运动时，会扫过这种看不见的海洋。如果粒子的典型速度为每秒几千公里，那么地球上每 1 千克物质每天所能散射的粒子数可多达 1000 个。如果这正是事件的发生率，弱相互作用重粒子的直接探测应当是可行的。

在继续设法猎取弱相互作用重粒子的同时，天文学家也正在着手处理宇宙称重的问题。一个天体即使看不见（或听不到），它的引力效应仍然会表现出来。例如，天文学家由于察觉土星轨道受到一未知引力源的扰动而发现了海王星。绕亮星天狼星转动的暗白矮星天狼 B 也是通过这条途径发现的。因此，只要监视可见天体的运动状况，天文学家也可以建立起任何不可见物质的图象（我已经说明了这种方法如何使人们猜测到天鹅 X-1 中可能有黑洞存在）。

最近一、二十年，人们仔细研究了银河系内恒星运动的方式。银河系并不是静止的，而是在缓慢地转动。恒星绕银心转动的典型时间尺度超过 2 亿年。银河系的形状很像一个盘子，银心附近聚集着大量的恒星，银盘里包含了更多的恒星、气体和尘埃。因此，粗略地说情况同太阳系相类似，后者是行星绕太阳旋转。在太阳系内，水星和金星这类内行星比土星和海王星这类外行星要转得快，这是因为内行星受到的太阳引力更强。你也许会以为这个规律也适用于银河系，即银盘外部区域恒星的运动速度应比银盘中央的恒星要慢得多。

然而观测结果并非如此。在整个银盘内恒星的运动速度大致相同，其解释只能是银河系的质量毕竟不是都集聚于其中央，而是一定程度上表现为平均分市。因此，看上去银河系质量好像集中在中央这一事实表明发光物质仅仅反映了部分实际情况。很明显，存在大量的暗物质或不可见物质，它们中的大部分分布在银盘的外围，从而加快了这部分区域内恒星的运动速度。甚至很可能暗物质的主要部分分布在发光银盘可见边缘之外以及银盘面外侧，它们以一种不可见的大质量晕的形式包围着银河系，并延伸至遥远的星际空间。在其他星系中也观测到了类似的运动图像。要是用太阳的质量和亮度间的关系，从星系可见区域的亮度可以推算出它的质量；而测量表明，平均来说显示的质量比它们亮度所反映的质量大 10 倍以上，在最外部区域甚至高达 5000 倍。

对星系团内全部星系运动状况的研究也得出了相同的结论。很清楚，如果星系运动得足够快，它将会摆脱星系团的引力束缚。如果团内所有星系的运动都这样快，这个星系团便会很快瓦解，后发座内有一个由几百个星系组成的典型星系团，人们已经对它作过深入细致的研究。后发团星系的平均速度实在太大了，以致这个星系团无法长期存在，除非那里要有比亮物质质量至少多 300 倍的物质。因为一个典型星系穿越后发星系团只要花 10 亿年左有的时间，所以到现在为止已有充足的时间使这个星系团瓦解。但这种情况并没有发生，星系团的结构从各个方面给人的印象表明它是一个引力束缚系统。很明显，那儿存在某种形式的暗物质，而且数量很大，正是这些暗物质影响了星系的运动。

对宇宙更大尺度结构的仔细研究进一步说明了可能存在着不可见物质。这种结构是以星系团和超星系团集结在一起的方式出现的。我在第三章中已经提到，星系分方的方式使人想起泡沫，它们成串排列，形成纤维结构，或蔓延开来形成巨大的薄片。它们包围着一些硕大无朋的巨洞。如果没有暗物质的额外引力作用，这样一种泡沫状的成团结构在自大爆炸以来的这段时间内是不可能出现的。但是，直到撰写本书之时，还无法借助任何简单形式的暗物质，通过计算机模拟来产生观测到的泡沫结构，这可能意味着需要某种复杂的混合型暗物质。

最近，科学界的注意力集中在用一些奇异的亚原子粒子作为暗物质的候选者。但是，暗物质以较为常见的形式存在也是可能的，如行星尺度的物质或者暗恒星。这类暗天体可能数量非常之大，它们在我们周围的太空中漫游，只是我们对这一事实毫无察觉且不以为然。近来，天文学家找到了一种方法，它能揭示没有受可见天体引力束缚的暗天体的存在。这种方法利用了爱因斯坦广义相对论所得出的一项结果，这就是引力透镜。

这种思想基于引力可使光线发生弯曲这一事实。爱因斯坦预言，如果一束星光从太阳附近通过，它就会发生少量的弯曲，导致恒星在天空中的视位置发生位移。在同一天体附近有无太阳的情况下，比较这颗恒星的位置就可检验这个预言。1919 年，阿瑟·爱丁顿(Arthur Eddington)首先做了这种检验，并出色地证实了爱因斯坦的预言。

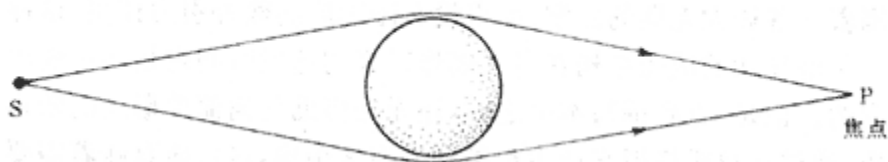


图 6-1 引力透镜 大质量天体（图中用一个球表示）的引力使远方光源 S 射来的光线发生弯曲。在适当的条件下这个作用会产生聚焦效应。焦点上的观测者会看到天体周围出现一个光圈。

引力透镜同样使光线发生弯曲，这样可以使光线聚焦而成像。如果某个引力天体对称性很好，它就能起到透镜的作用，可以使逐远光源射来的光线聚焦。图 6-1 表明了这种情况。从源 S 来的光线落到球形天体上，天体的引力使它周围的光线弯曲，并把光线引向另一侧的焦点。这种弯曲效应对多数天体而言是很微弱的，但在天文学距离尺度上，即使光在路途中发生微小的弯曲最终也会产生一个焦点。如果这个天体位于地球和遥远的 S 源之间，那么这一效应会使 S 的像大大地增亮，或在一些特殊情况下视线方向恰到好处，便会表现为一个明亮的光圈，称为爱因斯坦圈。对形状比较复杂的天体，透镜效应很可能会产生多重像，而不是单一的聚焦像。天文学家在宇宙学尺度上已经发现若干个与大质量星系有关的引力透镜，它使遥远的类星体形成多重像。此外还发现了一些因透镜作用由类星体形成的光弧和完整的光圈。这种情况的出现是因为居间星系同类星体差不多恰好位于同一视线方向上。

对于暗行星和低光度白矮星，如果它们恰好位于地球和某颗恒星之间，就应当出现透镜效应，而天文学家便可搜索能揭示这种效应的信号。当暗天体穿过视线时，恒星像的亮度会以一种特有的方式表现出时强时弱的变化。虽然天体本身还是没能看见，但是，从透镜效应可以推断它的存在。一些天文学家正在试图用这种技术来搜索银晕中的暗天体。尽管与遥远的恒星恰好位于同一视线方向上的概率非常非常小，但如果在那里有足够多的暗天体，就应当能观测到引力透镜效应。

黑洞也会起到引力透镜的作用，这方面已经做了广泛的搜索，以利用河外射电源（透镜对射电波的作用方式与光波相同）来确定黑洞个数的范围。结果发现可能的候选天体为数甚少，由此给人以这样的印象：用恒星或星系级质量的黑洞来解释存在大量暗物质是不大可能的。

但是，并非所有的黑洞都会在透镜效应普查工作中显示出来。很可能大爆炸后不久，早期宇宙盛行的极端条件有利于微黑洞的形成，它们也许不会比原子核大。这种天体的质量应当等于一颗小行星的质量。许多质量可以以这种形式隐藏起来，它们遍布于整个宇宙，而我们却观测不到。令人惊讶的是，甚至有可能通过观测来确定这些怪异实体的数量范围，其理由涉及称为霍金效应的一种现象，我将在第七章中对此作出解释。简单地说，微黑洞的爆发可能表现为一阵荷电粒子雨，爆发是在经历一段确定的时间之后发

生的，而时间的长短则取决于黑洞的大小：黑洞越小，爆发得越早。小行星质量的黑体将在 100 亿年后爆发，也就是说大约就发生在今天。这种爆发的一个效应是要产生突发性的射电脉冲，对此射电天文学家一直在进行检测。因为连一个有希望的脉冲也没有探测到，由此得出的结论是，每立方光年空间每 300 万年只能发生一次爆发。这意味着至少就小行星质量大小的微黑洞而言，它们只占宇宙质量的很小一部分。

总的来说，不同天文学家所估计的宇宙暗物质数量各不相同。可能的情况是，暗物质与发光物质的质量比至少为 10 比 1，有时也援引 100 比 1 这类比值。令人吃惊的是，天文学家居然不知道宇宙主要由什么东西组成。他们长期以来认为宇宙的主要成分是恒星，结果发现恒星只占了宇宙总质量中相当小的一部分。

对宇宙学家来说，关键问题是有没有足够的暗物质能阻止宇宙膨胀。如果能够的话，暗物质的数量与可见物质之比必定更接近 100 倍而不是只有 10 倍。虽然实际情况或许恰恰如此，但这毕竟只是一个纸面上的数值。由于宇宙的最终命运完全取决于这一答案，因而人们寄希望于对暗物质的搜寻会很快给出孰是孰非的明确答案。

与此同时，一些理论学家相信，只要通过计算就有可能估计宇宙的重量，而无需直接进行困难重重的观测工作。有一种传统信念认为，人类仅仅依靠合理推理的能力便有可能对宇宙的奥秘作出预测，这可以追溯到古希腊哲学家。在科学时代，有些宇宙学家一直企图根据一套深奥的原理，系统地导出一些数学公式，从这些公式应当可以得出数值确定的宇宙的质量。特别诱惑人的那些体系就是根据某种数灵学公式来确定宇宙中粒子准确数目的。这种学究式的冥思苦想一直没有得到大多数科学家的赞同，虽然它们也许很有诱惑力。但是，近年来开始流行一种比较令人信服的理论，因为它对宇宙质量作出了某种明确的预言。这就是第三章讨论过的暴胀演化图象。正如前面所解释的那样，暴胀理论有一项预言涉及宇宙的膨胀速度，其结论接近于观测值。事实上，这项预言比观测值更精确。暴胀相的效应会把宇宙恰好推到临界膨胀速度，结果宇宙正好摆脱自己的引力，并永恒膨胀下去。因此，暴胀理论预言，宇宙所包含的恰好就是临界物质重量，而宇宙便处于继续膨胀和重返坍缩的分界线上。

就今天的知识水平而言，我们还无法断定宇宙会不会永远膨胀下去。如果它再次收缩，问题便在于这将会在什么时候发生。答案完全取决于宇宙重量超过临界重量究竟有多少。如果超过百分之一，那么在大约 1 万亿年后宇宙将再次收缩；如果超过百分之十，收缩会提早到 1000 亿年后发生。

如果暴胀理论是正确的话，它同上述问题之间的关系是很有趣的。当然，这种理论的描述是理想化的。严格地说，暴胀相必须延续无限长时间才能达到这个临界值。实际上这个阶段所经历的时间非常短。因此，宇宙的实际质量会比这一临界值稍大一些，或者稍小一些。对前一种情况，坍缩最终总要出现。暴胀理论中很奇怪的一点在于向这个临界值的逼近，是按指数规律极快进行的，这意味着在经过一段极短时间的暴胀之后，宇宙实际上所具有的重量已非常接近这个临界值。因此，宇宙遥远的未来与爆炸后第一

秒钟时间内暴胀行为的具体细节有着非常密切的关系。

为了引入一些数字，可能的情况是暴胀相开始于大爆炸之后仅 10^{-34} 秒。在第三章中我把这段时间称之为一个滴答。暴胀可能延续几百个滴答，然后就结束了。由于时间有限，暴胀必定是不充分的，随后所产生的宇宙其重量非常非常接近而又不完全等于临界值。如果实际重量比临界值来得大，那么经过漫长的岁月，宇宙会再次收缩。

按指数规律迅速逼近临界值这一事实，意味着宇宙的寿命取决于暴胀相的寿命，而且后者对前者的影响十分敏感。粗略地说，要是暴胀每多坚持一个滴答，宇宙开始再收缩前所经历的时间就会增加 1 倍。因此，譬如说 100 个滴答的暴胀导致宇宙在 1000 亿年后再收缩，那么 101 个滴答会使再收缩发生在 2000 亿年以后，而 110 个滴答的暴胀暗示收缩发生在 102400 亿年以后，依此类推。因为我们对宇宙暴胀是 100 个滴答还是 1000 个滴答一无所知，所以也无法肯定经过多长时间宇宙才开始收缩。但是很明显，这大概总是发生在未来某个很遥远的时刻。除非在数字上出现某种特别的巧合，否则再收缩的时刻应当与我们人类在宇宙中出现并生存下来的时间无关。所以我们可以预料，如果再收缩会发生的话，也只会经过漫长的时间之后才会发生，这段时间是目前宇宙年龄的许多倍。如果情况确实如此（它还取决于暴胀理论所用的方法是正确的），那就是用我们最好的天文观测仪器也无法确定宇宙的重量究竟在临界值的哪一侧。在这种情况下，人类永远不会知道自己所居住的宇宙有着怎样的最终命运。

第七章 悠悠岁月

对无限来说很重要的一点是它并不仅仅是一个很大的数。无限与那种只是大得出奇，甚至大得令人无法想象的事物有着完全不同的质的差别。设想宇宙永无终结之日，它能永远存在下去，就意味着应当有无限长的寿命。如果情况确实如此，那么任何物理过程，不管它发展得多么缓慢，或出现的可能性多么的小，都必定有发生的一天。这好比一只猴子在打字机上乱敲，只要一直打下去，最终总会打出威廉·莎士比亚的杰作来。

我在第四章中已经讨论过的引力波发射现象就是个很好的例子。只有对那些最激烈的天文过程来说，以引力辐射形式损失的能量才会产生显著的变化。地球绕太阳的轨道运动会引起大约 1 毫瓦功率的发射，它对地球运动的影响非常非常小。但是，即使流失功率只有 1 毫瓦，只要延续几万亿年甚至更长的时间，最终也会使地球沿螺旋式的运动轨道落到太阳上。当然，在此之前地球很可能早就被太阳吞食掉了。然而，问题是一些发展得非常慢，因而对人类时标来说可以忽略不计的过程，只要持之以恒，最终总会取得支配地位，从而决定物理系统的最终命运。

让我们想象在非常非常遥远的未来，譬如说 1 亿亿亿年以后的宇宙状态。那时恒星早已燃烧完毕，宇宙一片黑暗。但是，宇宙并非空无一物。在一片漆黑的浩瀚太空中潜伏着许多带自转的黑洞、离散的中子星和黑矮星，甚至还有一些行星级天体。在那个时代，这类天体的密度是极低的，宇宙已膨胀到现有尺度的 1 亿亿倍。

引力会竭尽全力进行一场奇特的战斗。膨胀中的宇宙力图使每个天体同其邻居间的距离拉开，而天体相互间的引力吸引则起相反的作用，力图使天体团聚在一起。结果是，天体的某些集团，如星系团或经过数十亿年结构退化后权充的星系，仍然被引力束缚在一起，但这些集团与它们邻近集团间的距离一直在越走越远。这场争斗的最后结局取决于膨胀速度减速过程的具体情况。宇宙中物质的密度越低，越是会促使这些天体集团摆脱开它们的邻居，自由自在地各奔东西。

在一个引力束缚系统内，缓慢然而却不可抗拒的引力过程发挥了它们的优势。引力波发射虽然很微弱，但不露形迹地在消耗着系统的能量，结果便造成一种缓慢转动的死亡旋涡。死亡的恒星以渐进的方式非常缓慢地接近其他的死星或者黑洞，接着大规模地相互吞食并结合在一起。通过引力波辐射使太阳绕银心的轨道运动衰退下去需要 1 亿亿亿年时间，结果是表现为一个黑矮星残骸悄无声息地滑向银心，在那里有一个巨大无比的黑洞正等待着把它吞食掉。

但是，死亡了的太阳并非一定会以这种方式接受自己的葬礼。因为当它慢慢地向内漂移时，偶尔也会遇到其他一些恒星。有时它会接近一个双星系统——被引力作用紧紧拥抱而锁在一起的一对恒星。接下来的一段时间涉及到称为引力弹弓的一种奇特现象。

处在互绕轨道上的两个天体所表现的运动方式之简单是很典型的。正是这类问题使开普勒和牛顿为之着迷，并促成了现代科学的诞生，他们所研究的是行星绕太阳的转动。在理想情况下，同时不考虑引力辐射，那么行星的运动是规则的，而且是周期运动。不管你等待多久，这颗行星会在完全相同的轨道上一直运动下去。但是，如果有第三个天体存在，譬如说一颗恒星和两颗行星，或者三颗恒星，情况就完全不同了，这时不再是简单的周期性运动。三个天体间相互作用力的图象总是以一种复杂的方式在不断地改变。结果，系统的能量并不是均分给它的各个成员，即使对完全相同的天体也不例外。相反，出现的是一场复杂的舞蹈，在这场舞蹈中，一个天体先获得最大的能量份额，接着便轮到另一个天体。经过很长时间之后，系统的行为可以是完全随机的：事实上，引力动力学的三体问题是所谓混沌系统的一个很好的例子。其中两个天体碰巧会结成一帮，并把它们的大部分能量赋予第三个天体，结果后者便会一下子完全弹出这个系统，就像弹弓射出的弹子一样。引力弹弓这个名称便由此而来。

这种弹弓机制可以把恒星抛出星团，或脱离整个星系。在遥远的未来，绝大多数死星、行星和黑洞会通过这种方式被抛入星系际空间，它们也许会遇到另一个正在瓦解中的星系，或永远漫游在膨胀着的浩瀚太空之中。但是，这个过程是缓慢的：所需的时间是今天宇宙年龄的 10 亿倍。相反，剩下百分之几的天体会向星系中心移动，并合并而形成一些巨大的黑洞。

正如第五章中所解释的那样，天文学家有很好的证据表明，在某些星系中心已经存在有大黑洞，它们正贪婪地吞食作涡状转动的气体，其结果是释放出巨大的能量。总有一天，等待大多数星系的会是这种疯狂的吞食，并一直持续到黑洞周围物质或者被吸食一空，或者被逐出星系。然后，这个吃饱了的黑洞便会保持宁静状态，只是偶尔窜入一些游荡的中子星或小黑洞。但是，这决不是黑洞故事的终结。1974 年，英国数学物理学家霍金发现，黑洞毕竟不是完全黑的；相反，它们在发射一种微弱的热辐射辉光。

要想完全理解霍金效应只能依靠量子场论，这是物理学中一门深奥的分支学科，在第三章涉及到大爆炸的暴胀理论时我已隐隐提到过。回忆一下，量子理论的一条基本定则是海森伯不确定原理。根据这一原理，量子的所有属性都不具有非常确定的数值。例如，就某一特定时刻来说，光子或电子都不可能具有确定的能量值。在日常的工程领域里能量是守恒的，而在亚原子量子范畴能量可以变化，这种变化自发地出现，而且不可预见。所考虑的时间间隔越短，这种随机量子涨落就越大。事实上，粒子可以“借贷”能量，只要它马上偿还就行。能量借贷得越多，偿还也就越快。

在第三章中我已经解释过，能量不确定性导致某些奇特的效应，诸如在表观上空无一物的空间中存在着短寿命粒子，即虚粒子。它们瞬现即逝，寿命极短。由此便引出了“量子真空”这一陌生的概念。量子真空完全不同于真空，它充满了生机：翻腾不已的虚粒子在永无止息地运动着。虽然通常情况下这种活动不会引人注目，但是它可以引起一些物理效应，如真空活动由于引力场的存在而受到扰动时便会出现这类效应。根据爱因斯坦广义相对论，引力场表现为空间的翘曲，或者说弯曲。当我们考虑到空间中存在

虚粒子活动时，在虚粒子登台表演的空间中，空间翘曲便会明显地影响虚粒子的具体活动过程。一种极端情况发生在黑洞附近。这时，出现在黑洞外面的虚粒子可以在它再消失之前穿过黑洞表面进入黑洞。这会引发通过海森伯不确定原理借贷能量的计量系统发生混乱，因为在黑洞外部借到的能量还到了黑洞内部，而反之亦然。因此，能量可以从黑洞传递给它附近的某个虚粒子，并且永不返回黑洞，从而完全还清了海森伯债务，并使虚粒子变成实粒子。于是，这个粒子便可以自由自在地飞向任何地方。霍金发现，这种量子混乱的结局是粒子会在黑洞附近创生出来，而且其中许多粒子会远远地飞离黑洞环境。

霍金效应只对微黑洞来说是重要的。因为虚电子在它的借贷还清之前最多可移动约 10^{-11} 厘米，要使电子（以及正电子）能得以创生，所适用的仅仅是核尺度或更小尺度的黑洞。但是，虚光子的情况就不同了。虚粒子的寿命，以及它在消失前可渡越的距离都取决于它的能量。对一个电子来说，它有某种最小能量，即由静止质量所代表的能量（请记住 $E = mc^2$ ）。但是，光子具有零静止质量，因此它的能量要有多低就有多低，这意味着任何尺度的黑洞都会创生光子。但是，诸如一个太阳质量的黑洞只会产生极低能量的光子。在那种情况下霍金效应是非常微弱的。

这里用非常微弱这个词是毫不夸张的。霍金发现，黑洞产生的能谱和热物体的辐射能谱是相同的，因而可以用温度来表示霍金效应的强度。对核大小尺度的黑洞（ 10^{-13} 厘米）来说，温度是很高的，约为 100 亿开。作为比较，一个太阳质量的黑洞的尺度约为 1 公里，因而其温度比绝对温标千万分之一度还低。这样一个天体的全部霍金辐射不超过一千亿亿亿分之一瓦。

霍金效应的奇特性质之一是随着黑洞质量和尺度的减小，其辐射温度变得越来越高。这意味着小黑洞的温度比大黑洞来得高。黑洞在辐射过程中要损失能量，因而也就损失质量，于是黑洞便收缩。结果它变得更热，更为强烈地发出辐射，因此收缩得也更快。这个过程就其内禀性质来说是不稳定的。随着黑洞以越来越快的速率发射能量和收缩，它最终便进入失控状态。

要是完全相信霍金效应，那么它便预言所有的黑洞最终会在一阵快辐射中一下子消失掉。这最后的时刻应当是壮观的，就像一颗大型原子弹爆炸，在突然发出一阵短暂而强劲的热能之后，一切便化为乌有。这至少是霍金理论所推断的结果。但是，一些物理学家并不乐意接受一个有形天体会坍缩成黑洞，转而又消失殆尽，留下的只是热辐射。他们担心很不相同的两个天体在寿终正寝之际所产生的热辐射却是完全相同的，没有留下有关原始天体的任何信息。这种消失行为同受人珍爱的所有各种守恒定律相违背。另一种建议是蒸发黑洞遗留下一小片残骸，它以某种方式包含了大量的信息。不管哪种结果，黑洞的绝大部分质量总是以热和光的形式辐射掉。

霍金过程之慢几乎令人难以置信。一个太阳质量的黑洞要花 10^{66} 年时间才会消失，而一个超大质量黑洞所需的时间则超过 10^{93} 年。更有甚者，这种过程要在宇宙背

景温度低于黑洞温度之时才会开始,在这之前从周围宇宙空间流进黑洞的热量会超过通过霍金效应从黑洞向外流出的热量。目前,大爆炸留下的宇宙背景热辐射大约是绝对温标 3 开,要进一步冷却到使一个太阳质量的黑洞有净热量损失需要 10^{22} 年。霍金过程不是坐等可见的事情。

尽管永远这个词是一段漫长的时间,但只要永远发展下去,一切黑洞,即使是超大质量黑洞,都可能会消失。它们的死亡是痛苦的,但只是漆黑的宇宙永恒夜幕中一道道瞬现即逝的闪光,一种一闪而过的象征性墓志铭,上面记载着以往曾经存在过 10 亿颗辉煌的太阳。

留下的是些什么呢?

并非所有的物质都会掉进黑洞。我们必须考虑到中子星、黑矮星及那些孤独飘泊在浩瀚无垠的星系际空间中的离群行星;更何况还有那些从来不曾凝聚成恒星的稀薄气体和尘埃,以及在恒星系统中到处乱跑的那些小行星、彗星、流星体和古里古怪的岩石块。这些东西能永恒地存在下去吗?

这里我们遇到了一些理论上的困难。我们必须知道原始物质——构成你、我以及地球的原材料——是否是绝对稳定的。决定最终命运的关键在于量子力学。虽然通常情况下量子过程所涉及的对象是原子系统和亚原子系统,但量子物理学的定律适用于一切事物,包括宏观物体。尽管大物体的量子效应极其微弱,但经过很长时间以后,这些效应仍然可以引起一些重要的变化。

量子物理学的特征标记是不确定性和概率。在量子领域,除了赌博式的可能性之外,任何东西都是不确定的。这意味着如果一个过程不管怎么说总会有可能发生,那么无论这种可能性有多小,只要有足够长的时间它最终总是会发生的。我们可以以放射性为例来观察这个规律如何发挥作用。铀 238 核几乎是完全稳定的,但是它有很小的概率会释放一个 α 粒子并嬗变成钍。更确切地说,如果给定一个铀原子核,那么它在单位时间内会有某种很小的概率发生衰变。平均说来,大约 45 亿年发生一次。但是,因为物理学定律要求单位时间某种固定的概率,任意给定的铀核最终肯定要发生衰变。

发生 α 放射性衰变的原因是组成铀原子核的粒子(质子和中子)在位置上有很小的不确定性。同样,固体中原子的精确位置其不确定性就更小了,但仍并不为零。例如,金刚石上的一个碳原子处于晶体内非常确定的位置上,并且在宇宙遥远的未来其温度接近绝对零度时,这个位置也是极其稳定的。但情况并不完全如此,碳原子的位置总是存在着微小的不确定性,这意味着存在微小的概率使碳原子有可能自发地跳出它在晶格中的位置,并出现在另外某个地方。由于这种移动过程,没有一样东西是真正坚固不变的,即使硬如金刚石那样的物质也不例外。相反,表观上的固态物质就像是一种超粘滞液体,在漫长时间里它可以通过量子力学效应发生流动。物理学家弗里曼·戴森(Freeman Dyson)曾估计过,大约 10^{45} 年以后不仅每块仔细切割过的金刚石会变成球珠,而且每

块岩石也同样会发生形变而成为光滑的球。

要是时间更长，量子不确定性还会导致核嬗变。例如，考虑金刚石晶体中两个相邻的碳原子，其中一个碳原子在非常偶然的机会下会自发地发生位移，结果使它的核在一瞬间内恰好出现在相邻那个原子的核的附近。这时核引力就有可能使这两个核子发生聚变而形成镁原子核，所以核聚变不一定要求很高的温度。冷核聚变是可能的，但它需要的时间之长令人难以置信。戴森曾估计过，在 10^{1500} 年（也就是 1 后面有 1500 个零！）之后，所有的物质将以这种方式嬗变成最稳定的原子核，即元素铁。

但是，可能的情况是核物质无论如何也不会存在这么长时间，这是因为另有一些嬗变过程尽管这些过程慢得出奇，但相比之下进行得会快一些。戴森的估计中假设质子（和束缚于核内的中子）是绝对稳定的。换句话说，如果一个质子不落入黑洞，也不受到其他形式的干扰，那么它将永恒存在下去。但是，我们能肯定情况确实如此吗？在我的学生时代，没有人会怀疑这一点。质子是永恒的，它们应该是完全稳定的粒子。但是，关于这一点始终存在着一个令人困惑的疑问，它涉及到称为正电子的粒子。除了像质子一样带有正电荷外，正电子与电子是完全相同的。正电子比质子轻得多，因此所有其他方面都与正电子相同的质子应当更愿意嬗变成正电子（这是一条深奥的物理学原理，即物理系统力图达到它们的最低能态，而低质量即意味着低能量）。因为没人知道为什么质子并没有简单顺利地发生这样的嬗变，物理学家便简单地假设存在某种阻止这类事件发生的自然规律。直到最近，对这个问题还完全没有很好的理解。不过，在 70 年代未出现了一种关于嬗变方式的较为清晰的图象，而各种力就是通过这种方式激励粒子按量子力学规律互相嬗变。最近的一些理论都作为某种公设用到了这条阻止质子衰变发生的定律，但其中大多数理论也预言这条定律并非百分之百地有效。可能存在着非常非常小的概率，会使某个质子事实上嬗变成一个正电子。

在某种最简单的理论模型中，质子发生衰变所需的时间平均为 10^{28} 年，这是宇宙目前年龄的 1 百亿亿倍。因此，或许你会猜想，质子衰变这一课题应当属于某种纯学究式的好奇性。但是，必须记住这是个量子力学过程，因此事实上它的内禀性质具有或然性： 10^{28} 年是预期的平均寿命，并不是每个质子的实际寿命。只要有足够的质子，就会有很大的机会使其中一个质在你眼皮底下发生衰变。事实上，如果有 10^{28} 个质子，那么你可以预期大约每年发生一次质子衰变，而只要 10 千克物质就包含有 10^{28} 个质子。

很巧，这种理论还没有流行，这么长的质子寿命已被实验所否决。但是，其他版本的这类理论给出了更长的寿命—— 10^{30} 或 10^{32} 年，甚至更长（某些理论预言长达 10^{80} 年）。前者较低的寿命值正好还可以通过实验来加以检测。例如， 10^{32} 年的衰变时间意味着在你的一生中或许会通过这种方式在你身体内失去 1 个或 2 个质子。但是，怎样来探测如此罕见的事件呢？

所采用的技术是贮存数以千吨计的物质，用能被质子衰变事件产物触发的高灵敏度

探测器在几个月内对它们进行连续监视。遗憾的是，这样搜寻质子衰变有如大海捞针，因为质子衰变会被宇宙线产物所产生的数量多得多的类似事件所淹没。地球不断地受到宇宙高能粒子的轰击，它们产生某种亚原子粒子背景，并且永远存在。为了减小这种影响，实验不得不在很深的地下进行。

这样的—个实验设备安置在美国俄亥俄州克利夫兰附近的一个盐矿里，它深入地下 600 米。这台设备由装有 10000 吨极高纯度水的方形水罐和周围的一些探测器组成。之所以选择水是因为水是透明的，这样探测器便能同时“看到”尽可能多的质子。实验的思想是这样的：如果一个质子以当前流行的理论所预言的方式发生衰变，那么除了产生一个正电子以外，还会产生一个称为中性 p 介子的粒子，这个 p 介子接着很快衰变成两个能量很高的光子，即 γ 射线。最后，当这些 γ 射线遇到水原子核时，会产生能量很高的电子和正电子对。事实上，这些最终的带电粒子所具有的能量非常高，因此，它们会以接近光的速度运动。

光在真空中的速度为每秒 30 万公里，这是任何粒子可能具有的运动速度的极限。现在水的存在使光的速度慢了一些，大约为每秒 23 万公里。因此，以接近每秒 30 万公里速度穿越水的高速亚原子粒子实际上比光在水中跑得更快。当一架飞机的速度超过音速时，会产生某种轰鸣声。类似地，如果一个带电粒子穿过某种介质的速度比光在这种介质的传播速度更快时，就会产生某种特殊的电磁激波，称为切伦科夫辐射，它是以俄国发现者的名字命名的。因此，俄亥俄实验设置了一套光敏探测器，用以搜索切伦科夫闪烁。为了把质子衰变事件同宇宙射线中微子和其他虚假的亚原子粒子区别开来，实验特别要寻找背对背的成对切伦科夫光脉冲，这是一种与众不同的信号。其物理图象是，当一个 p 介子衰变时，它发出—对方向相反的 γ 射线光子，然后这些光子又会在各自的飞行方向上产生电子 - 正电子对。

遗憾的是，工作了几年之后，俄亥俄实验装置没能找到令人信服的有关质子衰变的证据。到撰写本书之时，其他不同的实验也没有得到任何结果。这可能意味着质子没有衰变。另一方面，它也可能意味着质子是会衰变的，不过它们的寿命要长于 10^{32} 年。要想测定比这更慢的衰变率已超出现有实验的可能范围，因而关于质子衰变的问题也许得留待可以预见的将来才会作出判断。

作为这一故事的结束语，我应该提及的是，虽然质子衰变实验没有达到它们的主要目标，但正是这些实验无意中检测到了超新星 1987A 发出的中微子，这一点我在第四章中已经讨论过了。因此，努力并没有白费。科学上往往如此，寻找某—种东西却导致另—个意外的发现。

搜寻质子衰变的实验曾在大—统—理论工作的刺激下风行—时，其目的是企图统—强核力（把质子和中子束缚在原子核内的力）造成 β 衰变的弱核力及电磁力。质子衰变的出现应当是这些力巧妙混合的结果。不过，即使这种观点被证明是错误的，质子仍有可能通过另—条途径发生衰变，这条途径涉及自然界的第四种基本力——引力。

为弄清引力如何引起质子衰变，必须考虑这样一个事实，即确切来说质子并不是点状基本粒子。它实际上是由 3 个称为夸克的更小粒子所构成的组合体。在正常组态中，质子的大小约为十万亿分之一厘米，这是 3 个夸克的平均间距。但是，基于量子力学的不确定性，夸克并不保持静止状态，而是不停地改变它们在质子内的位置。两个夸克有时会相互靠得很近。所有 3 个夸克也会自行跑到一起，彼此间靠得非常近，当然这种情况就更为罕见了。通常情况下，这些夸克间的引力作用是完全可以忽略不计的，但一旦它们靠得很近，引力就可能较所有其他力的作用更占优势。如果发生这种情况，这些夸克就会合到一起，形成一个微小的黑洞。实际上，质子是在它自引力作用下通过量子隧道效应发生坍塌的。由于霍金过程，这样生成的微黑洞是非常不稳定的，迟早会一下子蒸发掉，而最可能的结果是衰变成最轻的带正电荷的粒子——正电子，再加上其他粒子。对质子通过这种途径发生衰变的寿命所作的估计是很不确定的，其范围从 10^{45} 年到 10^{220} 年，后者实在是个惊人的数字。

如果质子确实在经过一段极其漫长的时间后会发生衰变，那么这个结果对宇宙遥远的未来有着深远的影响。所有的物质都将是不稳定的，它们最终都会消失。像行星那样的固态天体，即使未遭落入黑洞之劫，也不会永恒存在。相反，它会慢慢地逐渐蒸发掉。质子的寿命，譬如说取 10^{32} 年，那就意味着地球每秒钟失去 1 万亿个质子。按照这一速率，大约在 10^{33} 年以后，我们的行星假如还没有被其他某种东西毁掉的话，实际上到那时也已完全消失殆尽了。

中子星不受这个过程的影响。中子也由 3 个夸克组成，并可通过类似导致质子死亡的那种机制嬗变为更轻的粒子（孤立的中子在任何情况下都是不稳定的，大约在 15 分钟内就发生衰变）。只要时间足够长，白矮星、稀薄的气体云、岩石、尘埃、彗星以及所有其他各种天体都会因同样的原因而死去。我们今天在整个宇宙中所观测到的普通物质有 10^{48} 吨，这些物质都会因落入黑洞，或者通过缓慢的核衰变而消失。

当然，在质子和中子发生衰变时，会生成衰变产物，所以宇宙的物质未必都一点也留不下。例如，前面已经提到，质子的一种可能的衰变途径是生成一个正电子和一个中性 p 介子。这个 p 介子很不稳定，很快会衰变成两个光子，或可能衰变成电子 - 正电子对。无论哪种情况，质子衰变的结果总是使宇宙逐渐获得越来越多的正电子。物理学家相信，宇宙中带正电荷的粒子（现在主要是质子）总数与带负电荷的粒子（主要是电子）数量相等。这意味着一旦所有的质子都衰变，出现的将是一种由数量相等的电子和正电子组成的混合体。正电子是电子的所谓反粒子。反粒子的含义是指，如果正电子遇到电子，它们就彼此对消。从物理学上来说，它们是互相湮没而消失。这是一个在实验室里就能研究的过程，而且并不困难。这种湮没以光子形式释放能量。

人们已经完成了一些计算，以图确定宇宙在遥远的未来所留下的正电子和电子是否会完全互相湮没掉，或是否总是会留下少许残余。湮没不是突如其来发生的。相反，电子和正电子首先自行组合而形成一种微原子，称为偶电子素。它们相互间在电吸引力束

缚下，环绕它们的公共质心作轨道运动，跳起一场死亡之舞。然后，两个粒子作旋涡式运动，并碰到一起而发生湮没。它们旋到一起所需要的时间取决于偶电子素“原子”形成时的大小。在实验室里，偶电子素发生衰变所经历的时间远远小于 1 秒。但在外部空间，由于几乎不受任何干扰，电子和正电子可以在巨大的轨道上束缚在一起。一些估计表明，对大部分电子和正电子来说，形成偶电子素需要 10^{71} 年，但在大多数情况下，它们的轨道直径会有好几万亿光年！粒子的运动非常缓慢，100 万年才移动 1 厘米。这时电子和正电子的行动变得极为滞呆，完成旋入过程所需的时间为 10^{116} 年，这是一个令人惊讶的数字。不过，这些偶电子素原子从形成之时起就已注定了它们的最终命运。

奇怪的是，并非所有的电子和正电子都必定会湮灭。在电子和正电子寻找它们异性伙伴的全部时间内，这些粒子的密度逐渐下降，这一方面是因为发生了湮没，同时也因为宇宙在不断地膨胀。随着时间的推移，偶电子素的形成变得越来越困难。所以，尽管少量残留下来的物质变得越来越稀少，但它们永远也不会完全消失。尽管每个电子或正电子都孤立地分布在体积不断膨胀着的空间中，但在某个地方总能找到它们。

在这些慢得令人难以置信的过程完成之后，宇宙会呈现什么样的图象呢？现在我们可以对此作一番描述了。首先，会存在大爆炸留下的残余，也就是始终存在的宇宙背景。它由光子和中微子组成，也许还会有目前我们尚不清楚的其他一些完全稳定的粒子。随着宇宙的膨胀，这些粒子的能量会不断减小，直到形成某种完全可以忽略不计的背景。宇宙中的普通物质已经消失。所有的黑洞都已蒸发。黑洞的大部分质量变成了光子，不过一部分质量也会以中微子形式出现，而在最后爆炸中发射出来的极小部分质量会以电子、质子、中子和一些较重粒子的形式存在。这些较重的粒子会很快衰变，而中子和质子的衰变要慢得多，结果留下来的是少量的电子和正电子，还有其他一些粒子，它们便是我们今天所看到的普通物质在最后时刻剩下的残留物。

因此，在非常遥远的将来，宇宙应当是一锅薄得令人难以置信的稀汤，其中有光子、中微子及数量在逐渐减少的电子和正电子。所有这些粒子都在缓慢地运动，彼此间分离得越来越远。这是荒凉而又空虚的宇宙，它已走完了自己的历程，但所面临的仍是永恒的生命，或更恰当而言是永恒的死亡。就我们所知，任何基本物理过程再也不会发生了，也就是说不会再出现任何重大事件来打破宇宙那空虚荒凉的状态。

这种寒冷、黑暗、毫无特征而又近乎空无一物的凄惨景象差不多等同于说现代宇宙学导出了 19 世纪物理学的“热寂”说。宇宙退化到这种状态所需要的时间之长超出了人类的全部想象力。然而这只不过是无限时间长河中的无穷小一部分。永久之长，长不可测。

虽然宇宙的衰退过程要经历很长很长的时期，超过了人类的各种时标，因而实际上对我们是毫无意义的。可是人们仍然急于想问：“我们的后裔将会怎样？缓慢降临而却又必然发生的宇宙末日会不可避免地把他们毁灭掉吗？”科学对遥远未来宇宙的预言是有点令人失望的。要是情况果然如此，那么看来任何形式的生命最终必然都在劫难逃。

不过，死亡并非那么简单。

第八章 慢道上的生命

1972 年，一个名为罗马俱乐部的团体对人类的未来发表了一项令人沮丧的预测。他们预言了许多迫在眉睫的灾难，其中一项就是全世界的石油供应将会在二三十年内宣告枯竭。人们惊恐不安，油价暴涨，替代性能量的研究也开始盛行。今天我们已处于 90 年代，还没有任何迹象表明石油即将消耗殆尽，惊恐不安又为心安理得所取代。遗憾的是，简单的计算表明，对于有限的资源来说，能量危机迟早总会来临。关于地球上的人口，也可以得出类似的结论：它不能永远持续地增长下去。

某些耶利米们相信，下一次能量危机和人口过剩危机会彻底断送人类。可是，没有必要把石油的消失与人类的绝迹混为一谈。我们周围到处存在着大量的能源，问题在于我们要有利用它们的愿望和能力。最引人注目的是太阳光，它的能量对我们的需求来说绰绰有余。一个棘手的问题是应当控制人口的增长，从而不致于发生大规模的饥荒。这要求采取社会的、经济的和政治的手段，而不仅仅是科学的手段。但是，如果我们能够克服因石油耗尽而引起的能源瓶颈效应，如果能够稳定世界人口的增长，如果对地球的生态破坏能够加以限制，那么我相信人类肯定会昌盛繁荣。不存在任何明显的自然规律会限制我们人类的繁衍。

在前一章中我描述了经过令人难以置信的漫长时间后，作为一些慢物理过程的结局，宇宙的结构将怎样发生变化，而这种变化通常是朝着退化方向发展的。人类的存在充其量也大约只有 500 万年（这取决于对人类的定义），人类（就某种形式的）文明仅仅只有几千年。今后地球应当还可供人类居住 20~30 亿年，当然这是对于有限的人口而言。这是一段极长的时间跨度，长得令人无法想象，长得好像（实际上就是）无限长。但我们已看到，即使是 10 亿年，同发生在天文学和宇宙学意义上的总体变化所需要的巨大时间尺度相比，也只不过是极短的一瞬间。10 亿个 10 亿年后，在银河系的其他某个地方或许仍然存在类似的地球，从而成为可供人类居住的场所。

毫无疑问，我们可以推测我们的后裔有十分充裕的时间供他们支配，去发展空间探测技术和各种现人所不可思议的技术。在太阳把地球烤枯之前，他们有充裕的时间撤离地球。他们可以一个接一个地寻找适宜居住的行星，并且不断地继续下去。事实上，要是不离开地球，世界人口在任何时候都不太可能超过 100 亿左右。一旦扩展到空间，人口也可以增加。要知道我们在 20 世纪为生存下去而作的斗争最终也许并非徒劳无益，这一点会使我们得到安慰吗？

在第二章中，我描述了伯特兰·罗素因对热力学第二定律的结论怀有黯然消沉的心情，故而在描绘人类的存在对太阳系末日到来这一事实一筹莫展时的言辞凄惨悲凉。他显然认为，我们居住的场所看来不可避免要走向毁灭，而这又必然会使人类的生命变得毫无意义，甚至滑稽可笑。这种信念肯定影响到他的无神论。如果罗素知道黑洞的引力

能可以比太阳的作用高出好多倍，并且能够在太阳系瓦解后持续数以万亿年计的时间，那么他的感觉会好一点吗？可能并非如此。这并不是计算实际持续时间的问题，而是事实上宇宙迟早会变得不适宜人类居住，结果使某些人认为我们的存在是毫无意义的。

根据第七章我对宇宙遥远未来的叙述，也许可以认为一个更不安稳、更为恶劣的环境简直是难以想象的。但是，我们不必陷入沙文主义或悲观主义。毫无疑问，人类在由稀薄的电子 - 正电子汤所组成的宇宙中安顿自己的生活时会有一段艰难时期，但重要的问题肯定不在于我们种族本身能否永垂不朽，而是我们的后裔能否幸存下来。而且，我们的后裔也不太可能是今天意义上的人类。

地球上出现人类这个种族是生物进化的产物。但是，我们自己的活动正在迅速地改变这种进化过程。我们已经干预自然选择的作用，设计出变种的可能性也变得越来越来。我们也许很快就能通过直接控制遗传密码来设计出具有特定属性和体形特征的人类。所有这一切只是发生在技术社会的这几十年时间内。请想象一下几千年、甚至几百万年后，科学和技术能取得何等巨大的成就。

还有，就在这几十年的技术发展中，人类已经能离开地球，进入近地空间去探险。在今后几十亿年内，我们的后裔可以远离地球，进入宽广的太阳系，然后还可以飞往银河系内别的恒星系统。人们常常会有这种错误概念，即这类计划会花费近乎无限长的时间。然而情况并非如此。移民工作可能会通过行星短途飞行不断地进行下去。移民者会离开地球，移居到几个光年远某个适合居住的行星上。如果他们能以接近光的速度飞行，那么这种旅行只需要几年时间。但是，即使我们的后裔永远无法超过光速的百分之一（这个目标并不过分），那么旅行时间也就只是几个世纪。完成一颗行星的实际移民工作同样也需要几个世纪时间，到那个时候移民者会考虑派遣他们自己的移民探险队去另一个更远的适合居住的行星。再过几百年，这下一颗行星就好移民了。就这样不断地继续下去。这正是波利尼西亚人迁往南太平洋群岛的移民方式。

光大约只需要 100 万年就可横越银河系。所以，如果以百分之一光速的速度旅行，则穿越银河系需要 1 亿年。即使一路上有 100 万个行星作为移民驿站，而每一处花费两个世纪用以建站，也只相当于使银河系移民的时间尺度增长一倍。但是，用天文学标准甚至地质学标准来衡量，2 亿年是一段很短暂的时间。在大约 2 亿年时间内太阳仅仅环绕银河系转了一圈，而地球上生命存在的时间至少比它长 16 倍。太阳变老从而威胁到地球也只是在 30 或 40 亿年以后的事——在 2 亿年内几乎不会发生任何变化。结论是，就技术社会而言，我们的后裔只要用地球上生命进化所经历时间中的一小段就可实现在银河系内的移民工作。

我们这些移民后裔会是什么样的呢？如果允许我们自由地想象，可以推测这些移民者也许通过遗传工程很容易就能适应目标行星。举一个简单的例子，假设在波江 e 星附近发现一颗类似地球的行星，又发现在它的大气中氧气只占 10%，那么移民者可以借助遗传工程方法产生更多的红血球。如果此行星的表面重力比地球大，他们可以有更

强健的躯体和更坚硬的骨骼，等等。完成这种旅行即使要花费几个世纪时间，途中的供应也不成问题。宇宙飞船可以造得像一个方舟——一个完全有自我维持能力的生态系统，以满足好几代旅行者的需要。当然，另一种方法是在旅途中对移民者们实施深度冷冻。事实上，更理智的做法是，只派出一只小型飞船和一小队船员，而在货物中则包括数以百万计的受精卵。在到达目的地后即可将它们孵化，由此立即可提供一大批人，这样就没有因长时期运输大量成年人所带来的后勤问题和社会问题。

让我们对或许可能出现的情况作一番推测，如果有着非常充裕而漫长时间，那么这些移民者在外表甚至在智力上都没有理由应当和人类一样。如果人类可以借助遗传工程方法去适应各种不同的需要，那么每次探险都能涉及到一些人为任务而特意设计的生命实体，它们应该具有必要的解剖学结构和心理学素质。

这些移民者甚至也许不是通常定义的普通生命有机体。现在已经能够做到把硅片微处理器置入人体。这种技术的进一步发展将能预见到由有机部件和人造电子部件组成的某种混合体，它兼有生理功能和大脑功能。例如，也许有可能为人类大脑设计一种类似现代计算机上所用的“可插式”外存贮器。相反，或许很快可以证明，用有机物质来完成计算工作，要比现在所做的以生产固体器件来完成计算任务更为有效。实际上，将来有可能通过生物学的方法来“培育”计算机部件。对于许多计算任务来说，神经网络将来更有可能超过数字计算机；事实上这已经开始出现了。在那种情况下，从小片大脑组织来培育有机神经网络要比从头开始制造这种网络具有更好的感官能力。或许也有可能建造有机网络和人造网络构成的共生混合体。随着纳米技术的发展，生命体和无生命体，天然物和人造物，大脑和计算机之间的区别会变得越来越模糊。

今天，这种种想法还只属于科学幻想的范畴。它们能够成为科学现实吗？不管怎么说，我们能够想象的事并非都意味着必定会发生。但是，我们可以把适用于自然过程的同样原理用于技术过程：只要有足够长的时间，任何能够发生的事必将会发生。如果人类或他们的后裔一直保持充分的能动性（这可能是一个大胆的设想），那么技术将只受物理规律的约束。像人类基因组计划这样的一种挑战，或许会使一代科学家望而却步，但只要有 100 代，1000 代，或者 100 万代科学家来从事这项工作，计划的完成应当就不成问题了。

让我们乐观地设想人类会一直生存下去，并继续不断地朝着技术发展的极限迈进。那么，这对于宇宙探险又意味着什么呢？制造出特意设计的智能人将会开创这样一种可能性：派遣代理人进入迄今为止完全不适合人类居住的场所，以完成今天无法想象的任务。虽然这种智能人或许是始于人类技术的最后产物，但不论从哪种直接意义上来说，他们都不算是人类。

我们应该为这种奇异实体的命运忧心忡忡吗？好多人也许会对人类可能被这种怪物所取代的前景抱有反感情绪。如果生存下去意味着人类将让位于遗传工程造就的混合有机机器人，人们也许宁可选择灭绝。然而，如果人类让位的可能性使我们感到沮丧的

话,那么我们必然要问我们希望而且可以忍受的人究竟是什么。肯定不同于我们的形体。要是知道从现在起,比如说经过 100 万年后我们的后裔,可能没有脚趾,或者腿较短,或头和脑袋较大时,这会使我们感到不安吗?无论如何,在过去几个世纪里我们的形体毕竟已有不少变化,而且在不同的种族群之间现已存在很大的差别。一定要我讲的话,我认为多数人会更珍视那种也许可称为人类精神的东西,即我们的文化,整套社会标准、特有的精神性格,这样的例子在我们的艺术成就、科学成就和智力成就上都随处可见。这些东西肯定值得保护和流芳百世。如果我们能把人类的基本属性传给我们的后裔,则不论他们的形体如何,便已达到最完美的生存下去的状态。

当然,是否有可能创造出将来要向宇宙进军并穿越宇宙的“类人生物”的问题在很大程度上只是一种推测。撇开任何别的不谈,人类有可能对实施这类宏伟计划缺乏能动性,或由于经济、生态或其他方面的灾难,我们可能会在真的要离开地球之前就已过早地死亡。甚至可能外星人类领先了我们一大步,并且已经向大多数适宜居住的行星进行了移民(不过显然不包括地球——现在还没有)。但是,不管是我们的后裔还是某些外星人种的后裔,有某种智慧生物向宇宙各个角落传播,并通过技术手段逐渐掌握如何控制宇宙的这种可能性是十分令人神往的,而这种超级人类应当怎样同宇宙缓慢退化作斗争的问题也是非常吸引人的。

在第七章中讨论过了物理衰变的持续时间,这段时间是极为漫长的,要是企图根据今天地球上的趋向加以外推来猜测在极其遥远的未来可能会有什么样的技术,那么任何这样的企图都是徒劳的。有谁能想象出 1 万亿年后的技术社会呢?看起来好像任何事情也许都能办得到。然而,任何技术不论怎样先进,大概还是要受基本物理规律的制约。举例来说,如果相对论所作的关于任何物体都不能超越光速的结论是正确的话,那么即使技术发展 1 万亿年,冲破这道光速屏障的努力终将归于失败。更严重的是,如果一切有意义的活动都要消耗一点能量的话,那么一个技术社会无论有多先进,宇宙中可资利用的自然能源的不断减少最终将会对这个社会构成严重的威胁。

要是把基本物理原理应用于最广泛定义下的智慧生物,我们便可来研究遥远未来的宇宙退化是否会对他们生存造成任何真正的基本障碍。一种生物要想取得智慧生物资格,它至少要有处理信息的能力。思考问题和取得经验这两者都是涉及到信息处理的那些活动的例子。那么,这对宇宙的物理状态会提出什么要求呢?

信息处理的一个特征是要消耗能量。我现在在打印这本书所用的文字处理机必须与电源相连接,理由就在这里。每条信息消耗的能量与热力学因素有关。当处理机的工作温度与环境温度相仿时消耗最小。人的大脑和大多数计算机的工作效率是很低的,它们要消耗大量额外的热能。例如,人脑产生出相当大一部分体热,而许多计算机需要专门的冷却系统来保护它们不被熔毁。这种余热的起因可以追溯到作为信息处理基础的实际逻辑线路,后者对于清除信息是必不可少的。例如,要是有一台计算机在执行 $1 + 2 = 3$ 的计算,这时两条输入信息(1 和 2)被一条输出信息(3)所置换。一旦计算完成,计算机也许会把输入信息清除掉,其结果是一条信息取代两条信息。事实上,为防止存储

器堆满信息，计算机不得不随时清除掉这种多余的信息。清除过程按定义是不可逆的，因此就牵涉到熵的增加。因此，基于这个最基本的理由，信息的收集和处理由于它们活动的结果，看来必然会按不可逆的方式把可供利用的能量消耗殆尽，并使宇宙的熵增加。

戴森认真地考虑了下述情形，也就是仅仅出于对某智慧生物社会需要以一定速率消耗能量的前提假定的考虑，则在宇宙朝热寂状态冷却的过程中它们所面临的问题。第一个约束是这种生物的温度必须比他们所处环境的温度更高，否则余热不会从他们身上向外流出。其次，物理系统向周围环境辐射能量的速率受物理定律的限制。很明显，如果这种生物产生余热的速度要比排除余热来得快，那么它们是不能长期工作的。这种生物必然要消耗能量，而上述要求对能量消耗的速率规定了某个下限。因此，一个最基本的要求是必须存在某种自然能源，以补充这种为维持生命所必须的热外流。戴森的结论是，所有这类能源在宇宙遥远的未来注定会越来越少，因而所有的智慧生物最终还是要面临能量危机。

现在有两种延长智慧生物寿命的方法。一是应当尽可能长地活下去，另外是要加快思考问题和取得经验的速度。戴森作了一个合理的假设，即智慧生物对时间流逝的主观感受取决于他们处理信息的速率：处理的机制运行得越快，每单位时间内这种生物的思维和知觉就越多，时间也好像过得越快。罗伯特·福雷沃德(Robert Foreword)在他的科幻小说《龙蛋》(Dragon's Egg)中，以引人入胜的手法运用了这个假设。它讲的是生活在中子星表面上的某个有理智生物社会的故事。这些生物是靠核过程而不是化学过程来维持他们的生存。由于核相互作用要比化学相互作用快几千倍，中子星生物对信息的处理速度也就快得多。人类时标的1分钟等价于他们的许多年。这种中子星社会在同人类第一次接触时是相当原始的，但每一分钟它都在发展，很快便超过人类社会。

遗憾的是，采用这种策略作为在遥远将来生存下去的手段有一个缺陷：信息处理得越快，能量消耗速率也越大，因而可利用能源耗尽得也越快。你也许以为这必然会导致我们后裔末日的来临，不管他们采取何种形体也无法避免。但情况并非一定如此。戴森已经指出，可以有某种巧妙的折衷方案，使这个社会逐渐减慢它的活动速率，以做到与宇宙的衰退相匹配。一条途径是使这种社会进入休眠状态，以不断增加时间长度。在每个休眠阶段中，从前一个活动阶段的努力得来的热可以慢慢地加以消耗，而有用的能量就累积起来，以便在下一个活动阶段中予以利用。

采用这一策略意味着这种生物的主观感受时间在实际流逝时间中所占的比例越来越小，因为这种社会的休眠期总是变得越来越长。但是，我曾强调指出过，永久之长，长不可测，我们不得不与相反的两个极限作斗争：资源趋于零而时间趋于无穷。戴森对这两个极限作了简单的研究后指出，即使总的资源有限，总的主观时间也可以为无限。他引用了一项令人大吃一惊的统计结果：人口水平与今天人类社会相当的某个生物社会，只需 6×10^{30} 焦耳的总能量就可永远维持下去，而这仅仅是太阳在8小时内的能量输出！

但是，真正的永垂不朽要比对处理无穷多信息的能力的要求更高。如果一个人的大脑状态的数目有限，那么他只能思考有限数目的不同思维。如果永远维持这种情况，则意味着翻来覆去地重复相同的思维。这样一种生存方式看来是毫无意义的，就同注定要灭亡的物种所处的情况一样。要避开这条死胡同，这个社会或单个超人必须在尺度上永远不断地扩大。这对非常遥远的未来提出了严峻的挑战，因为物质的消散将比物质能被收罗来作为大脑材料来得更快。也许一个绝望然而却很聪明的人会企图利用那些难以捉摸却又永恒存在的宇宙中微子去扩大他的智力活动范围。

戴森所作的许多讨论，以及对遥远未来智慧生物命运的绝大多数推测，实际上是假定这些生物的精神活动过程始终归结为某种数字计算过程，毫无疑问，数字计算机是一种有限状态的机器，因此它所能达到的状态数有着严格的极限。但是，还有另外一种称为模拟计算机的系统。计算尺就是这类系统的一个简单例子。连续调节滑尺就可进行计算，而在理想化情况下，这可以有无限多种状态。因此，模拟计算机便摆脱了数字计算机的某些限制，即只能贮存和处理有限数目的信息。如果仿照模拟计算机的工作方式对信息进行编码，如用物体的位置或角度来编码，那么这种计算机的能力看上去好像就没有限制了。所以，如果某个超人可以像模拟计算机那样工作，那么他也许不仅能进行无限多个思维，而且可以进行无限多个不同的思维。

遗憾的是，我们并不知道就整体而言宇宙是像一台模拟计算机还是像一台数字计算机。量子物理学认为，即使整个宇宙归根结蒂也应当是“量子化”的，它的所有属性都表现为离散的跳变，而不是连续的变化。不过这纯粹是推测。实际上我们也并不理解大脑的精神活动和物质活动之间的关系。也许不可能以这里所讲的方式用一些简单的物理因素把思维和经验联系起来。

不论精神的本性如何，不容置疑的是，遥远未来的生物将面临最终的生态危机：一切能源为宇宙所消耗。尽管如此，通过“节衣缩食”，看来他们仍有可能达到某种永垂不朽。按照戴森描绘的演化景象，他们的活动对宇宙的影响会越来越小，而宇宙对它们的需求则漠然置之，毫不关心。他们应当无限长地处于不活动的休眠状态，保持然而却并不增加他们的记忆力，同时几乎一点也不干扰寂静黑暗的垂死宇宙。但是，借助巧妙的组织他们仍能够进行无限多个思维，感受无限多个经验。我们还能希望什么呢？

宇宙热寂是我们时代经久不衰的神话之一。我们已经看到，罗素和其他一些人是怎样根据热力学第二定律的预言，抓住宇宙看上去必然要退化的结论来支持由无神论、虚无主义和绝望观念组成的一种哲学思想。随着对宇宙学理解的深化，我们今天能够描绘出一幅多少有所不同的图景。或许宇宙正在逐渐衰退，但它不会消亡。热力学第二定律肯定适用，但它不一定会妨碍文明的永垂不朽。

事实上，也许情况甚至并不会像戴森描绘的那么糟。迄今为止，我一直假定宇宙在膨胀和冷却时或多或少会保持均匀性，但这可能并不正确。引力是许多不稳定性的根源，而且今天我们所见到的宇宙的大尺度均匀性在遥远的将来会被某种较为复杂的结构所

取代。例如，膨胀速度在不同方向上的微小差别可能会被放大。巨黑洞也许会因它们相互间的引力战胜宇宙膨胀的弥散效应而集聚成团。这将导致一场奇特的争斗。请记住黑洞越小则越热，蒸发得也越快。如果两个黑洞并合在一起，所生成的黑洞就变大，因而温度就会下降，而蒸发过程将大为减慢。凡是谈及宇宙遥远的未来，关键在于黑洞并合的速率是否足以跟得上黑洞的蒸发速率。如果跟得上，那么总会有一些黑洞始终存在，它们可以通过霍金辐射提供有用的能源，为人类社会所开发提取，以维持他们的生活而无需休眠。物理学家唐·佩奇（Don Page）和兰德尔·麦基（Randall Mckee）的计算表明，这场争斗就像在走钢丝，关键问题取决于宇宙在不断衰退的过程中膨胀速度究竟有多大。但是，在某些模型中，并合的确最终取得了胜利。

戴森还忽略了这样一种可能性，即我们的后裔自身会尽力修正宇宙的大尺度结构，以使他们能一直生存下去。约翰·巴罗（John Barrow）和弗兰克·蒂普勒（Frank Tipler）曾考虑过一些方法，由此一个高度发达的技术社会也许能稍稍调整恒星的运动，以便巧妙地造成某种对他们自己有利的特定的引力安排。例如，可以利用核武器给小行星的轨道以少量的摄动，于是来自行星的一次弹射式推动能使它撞向太阳。碰撞产生的动量会使太阳在银河系里的轨道发生极其微小的变化。尽管这种效应很小，但具有累积性：太阳走得愈远，偏差便愈大。假如要使太阳向另一颗恒星接近，那么经过许多光年的距离后，这种偏差就能导致具有决定性意义的差别，使原本蜻蜓点水般的相遇发生改变，从而极大地修正了太阳在银河系内的运动轨道。通过这种方式操纵许多颗恒星，便可以创造出一些天体集团并把它们管理好，使之造福于社会。而且，由于这一效应的放大和累积作用，可以通过这种方式来加以控制的系统的尺度就没有任何限制，只要在不同的地方轻轻地推推恒星就可以了。要是足够长的时间——我们的后裔肯定有充裕的支配时间——甚至整个星系都能加以调度。

这种宏伟的宇宙工程将不得不同恒星和星系的天然无规则行为作斗争，因为随机运动会把天体从引力束缚团中抛离出去，从而促使系统走向瓦解，这一点在第七章中已经介绍过了。巴罗和蒂普勒发现，通过操纵小行星来重新调整一个星系需要 10^{22} 年，而系统自然瓦解发生在大约 10^{19} 年的时间内。所以，这场战斗看来大自然明显地占了上风。另一方面，我们的后裔也许能做到控制比小行星大得多的天体。还有，自然瓦解的速率取决于天体的轨道速度。对于整个星系来说，这种速度随着宇宙的膨胀而减小。轨道速度慢了，人工操纵的过程也会放慢，但这两种效应不会以相同的速率减小。看来，随着时间的推移，自然瓦解的速率也许会比工程社会能对宇宙作出重新安排的速率来得低。这样就出现了一种十分有趣的可能性，即随着时间的推移，宇宙中的资源越来越少，而智慧生物却越来越能做到对宇宙加以控制，一直到整个自然界基本上实现“技术化”，而那时自然与人为两者之间的区别应当就不复存在了。

戴森的一个关键性假设是，思维过程不可避免地要消耗能量。人类的思维过程肯定如此，而且迄今都假定任何形式的信息处理必须付出最小的热力学代价。令人惊奇的是，严格说来这个假设并不正确。国际商用机器公司（IBM）的计算机专家查尔斯·贝内特（Charles Bennett）和罗尔夫·兰道尔（Rolf Landauer）已经证明，可逆计算原则上说是可能

的。这意味着某些物理系统（就目前而言这完全是假设性的）可以无消耗地处理信息。这就为想象有这样一种系统提供了可能性，该系统能进行无限量的思维而无需供给任何能量！我们并不清楚这种系统能否收集并处理信息，因为从周围环境中获取任何有用的信息似乎总要涉及到这种或那种形式的能量消耗，哪怕只是从噪声中提取信号都应如此。所以，这类无所需求的生物可以对它周围的世界没有任何感觉。但是，它能记住宇宙是什么，说不定它还能做梦。

有关宇宙垂死的形象已经使科学家们困惑了一个多世纪。我们生活在一个因熵的挥霍而逐渐退化的宇宙之中，这种假设乃是科学民间传说的一部分。但是，这一假设的可靠程度如何呢？我们能否肯定所有的物理过程必然使我们走向混沌和衰退呢？

生物学的情况又如何呢？从某些生物学家为捍卫达尔文进化论所采取的极端辩护方式中，我们可以有所启发。我相信，引起他们这种反应的原因是，对一种显然是建设性的过程抱有格格不入的抵触情绪，而这一过程又是由本质上应该起破坏作用的一些物理作用所推动的。地球上的生命起源于某种粘稠的原始原生质。今天的生物圈是一个复杂繁荣的生态系统，一种由各种各样极为复杂的有机体组成的网络，而这些有机体之间又在发生微妙的相互作用。这好像是一种进步。但是，多数生物学家表现为急于否认曾经发生过任何进步。他们声称，采用这样一种说法只不过是按人类的标准来渲染进化论的变化：一种人类也许被另一种人类判定为在某种意义上优于细菌，但这纯粹是主观意志。

使这些生物学家惶惶不安（我相信这种惊慌是有某种正当理由）的是担心人类会倒退到达尔文之前的目的论的思维方式，即倒退到自我信仰的轨道上去。这种自我信仰认为，我们人类处于进步阶梯的顶端，它代表了上帝刻意安排的某种过程的顶峰，而人类便是这一过程所预期的最终产物。这种思维方式早就名誉扫地，而为了同堕落到这种思维方式的行作斗争，许多生物学家毫无保留地放弃了所有与进步有关的术语。他们声称不存在任何的阶梯，进化没有变得越来越复杂，特别是进化论的发展根本不存在方向性。所存在的只是随机性和无规则行为。

英国科学评论家和幽默作家拉尔夫·埃斯特林（Ralph Estling）曾经写道：只有高级生命才会否认过去 30 亿年中生命一直在进步。对一名物理学家以及对大多数普通人来说，有一点看来是很明显的，那就是今天生物圈的状态与 30 亿年前有着天壤之别。问题是应该更为准确地来说明这种差别有什么特征。

前面关于生存问题的讨论焦点在于信息（或有序）与熵之间的斗争，其中熵始终占据上风。但是，信息本身是我们应当关心的量吗？不管怎么说，有条不紊地努力工作，把所有可能的思维方式都理一遍，这种做法实在令人不敢问津，差不多就像要你读一本电话簿一样。值得考虑的无疑是经验的质，或者说得更通俗一些，是有待收集和利用的信息的质（而不是量）。

就我们所知，宇宙的最初状态根本无特征可言。随着岁月的流逝，出现了我们今天所见到的形形色色而又丰富多采的各种物理系统。因此，宇宙的历史就是复杂结构的组织和成长史。这看上去好像是一种佯谬。我最初曾经解释过，热力学第二定律告诉我们宇宙正在走向死亡，它不可避免地要从初始的低熵状态不知不觉地走向最终的最大熵状态，而且毫无前途可言。那么，事情正在变得更好还是变得更糟呢？

事实上不存在任何佯谬，因为结构复杂性与熵不是一回事。熵，或者说无序，是信息即有序的反义词：你处理的信息越多，或者说产生出越多的有序，那么所付出的熵的代价就越大，这里的有序意味着另外某个地方的无序。这就是第二定律，熵总是赢家。但是，结构和复杂性并不仅仅是有序和信息。它们只与某些类型的有序或信息有关。举个例子来说，我们清楚地认识细菌和晶体之间的重要差别。这两者都是有序的，但方式却不同。晶体点阵表现出严密的均匀结构；这种结构是很漂亮的，然而却显得呆板，实际上多看便令人生厌。相反，细菌的构造安排得非常精巧，它会使人产生浓厚的兴趣。

这些看上去好像只是主观上的判断，但利用数学可以使之更具说服力。近年来开创了一个全新的研究领域，它的目标是使结构复杂性这类概念定量化，并力图为结构建立起与现有物理定律有同等地位的一些普适性原理。这一领域现在仍处于摇篮时期，但已经对许多关于有序和混沌的传统假设提出了挑战。

在《宇宙蓝图》(The Cosmic Blueprint)一书中，我曾经提出有一条“复杂性增加定律”对宇宙是适用的。它应当与热力学第二定律处于同等的地位。这两条定律之间不存在任何不相容性。实际上，对一个物理系统来说，结构复杂性的增加是以熵为代价的。例如，在生物进化的过程中，在一种更为复杂的新有机体出现之前，必然要发生许多破坏性的物理过程和生物过程（例如非适应性突变体的过早死亡）。即使一片雪花的形成产生的余热，也会使宇宙的熵增加。但是，我们已经作过解释，这里不存在任何直接的替换关系，因为结构并不是熵的反义词。

我非常高兴地看到，许多研究者已经得出类似的结论，并正努力使复杂性“第二定律”公式化。我可以推荐米切尔·沃尔德鲁普(Mitchell Waldrop)所著的《复杂性》(Complexity)一书来作为对这类研究进展的绝妙的总结。虽然复杂性定律与热力学第二定律并不矛盾，但它对宇宙变化的解释却大为不同，它所描述的宇宙正在进步，从基本上无特征的初始状态，发展到结构越来越复杂，越来越精巧。

复杂性第二定律正在不断完善之中，它对宇宙的结局有着深远的意义。如果结构复杂性不是熵的对立物，那么尽管宇宙中负熵的贮存有限，也不需要复杂性程度加以限制。因复杂性的增加而付出的熵的代价也许完全是附带的，而不是基本的；纯有序化或者进行信息处理正是这种情况。如果是这样的话，那么我们的后裔也许有能力达到结构不断地变得越来越复杂的那种状态，而同时却没有对不断减少的资源造成浪费。尽管他们处理信息的数量也许会受到限制，但就他们的智力活动和体力活动的丰富程度和性质而言，也许并不存在任何的限制。

在本章以及前面一章中，我一直试图简要地说明宇宙正在缓慢地衰退，但也许永远不会完全把精力消耗殆尽；这也就是要说明那些稀奇古怪的幻想出来的生物为了维持生存而尽力减少不必要的额外开支——这种开支总是越积越多而给他们造成了困难，并借以考察他们为对付热力学第二定律不可避免的逻辑结局所表现的聪明才智。他们不顾一切地为生存下去进行着一场并非完全绝望的斗争，这种场面也许会使某些读者感到兴奋，而另外一些读者可能会对此忧心忡忡。我本人则是两种情绪兼而有之。

但是，全部推测的基础是假设宇宙将会永远不断地膨胀下去。我们已经知道为什么这只是宇宙的一种可能的命运。如果这种膨胀的减速能足够快，那么有一天宇宙也许会停止膨胀，并开始朝一场大危机收缩。那时，生存下去的希望又是什么呢？

第九章 快道上的生命

要是不存在“永恒”，人类或者外星智能人，无论他们的数量有多大，都不可能把生命永远延续下去。如果宇宙作为整体只能存在有限的时间，那么世界末日是不可避免的。在第六章中，我解释了宇宙的最终命运如何取决于它的总重量。观测表明，宇宙的重量所处的地位非常接近永恒膨胀和最终坍缩间的临界点。如果宇宙最终确实会开始出现收缩，任何智慧生物的经历实际上就会同上一章所描述的情况大不相同了。

宇宙收缩的早期阶段丝毫不构成任何威胁。就像一只扔向空中并已到达轨道顶点的小球那样，宇宙会开始缓慢地向内下落。我们假定到达这个最高点的时刻出现在 1000 亿年以后，那时仍然有许多恒星在继续燃烧，而我们的后裔应当有能力利用光学望远镜跟踪遥远星系的运动：这些星系的退行在逐渐变慢，然后开始回落，彼此越来越接近。今天我们所能见到的星系在那时将会处于大约 4 倍远的距离上，因为宇宙的年龄增大了，那时的天文学家能观测到的距离大约 10 倍于我们能见到的距离。因此他们观测到的宇宙中所包含的星系，应当比我们这个时代能够见到的星系多得多。

光线穿越宇宙需要好几十亿年时间，这个事实意味着 1000 亿年以后，任何天文学家在很长一段时间内会看不到这种收缩。他们首先注意到的应当是，比较近的星系平均说来相互接近要比彼此远离来得多，但是从遥远星系来的光线仍然会表现出红移。只是在几百亿年以后，系统性的内落才会变得明显。比较容易识别的应当是宇宙背景热辐射温度的微小变化。我们应当记得，这种背景辐射是大爆炸遗留下来的产物，现在它的温度在绝对温标 3 开左右。这个温度会随着宇宙的膨胀而下降。1000 亿年后，它会降低到 1 开左右。在膨胀的最高点，这个温度降到了最低。一旦收缩开始，温度会重新上升，当宇宙又收缩到与今天有同样密度时再次回升到 3 开。这又需要 1000 亿年时间：宇宙的增大和回落在时间上是对称的。

对此，没有必要造成恐慌。宇宙不会简单地在一夜之间坍缩。事实上，即使在收缩阶段，我们的后裔也能在几百亿年时间内好好生活，安度时光。但是，如果转折点在更长得多的时间之后出现，譬如出现在 1 亿亿亿年之后，那么情况就不容过份乐观了。这种情况下，在膨胀达到最高点之前恒星已结束燃烧，任何当时还活着的居民会开始面临在永恒膨胀宇宙中所会遇到的同样问题。

无论转折在什么时候出现，如果从现在开始用年来计量，那么宇宙要在转折后经过相同的年数才再次回到今天的大小。不过，它的样子将会有很大的变化。要是认为转折就出现在 1000 亿年后，那么同现在相比，那个时候黑洞会多得多，而恒星却要少得多。可供人类居住的行星将会非常珍贵了。

在宇宙到达这个阶段时，它收缩的步伐已经相当快了，大约再过 35 亿年，宇宙的

尺度会减小一半，并且不断地加速减小。但是，真正紧张的时刻大约出现在这一阶段之后的 100 亿年，那时宇宙背景热辐射温度的上升开始构成一种严重的威胁。当温度上升到绝对温标 200 开时，像地球这样的行星就很难把热量释放出去，它会越变越热，而且毫无挽回的余地。首先，所有的冰冠或冰川都会融化，然后海洋开始蒸发。

再过 4000 万年，背景辐射温度会达到今天地球的平均温度。那时，像地球那样的行星将完全不适合人类居住。当然，在太阳膨胀成一颗红巨星时，地球早已承受过类似的命运。但在此时此刻，已没有任何别的地方可去，没有一个安全的避难场所。背景热辐射充满整个宇宙。整个空间的温度都达到摄氏 20 度，并且还在上升。那时人类或者已适应这种灼热的环境，或者已创造出一些制冷生态系统以推迟被煮烤的威胁。他们都应当注意到，宇宙那时正以一种狂热的步伐在坍缩，每过几百万年尺度就会缩小一半。在收缩的这一阶段，所有还存在的星系都已不能再加以识别了，因为那时它们应当已经并合到一起。但是，空间还是很大的，个别恒星之间的碰撞应当很少出现。

宇宙在接近它的最后阶段时，环境条件应当同大爆炸后不久起支配作用的那些条件越来越相似。天文学家马丁·里斯(Martin Rees)进行了一项有关宇宙末日学的研究。他运用普通的物理原理已能构造出一幅最后坍缩阶段的景象。宇宙热辐射最终变得非常强，使夜间天空发出淡红色的辉光。漆黑的宇宙慢慢地变成一个无所不包的宇宙熔炉，所有脆弱的生命形式，无论他们躲在何处，都要受到酷热的折磨，而行星的大气层也已被剥得干干净净了。红色的辉光渐渐地变成黄色，然后是白色，直到充满整个宇宙的可怕的热辐射威胁到恒星本身的存在。因为无法把自身的能量辐射出去，恒星热量就会在内部堆积起来，结果发生爆炸。空间会逐渐地被热气体即等离子体所充满，会发出可怕的光芒，同时一直不断地越变越热。

随着变化步伐的加快，环境条件不断地走向极端。宇宙开始发生明显变化的时间尺度只需要 10 万年，然后只要 1000 年，接下来是 100 年，朝着总的灾变加速前进。温度上升到几百万开，然后是几十亿开。分布在今天浩瀚空间中的物质被挤入很小的体积内。一个星系的质量所占据的空间直径只有几个光年。最后三分钟来临了。

最终，温度变得极高，甚至连原子核也分裂了。物质被剥离得成了一锅均匀的基本粒子汤。在不到你读完这一页书的时间内，大爆炸和一代又一代恒星创造化学重元素的杰作就被破坏殆尽。保持了无数亿年的最稳定结构——原子核——无可挽回地被摧毁了。除黑洞之外，其余一切结构早已被烧烤得不复存在。现在，宇宙的结构变得很简单，这种结构尽管别致，却是前途凶险，它只剩下几秒钟的生存时间。

随着宇宙坍缩得越来越快，温度也上升得越来越快，而且没有明确的限制。物质受到的压缩作用极为厉害，区分单个质子和中子已变得毫无意义，所存在的只是一种由夸克组成的等离子体。然而，坍缩还在加速进行。

现在所处的阶段离开宇宙最终大灾变只剩下最后几个微秒时间。黑洞开始相互并

合，其内部情况与整个宇宙的总坍缩状态几乎毫无区别。它们现在只不过是一些略为提早到达末日的时空区域，并且正在和宇宙的其他部分掺合在一起。

在最后那些时刻，引力成为占绝对优势的作用，它毫不留情地把物质和空间碾得粉碎。时空曲率不断地增大。越来越大的空间区域被压缩到越来越小的体积之内。按照常规理论，这场暴缩有着无比强大的威力，所有的物质都因挤压而不复存在，一切有形的东西统统都被消灭，其中也包括空间和时间本身在内，剩下的只是一个时空奇点。

这就是末日。

就我们的理解，这场“大危机”不只是一切有形结构的末日，甚至也不仅仅是物质的末日，它是一切事物的末日。因为在大危机的瞬间，时间本身已经停止，要问以后会发生什么是毫无意义的，就像问大爆炸前发生过什么一样。对任何事物来说，根本不存在“以后”会发生什么，没有任何时间可言，那怕是静止的时间都没有，也不存在空的空间。大爆炸时从虚无中诞生的宇宙，将在大危机中于虚无中消失，它曾经灿烂辉煌地存在了无数亿年，而现在甚至连一丝回忆也不会留下。

我们应该为这样一种前景而感到气馁吗？一种情况是宇宙永无休止地向着黑暗空虚的状态缓慢地退化和膨胀，另一种则是在剧烈的暴缩中湮没，两者哪一种更为糟糕呢？还有，在一个注定要走到时间尽头的宇宙里，永垂不朽的希望又是什么呢？

同一个无限膨胀的宇宙在遥远将来的状态相比，逼近大危机时的生命看来更没有希望。现在的问题不是缺乏能量，而是能量太多。但是，我们的后代也许还有数十亿年甚至数万亿年的时间来对付这场最后的大屠杀。这段时间里，生命能够扩展到整个宇宙。对于最简单的再坍缩宇宙模型来说，总的空间体积实际上是有限的。这是因为空间是弯曲的，在一个三维等价球面上空间可以自相连通。因而可以想象，智慧生物有能力传播到整个宇宙，并对它加以控制，因此他们可以调整自己的位置，支配一切可能的资源来对抗这场大危机。

初看起来，很难理解他们为什么会感到烦恼。要是大危机后的生存在逻辑上是不可能的，那么把痛苦挣扎的状态只是延长一点点时间，其目的又是什么呢？湮没发生在末日来临之前 1000 万年还是 100 万年，这对一个年龄为几万亿年的宇宙来说是完全一样的。但是，我们不应当忘记时间是相对的。我们后裔的主观时间将取决于他们新陈代谢和信息处理的速度。还有，要是假定他们有充裕的时间去改变他们的体形，那么他们也许有能力把罪恶变成美德，把哈得斯(Hades 扫校者注：希腊神话里的冥王)的逼近变成一种永生。

温度的上升意味着粒子运动加快，而物理过程也发生得愈快。请记住，对一种智慧生物的基本要求就是要有处理信息的能力。在一个温度逐步升级的宇宙中，信息处理的速度也会加快。要是有一个能利用 10 亿开条件下的热力学过程，那么对于他来说，

宇宙的湮没已迫在眉睫，似乎就应发生在几年之后。如果余下的时间在观察者的意识中可以无限延伸，那么就无需担心时间的末日。随着坍缩朝最终危机加速发展，观测者的主观经历原则上可以扩大并能不断地加快这个过程。这样一来，逐步升级的思维速度就同朝着世界末日的加速冲刺相匹敌了。

奇妙的是，我们不知道对于一个居住在坍缩宇宙中并处于最后时刻的超人来说，在可以利用的有限时间里，他是否会有无限多个性质不同的思维和经历。巴罗和蒂普勒一直在研究这个问题。其答案关键取决于最终阶段的物理细节。例如，要是在逼近最后奇点的过程中宇宙始终保持良好的均匀性，那么就会产生一个重要的问题。不论思维的速度是多少，光速总保持不变，每秒钟它最多只能穿越 1 光秒的距离。因为光速决定了任何物理效应所能传播的极限速度，由此得出的结论是，在最后 1 秒钟内，同宇宙中距离大于 1 光秒的区域之间不可能进行任何的通讯联系（这是事件视界的另一种例子，同阻止从黑洞取得信息的视界是相类似的）。随着末日的临近，可通讯区域的尺度和它们所包含的粒子数也就向着零缩减。对于一个要处理信息的系统来说，它的各个部分最起码需要进行通讯。很清楚，光速有限所起的作用是限制了末日来临之际还有可能存在的任何“大脑”的尺度，因而也就会限制这个大脑可能具有的不同性质状态的数目，即思维的数目。

为了摆脱这种限制，宇宙坍缩的最后各个阶段一定要偏离均匀性。事实上，这是很有可能的。有关引力坍缩的大量数学研究表明，随着宇宙发生暴缩，不同方向上的坍缩速率开始出现变化。奇妙的是，这个问题并不简单地表现为宇宙在一个方向上比另一个方向收缩得更快些。所发生的情况是开始出现振荡，所以坍缩最迅速的方向一直在改变。实际上，宇宙是在剧烈程度和复杂性不断增加的多次循环中，以摆动的方式走向消亡的。

巴罗和蒂普勒推测，这些复杂的振荡造成事件视界先在一个方向上消失，然后在另一个方向上消失。这样变来变去使得空间的所有区域都能保持联系。因为这种振荡使得比较快的坍缩一会儿出现在一个方向，然后又出现在另一个方向上，所以任何超级大脑必须思路敏捷，应当能接通不同方向之间的通讯联系。如果这个超人能够做到与振荡保持同步的话，那么振荡本身就可以提供推动思维过程所必需的能量。还有，在一些简单的数学模型中，大危机前最后那段有限的时间内，看来会发生无数次振荡。这就为进行无限数量的信息处理提供了必要的条件。因此根据假设，也就为这位超人提供了无限的主观时间。所以，即使物理世界在大危机时突然寿终正寝，精神世界也许永远不会完结。

要是大脑的功能没有限制，它可以做些什么呢？按照蒂普勒的观点，对于它自身的存在以及它所卷入的那个宇宙，大脑应当有能力进行全面而又细致的考虑；不仅如此，由于它有着无限的信息处理能力，大脑也能以某种丰富多采的虚假现实不断地模拟出一些假想的世界。所以，最后三分钟不仅会变得无限地扩展，而且反映无数种不同的宇宙活动的模拟现实也可以建立。

遗憾的是这些推测（有时是些异想天开的推测）取决于一些非常特殊的物理模型，而这些模型有可能被证明是完全不现实的。它们也没有包含量子效应，而这种效应在引力坍缩的最后那些阶段应有可能起着支配作用，并且有可能为信息处理的速率规定某个最终极限。如果是这样的话，让我们期望宇宙超人或超级计算机至少在它所能利用的时间内会逐步做到对生存取得充分的理解，这样它就能顺乎天命去面对自己必然会死亡的命运了。

第十章 暴卒与再生

迄今为止我总是假定，无论是通过惊天动地的事件，还是悲惨凄凉的形式（或者更确切地说，是通过大危机还是深冻），宇宙末日的来临都是发生在非常遥远的、甚至可能是无限远的未来。假如宇宙会发生坍缩，我们的后裔应当有好几十亿年的时间来警惕这场即将发生的危机。但是，还有另外一种更令人恐惧万分的可能性。

我已经解释过，当天文学家注视天空的时候，他们并没有看到目前状态的宇宙，天空所显示的图象不同于一幅瞬时拍摄的快照。因为光从遥远的地方到达我们这里要花一定的时间，我们在天空中所见到的任何一个天体都是它在发光瞬间的象。望远镜也是一种望时镜。天体离得越远，我们今天见到的象在时间上就倒退得越早。实际上，天文学家的宇宙是一个穿越时空回溯的像，它的技术用语是“过去光锥”，图 10-1 描述了这种情况。

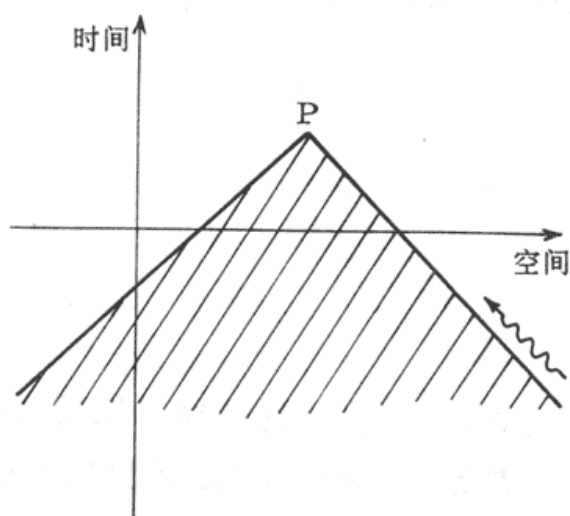


图 10-1 一位天文学家从某个时空点 P（例如该点也许就在此刻此地）眺望宇宙。他其实看到的是过去的而不是现在的宇宙。沿着以 P 的顶点的“过去光锥到达的信息用斜线表示。这些斜线代表过去宇宙的遥远区域会聚到地球上的光信号的路径。因为任何信息或物理影响的传播都不可能快于光速，观测者在图示时刻只能知道阴影区内发生的影响或事件。在过去光锥以外某个预示世界末日到来的事件，可能正把它的灾难性影响（波浪线）飞快地向地球传来，而观测者在这些影响到达之前应当对这个事件一无所知，这也可以算是一种幸运。

根据相对论，任何信息或物理影响都不能传播得比光更快。因此，过去光锥所划定

的不仅是有关宇宙一切知识的界限,而且也是在这一瞬间有可能对我们产生影响的所有事件的界限。由此可见,任何以光速向我们逼近的物理影响在到达之前是完全无法预防的。如果大灾难沿着过去光锥朝着我们迎面而来,那么死神的降临就不会有任何的先兆。只是当它袭击到我们时,我们才刚刚知晓。

举一个简单的假设性例子。要是太阳现在爆炸了,我们要在 8 分半钟以后才会知道这个事实,这就是光从太阳到达我们所花的时间。同样,附近的一颗恒星完全可能已发生超新星爆发,这种事件可以使地球完全笼罩在致命的辐射之中。但是,在这个可怕的消息以光速穿越银河系疾驰而来的过程中,我们还会在好几年的时间内对这个事实一无所知,这也可以算是一种幸运。所以,虽然此时此刻宇宙也许看上去平安无事,但我们不能肯定是否已经发生了某种真正令人恐怖的事件。

宇宙中大多数突发性剧变所造成的危险只局限于事件发生地的附近区域。恒星的死亡或物质陷入黑洞会对行星和附近的恒星起破坏作用,其影响范围也许有几个光年。最壮观的爆发看来就是那些发生在某种星系核中的事件。正如我已描绘过的那样,巨大的物质喷流有时会以接近光的速度向外抛出,同时发射出大量的辐射。这是星系尺度上的剧变。

那么宇宙尺度的破坏事件又如何呢?比方说,在生命存在期间是否会出现一个一下子就毁灭整个宇宙的灾难呢?一场真正的宇宙大灾难会不会已经触发,它那令人胆战心惊的效应,甚至现在就已沿着我们的过去光锥朝我们脆弱的时空区域席卷而来呢?

1980 年,物理学家西德尼·科尔曼(Sidney Coleman)和弗兰克·德卢西亚(Frank De Luccia)发表了一篇新奇的文章,它以平淡无奇的标题“引力效应和真空衰变”刊登在《物理评论》杂志上。他们所指的真空不仅仅是空无一物的空间,而且是量子物理的真空态。在第三章中我已经解释过,在我们看来也许是空无一物的真空,实际上怎样沸腾着极短暂的量子活动,幽灵般的虚粒子出现、传播又再次消失,就像是一场随便闹着玩的游戏。前面已经提到过,这种真空状态也许不是唯一的,可以存在多种量子状态,每一种看上去都像是空无一物,但却不同程度地经历着量子活动,与此相联系的就有不同的能量。

高能态往往要向低能态衰变,这是量子物理学中一条完全确证的原理。例如,一个原子可以取一定范围内的若干种激发态,但这些激发态都是不稳定的,原子会力图向最低能态即“基”态衰变,这个基态才是稳定的。同样,一种激发真空态也会力图向最低能态即“真”真空态衰变。暴胀宇宙演化图象所依据的理论是,宇宙从一种激发真空态或“伪”真空态开始,在伪真空态期间,它疯狂地暴胀,但经过一段极为短暂的时间,这种状态便衰变成真真空,暴胀也就停止了。

目前通常假定,宇宙的现有状态对应着真真空态,这就是说,是所有可能的能态中今天的空间是最低能量的真空态。但是,对于这一点我们有把握吗?科尔曼和德卢西亚考虑了一种令人恐惧的可能性,即现在的真空态实际上也许不是“真”真空,而是一种有

相当长寿命的亚稳态,这也就是另一种伪真空,它一直在以一种伪装的安全感哄骗我们,因为它已经延续了几十亿年。我们知道许多量子系统,如铀核,它的半衰期为几十亿年。能够想象现在的真空态会属于这一类型吗?科尔曼和德卢西亚在文章中所提到的真空“衰变”涉及到一场大灾难的可能性,即现在的真空态也许会突然终止,把宇宙扔进一个更小更低的能态,同时给我们(以及所有别的事物)带来悲惨的结局。

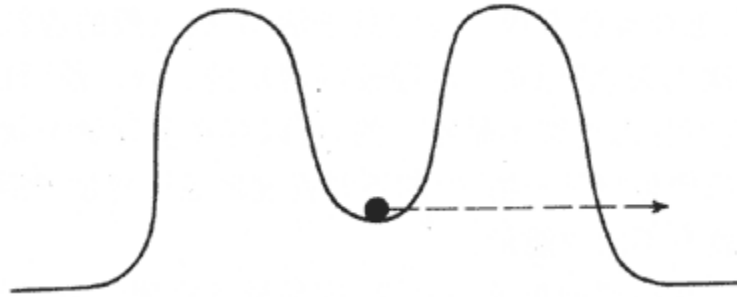


图 10-2 隧道效应 如果粒子陷入两座小山间的谷地中,它有很小的概率能通过借贷能量越过小山逃出去。实际上,这是在观察穿越势垒的隧道效应。一种熟悉的情况是某些元素原子核中的 α 粒子通过隧道效应穿越核力势垒并飞离原子核,这种现象称为 α 放射性。在这个例子中,“小山”由核力及电力产生,这里画的只是示意图。

科尔曼和德卢西亚假设的关键是量子隧道效应这种现象。量子粒子被力的势垒所俘获的那种简单情况可以对上述效应作出最好的说明。假设这个粒子位于一个小山谷中,它被两侧的小山所束缚,图 10-2 说明了这种情况。当然,这不一定是真实的小山,例如它们可以是电子场或核力场,在没有取得越过小山(即克服力势垒)所必须的能量时,这个粒子看来会永远困在谷底。但是要记住,所有的量子粒子都服从海森伯不确定原理,它可以在很短的时间内“借贷”到能量。这就开辟了一种很有趣的可能性。如果这个粒子能够借到足够的能量以到达山顶,并在它必须偿还这份能量之前翻到山的另一侧,那么粒子就可以逃出这个陷阱了。实际上,它会借助隧道穿过势垒,好像它根本就没有在那里呆过一样。

量子粒子“泄出”这类势阱的概率非常灵敏地取决于势垒的高度和宽度。势垒越高,粒子为达到山顶所必须借到的能量也越大。还有,根据不确定原理,借贷期也必须越短。因此,对于高势垒,只有当它们同时又是薄势垒时才能利用隧道效应,这样粒子才能很快地穿过它们,以便拒绝按时还清借来的能量。出于这个原因,在日常生活中隧道效应并不引人注意。要能出现有效的隧道作用,“每天”的势垒实在是太高也太宽了。原则上说,人类可以步行穿过砖墙,但出现这种奇迹的量子隧道作用概率极其微小。然而在原子尺度上,隧道作用很普遍。例如, α 放射性正是通过这种机制出现的: α 粒子从力图捕获它们的原子核中泄漏出来。隧道效应也被应用在半导体和其他一些电子产品上,如隧道二极管。

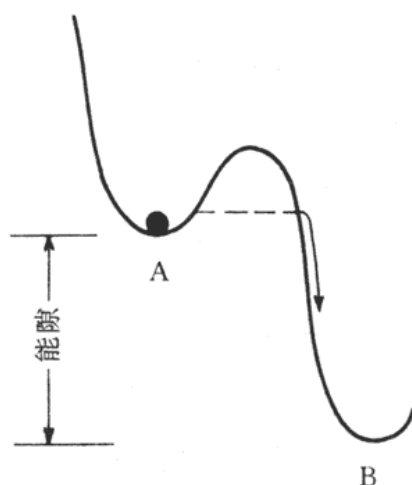


图 10-3 伪真空态和真真空态 也许有这样的情况：空间 A 现在所处的量子态不是最低能态，但尽管如此它还是准稳的，因为它对应着某种位置比较高的山谷。因此，应当存在极小的概率可以使这种量子态借助隧道效应衰变到真正稳定的基态 B。这两种状态间的跃迁是通过宇宙泡的成核作用而出现的，并会释放出巨大的能量。

现在回到有关真空衰变的问题上来。科尔曼和德卢西亚推测，组成真空的量子场也许会经受像图 10-3 所表示的那种力场的作用（这里是一种比喻）。现在的真空态对应着从谷底 A。但是，真真空对应着谷底 B，它比 A 还要低。真空要想从较高的能态 A 向较低的能态 B 衰变，但是使 A 和 B 隔离开来的那座小山把它挡住了（注意：这些小山和山谷代表了力和场的配置——它们同实际空间中的特征并不一一对应）。现在，虽然小山妨碍了衰变，但考虑到隧道效应的话，它并没有完全阻止衰变的发生：系统可以借助隧道从谷 A 穿到谷 B。发生这种现象所需的时间将取决于这种跃迁的概率有多大。上面已经解释过，这种概率对小山的高度和宽度十分敏感。这两个量的数值完全有可能造成这样的情况：也许要经过几十亿年后跃迁才会突然发生。在这种情况下，宇宙也许正生存在借来的时间上，挂在谷 A 的上方，但它会有一定的机会在某个任意时刻借助隧道进入谷 B。

科尔曼和德卢西亚用数学方法对真空衰变进行了模拟，以找到这种现象出现的方式。他们发现，衰变开始出现时的空间位置是随机的，它表现为一个“真”真空小泡，四周被不稳定的“伪”真空所包围。这个小泡一旦成核，就很快地膨胀，膨胀速度迅速趋近光速。越来越大的伪真空区域被它所吞没，同时转变成真真空。在第三章中我曾讨论过，这两种状态的能量差也许会达到非常大的程度，它集中在泡壁上，并扫过整个宇宙，同时也把它在前进道路上所遇到的一切事物统统毁灭掉。

只有当泡壁出现，而我们这个世界的量子结构突然发生改变时，我们才会知道真空泡的存在。我们甚至没有 3 分钟的预警时间。顷刻之间，所有亚原子粒子的性质以及它们的相互作用会发生剧烈的变化。例如，质子也许会在瞬息之间发生衰变，在这种情

况下，一切物质都会突然蒸发。那时，留下来的东西会发现自己处于真真空泡的内部，事物的这种状态与我们现在所观察到的情况大不相同。最重要的差别与引力有关。科尔曼和德卢西亚发现，较低真空态的能量和压力会产生一种强大的引力场，它使泡内的区域会在不到 1 微秒的时间内坍缩。这一次，从容不迫地向大危机收缩的情景不见了，相反的是，随着泡的内部突然暴缩成一个时空奇点，一切东西几乎立即湮没。总之，这是一场瞬息之间出现的灾难。“这是很令人泄气的”，两位作者巧妙而又谨慎地评论道，“我们正生活在一个伪真空中的可能性从来都不是我们所期待的、令人欢快的事情。真空衰变是最终的生态大灾难……在真空衰变后，不仅我们所知道的生命不可能存在，而且我们所认识的化学过程也不可能出现。但是，过去人们始终以为随着时间的流逝也许新的真空会维持某种东西并能够从这种可能性中获得一丝淡泊的安慰——即使那时的生命不是我们现在所认识的生命，那么至少也是懂得乐趣的某种组织，但现在连这种可能性也已被排除了。”

科尔曼和德卢西亚的论文发表后，骇人听闻的真空衰变成了物理学家和天文学家广为讨论的议题。通过对粒子物理学最新思想的深入研究，迈克尔·特纳(Michael Turner)和弗兰克·威尔扎克(Frank Wilczek)得出了一个启示式的结论：“因此从微观物理学的观点来看，完全可以想象我们的真空是亚稳态的……真真空泡会在毫无预兆的情况下在宇宙的某个地方成核，并以光速向外运动。”

特纳和威尔扎克的论文在《自然》杂志上发表后不久，皮特·赫特(Piet Hut)和马丁·里斯(Martin Rees)唤醒了一个可怕的幽灵：一个使宇宙遭到破坏的真空泡得以成核也许是被粒子物理学家本身在无意之中所触发的！问题在于，亚原子粒子的甚高能碰撞有可能仅在一瞬间内，就会在一个非常小的空间区域中创造出促使真空发生衰变的一些条件。一旦这种跃迁发生，哪怕是发生在微观尺度上，也无法阻止新形成的真空泡在瞬息内膨胀到天文尺度。是否我们应查禁下一代粒子加速器呢？

赫特和里斯也在《自然》杂志上发表一项备受欢迎的积极证明。他们指出，宇宙线的能量早已超过我们在粒子加速器内所能获得的能量，而这些宇宙线几十亿年来一直在轰击地球大气中的原子核，却丝毫没有触发真空衰变。另一方面，随着加速器的改进，能量提高了大约几百倍，我们也许有能力产生出更大能量的撞击，它将超过任何宇宙线撞击地球时产生的能量。然而，现实问题不是真空泡的成核现象是否会在地球上出现，而是它是否会在大爆炸以后的某个时刻已经出现在可观测宇宙中的某个地方。赫特和里斯指出，两束宇宙线出现迎面碰撞的机会非常小。他们的计算得出，在宇宙的历史中，必定发生过能量比现有加速器大几十亿倍的碰撞事件。所以，我们还不需要制定一项权威性的规定。

自相矛盾的是，尽管真空泡成核现象会威胁宇宙本身的存在，但就是同样的真空泡成核现象却在与此稍为不同的另一意义上却又证明是宇宙的唯一可能生路。摆脱宇宙死亡的万全之策是应该创造出一个新宇宙，并躲进这个宇宙中去。这听起来似乎是天方夜谭式的幻想，但“婴宇宙(Baby Universe)”的研究已成为近几年来广泛讨论的论题，而

且这种讨论是严肃的。这个论题最初是由一个日本物理学家小组在 1981 年提出的，当时他们所做的是用一个简单的数学模型来研究受真真空泡包围的伪真空小泡的变化特性。因此，情况正好与我上面讨论的相反。他们得到的预期结果是，伪真空应当以第三章所描述的方式暴胀，在一场大爆炸中迅速膨胀成一个巨大的宇宙。初看起来，似乎是伪真空泡的暴胀必定造成泡壁极大地膨胀，结果伪真空区域增大的代价是牺牲了真真空区域。但它与下面这种预期的情况是矛盾的：真真空的能量比较低，它应当取代能量较高的伪真空，而不是相反。

非常奇特的是，从真真空区域来观察的话，伪真空泡所占据的空间区域看来并不暴胀。事实上，看上去它更像是个黑洞，这种情况好像沃博士的时间机器塔迪斯(Tardis ，扫校者注：欧美科幻电视剧 Dr. Who 里的时间机器)，从里面看它会显得要比从外面看它来得大。一个位于泡内的假想观察者会看到宇宙膨胀到巨大的尺度，但从泡外来观察的话，宇宙仍是致密的。

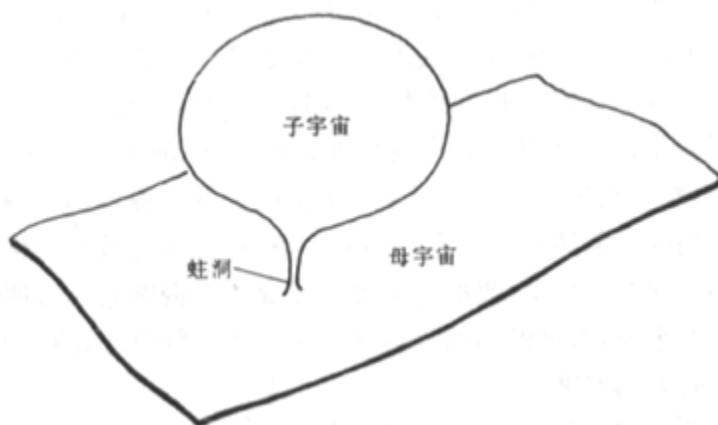


图 10-4 一个空间气泡像气球那样从母宇宙中长地来，这就形成了一个子宇宙，它通过脐带蛀洞与母体相连。从母宇宙的角度来看，蛀洞的嘴犹如一个黑洞。随着这个黑洞的蒸发，蛀洞的咽喉就掐断了，因此同母宇宙失却了联系。接着婴宇宙凭借自己的地位成为一个独立存在的宇宙。

为了观察这种特殊事态，有一种方法是用一张橡皮来进行模拟。这张橡皮的某个地方鼓出了一个泡，并像气球那样向外膨胀（图 10-4）。这个气球形成了一个婴宇宙，它通过一条脐带，也就是蛀洞与母宇宙相连。蛀洞的咽喉像一个黑洞那样从母宇宙中露出来。这种结构实际上是不稳定的。黑洞因霍金效应而很快地蒸发，使它完全从母宇宙中消失。结果，蛀洞被掐掉了，婴宇宙与母宇宙失去了联系，名正言顺地变成了一个新的独立的宇宙。这个子宇宙(Child Universe)从母胎中“发育”出来以后，发展过程和我们的宇宙是相同的：一个短暂的暴胀期后紧跟着的就是通常的热大爆炸。这种模型所包含的明显的言外之意是，我们自己的宇宙正是通过这条途径，作为另一个宇宙的后代而诞生出来的。

暴胀理论创始人艾伦·古思(Alan Guth)和他的一些同事研究了上述演化图象是否允许出现一种异乎寻常的可能性,这就是通过审慎的操纵,也即在实验室里能否创造出一个新宇宙来。与伪真空衰变成真真空泡那种骇人的情况不同,创造出一个四周为真真空所包围的伪真空泡不会对整个宇宙的存在构成威胁。事实上,虽然这种实验也许会触发一次大爆炸,但就实验室来说,这种爆炸完全会受到限制,限制在一个马上会蒸发的微黑洞内。这个新宇宙应当创造出它自己的空间,而不会把我们空间的任何一部分吞食掉。

虽然这种思想仍然是高度猜测性的,而且完全建筑在数学推理的基础上,但某些研究表明,沿着这条途径,通过精心设计的方法把巨大的能量集中起来,也许有可能创造出一些新的宇宙。这就提出了一种令人神往的可能性:在遥远的未来,当我们自己的宇宙逐渐变得不适宜居住或向大危机逼近时,我们的后代也许会决定采用“出外寻找乐土”办法,启动新宇宙的发育过程,然后在蛀洞的脐带被掐掉之前通过它爬进邻近的宇宙。这必定是最终的移民。当然,没有人知道这些无畏的人类如何完成或是否能完成这项壮举。最低限度来说,通过蛀洞的旅行应当是相当不舒服的,除非他们需要进入的黑洞非常大。

撇开这些实际问题不谈,正是婴宇宙这种可能性不仅为我们的后裔,而且也为那种宇宙开辟了真正永垂不朽的前景。我们不当去思考这个宇宙的诞生和死亡,而应当去思考正在无限繁殖的一个宇宙家庭,每个宇宙都生出一些新一代的宇宙,而且也许是成批地诞生出来。通过这种宇宙生育能力,宇宙集合,或真正意义上应称之为超宇宙(metaverse),也许不会有任何开端和终结。每个单独的宇宙会按本书前几章所述的方式诞生、演化和死亡,但作为一个整体,这个集合应永远存在。

这种演化图象留下一个悬而未决的问题:创造出一个像我们这样的宇宙是自然发生的事件(类似于自然出生的婴儿),还是人为操纵的结果(“试管”婴儿)。我们可以设想,在母宇宙中有一个充分先进而又无私的人类社会,他们也许会决定创造一批婴宇宙,这并不是为自己生存提供逃亡之路,而只是一旦它们自己的宇宙末日来临,使生命有可能在某个地方永恒地存在下去。这样就不需要对付上面提到的那些难以逾越的障碍,而这种障碍在企图筑造通往子宇宙的蛀洞通道时总是要遇到的。

我们并不清楚婴宇宙会包含多少它母亲的遗传特征。物理学家也还没有理解自然界的各种力和物质粒子为什么会表现出现在所具有的属性。一方面,这些属性可能是自然规律的一部分,它们一旦被确认,任何宇宙中的所有东西都要受这些规律的制约。另一方面,其中某些属性也许是演化中偶然事件的结果。例如,很可能有不止一个“真”真空态,它们具有完全相同或几乎相同的能量。情况可能是这样,伪真空在衰减到暴胀纪元结束时,在这么多可能的真空态中,它简单地随意选择了其中的一个。就宇宙的物理学而言,真空态的选择决定了粒子和粒子之间作用力的属性,甚至可能决定空间的维数。所以,一个婴宇宙也许同它的母亲有着完全不同的性质。生命也许只可能出现在极少数后代之中,那里的物理学应该同我们宇宙的物理学非常类似。或者也许存在某种遗传原理,只要不出现离奇古怪的变种,它能保证婴宇宙继承它们母宇宙的几乎所有的性质。

李·斯莫林(Lee Smolin)一直主张甚至可能有某种达尔文式的进化在宇宙中间起作用 ,它通过间接的方式促进了生命和意识的出现。更令人感兴趣的是 ,宇宙有可能通过母宇宙中智慧生物的操纵创造出来的 ,并有意把产生生命和意识的必要性质赋予宇宙。

所有这些概念都不是毫无根据的胡思乱想 ,但宇宙学这门学科差不多完全处于摇篮时期。上面所考虑的种种异想天开式的推测 ,至少可以作为前几章悲观预测的某种安慰。这些推测表明 ,即使我们的后裔有一天必定会面临这最后的三分钟 ,某些理智生物仍有可能始终存在下去。

第十一章 世界无尽头吗

人们一直在讨论各种可能性以找到摆脱宇宙末日的出路,而上一章所论述的那些奇特的想法并不是这类可能性的唯一代表。每当我作有关宇宙末日的演讲时,总有人向我问到循环模型。这种模型认为,宇宙膨胀到极大尺度,然后再收缩到大危机,但它并没有完全湮没,由于某种原因它出现“反弹”,并开始新一轮由膨胀和再收缩组成的循环(图 11-1)。这个过程也许会永远进行下去。在这种情况下,宇宙就应当没有真正的开始或终结,不过每一次循环都会有特定的开始和结束而把它们区分开来。这种理论对一直受印度教和佛教神话影响的人特别有吸引力,在这类神话中明显地反映出生与死、创生与灭亡构成的轮回。



图 11-1 循环宇宙模型 宇宙的尺度以某种周期性的方式在非常致密的状态和极度膨胀的状态之间脉动。每轮循环都从大爆炸开始,以大灾难结束。在时间上它是对称的。

我已经简要地描述了有关宇宙结局两种很不相同的科学演化图象。每一种结局都以它特有的方式使人深感寒心。宇宙在一场大危机中把自己完全湮没掉的预言是很吓人的,不过这种事件也许在遥远的将来才会发生。另一方面,一个宇宙在经历有限的辉煌活动时期后,永恒地堕入萧瑟荒芜状态却使人深感沮丧。每一种模型也许都有可能使超人类获得无限的信息处理能力,这个事实对于我们血气方刚的人类来说似乎可以算是一种勉强的安慰。循环模型的魅力在于它回避了彻底湮没这个幽灵,同时也不会出现永恒的退化和衰败。为避免无止境重复的缺陷,重要的问题是这些循环会因某种原因而使它们互不相同。在有关这类理论的一种流行的说法认为,每次新循环就像不死鸟一样,从燃烧中死去,然后在死去的躯壳中再生。它们从这种原始的条件出发,演变出一些新的体系和结构,并探索它们自己丰富多采的新世界,直到下一次大危机出现时再次把往事一笔勾销。

虽然这种理论看上去似乎颇有吸引力,遗憾的是它会遇到一些难以逾越的物理学障碍。其中的一个问题是要找到一种能够说得通的过程,使得处于某种极高密度状态的坍缩宇宙能出现反弹,而不是一场大危机中把自己湮没。这必须存在某种反引力,它在坍缩的最后阶段会增大而变得压倒一切从而把暴缩的动量反转过来,并能同正在向内挤压的巨大引力作用相抗衡。现在还不知道是否有这样的力,而且假如这种力存在的话,它的性质也必然是十分奇特的。

也许可以重温一下,在大爆炸的暴胀理论中,所假定的恰恰是这样一种威力强大的斥力。

但要记住，产生暴胀力的激发真空态是高度不稳定的，它会很快地衰退。虽然可以想象这种微小而又简单的新生宇宙应该起源于这样一种不稳定状态，但是，要求一个从某种很复杂的宏观条件下进行收缩的宇宙，能够设法使之都恢复到激发真空态，则完全是另外一回事。这种情况有点像笔尖朝下平衡一支铅笔。这支铅笔马上会倒下，倒下是很容易的，再要一下子把铅笔放回笔尖朝下的位置就难得多了。

即使假定可以用某种办法克服这类难题，循环宇宙的概念仍存在一些严重的困难，其中之一我已在第一章中讨论过。要是有一些不可逆过程以有限的速度在向前发展，那么对于受这种过程支配的一些系统来说，经过一段有限的时间之后，这些系统就往往会趋近它们的最终状态。正是这条原理在 19 世纪引出了关于宇宙热寂的预言。宇宙循环的引入克服不了这个困难。我们可以用一个渐渐走得慢下来的钟来比作宇宙。这台钟的运动最终不可避免地要停下，除非有某种外因使它重新上紧发条。但是，有什么机制能够再把宇宙钟的发条上紧，而同时自己又不会受到不可逆变化的支配呢？

初看起来，宇宙的坍缩阶段似乎是膨胀阶段出现的那些物理过程的某种反演。正在分散开去的星系被拉回到一起，正在冷却的背景辐射又重新变热，而复杂的元素则再次分裂成一锅基本粒子汤。大危机前夕宇宙的状态同刚刚发生大爆炸后的宇宙状态极其相似。但是，这种对称的印象仅仅是表面的。下面这个事实会使我们得到一点启发：当膨胀转变成收缩时，生活于时间反演中的天文学家在好几十亿年中还是看到遥远的星系在退行。宇宙看上去似乎仍在膨胀，尽管它已经在收缩。造成这种错觉的原因在于有限光速带来了表观上的滞后现象。

宇宙学家理查德·托尔曼(Richard Tolman)在 30 年代已经指出，这种滞后现象是如何破坏循环宇宙的表观对称性的。理由很简单。宇宙是携带大爆炸后遗留的大量热辐射开始向外膨胀的。随着时光的流逝，星光使这种辐射增强，结果在几十亿年后，充满在宇宙空间中的累积星光所包含的能量几乎与背景热能一样多。当宇宙接下来进入收缩阶段时，星光产生得越来越多。这意味着宇宙在逼近大危机时，散布在整个宇宙中的辐射能比大爆炸刚发生后的辐射能要多得多。因此，当宇宙最后压缩到与今天相同的密度时，它将要稍微热一些。

超额的热能是通过爱因斯坦公式 $E = mc^2$ 由宇宙包含的物质提供的。在产生热能的那些恒星的内部，诸如氢一类的轻元素被加工成一些重元素，例如铁。一个铁原子核通常包含 56 个质子和 30 个中子。你也许会猜想，这样一个核因而就应有 56 个质子和 30 个中子的质量，但事实并非如此。这个合成的核比单个粒子的质量之和要轻百分之一左右。造成这部分质量“遗失”的原因在于强核力在原子核内产生的巨大的束缚能，而这部分能量所代表的质量被释放出来提供给了星光。

所有这一切的结局是，能量从物质完全转化为辐射，由于辐射引力与物质引力大不一样，因而这对宇宙收缩的方式有着很重要的影响。托尔曼指出，在收缩阶段，这种超额辐射使宇宙坍缩的速度更快。假如有某种方法使反弹出现的话，那宇宙也会以更快的

速度膨胀。换句话说，每次大爆炸都应当比上一次更大。其结果是，宇宙在每一轮新的循环中会膨胀到更大的尺度，所以循环逐渐变得尺度更大，时间也更长（图 11-2）。



图 11-2 一些不可逆过程造成宇宙学循环越来越大，因而就失去了真正循环说的含义。

宇宙循环的这种不可逆增长决不是不可思议的，它只是热力学第二定律必然结果的一个范例。辐射的累积代表熵的增加，它以循环越来越大这种形式从引力上表现出来。但是，它确实使循环说的概念宣告破产：宇宙明显地随时间演化。回溯过去，那些循环阶梯式地串接在一起，它们的起点既复杂又混乱，而未来的循环会无限地扩大，一直到它们变得很长很长，以至对于任意给定的一个循环来说，大体上同永远膨胀模型的热寂演化图象无法加以区别。

自托尔曼的工作以来，宇宙学家已找到其他一些物理过程，它们同样会破坏每次循环中膨胀阶段和收缩阶段的对称性，一个例子是黑洞的形成。在标准图象中，宇宙开始时并没有黑洞，但随着时间的不断推移，因恒星坍缩和其他一些过程，黑洞便形成了。随着星系的演化，出现的黑洞越来越多。在坍缩的最后阶段，压缩会促使形成更多的黑洞。某些黑洞可能会合并而形成较大的黑洞。因此，接近大灾变时的宇宙引力结构要比大爆炸刚发生后的情况复杂得多，因为事实上黑洞会明显的增多。假如宇宙反弹，那么下一轮循环开始时会比这一轮循环有更多的黑洞。

看来不可避免的结论是：任何一种循环宇宙，只要它允许把物理结构和物理系统从一轮循环传递给下一轮循环，那它将无法回避热力学第二定律的退化影响。结局仍然会是热寂。避免这种可怕结论的一条途径是假设反弹时的物理条件非常极端，有关前面各轮循环的任何信息都不可能传递给下一轮。先前所有的物体都被摧毁，全部影响统统消失。实际上，宇宙完全从零开始再次诞生。然而，很难看出这种模型会有什么吸引力。如果每轮循环在物理性质上与其他循环是断开的，那么一定要讲这些循环是相互继承的，或者说它们代表同一个宇宙以某种方式在延续，那又有什么意义呢？这些循环实际上是一些有不同性质的分立宇宙，也许更正确的是应把它说成是平行存在而不是依次连接的宇宙。这种情况使人想起有关人可以投胎而得以再生的信仰，那里再生的人对他的前世毫无记忆。在哪种意义上人们可以说，这个再投胎的人与另一个截然不同的人是同一个人呢？

另一种可能性是，由于某种原因违背了热力学第二定律，结果在反弹时“时钟再次上紧了发条”。这种第二定律失效所造成的破坏意味着什么呢？让我们举一个第二定律在起作用的简单例子：关于第二章中讨论过的香水从瓶子中挥发的的问题。对香水来说，

命运的倒退需要大规模有组织的协调作用,使散布在整个房间中的每个香水分子都吸回瓶子里去。实际上,这是一部倒放的“影片”。正是热力学第二定律使我们清楚了过去和将来之间的区别——“时间箭头”。因此,违背第二定律相当于时间的倒流。

当然,在听到世界末日来临的霹雳信号时,假定时间简单地倒退以逃避宇宙死亡多少总是一种无能的表现。当旅途变得艰难之际,只是在倒放这部伟大的宇宙影片!

尽管如此,这种观念已引起某些宇宙学家的注意。60 年代托马斯·戈尔德(Thomas Gold)提出,对于一个再收缩宇宙来说,收缩阶段中时间也许会倒流。他指出这种倒流应包括在那段时间内所有生物的大脑功能,因而使他们对时间的主观感觉也倒过来。所以,收缩阶段的居民不会观察到他们周围的每件东西在“往回跑”,而应有着与我们相同的感觉,即感觉到的是向前的事件流。例如,他们会发觉宇宙在膨胀而不是收缩。在他们看来我们的宇宙正处于收缩阶段,而我们的大脑则是在倒退着处理问题。

80 年代,霍金也曾一度热衷于时间反演宇宙,只是由于后来承认这是他的“最大错误”才予以放弃。霍金起初相信量子力学用于再收缩宇宙时隐含时间的对称性。但是,结果证明并非如此,至少在量子力学的标准公式中并不对称。最近,默里·盖尔曼(Murray Gellman)和詹姆斯·哈特尔(James Hartle)讨论了对量子力学规律的某种修正,其中先简单地强制设定了时间的对称性,然后探讨这种事态在我们的宇宙年代可能引起的可观测结果。迄今为止答案可能是什么还不清楚。

俄国物理学家安德烈·林德(Audrei Linde)为摆脱宇宙末日提出了一条很不一样的途径。他所依据的是一种经过他精心制作的暴胀宇宙理论。在第三章的讨论中,对于原始暴胀宇宙的演化图象,人们假定甚早期宇宙的量子态对应于一种特殊的激发真空,它的作用是在短时间内促成飞速膨胀。林德的想法不是这样,他在 1983 年提出,早期宇宙的量子态也许以一种无序的方式逐点变化:这里是低能态,那里是中等激发态,某些地方则是高激发态。处于激发态的地方会出现暴胀。此外,林德对量子态变化特性的计算清楚地表明,高激发态暴胀得最快而衰退得最慢。结果是对某个具体的空间区域来说,能态激发得越高,宇宙应暴胀得越剧烈。显然,在极短时间之后,能量碰巧为极大因而暴胀也最快的空间区域会膨胀得最大,并占据整个空间的最大部分。林德把这种情况同达尔文进化或经济学联系起来。对应于某个甚高激发态的一次成功的量子涨落,所产生的结果是那个区域的体积在瞬息之间便出现巨大的增长,尽管这意味着它外借了大量的能量。所以,那些借了许多能量、处于超级暴胀之中的区域很快便取得了统治地位。

无序暴胀的结果是,宇宙会被分割成一团微宇宙,或者说一团宇宙泡,某些泡发疯似地暴胀,而有的则根本不出现暴胀。因为纯粹是由于随机涨落的结果而使某些区域具有十分大的激发能,在这些区域内出现的暴胀会比原始理论中所假定的暴胀要强得多。但是,这些区域正是暴胀最强烈的区域,所以要是在暴胀后宇宙中随机选择一点,那么这一点很可能就落在这种高度暴胀的区域中。因此,我们自己在空间中的位置很可能便位于某个超级暴胀区内很深的地方。按林德的计算,这种“大宇宙泡”也许已经暴胀了 10

的 8 次方幂。这是一个在 1 的后面跟着 1 亿个零的数！

我们自己的宏伟宇宙版图应只是无限多个高度暴胀宇宙泡中的一个，因而在庞大无比的尺度上，宇宙看上去仍然会是极端无序的。我们这个宇宙泡的延伸距离之远大大超出了目前可观测宇宙的范围，在它的内部物质和能量大致呈均匀分布。但是，在我们的宇宙泡之外还有其他宇宙泡，以及一些仍处于暴胀过程中的区域。事实上，在林德模型中，暴胀永不停息。始终有一些空间区域正发生暴胀，那里正在形成新的宇宙泡，那怕另一些宇宙泡走完它们的生命循环而已死亡也没有关系。所以，这是某种形式的永恒宇宙，它同前面一章所讨论的子宇宙相类似。在这种宇宙中，生命、希望和泡宇宙永恒不息地在涌现出来。因暴胀而产生泡宇宙决无结束之日，可能也谈不上有什么起点，尽管现在对此还存在某些争议。

其他宇宙泡的存在是不是为我们的后裔提供了某种救命之索呢？他们能不能通过不断地迁移到另一个更年轻、因而拥有大量时间的宇宙泡去，以逃避宇宙末日，或更精确他说逃避宇宙泡的末日呢？1989 年，林德在《物理通讯》杂志上发表了一篇大胆的论文，题为“暴胀后的生命”，文中所谈的正是这个问题。“这些结果意味着暴胀宇宙中的生命永远不会消失。”他写道，“遗憾的是，这个结论不是自然而然地意味着人们可以非常乐观地对待人类的未来。”林德注意到，任何一个特定的区域，或宇宙泡，都会慢慢地变得不适宜人类居住。因此引出的结论是：“为了生存下去，我们在那个时候可以找到的唯一可能的策略是，应该从老区域搬到新区域去。”

令人泄气的是，在林德的暴胀理论中，一个典型宇宙泡的尺度非常之大。根据他的计算，离我们最近的宇宙泡也许都非常非常遥远，要是以光年为单位，这段距离必须用 1 后面跟上几百万个零来表示。这个数字太大了，想把它全部写出来就会需要关于它自己的一整本百科全书！即使以接近光的速度，到达另一个宇宙泡也要花费差不多同样多的年数，除非运气特别好，即我们正好处在我们自己这个宇宙泡的边缘。林德指出，这甚至还要假定在如此漫长的时间中，我们的领域会以某种可预见的方式不断地膨胀下去。一旦今天左右我们的物质和辐射变得无限稀薄，现在完全不引人注意的最微不足道的物理效应最终可能会决定宇宙膨胀的方式。例如，宇宙中可能一直存在着某种极其微弱的暴胀力，它今天完全被物质的引力作用所淹没。但是，如果人类为逃离我们的宇宙泡所需要的时间非常非常长，它最终总会被察觉到。那种情况下，因为有着充裕的时间，宇宙应会再一次开始暴胀，不过这一次不是采取大爆炸那种疯狂的方式，而是进行得极其缓慢，好像是大爆炸的某种软弱无力的赝品。不过，这种无力的抽泣尽管很微弱，但却会永远地持续下去。虽然宇宙的增长只是以微小的速率在加速，但它在加速这个事实却有着重要的物理效应。这个效应会在泡内生成一个视界，它有点像一个里外颠倒的黑洞，实际效果正像一个陷阱。在那种情况下，任何幸存下来的生物会变得孤立无援，深深地被埋葬在我们的宇宙泡内。这是因为，虽然他们企望尽快地到达泡的边缘，但暴胀泡边缘会更快地后退。因此，林德的计算向我们表明，对于人类或我们的后裔来说，他们的最终命运是如何取决于这么微小的物理效应，而这种效应在表现出它们的宇宙学意义之前，我们实际上根本无法探测到它们。林德的宇宙学在某些方面使人联想到陈旧的

稳恒态宇宙理论，它在 50 年代以及 60 年代的早期曾一度流行，而至今它仍是用来摆脱宇宙终结的最简单而又最吸引人的学说。在赫尔曼·邦迪(Herman Bondi)和戈尔德的原始形式中，稳恒态学说假定宇宙在大尺度上是永远保持不变的。因此，宇宙没有开端，也没有终结。随着宇宙的膨胀，新物质不断地创生出来以填补空隙，同时保持总体密度不变。任何一个星系的命运同我在前面几章中所描述的情况相类似：那就是诞生、演化和死亡。但是，一些星系源源不断地从新创生的物质中形成，而新创生物质的补充又是永无止境的。因此，宇宙的总体状况看上去是相同的，在给定的空间范围内有着相同数目的星系，它们由各种年龄的星系混合组成。

稳恒态宇宙的概念无需解释宇宙最初如何从虚无中诞生，它还把在演化过程中产生的各种各样有趣的现象同宇宙的永恒掺合到一起。事实上，除了这点以外，它保证宇宙将永葆青春，这是因为尽管各别星系会慢慢地死去，但宇宙作为一个整体永远也不会变得老态龙钟。由于新物质自然就提供了能源，因而我们的后裔永远不必因为能源越来越枯竭而到处去发掘可利用的东西。一旦老的星系燃料用完了，居民们就迁往比较年轻的星系，而这个过程可以永无止境地、以同等充沛的精力、多样性和活跃性，一直维持下去直到永远。

但是，要使这个理论成立，还需要某些必要的物理条件。因为膨胀，每隔几十亿年宇宙的体积便要增大 1 倍。为了使密度保持不变，在此期间需要创生出大约 10^{48} 吨的新物质。这个数字看上去很大，但平均说来，这相当于每一百年在机舱那么大的空间内只出现 1 个原子。这种现象我们不大可能会注意到。一个比较严重的问题是，关于这个理论中使物质得以创生的那种物理过程的性质。至少我们应该要知道，提供这份额外质量的能量来自何处，而这个能量魔瓶又怎样会取之不竭，用之不尽。这个问题是由弗雷德·霍伊尔(Fred Hoyle)和他的同事贾扬特·纳里卡(Jayant Narlikar)解决的。他们非常细致地发展了稳恒态学说。这两位学者提出用一种新型的场——创生场——来供应能量，前提条件是这种创生场具有负能。每个质量为 m 的新物质粒子的出现，其效果是贡献给创生场一份负能量 mc^2 。

虽然创生场从技术上解决了创生这个难题，但它仍留下许多悬而未决的问题。此外，它似乎还显得有点特别，因为对于这种神秘的场看不出任何其他的表征。更为严重的是，60 年代的观测证据开始对这种稳恒态学说提出了挑战。其中最重要的就是发现了宇宙背景热辐射。这种均匀背景很容易用热大爆炸的遗迹来加以解释，但在稳恒态模型中要作出令人信服的解释却很难。还有，星系和射电星系的深空巡天结果明确无疑地表明，在大尺度上宇宙是在演化的。当这些证据变得确凿无疑时，霍伊尔和他的同事便放弃了稳恒态学说，不过有的时候，还会有人把它重新提出来。

除物理学的和观测上的问题外，稳恒态学说还遇到一些奇妙的哲学上的困难。例如，假如我们的后裔确实有无限的时间和能源任凭他们支配，他们的技术发展也就不会有明显的限制。他们应会在宇宙中自由地传播开来，从而控制越来越大的空间体积。因此在非常遥远的未来，大部分宇宙基本上都已实现技术化。但我们的前提是宇宙大尺度性质

应该不随时间而变化，所以稳恒态这种假定不得不使我们得出这样的结论：我们今天所见到的宇宙已经实现了技术化。因为宇宙中的物理条件总体上对所有的时期都是相同的，智慧生物在所有的时期必定都会出现。而且，因为这种事态永远存在，某些人类社会应该在不同的地方已经生存了任意长的时间，而且它们将会扩展开去占领任意大的空间体积并使之技术化，其中也包括占领宇宙中我们所在的那部分区域。即使假定智慧生物没有向宇宙移民的意愿也无法回避这个结论。只要有一个这样的社会，即使它出现的时间不长，上述结论都会有效。这难题的另一种情况是，在一个无限宇宙中，即使它只有非常小的可能性，任何事件也必定会在某个时候出现，并会一次又一次无限地出现。按照这个明确结论的逻辑，稳恒态学说便预言宇宙的种种过程与宇宙居民的技术活动是同一的。事实上，我们所称的大自然就是某种超级生物或超级生物社会的活动。这看上去好像是柏拉图的造物主（在已设定的一些物理定律的范围内操纵一切的一个神）的某种翻版，而且有趣的是霍伊尔在他以后提出的一些宇宙理论中，直言不讳地鼓吹这样一类超级生物。

在任何有关宇宙末日的讨论中，我们都面临要达到什么目的的问题。我已经婉转地提到过一个事实，即一个走向死亡的宇宙前景使伯特兰·罗素确信，生存最终是徒劳无益的。近年来，这种观点得到温伯格的共鸣，集中表现于他的著作《最初三分钟》中那赤裸裸的结论：“看来对宇宙理解得越多，好像就越感到索然无味。”我一直主张对宇宙慢热寂说最初的担忧恐怕是过份了，甚至也许是错误的，虽然由大危机引起的突然灭绝仍然有可能发生。我已大胆地推测过那些超级生物的活动，使它们在体形和智能上能达到令人不可思议的目标以对付他们的各种遭遇。我也简单地探索了无限思维认识的可能性，哪怕宇宙是有限的。

但是，这些可作为代用品的演化图象能够减轻我们的不安情绪吗？我的一位朋友曾发表这样的意见：他对听到的关于天国的内容没有多大的兴趣。他觉得要是前景是永远生活在某种极端平衡状态之中，那是一点也没有吸引力的。快一点结束生命，把一切的一切都彻底了结，这要比面临着毫无趣味地永远活下去更好些。如果永垂不朽只是限于永远翻来覆去的老一套思维和经历，那么这看来确实是索然无味的。另一方面，如果永垂不朽与进步联系在一起，那么我们可以憧憬那种永远变化的新颖生活状态，永无止境地学习或者做某种新的振奋人心的事情。但问题在于，这又为了什么？当人类着手一项有目的计划时，他们心中是有既定目标的。如果这个目标没有达到，计划就宣告失败（虽然经验也许未必毫无价值）。另一方面，如果目标达到，这个计划便宣告完成，然后活动也将停止。在一项永远完不成的计划中能有真正的目标吗？如果生存本身就是向一个永远达不到的目的地的一场永无止境的旅行的话，那么这种生存有意义吗？

要是宇宙有一个目标，并且它达到了那个目标，那么宇宙一定会寿终正寝，因为它的继续存在既没有理由也毫无意义。相反，如果宇宙会永远存在下去，那么不难想象，对宇宙来说根本不会有任何最终的目标。这样，宇宙的死亡也许正是为宇宙的成功所必须付出的代价。因此我们只能希望在宇宙的最后三分钟结束之前，它的目标也许会被我们的后裔所认识。

宇宙最后的三分钟

关于宇宙归宿的最新观念

保尔·戴维斯 著

傅承启 译

赵君亮 校

上海科学技术出版社，科学大师佳作系列

1995 年

ISBN 7-5323-3660-3

PDF 版本制作：OurSci.org