湛庐CHEERS

大师带你探索宇宙的奥秘（七册套装）



版权信息

本套装纸版天津科学技术出版社于2020年8月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：大师带你探索宇宙的奥秘（七册套装）

作者：保罗·戴维斯，马丁·里斯，迈克斯·泰格马克，斯蒂芬·亚历山大，约翰·布罗克曼，凯莱布·沙夫，罗恩·米勒

电子书定价：479.99元

总目录

宇宙的最后三分钟
六个数
穿越平行宇宙
宇宙的结构
宇宙的起源
如果宇宙可以伸缩
宇宙：从起源到未来

CHEERS
湛庐

宇宙的最后三分钟

科学大师书系

[澳]
保罗·戴维斯 著
Paul Davies
高晓鹰 译

The Last Three Minutes

著名物理学家保罗·戴维斯
带你破解宇宙终结之谜

天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

版权信息

本书纸版由天津科学技术出版社于2020年7月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：宇宙的最后三分钟

著者：保罗·戴维斯

电子书定价：62.99元

The Last Three Minutes: Conjectures About The Ultimate Fate of The Universe / By Paul Davies.

Copyright © 1994 by Paul Davies. Published by BasicBooks,

A Member of the Perseus Books Group

All rights reserved.

万物有生就有灭

20世纪60年代初，当时还是学生的我就对宇宙的起源产生了浓厚的兴趣。宇宙大爆炸理论始于20世纪20年代，但直到20世纪50年代才引起人们的关注。虽然该理论已经众所周知，但还远未令人信服。与之相对的宇宙恒稳态理论完全抛弃了宇宙起源说，在某些领域甚为流行。1965年，阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）发现了宇宙微波背景辐射，形势逆转，大爆炸理论开始被更多人接受。毫无疑问，宇宙微波背景辐射是宇宙从炽热而又猛烈的大爆炸中突然诞生的确凿证据。

至此，宇宙学家开始狂热地研究这一发现的意义。大爆炸发生100万年后的宇宙有多热？大爆炸发生1年后、1秒钟后又有多热？最初地狱般的炽热状态中出现过何种物理过程？是否留有宇宙诞生之初的遗物，这些遗物是否还保留着当时的极端环境的印记？

1968年，我参加了一个有关宇宙学的讲座，至今记忆犹新。在演讲即将结束时，那位教授根据宇宙微波背景辐射的发现评论了大爆炸理论。“基于宇宙大爆炸后最初三分钟发生的核反应过程，有些理论家已经列出了组成宇宙的化学成分。”他笑着对众人说道。所有的观众听后哄堂大笑。似乎，所有对宇宙诞生后最初时刻状态的描述都过于雄心勃勃和荒谬可笑了，即使7世纪那个宣称宇宙诞生于公元前4004年10月23日的大主教詹姆斯·乌瑟（James Ussher），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。

在发现宇宙微波背景辐射仅仅10年之后，宇宙诞生后的最初三分钟的相关理论已在大学里进行讲授，相关教科书也应运而生，这就是

科学进步的速度。1977年，美国物理学家兼宇宙学家史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）出版了一本畅销书——《最初三分钟》（*The First Three Minutes*），该书被公认为科普读物的里程碑。作为一位世界知名的理论物理学家，温伯格向公众详细地描述了大爆炸后数秒内所发生的事件的全过程，这着实令人折服。

当公众还沉迷于这些令人兴奋的科学进展时，科学家已经继续向前迈进了。此时，科学家研究的焦点已经从早期宇宙（大爆炸发生后的几分钟）转向了极早期宇宙（大爆炸发生后的一秒钟）。大约10年后，英国物理学家斯蒂芬·霍金在他的《时间简史》一书中，无比自信地提出了大爆炸发生后最初一万亿亿亿亿分之一秒内所发生的事件的最新想法。现在看来，1968年那次演讲结束时观众发出的笑声显得多么无知。

随着大爆炸理论被大众和科学家完全接受，越来越多的人开始思考宇宙的未来。我们已经知道宇宙是如何开始的，那它将如何结束呢？宇宙最终的命运是什么？宇宙真的会以爆炸或逐渐衰败的形式终其一生，或者永久消失吗？那时人类的命运又将如何？人类的后代——无论是机器人还是人类自身，能逃过一劫并就此实现永生吗？

尽管世界末日并不会马上来临，但对这些事情不好奇是不可能的。地球近年来备受人为危机的困扰，当我们不得不思考所在宇宙的尺度时，我们为能在地球上生存下去所做的抗争便显得备受瞩目。《宇宙的最后三分钟》是关于宇宙未来的故事，根据一些著名物理学家和宇宙学家的最新想法，我们在这本书中竭尽所能地对宇宙的未来进行了预测。这些预测并不是宗教式的启示。事实上，鉴于已有的科学研究成果和丰富的经验，宇宙的发展潜力将不可预测。但与此同时，我们也不能忽略另一个事实，万物有生就有灭。

《宇宙的最后三分钟》这本书是为普通读者撰写的，阅读时无须事先掌握科学或者数学知识。不过，有时我需要讨论非常大和非常小

的数字，会用到紧凑的数学符号，这样读起来简单易懂，这种符号就是“10的指数幂”。举例来说，1 000亿展开来写就是100 000 000 000，相当麻烦。这个数字的1后面有11个零，所以我们可以用10^{11}来表示它，用文字来描述就是“10的11次方”。同样，100万为10^{6}，10 000亿为10^{12}，以此类推。然而，当幂指数增加时，这种符号会掩盖这些数字的实际增大程度。比如，10^{12}是10^{10}的100倍，前者是一个比后者大得多的数字，但它们看起来相差无几。“10的负指数幂”也可以用来表示非常小的数字，比如10亿分之一，即1/1000 000 000，可写成10^{-9}，因为这个分数的分母为1后面有9个零。

此外，我想提醒读者，这本书具有高度的推测性。虽然大多数观点都是基于目前最新的科学进展，但未来学不能跟其他科学研究相提并论。推测宇宙最终命运的诱惑是不可抗拒的，正是本着这种开放的调查精神，我写了这本书。宇宙起源于大爆炸，然后膨胀并冷却到某种物理状态，或灾难性地坍缩的基本设想，在科学上是相当成熟的。我们尚不清楚的是，在巨大的时间尺度上可能发生的主要物理过程。天文学家对普通恒星的总体命运已经有了清晰的认识，对中子星和黑洞的基本性质也有了越来越深刻的理解，但如果宇宙能持续存在数万亿年或更长时间，可能会存在一些微妙的物理作用，我们目前只能猜测其存在的可能性。这些物理作用最终会变得非常重要。

既然我们面对的问题源自对自然规律的了解不够深入，那么推演宇宙最终命运的最好方法就是，运用我们现有的最佳理论不断尝试和推断，最终得出合乎逻辑的推论。然而问题是，许多与宇宙命运有重要关系的理论仍有待验证。我所讨论的一些过程，比如引力波(1)、质子衰变和黑洞辐射，虽然理论家狂热地相信它们的存在，但实际上还没有被观察到。除此之外，肯定还存在一些其他的物理过程，我们目前对此一无所知，但这些过程极有可能会大大改变我在本书中提出的推论。

当我们考虑宇宙中智慧生命可能产生的影响时，这些不确定性就会变得更大，只有进入科幻小说的领域才能更好地展开联想。然而，我们不能忽视这样一个事实：经过数十亿年的时间，生物可能会在更大尺度上显著地改变物理系统的运作方式。因此，我决定将宇宙中的生命纳入本书的主题中，因为对许多读者来说，对宇宙命运的着迷与他们对人类命运及其后代的关注息息相关。不过，我们应该始终记住，科学家远未真正了解人类意识的本质，也不了解允许意识活动在宇宙遥远的未来继续存在下去所必需的物质条件。

感谢约翰·巴罗（John Barrow）[(2)]、弗兰克·蒂普勒（Frank Tipler）、杰森·特沃姆利（Jason Twamley）、罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）和邓肯·斯蒂尔（Duncan Steel）对本书主要内容所做的有益探讨；感谢本系列丛书编辑杰里·莱昂斯（Jerry Lyons）对手稿的批判性审阅；感谢萨拉·利平科特（Sara Lippincott）对最终手稿所做的出色整理。

目 录

前言
01　宇宙会消亡吗
02　逐步消亡的宇宙
03　最初的三分钟
04　恒星的末日
05　黑夜降临
06　称称宇宙的质量
07　永远很远
08　慢车道上的生命
09　快车道上的生命
10　暴卒和突生
11　世界没有尽头吗



扫码下载湛庐阅读APP，
搜索《宇宙的最后三分钟》，
获取本书趣味测试彩蛋！

THE LAST THREE MINUTES

01
宇宙会消亡吗

你想过世界末日的场景吗？宇宙会在怎样的情景下走向末日，是遭遇小行星撞击，还是遭遇彗星撞击，又或是银河系遭遇另一个星系的撞击？

日期：公元2126年8月21日，世界末日

地点：地球

在这颗星球上，绝望的人们四处寻找藏身之处，数十亿人无处可逃。有些人逃往地下深处，拼命寻找洞穴和废弃的矿井，或者乘坐潜艇逃往海里；有些人则横冲直撞，杀气腾腾，冷漠无情；而大多数人就那样坐着，抑郁沉闷，茫然无措，等待末日降临。

高高的天空中，一束巨大的光如火箭一般直冲云霄。最初，一条轻絮般的细条形辐射状星云日渐膨胀，直至形成一团巨大的气体旋涡，如沸腾的水般闯入真空的宇宙中。长条形气旋的顶端有一个漆黑的、畸形的、危险的星团。这是一颗彗星，它头部虽然微小，但破坏力惊人。这颗彗星携带着数万亿吨的冰和岩石，以每小时约6.4万千米（即每秒约16千米）的惊人速度逼近地球，最终势必以音速的70倍的速度撞向地球。

此刻，人类只能观望等待。科学家早已放弃使用望远镜，并默默地关闭了计算机，静静等待着这场不可避免的浩劫。科学家对这场灾难进行了不计其数的模拟，但得到的结果依然不太确定，而且太过于危言耸听，无法向公众公布。一些科学家利用普通老百姓所不具备的技术优势，准备了万全的逃生之策；而另一些科学家则准备站好他们作为科学家的最后一班岗，在世界末日来临之际，尽可能仔细地观察和分析这场灾难，将观察所得的数据传输到深埋于地下的时间胶囊中，以备后代子孙之需……

撞击时刻迫近，世界各地数以百万计的人们紧张地盯着自己的手表。这是宇宙的最后三分钟。

爆心投影点突现于正上方，天空径直裂开，几千立方千米的空气被爆开。一簇比一座城市还宽的熊熊烈焰呈弧状冲向地面，15秒后贯穿了整个地球。相当于一万次地震同时爆发的冲击力使地球不停震颤，空气被挤压形成冲击波，横扫地球表面，摧毁了所有的建筑物，所到之处，万物皆毁。被撞击地点周围的平地上激起了一座高达几千米的液态环形山，在直径达160千米的坑穴内，地球的内部构造赤裸裸地呈现了出来。熔化的岩石壁向外呈环状铺展，逐步蚕食地面，就像一条被不断拍打的毯子缓慢地向前蠕动。

在坑穴内部，数万亿吨的岩浆被汽化，而数量比这多得多的物质则被抛入高空，其中一部分被抛到了太空中，更多的被喷溅到了大半个陆地上，如雨点般落在几百甚至几千千米之外，所落之处，尽遭毁坏。一些熔化的喷射物落入海洋，引发了巨大的海啸，加剧了混乱的不断蔓延。大量的尘埃飘散在空气中，整个地球暗无天日。更可怕的是，当被抛向太空的物质突然再次落入大气层时，阳光被数以十亿计如流星般闪烁的危险火焰遮蔽，大地陷入炙烤之中。

这个场景源自一则预言，该预言预测斯威夫特-塔特尔彗星（Swift-Tuttle）将于2126年8月21日撞击地球。如果该预言成真，全球性的大灾难将不可避免，并摧毁所有的人类文明。1993年，斯威夫特-塔特尔彗星接近过地球。根据早期科学家的计算，2126年，这颗彗星将再次接近地球，与地球相撞的可能性很大。之后，科学家修正了早期的计算，得出这颗彗星会惊险地避开与地球的撞击，也就是会与地球近距离擦身而过，时间误差为两周。但这足以让我们免遭毁灭。不过，危险不会彻底消失。斯威夫特-塔特尔彗星或类似的天体迟早会撞击地球。据估计，有1万个直径大于或等于500米的天体在地球交叉轨道上运动。这些星际入侵者诞生于太阳系寒冷的外围，其中一些是被行星引力场捕获的彗星的残骸，而另一些则来自火星和木星之间的小行星带。轨道的不稳定性导致这些小而致命的天体不断地进出太阳系内部，对地球及其姊妹行星的存在造成永久的威胁。

这类天体所能造成的破坏力，比全世界所有核武器加起来造成的破坏力还要大。天体撞击地球事件的发生只是一个时间问题。如果属实，那真是个坏消息。对人类的发展而言，某颗天体撞击地球将会对人类的发展产生空前绝后的影响，会造成人类历史的突然中断。不过对于地球而言，这种事件比较寻常，因为这种规模的彗星或小行星撞击事件平均每几百万年就会发生一次。人们普遍认为，6 500万年以前，就是因为天体一次或多次撞击地球，才导致了恐龙的灭绝。而下次，可能就轮到人类了。

大多数宗教和文化都坚信，世界末日一定会来临。这种观念根深蒂固。一则相关的宗教故事就生动地描述了我们即将面临的死亡和毁灭。

电闪雷鸣，强烈地震。自从地球上有人类以来，从未发生过震感如此强烈的地震……各国的城市彻底崩塌，岛屿和

群山全都消失了。重约50千克的巨大冰雹从天而降，砸在人们身上。冰雹灾难极其惨烈，他们因此而诅咒上帝。

在充斥着暴力的宇宙中，地球只是一颗微不足道的星球，肯定发生过很多可怕的事件，但它依然保持着适宜生命生存的环境，维持了至少35亿年。我们得以在地球上成功生存的秘诀源自空间，巨大无比的空间。太阳系只是茫茫宇宙海洋中一座活动的小岛，距离太阳最近的恒星也远在4光年之外。若想知道这个距离到底有多远，可以试想一下，光在8分钟内就能从太阳传到1.5亿千米之外的地球，4年以后，它的行程将超过37万亿千米。

太阳是银河系中一个典型区域中的一颗典型的矮恒星。银河系包含大约1 000亿颗恒星，质量从太阳质量的百分之几到100倍不等。这些恒星连同大量的气体云和尘埃以及不计其数的彗星、小行星、行星和黑洞一起，缓慢地绕着银河系中心旋转。如此庞大的天体集合可能会给人留下拥挤不堪的印象，但只要想一想银河系可见部分的直径约为10万光年，你就会释然。银河系呈盘状，中央有一个凸起，周围围绕着几条由恒星和气体组成的旋臂，太阳系就位于其中一个旋臂上，距离银河系中心大约3万光年。

根据我们所掌握的知识，银河系没有什么特别之处。仙女座方向有一个和银河系很类似的星系，名为仙女星系（Andromeda），位于大约200万光年之外。仙女星系看起来像一片模糊的光斑，用肉眼勉强可见。可见宇宙之中存在几十亿个星系，有的呈螺旋形，有的呈椭圆形，还有一些呈不规则形状。这些星系距离彼此非常遥远，高倍天文望远镜可以观测到几十亿光年之外的单个星系。对某些星系来说，它们发出的光到达地球的时间比地球的年龄（45亿年）还要长。

如此巨大的空间意味着宇宙中的碰撞事件非常罕见。地球最大的威胁可能来自我们自己的家园。小行星通常不在靠近地球的轨道上运

行，多数被限制在火星和木星之间的地带。但木星巨大的质量会扰乱小行星的轨道运动，偶尔会将它们中的一颗推向太阳，进而对地球的安全造成威胁。

地球面临的威胁也可能来自彗星。根据科学家的探测，这些壮观的天体源自离太阳大约1光年远的一块看不到的云团。彗星对地球的威胁并不是来自木星，而是来自经过的恒星。银河系不是静止的，随着位于银河系中的恒星绕着银河系中心做轨道运动，银河系自身会缓慢自转。太阳及其行星随从们围绕银河系中心运转一周大约需要2亿年，在这个过程中，它们会遇到许多危险。附近的恒星可能会掠过彗星云，使一些星体发生位移，向着太阳系运动。当彗星冲入太阳系内部时，太阳会蒸发掉一些易挥发的或者不稳定的物质，而太阳风还会将其“吹”成一条长长的流光，即著名的彗星尾。在极其偶然的情况下，彗星会在太阳系内部逗留期间与地球相撞。从表面上来看，是彗星对地球造成了破坏，但事实上，罪魁祸首是那些路过的恒星。幸运的是，由于恒星彼此之间的距离遥远无比，这种交会少之又少。

其他天体在围绕着银河系中心运转的途中，也有可能穿越太阳系轨道。当巨大的气体云团缓慢地飘过太阳系，尽管它们比实验室里的真空还要稀薄，依然可能大幅度地改变太阳风，并影响来自太阳的热流。此外，更危险的天体可能潜伏在漆黑的太空深处，比如漂泊的行星、中子星、褐矮星、黑洞，所有这些天体都可能在没有预警且不可见的情况下袭击地球，并对太阳系造成严重破坏。

来自宇宙的威胁也有可能更加隐蔽，更加难以被发现。一些天文学家认为，太阳可能与银河系中的许多其他恒星一样，属于双星系统，而这颗被我们称为“复仇女神星”（Nemesis）[(3)]或“死亡之星”的伴星，因为太暗太远，至今还没有被发现。不过，通过引力效应，我们仍然可以感受到它的存在。在围绕太阳缓慢运行的轨道上，太阳的这颗伴星会周期性地干扰遥远的彗星云，并使一些彗星撞向地

球，形成彗星风暴，进而产生一系列毁灭性的影响。地质学家发现，这种大规模的生态破坏呈现出某种周期性，大约每3 000万年发生一次。

在宇宙深处，天文学家已经观测到了处于明显碰撞过程中的星系系统。银河系与另一个星系碰撞的可能性有多大呢？某些快速运动的恒星的存在证明，银河系可能已经与邻近的小星系发生过碰撞，并遭到了破坏。不过，两个星系的碰撞并不一定会对其星系中的星体带来灾难，因为星系中的恒星非常稀少，它们可能会彼此靠近，但不会直接碰撞。

大多数人都会为世界末日的来临——世界突然遭到大规模的毁灭，而惊慌失措。不过，相比缓慢的衰退，地球遭遇惨烈毁灭的可能性更小。有很多情况会使地球逐渐变得不适宜居住，比如缓慢的生态退化、气候变化、太阳热能输出的微小变化，所有这些可能的变化即使不会威胁到人类的生存，也会干扰我们在这颗脆弱的星球上原本舒适的生活。但是，这些变化将会在几千年，甚至数百万年间缓慢发生，因此人类有时间研制尖端技术与之抗衡。比如，只要有时间重新组织人类的活动，就能应对新的冰河时代的来临，从而避免人类的灭绝。可以肯定，在未来的几千年里，我们在技术方面将继续取得巨大进步。因此，我们有理由相信，人类或其后代将能够控制越来越大的物理系统，并有可能避免遭遇天文级别的灾难。

人类会永远存在吗？这种可能性很大。但我们也要看到，永生不朽并不易得，且还可能被证明是不可能的。宇宙自身作为一个整体，必然会受到物理规律的制约，从而衍生出它自己的生命周期：诞生、演化，也许还有死亡。作为宇宙中的一员，人类的命运不可避免地与恒星的命运紧密地纠缠在一起。

THE LAST THREE MINUTES

02
逐步消亡的宇宙

宇宙最终会走向热寂的预测不仅说明了宇宙的未来，同时也暗示了过去发生的一些重大事件 —— 宇宙诞生于过去的某个时刻。

1856年，德国物理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹（Hermann von Helmholtz）做出了科学史上最令人感到沮丧的预言——宇宙正在消亡。这个天启般的预言依据的是热力学第二定律。该定律于19世纪早期被提出，最初用来说明热机效率，但很快人们就发现它具有更普遍的意义，即整个宇宙都适用。

简而言之，热力学第二定律指明，热量是由热向冷流动的。这是物理系统的一个常见而又明显的特性，从做饭或咖啡冷却这些日常小事中，我们可以清晰地看到这个定律的作用方式：热量从温度较高的地方流向温度较低的地方。这并不神秘。热以分子运动的形式在物质中表现出来。在气体中，分子会四处乱窜并相互碰撞，包括空气中的分子也是如此。即使在固体中，原子也在剧烈地运动着。物体的温度越高，分子的运动就越剧烈。如果两个温度不同的物体相接触，较热物体中运动比较剧烈的分子很快就会扩散到较冷物体的分子中。

因为热量流动是单向的，所以该过程在时间上是不对称的。如果放映一部记录热量由冷的地方到热的地方自发性地流动的影片，那它看上去就像河水倒流至高山、雨滴升至云层，非常荒唐可笑。因此，我们可以确定热量流动的基本方向，通常用从过去指向将来的箭头表示（见图2-1）。这个“时间箭头”表明了热力学过程的不可逆性，物理学家为此着迷了150年。

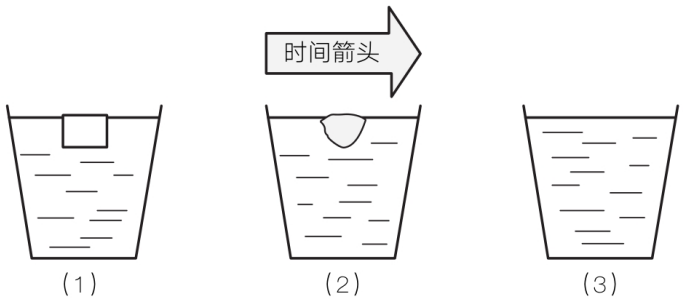


图2-1　冰块的融化过程

注：冰块的融化过程决定了时间的方向：热量从温水流入冰块。假如按照（3）（2）（1）的顺序放映一部电影，人们会认为这是一种特殊的剪辑手法。我们常用一个专门的物理量来表征这种不对称的特点，它就是熵（entropy），其值随着冰块的融化而增加。

冯·亥姆霍兹、鲁道夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）和威廉·汤姆森（William Thomson，又称开尔文勋爵）的研究向人们普及了热力学中一个描述不可逆转的变化的重要物理量——熵。在简单的热冷物体相接触的情境中，熵等于熵增过程中流入物质的热量除以物质的温度。假定少量热量从热物体流入冷物体，热物体将失去一些熵，那么冷物体将获得一些熵。由于这个过程中转移的热量相同，但温度不同，因此，冷物体获得的熵将大于热物体损失的熵，整个系统的总熵值（热物体的熵加上冷物体的熵）也就增加了。由此可得出热力学第二定律的一个原则：一个系统的熵永远不可能减少，因为减少就意味着一些热量自发地从低温物体流向了高温物体，而这种现象显然是不可能发生的。

熵永远不会下降。这个定律适用于所有的封闭系统。以冰箱为例，冰箱可以将热量从低温物体（冰箱内部）传递到高温物体（冰箱外部），那么整个系统的总熵值就必须考虑冰箱运行所消耗的能量，因为热量传递过程本身会使熵增加。正因为如此，在通常情况下，冰箱运行产生的熵会超过冰箱从低温物体到高温物体因热量的传递而导致的熵减少。在自然系统中，比如那些涉及生物有机体或者晶体形成的系统，其中一部分熵通常会下降，但这个下降总是由系统另一部分的熵的增加换来的。总而言之，熵永远不会下降。

如果将整个宇宙看作一个封闭系统，在没有“外部”的基础上，我们可以根据热力学第二定律做出一个重要的预测：宇宙的总熵永远不会减少。事实上，熵会一直冷酷无情地增加。我们眼前就有一个很好的例子——太阳，它不断地向寒冷的太空深处散发热量，而热量进入宇宙，永不返回，这是一个惊人的不可逆的过程。

如果真如上文所述，便会不可避免地产生一个问题：宇宙的熵会永远增加吗？想象一下，一个热物体和一个冷物体在热力学封闭（绝热）的容器中相互接触，热能从热物体传递到冷物体，熵会增加，但最终冷物体会变暖，热物体会冷却，进而两个物体达到相同的温度。当达到这种状态时，就不会再发生热能传递现象。容器内的系统将达到均匀的温度，即包含最多熵的稳定状态，这种现象被称为热动平衡（thermodynamic equilibrium）。只要系统保持隔离，就不会有进一步的变化；但如果物体受到某种形式的干扰，比如，从容器外部引入更多的热量，那么就会产生进一步的热活动，熵将增加到更大的峰值。

这些热力学的基本原理向我们揭示了天文学和宇宙学方面的什么规律呢？在太阳和大多数其他恒星中，热量的外流虽然可以持续数十亿年，但总体而言并不是取之不尽的。正常恒星的热量是由其内部的核聚变过程产生的。正如我们将看到的，太阳终将会耗尽，除非有大事件能改变这一局面，否则太阳将持续冷却到与周围空间相同的温度。

虽然冯·亥姆霍兹对核聚变反应一无所知（在当时，太阳巨大能量的来源还是一个谜），但他认识到了一个普适规律：宇宙中的所有物理活动都将趋向于热动平衡这一最终状态，或最大熵状态，随后宇宙中不会发生任何有意义的物理活动。这种走向平衡的单向变化过程被早期的热动力学家称为宇宙的“热寂”（heat death）。个别系统可能会被外部的干扰事件重新激活，但宇宙本身按其定义没有“外部”的概念，所以没有任何东西可以阻止宇宙走向无所不包的热寂。这似乎是不可避免的事情。

宇宙的消亡是热力学第二定律作用的必然结果，这一发现对一代又一代的科学家和哲学家产生了极其消极的影响。比如，伯特兰·罗

素（Bertrand Russell）怀着激动的心情在他的著作《为什么我不是基督徒》中写下了以下悲观的评论。

> 所有时代的劳动结晶，人类天才的所有奉献、所有灵感、所有光华，都注定会随太阳系的浩劫而消亡，象征整个人类成就的神殿也将不可避免地被掩埋在宇宙的废墟下。所有这些，即使不是完全无可争议的，也几乎是确定无疑的，所有哲学都无法否定它们的真实性。只有在这些真理的脚手架中，只有在面对绝望时不屈不挠，我们才能安全地建造起灵魂的家园。

许多作家从热力学第二定律中得出结论，认为宇宙是无意义的，人类的存在最终是无用的。在本书后面的章节中，我们将会继续探讨这种悲观的评论，讨论这是不是一种误解。

宇宙最终会走向热寂的预测不仅说明了宇宙的未来，同时也暗示了过去发生的一些重大事件。很明显，如果宇宙以有限的速度不可逆转地衰退，那么它就不可能永远存在。原因很简单：如果宇宙是无限古老的，那它应该早就死了。以有限的速度运行的东西不可能永久存在。换言之，宇宙诞生于过去的某个时刻。

值得注意的是，这一深刻的结论并没有被19世纪的科学家正确理解。20世纪20年代，关于宇宙起源于大爆炸的假设必须等待天文观测才能判定真假，但在过去的某个时刻，这个纯粹基于热动力基础的宇宙起源理论已经得到了明显的证据支持。

然而，由于没有提出显而易见的推论，19世纪的天文学家为一个奇怪的宇宙学悖论感到困惑不解，这个悖论由德国天文学家海因里希·奥尔伯斯（Heinrich Olbers）提出，被称为“奥尔伯斯悖论”（见图2-2）。该悖论提出了一个简单却意义深远的问题：为什么夜晚的天空是黑色的？

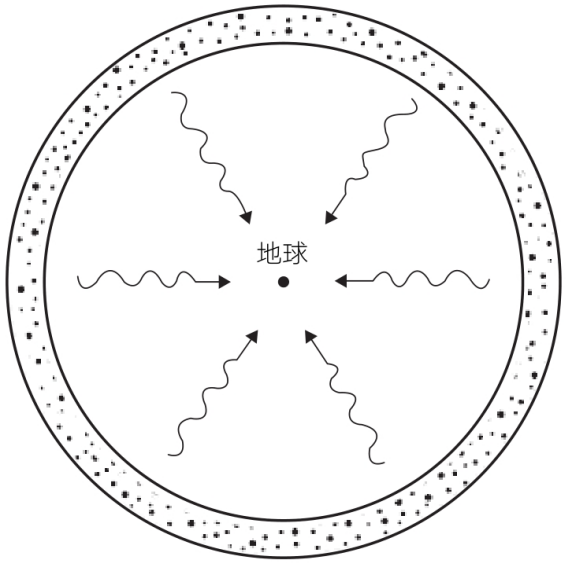


图2-2　奥尔伯斯悖论

注：设想一下，宇宙永无变化，其间的恒星在某个平均密度下随机分布。图中是一组恒星，它们位于一个以地球为中心的薄薄的球状壳层内（图中省略了壳外的恒星）。这个壳层中所有恒星发出的光构成了落在地球上的恒星的光的总通量。恒星的光强度将随着壳层半径的平方而减小。然而，球壳内的恒星总数量将随着球壳半径的平方成比例增长。因此，这两个因素相互抵消，该球壳的总光通量与它的半径无关。在一个无限的宇宙中，会有无限多的球壳，那么显然，就会有无限的光通量到达地球。

乍看之下，这个问题似乎不值一提。因为恒星离我们很远，所以夜空看起来很暗。然而，假设空间是无限的，那么恒星就有无限多，而无限多星光黯淡的恒星叠加起来会产生大量光。我们很容易计算出分布在整个空间的无限多恒星累积发出的星光。一方面，恒星的亮度跟距离的平方成反比，这就意味着在距离的2倍处，恒星的亮度减弱为1/4，在距离的3倍处，恒星的亮度减弱为1/9，以此类推。另一方面，你看得越远，看到的恒星数目就越多。事实上，简单的几何学表明，距离地球200光年处的恒星数量是距离地球100光年处的4倍，而距离地球300光年处的恒星数量是距离地球100光年处的9倍。所以恒星的数量按距离的平方增加，而亮度按距离的平方减少。这两种效应相互抵消，结果便是，在一定距离内所有恒星发出的光的总强度与距离无

关。所有来自200光年以外的恒星发出的光，与来自100光年以外的恒星发出的光的总强度相同。

当我们将所有可能距离上的所有恒星发出的光相加时，就会产生一个问题：如果宇宙没有边界，那么地球接收到的总的光通量应该是无限的，夜空就不应该是黑暗的，而是无限明亮！

如果将恒星的大小考虑在内，那么情况就会得到一定程度的改善。恒星离地球越远，其外在大小就越小。如果一颗邻近的恒星位于同一条视线上，那么它就会遮住一颗较远的恒星。在一个无限的宇宙中，这种情况经常发生，考虑到这一点，先前计算的结论就需要修改。到达地球的光通量不是无限的，只是非常大而已，大致相当于太阳的圆盘充满整个天空，相当于将地球放在离太阳表面大约160万千米远的地方，这确实是一个非常不舒服的地方，因为地球会被巨大的热量迅速汽化。

一个无限宇宙等同于一个宇宙熔炉这样的结论实际上是对前面讨论过的热力学问题的重述。恒星将热量和光注入太空，其辐射会在太空中慢慢积累。假如恒星一直在燃烧，那么从表面来说，这种辐射应该有无限的强度。事实上，有一些辐射在穿越太空的过程中，会撞击到其他恒星并被重新吸收（这相当于附近的恒星遮住了较远恒星的光）。因此，如果达到平衡状态，发射率刚好与吸收率平衡，那么辐射强度将不再升高。当太空中的辐射达到恒星温度（几千开尔文）时，就会出现这种热动平衡状态。因此，宇宙应该是充满了温度达到几千开尔文的热辐射，而这个温度下的夜空应该是发光发热的，而非黑暗无光。

奥尔伯斯针对自己的悖论提出了一个解决办法。他注意到宇宙中存在大量尘埃，这些物质会吸收大部分星光，从而使天空变暗。虽然他的观点富有想象力，但从本质上来说是有缺陷的。尘埃最终会升温，并会以与吸收的辐射相同的强度发光。

另一个可能的解决办法是，放弃宇宙空间无限大的假设。假设恒星很多，但数量有限，宇宙由一个巨大的恒星群组成，并被一个无限的黑暗空间包围着，那么大部分恒星发射的光就会流向宇宙的另一个空间，然后消失。这个简单的办法也有一个致命的缺陷，事实上，牛顿在17世纪就已经发现了这一点。这个缺陷与引力的性质有关：每一颗恒星都用引力吸引着其他恒星，因此，在这种由巨大的恒星群组成的宇宙中，所有恒星都倾向于向引力中心跌落并聚集。如果宇宙有一个明确的中心和边界，它一定会自行坍缩。一个无支撑的、有限的、静态的单向体是不稳定的，很容易发生引力坍缩（gravitational collapse）。

我们会在后文继续讨论引力坍缩的问题，这里只需要注意牛顿试图回避这个问题的巧妙方法。牛顿推断，只有当宇宙有中心时，它才能坍缩到中心。如果宇宙的范围是无限的，其中均匀地分布着恒星，那么它就没有所谓的中心和边界。一颗特定的恒星将会被它的许多邻居向多个方向牵引，就像一场巨大的拔河比赛，牵引的绳索向四面八方延伸。平均开来，所有的引力会相互抵消，因此恒星并不会移动。

如果我们接受牛顿解决引力坍缩问题的方法，就又回到了无限宇宙和奥尔伯斯悖论的问题上。看来我们必须面对这种进退两难的境地。但事实证明，我们可以在两难境地之间找到一条出路。错的不是假设宇宙在空间上是无限的，而是假设宇宙在时间上是无限的。永远存在的奥尔伯斯悖论源自天文学家假定宇宙是永恒不变的，即假定恒星是静止的，并以不减的强度永恒燃烧。我们现在知道，这两个假设都是错误的。首先，宇宙不是静止的，而是在不断膨胀；其次，恒星不可能永远燃烧，因为如果真是那样，它们的燃料早就耗尽了。恒星还在燃烧的事实意味着，宇宙是在过去某一特定时刻形成的。

如果宇宙的寿命是有限的，奥尔伯斯悖论就会迎刃而解。我们以一颗非常遥远的恒星为例来说明这个问题。光是以有限的速度传播

（在真空中以每秒30万千米传播）的，所以我们无法看到当前的恒星，只能看到光离开它时的星象。比如，明亮的参宿四离地球大约650光年，所以我们现在看到的是650光年前的参宿四。如果宇宙是100亿年前形成的，那么我们就无法看到任何距离地球超过100亿光年的恒星。宇宙在空间上可能是无限的，但如果地球有一个有限的年龄，那么我们在任何情况下都看不到超过某个有限距离的天体。因此，来自有限年龄无限恒星的累积光通量将是有限的，而且可能极其微弱。

科学家从热力学角度也得到了同样的结论。由于宇宙的空间是无限的，因此恒星用热辐射填充宇宙空间，并达到同温状态所花费的时间将会相当长，而宇宙从诞生之初到现在，还没有足够的时间来达到热动平衡状态。

所有的证据都表明，宇宙的寿命是有限的。它在过去某个有限的时间形成，现在正处于活力满满的黄金时期，而在未来某刻会无可避免地退化至热寂状态。由此我们不得不思考后面的一系列问题：末日什么时候会降临？末日会以什么样的形式到来，是缓慢进行还是突然发生？按照科学家对“热寂说”的认识，“热寂说”在未来会不会被证明是错误的？

THE LAST THREE MINUTES

03
最初的三分钟

宇宙学家深知探测宇宙未来的关键在于过去。只有了解宇宙如何诞生，我们才能去探索宇宙如何消亡。

和历史学家一样，宇宙学家深知探测宇宙未来的关键在于过去。我已经从热力学第二定律的角度解释了宇宙的寿命为何是有限的。科学家几乎一致地认为，整个宇宙起源于100亿～200亿年前的一次大爆炸，并会走向它的最终命运。通过研究宇宙是如何开始的以及最初阶段的演变过程，我们可以获得关于遥远未来的重要线索。

“宇宙并不是永恒存在的”这个观念在西方文化中根深蒂固。尽管希腊哲学家思考过宇宙可能是永恒存在的，但所有西方的主流宗教都坚持认为，宇宙是上帝在过去的某个特定时刻创造出来的。

宇宙起源于大爆炸的理论具备令人信服的科学依据，最直接的证据来自对遥远星系光线颜色的研究。20世纪20年代，在亚利桑那州罗威尔天文台工作的专家维斯托·斯莱弗（Vesto Slipher）对星云进行了长期的耐心观测，而美国天文学家埃德温·哈勃（Edwin Hubble）在斯莱弗工作的基础之上，发现遥远的星系似乎比附近的星系要更偏红一些。哈勃用100英寸（254厘米）的威尔逊山望远镜仔细观测了这种现象，并绘制了一张图表。结果发现，星系具有一种系统性的特征：星系离地球越远，发出的光线看起来越红。

光的颜色与其波长有关。在白光光谱中，蓝色位于短波的一端，而红色位于长波的一端。遥远星系偏红意味着，这个星系的光波波长不知何故被拉长了。通过仔细测定许多星系光谱中特定谱线的位置，哈勃证实了这一效应。他提出，光波之所以被拉长是因为宇宙在膨胀。哈勃的这一重大发现奠定了现代宇宙学的基础。

宇宙正在膨胀的性质让许多人感到困惑。从地球的角度来看，遥远的星系似乎正在快速地远离我们。然而，这并不意味着地球处于宇宙的中心，整个宇宙的膨胀模式（平均来看）是相同的。更准确地来说，每个星系团都在彼此远离。我们最好把这种远离设想成星系团之间空间的伸展或者膨胀，而不是星系团在宇宙中的运动。

空间竟然可以延伸，这实在令人感到惊讶。1915年，爱因斯坦发表了广义相对论之后，这一概念已经被科学家熟知。广义相对论认为，引力实际上表现为空间的弯曲或扭曲，严格地来说，是时间和空间的弯曲或扭曲。从某种意义上来说，空间是有弹性的，能以某种方式弯曲或者延伸，弯曲或者延伸的程度取决于空间中物质的引力属性。这一观点已经被充分地证实了。

我们通过一个简单的类比来理解一下膨胀空间的基本概念。假设用一排纽扣代表星系，并将其缝在一根松紧带上（见图3-1）。如果你拉绳子的两端，所有的纽扣就会彼此远离，无论哪个纽扣，所有与它相邻的纽扣都在远离。宇宙各处的膨胀都是一样的，没有中心。虽然图3-1中央有一个纽扣，但这与系统的膨胀方式无关。如果带纽扣的松紧带无限长，或者闭合成一个圆，这个中心点便不存在了。

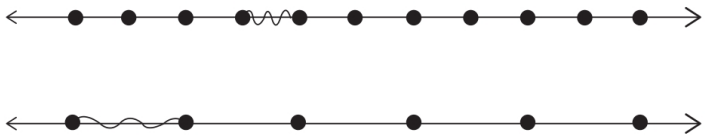


图3-1　膨胀宇宙的一维模型

注：纽扣代表星系，松紧带代表宇宙空间。当松紧带延伸时，纽扣会彼此远离。所以，延伸可以增加沿线传播的波的波长，这与哈勃发现的光的红移现象相吻合。

从任何一个特定的纽扣来看，相邻最近的纽扣的远离速度似乎仅仅是下一批相邻更近的纽扣的一半，以此类推可得出，纽扣离你的视点越远，它后退的速度就越快。在这种类型的膨胀中，后退的速度与距离成正比，这是一种非常显著的关系。因此，我们可以想象光波在膨胀空间中的星系之间传播的情形，随着空间的延伸，光波也会被拉长。这就解释了宇宙红移现象。哈勃发现，红移现象与距离成正比，正如图3-1所示。

如果宇宙在膨胀，那么它在过去一定是被压缩了。哈勃的观察结果以及此后所做的大量研究为膨胀率提供了一个衡量标准。如果将宇宙的运行看作一部电影，并倒着看这部电影，我们就会发现在遥远的过去，所有的星系都聚合在一起。根据当前的膨胀率，我们可以推断出，这种聚合一定发生在数十亿年前。然而，由于以下两个原因，我们很难准确地判断出这种聚合究竟发生在多少年前。

第一，测量很难精确地进行，而且会有各种各样的误差。尽管现代望远镜几经改进，可观测到的星系数量大大增加了，但膨胀率的不确定性仍在两倍以内，这是一个充满争议的话题。

第二，宇宙膨胀的速度不会随着时间的推移保持不变，这是引力作用的结果。引力不仅会作用于星系之间，而且会作用于宇宙中所有形式的物质和能量之间。引力起到了刹车的作用，抑制了星系向外冲撞。因此，膨胀率会随着时间的推移逐渐减小。由此可知，过去宇宙的膨胀速度肯定比现在快。如果我们绘制一张关于可见宇宙的大小与时间的关系图，就会得到如图3-2所示的曲线。从图中我们可以看到，宇宙开始时压缩在一起，但膨胀的速度很快，而且随着时间的推移，物质的密度随着宇宙体积的增加而稳步下降。如果沿着曲线一直追溯到最初状态（图中标记为“0”），我们就会发现，宇宙起源于零体积且具有无限的膨胀率。换言之，构成我们今天所能看到的所有星系的物质从一个奇点上快速出现，爆炸的速度极快。这是对大爆炸理论的理想化描述。

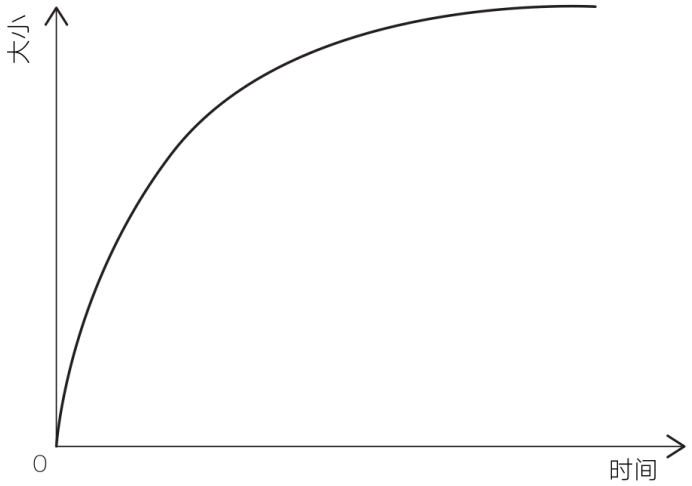


图3-2　可见宇宙的大小与时间的关系图

注：如图所示，宇宙的膨胀率随着时间的推移而稳定地降低。在时间轴上标记为“0”的点上，膨胀率是无限的。这一点与宇宙大爆炸理论相吻合。

我们是否应该沿着这条曲线一路追溯到起点呢？许多宇宙学家觉得这很有必要。如果宇宙曾经有过一个开端（鉴于我在前一章中讨论过的原因），大爆炸肯定是真实的。如果真是这样，那么曲线所标志的就不仅仅是一次大爆炸。请记住，这里所描绘的膨胀是宇宙空间本身的膨胀，所以零体积并不意味着物质被压缩到无限密度，而是意味着空间被压缩到零。换句话说，大爆炸是空间的起源，也是物质和能量的起源。最重要的是要认识到，宇宙大爆炸发生时，没有预先存在的空间。

同样的思路也适用于时间。物质的无限密度和宇宙空间的无限挤压也标志着时间的边界，因为时间和空间都被引力延伸了。同理，这种效应是爱因斯坦广义相对论的一系列推论，并且已经被实验证实了。大爆炸的条件意味着时间的无限扭曲，因此时间和空间的概念不能延伸到大爆炸之外。这迫使我们得出一个结论，大爆炸是所有物理事物（空间、时间、物质和能量）的开端。显然，像许多人那样询问大爆炸前发生了什么，或者是什么导致了大爆炸的发生，都显得毫无

意义。因为大爆炸没有以前。如果没有时间，就没有一般意义上的因果关系。

如果宇宙大爆炸理论仅仅基于宇宙膨胀的现象，那么许多宇宙学家可能会拒绝相信它。不过，科学家1965年发现了宇宙微波背景辐射之后，该理论又有了一个重要证据。在整个宇宙中，宇宙微波背景辐射以相同的强度从天空的各个方向射向地球，自大爆炸发生后不久，它一直不受干扰地传播着。因此，宇宙微波背景辐射提供了原始宇宙状态的快照。这种辐射的光谱与存在于炉内达到了热动平衡状态的光完全匹配，这是物理学家称为黑体辐射的一种辐射形式。我们可以据此得出结论，早期宇宙处于这样一种平衡状态：所有区域都处于同一温度。

根据测量，宇宙微波背景辐射比绝对零度(4)大约高出3开尔文，但温度会随着时间缓慢变化。当宇宙膨胀时，温度会根据一个简单的公式冷却：当宇宙的半径增加一倍时，温度会下降一半。这种冷却与光的红移现象具有相同的效果：热辐射和光都由电磁波组成，热辐射的波长也会随着宇宙的膨胀而被拉长。低温辐射比高温辐射的波长更长。此外，如果将宇宙这部电影倒着看，我们就会发现宇宙的温度在过去更高。宇宙微波背景辐射可以追溯到大爆炸发生后的大约30万年，当时宇宙已经冷却至大约4 000摄氏度。宇宙背景热辐射至今仍然保持着完美的黑体谱，这表明，从大爆炸之后的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。

宇宙微波背景辐射不仅因其黑体形式而异，更因其在天空中的极端均匀性而异。在不同的空间方向上，辐射的温度差仅有十万分之一左右。一方面，这种平滑度表明，宇宙在很大程度上是非常均匀的，因为当任何系统的物质聚集到空间的一个区域，或者沿一个特定的方向聚集时，温度都会发生变化。另一方面，宇宙并不是完全均匀的。物质聚集成星系，星系又形成星系团，这些星系团依次排列在超星系

团中。在数百万光年的规模上，宇宙呈现一种气泡状结构，也就是在一些巨大的空洞周围包围着星系膜和星系纤维。

宇宙大规模的块状聚集一定是从一个更加平滑的原始状态开始的。虽然这可能是各种物理机制造成的，但最合理的解释是，这种现象源自缓慢的引力作用。如果宇宙大爆炸理论是正确的，我们期望有证据证明，这种聚合过程的早期阶段的迹象已经留在了宇宙微波背景辐射中。1992年，美国国家航空航天局（NASA）的一颗宇宙背景探索者卫星（COBE）显示，宇宙微波背景辐射并不是精确地均匀分布的，从太空一端到另一端的辐射都具有明显的波纹或强度变化。这些微小的不均匀现象似乎是超聚集过程的温和开端。宇宙微波背景辐射忠实地保留了千古以来宇宙原始聚合的迹象，并以图形的方式证明宇宙并非以我们今天所看到的独特方式构成。物质聚集成星系和恒星是一个不断扩展的演化过程，这个过程始于宇宙几乎完全均匀的状态。

某些化学元素的宇宙丰度(5)也能证明大爆炸理论的正确性。知道了当前宇宙微波背景辐射的温度，我们就可以很容易地计算出，整个宇宙在大爆炸发生后一秒钟的温度约为100亿摄氏度，对现有的原子核的合成来说，这个温度太高了。那时，物质被分解成最基本的成分，形成一个由质子、中子和电子等基本粒子组成的粒子汤。然而，随着粒子汤的冷却，核聚变反应成为可能，特别是中子和质子可以自由、成对地黏在一起，而它们又结合在一起形成了氦元素的原子核。根据计算表明，这种核活动持续了大约三分钟（史蒂文·温伯格所著的《最初三分钟》的书名由此而来）。在此期间，大约1/4的物质被合成氦元素。这几乎耗尽了所有可用的中子，剩下未结合的质子注定会变成氢原子核。因此，据此预测，宇宙中应包含约75%的氢元素和25%的氦元素。这一比例与目前这些元素宇宙丰度的测量结果一致。

最初的核聚变反应还可能产生了非常少量的氘、氦-3和锂。不过，这些占宇宙物质总量1%的重元素并不是在大爆炸中产生的。相

反，它们形成的时间较晚，且形成于恒星内部，我将在第4章讨论它们形成的方式。

综上所述，宇宙的膨胀、宇宙微波背景辐射以及化学元素的宇宙丰度是证实大爆炸理论的有力证据。但是，仍有许多问题尚待解决。比如，为什么宇宙当初会以那么快的速度膨胀？换句话说，为什么大爆炸的规模如此之大？为什么早期宇宙如此统一？为什么各个方向和空间中的膨胀率也如此相似？宇宙背景探索者卫星所发现的宇宙密度发生微小波动的起因是什么？这些波动对银河系和星团的形成有什么重要影响？

近年来，通过将大爆炸理论与高能粒子物理学的最新思想相结合，科学家付出了巨大努力来解决这些深层次的难题。我要强调的是，这种“新宇宙学”所依据的科学基础远不如我们之前讨论的那些主题可靠，因为涉及的粒子能量远远大于任何可以直接观察到的粒子能量，而这些过程发生的时间则是宇宙诞生后不到一秒钟的时间内。当时的情况可能非常极端，目前唯一合适的途径就是几乎完全基于理论来进行数学建模。

新宇宙学的一个核心假设是，宇宙可能发生了暴胀。这个假设的基本思想是，在最初的几分之一秒内的某个时刻，一个巨大的因素促使宇宙突然变大了。若想了解这意味着什么，请再次参考图3-2，图中的曲线是向下弯曲的，这表明当任何给定空间的体积在膨胀时，其膨胀速度都会减缓。相比之下，在宇宙暴胀期间，膨胀的速度增加了（见图3-3，不按比例）。大爆炸发生之初，宇宙膨胀的速度放缓，但随着暴胀的开始，速度迅速回升，曲线上升了一小段时间之后，趋势恢复正常，但与图3-2中的同一位置相比，图3-3相对应的空间区域的大小已大幅增加，远远超过图3-2所示。

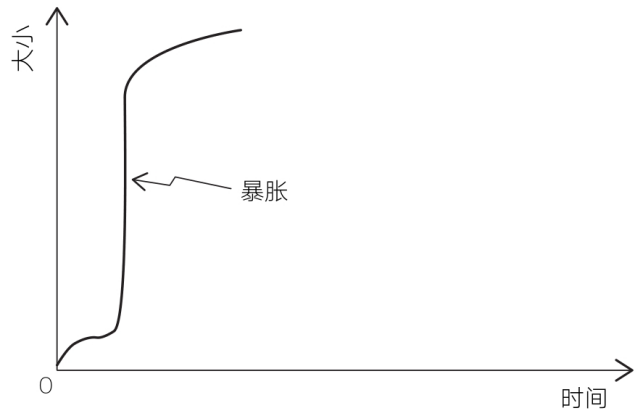


图3-3　暴胀过程

注：宇宙的大小在大爆炸发生后极短的时间内经历了一次突然的增大，膨胀的速度极速攀升。而暴胀阶段之后，膨胀的速度慢慢放缓，类似于图3-2。

为什么宇宙要以这种奇怪的方式运行呢？曲线向下弯曲是因为引力的作用，它在宇宙膨胀时起到了抑制作用。因此，向上的弯曲可以看作一种反引力或者排斥力，致使宇宙越来越大。尽管反引力听起来像是一种异端邪说，但最近的一些理论表明，反引力效应可能发生在宇宙早期的极端温度和密度条件下。

在讨论暴胀是怎么回事之前，我先来解释一下为什么暴胀理论有助于解决上文列出的一些宇宙难题。首先，暴胀可以令人信服地解释为什么大爆炸如此之大。反引力效应是一种不稳定的失控过程，可以使宇宙的大小呈指数级增长。从数学上来讲，这意味着给定空间区域的大小在固定的时间段内会成倍增大。如果将这段周期称为1个“滴答”（tick），2个滴答之后，给定空间区域的大小会膨胀4倍；3个滴答之后会膨胀8倍；10个滴答之后，该区域会膨胀千倍。计算表明，暴胀结束时的膨胀率与科学家今天观察到的膨胀率是一致的。在第6章中，我还会详细说明这个问题。

暴胀引起的宇宙空间的巨大跃升为宇宙的均匀特性提供了一种现成的解释。任何初始的不规则都会被空间的扩展消除，就像气球充气后，气球上的褶皱会消失一样。同样，宇宙任何不同方向上的早期膨

胀速度引发的任何变化都将很快被暴胀消除，暴胀在各个方向上都具有相同的作用力。我们可以由此得出，宇宙背景探索者卫星发现的宇宙密度的微小变化可能是因为这样一个事实：任何地方的暴胀都可能不会在同一瞬间结束，因此某些区域的膨胀程度会略高于其他区域，从而导致密度的轻微变化。

我们可以利用一些数字来说明暴胀的程度。在简单版本的暴胀理论中，暴胀力（反引力）异常强大，导致每隔一百亿亿亿亿分之一秒（10^{-34}秒），宇宙的大小就会增加一倍。这个几乎无穷小的时间间隔就是前文所称的“滴答”。仅仅100个滴答之后，一个原子核大小的区域就会暴胀到直径一光年左右。这足以回答之前讨论过的各种宇宙难题。

通过对亚原子粒子物理理论的研究，人们发现了几种可能致使暴胀发生的机制。所有这些机制都利用了“量子真空”概念。若想了解涉及的内容，我们必须先了解有关量子物理学的知识。量子理论始于电磁辐射（如热和光）性质的发现，尽管这种辐射以波的形式在空间中传播，但它是由粒子组成的，因为光的发射和吸收以光子这种微小能量包（或量子）的形式发生。这种由波和粒子组成的奇怪的混合体有时被称为波粒二象性，事实证明，这种现象适用于原子和亚原子尺度上的所有物理实体。因此，通常被认为是粒子的实体，比如电子、质子、中子，甚至整个原子，在某些情况下都会表现出波动的性质。

量子理论的一个核心原则是维尔纳·海森堡（Werner Heisenberg）提出的不确定性原理。根据该原理，量子物体的所有属性都不具有明确定义的值。比如，电子不可能同时具有确定的位置和确定的动量。在确定的时间，它的能量也没有确定的值，而能量值的不确定性是我们关心的问题。然而，在宏观世界中，能量始终是守恒的，既不能被创造，也不能被消灭，但是在亚原子量子领域，这个定律就失效了。能量可以自发地、不可预测地在时间尺度上发生变化。

间隔越短，这些量子的随机涨落就越大。实际上，粒子可以从我们不知道的地方借来能量，当然，这种借贷也需要及时偿还。不确定性原理的精确数学形式要求粒子必须尽快偿还大笔能量贷款，而小笔能量贷款则可以保留更长的时间。

能量的不确定性导致了一些奇怪的效应，比如粒子会突然从无到有，然后又很快消失，比如光子。这些粒子依靠借来的能量生存，因此也借着时间生存。我们看不到它们，因为它们如闪电一般转瞬即逝，我们通常认为空无一物的空间实际上成群地聚集着这种暂时存在的粒子，包括光子、电子、质子以及其他粒子。为了区分这些暂时存在的粒子和永久的粒子，前者被称为“虚粒子”，后者被称为“实粒子”。

除了暂时性之外，虚粒子与实粒子其实是相同的。事实上，如果系统外部以某种方式提供足够多的能量来偿还能量贷款，那么虚粒子就有可能变为实粒子，因此，虚粒子与任何其他实粒子没有什么区别。比如，一个虚电子通常只能存活约10^{-21}秒，在短暂的生命中，它不会停留在静止状态，但会在消失之前移动10^{-11}厘米的距离（一个原子的直径约为10^{-8}厘米）。如果虚电子在这么短的时间内（比如从电磁场）能接收到能量，它就不会消失，可以作为正常的电子继续存在。

尽管我们看不到虚粒子，但它们真的存在于空旷的空间中，因为它们留下了可检测到的活动痕迹。虚光子可以在原子的能级上产生微小的位移，也能使电子磁矩发生同样微小的变化。这些微小的变化已经被光谱技术精确地测量出来了。

亚原子粒子一般不会自由运动，但会受到各种力的作用。而力的类型取决于所涉及的粒子的类型，这些力也作用于相应的虚粒子之间，正因为如此，上述关于量子真空的简单模型还需要修改。宇宙中可能存在多种真空状态。存在多种可能的“量子态”是量子物理学的

一个常见特征，最广为人知的是原子的各种能级。一个绕原子核运行的电子可以以一定的能量且定义明确的状态存在。最低的能级被称为基态，是稳定的；较高的能级被称为激发态，是不稳定的。如果一个电子被激发到一个更高的状态，它会做一个或多个向下的跃迁回到基态，这种激发态有很明确的半衰期。

类似的原理也适用于真空，它可能有一个或多个激发态。这些真空中存在着不同的能量，尽管它们看起来是相同的，也就是说，是空的。最低能级或者基态有时又被称为真真空，这表明它处于稳定的状态，与目前可见宇宙中的真空状态相吻合。处于激发态的真空被称为伪真空。

值得强调的是，伪真空仍然是一个纯粹的理论概念，它们的性质很大程度上取决于人们引用的特定理论。伪真空的概念也出现在最新的理论中，这些理论旨在统一自然的4种基本力：我们日常生活中熟悉的引力和电磁力以及被称为弱相互作用力和强相互作用力的两个短程力。以前，人们认为电和磁是截然不同的，它们的统一过程始于19世纪初，并在近几十年中取得了进展。现在我们知道，电磁力和弱相互作用力是相互联系的，两者共同形成了单一的电弱力。许多物理学家认为，电弱力作为大一统理论的一部分，将来也会证明，强相互作用力与电弱力有关。很可能，这4种力在某个更深的层次上可以合并成一种单一的超级力。

各种大一统理论都预言了一种最有可能的暴胀机制。这些理论的一个关键特征是，伪真空状态具有惊人的能量：1立方厘米的空间包含10^{87}焦耳能量！在这种状态下，一个原子的体积也将包含10^{62}焦耳能量。相比之下，一个被激发的原子只有10^{-18}焦耳能量。因此，激发真真空需要巨大的能量，不过我们也不期望在宇宙中发现伪真空。考虑到大爆炸发生的极端条件，这些数字是可以说得通的。

与伪真空状态相关的巨大能量具有强大的引力效应。正如爱因斯坦所指出的，这是因为能量具有质量，因此可以产生引力，就像常规物质一样。量子真空的巨大能量非常诱人：1立方厘米伪真空的质量重达10^{67}吨，比当前整个可见宇宙的质量（约10^{50}吨）还要重！这种巨大的引力无法产生膨胀，后者还需要某种反引力。然而，巨大的伪真空能量与同样巨大的伪真空压力有关，正是这种压力起了作用。通常，我们不认为压力是引力的来源，但它确实是。虽然压力产生向外的机械力，但它也能产生向内的引力。在常见的物体中，与物体质量的影响相比，压力的引力效应可以忽略不计。比如，你在地球上的重量只有不到十亿分之一的重量来自地球的内部压力。然而，压力的引力效应是真实存在的，并且在压力达到极限值的系统中，压力的引力效应可以与质量效应相媲美。

伪真空状态下既有巨大的能量，也有与之相仿的巨大压力，因此它们会争夺对引力的支配权。然而，压力的关键特性是，它是负的。伪真空的压力起的作用不是排斥而是吸引。负压力会产生负引力效应，也就是说，会产生反引力作用。因此，伪真空的引力作用凭借其能量产生的巨大吸引效应与其负压力的巨大排斥效应进行了竞争。事实证明，压力赢了，其净效应是产生一种巨大的排斥力，它可以在瞬间将宇宙炸裂。正是这种巨大的膨胀推动着宇宙的体积每10^{-34}秒就增加一倍。

伪真空本质上是不稳定的。像所有的激发量子态一样，它倾向于衰变回基态，变为真真空。这个过程只需要几十个滴答就能完成。作为一个量子过程，它会不可避免地表现出不确定性和随机涨落，这与之前讨论过的不确定性原理有关。这意味着衰变不会在整个空间中均匀地发生，而是会有波动。一些理论家认为，这可能是宇宙背景探索者卫星发现的宇宙密度产生微小波动的根源。

当伪真空发生衰变时，宇宙会恢复其正常的膨胀速度，被锁在伪真空中的能量被释放出来，以热的形式出现。暴胀使宇宙冷却到接近绝对零度的温度；突然，暴胀终止，宇宙重新被加热到10^{28}摄氏度。随着宇宙微波背景辐射的扩散，这种巨大的热能扩散到了目前的低温状态。真空能量释放产生的副产品是，量子真空中的许多虚粒子结合另一些虚粒子，变为实粒子。经过进一步的处理和改变，这些原始粒子的残余物仍旧提供了10^{50}吨的物质，组成了你、我、银河系以及可见宇宙的其余部分。

如果暴胀理论是正确的，那就意味着经过10^{-32}秒后，决定宇宙的基本结构和物理成分的过程便已经形成了。在暴胀后期，宇宙在亚原子层面上经历了许多额外的变化，使原始物质发展成了构成当前可见宇宙物质的粒子和原子，但大多数物质的处理过程仅仅在三分钟左右就完成了。

宇宙的前三分钟和最后三分钟有什么关系呢？正如子弹的命运在很大程度上取决于射向的目标一样，宇宙的命运也取决于其初始条件。接下来，我会介绍当前的可见宇宙如何从最初的起源开始膨胀以及从大爆炸中产生的物质的性质如何决定了宇宙最终的未来。宇宙的开始和结束深深地交织在一起。

THE LAST
THREE
MINUTES

04
恒星的末日

一颗大质量恒星的命运就是将自身炸成碎片，留下一颗中子星或一个被扩散性喷射气体包围的黑洞。

1987年2月23日至24日晚，加拿大天文学家伊恩·谢尔顿（Ian Shelton）在智利安第斯山脉的拉斯坎帕纳斯天文台工作。值夜班的一位助理走出办公室，漫不经心地瞥了一眼漆黑的夜空。他对天象十分熟悉，很快便发现了一些不同寻常的事情。那片被称为大麦哲伦星云的边缘有一颗恒星，它不是特别亮，与猎户座带上的其他恒星相差无几，关键的问题是，前一天它并不在那里。

这位助理成功地将谢尔顿的注意力吸引到了这颗恒星上。几个小时之内，这个消息就传遍了全世界。谢尔顿和助理发现了一颗超新星。这是自1604年约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler）记录下一颗超新星之后发现的第一颗肉眼可见的超新星。好几个国家的天文学家立即开始用仪器捕捉大麦哲伦星云上的这颗超新星——1987A。在随后的几个月里，天文学家观测并详细地记录下了这颗超新星的运行轨迹。

就在谢尔顿做出惊人的发现之前的几个小时，人们在一个不同寻常的地点——位于日本神冈地下37层的锌矿里，发现了另一个不同寻常的事件。长久以来，一些物理学家在这里做着一项雄心勃勃的实验，目的是测试质子（物质的基本构成成分之一）的最终稳定性。20世纪70年代发展起来的大一统理论预测，质子可能非常不稳定，偶尔会衰变成某种异乎寻常的放射性变种。如果是这样，它将对宇宙的命运产生深远的影响，我们将在后面的章节中讨论这个问题。

为了测试质子的衰变，日本实验人员往一个水箱中注入了2 000吨超纯水，并在水箱周围放置了高灵敏度的光子探测器。探测器的工作是记录可能由个别衰变事件产生的高速产物的闪光信号。为了减少宇宙辐射的影响，实验选择了在地下进行，以防探测器被虚假事件淹没。

1987年2月22日，探测器在数秒内突然被触发了至少11次。与此同时，在地球的另一边，俄亥俄州一个盐矿中的探测器也记录了8次类似

事件。19个质子同时自行消失，这种大规模的事件是不可想象的，肯定事出有因。物理学家很快就发现，他们的设备记录了另一种更传统的过程对质子的破坏，该过程就是中微子的轰击。

中微子属于亚原子粒子，在我的研究中至关重要，所以我有必要先详细介绍一下。1931年，奥地利理论物理学家沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）首次提出了中微子存在的观点，以解释被称为β衰变的放射性过程中产生的一个问题。在典型的β衰变过程中，中子会衰变成质子和电子（质子变成中子，并释放电子）。电子是一种相对较轻的粒子，飞走时携带了巨大能量。问题是，在不同的衰变过程中，电子似乎带有不同的能量，比中子衰变的总能量要少一些。由于总能量在所有情况下都是相同的，而这里的最终能量和初始能量不相等，这种情况肯定是不正常的，能量守恒定律是物理学的基本定律。泡利提出，缺失的能量可能是被一种看不见的粒子转移走了。早期探测这些粒子的尝试都以失败告终。很明显，如果它们真的存在，一定具有难以置信的穿透力。由于任何一种带电粒子都很容易被物质捕获，因此泡利所说的粒子必须是电中性的，因此得名“中微子”。

尽管当时还没有人发现中微子，但理论家已经发现了中微子的很多性质，其中一个与中微子的质量有关。

当涉及快速运动的粒子时，质量的概念就显得很微妙。这是因为物体的质量不是固定的，而是随着物体的速度发生变化。比如，一个重1千克的铅球如果以每秒26万千米的速度移动，它的重量将会达到2千克。这里的关键因素是光速，物体的速度越接近光速，其质量就越大，并且质量的增加没有上限。由于质量会随速度发生变化，所以当物理学家谈论亚原子粒子的质量时，他们指的是亚原子静止时的质量。如果粒子以接近光速的速度运动，其实际质量可能是其静止质量的许多倍，在大型粒子加速器中，循环运动的电子和质子的质量可能是其静止质量的数千倍。

中微子的静止质量源自这一现象：β衰变事件有时会用所有的可用能量发射电子，不给中微子留下能量。这意味着中微子可以以零能量的状态存在。那么，根据爱因斯坦著名的方程式$E=mc^2$，能量E和质量m是相等的，所以零能量对应的是零质量。这意味着中微子的静止质量可能非常小，几乎为零。如果静止质量真的为零，那么中微子将以光速运动。无论如何，中微子很可能是以非常接近光速的速度运动的。

中微子的另一个性质涉及亚原子粒子的自旋方式。科学家发现，中子、质子和电子有自旋。这种自旋的大小有一个固定的值。事实上，这三种粒子的值都是相同的。自旋是角动量的一种形式，遵循角动量守恒定律，该定律是一个基本的能量守恒定律。一方面，当中子衰变时，其自旋必须保留在衰变产物中。如果电子和质子朝同一方向旋转，它们的自旋将相加，使中子的自旋增加两倍。另一方面，如果它们反向旋转，自旋将相减，两者之和为零。然而，无论是哪种方式，单独的电子和质子的总自旋都不可能等于中子的总自旋。但当科学家考虑到中微子的存在时，通过假设中微子具有与其他粒子相同的自旋，就会达到平衡。然后，三个衰变产物中的两个可以朝同一方向旋转，而第三个则反向旋转。

在没有探测到中微子的情况下，物理学家就已经推断出，它一定是一个电荷为零、自旋与电子相同、静止质量很小或者没有静止质量的粒子，与普通物质的相互作用非常微弱，几乎不会留下任何痕迹。简而言之，中微子是一种旋转的幽灵。在泡利推测出存在中微子大约20年后，中微子才在实验室中被明确地探测到。它们在核反应堆中的数量非常多，尽管它们难以捉摸，但还是偶尔会被探测到。

中微子的爆发与超新星1987A的发现差不多是同步的，毫无疑问，这不仅仅是一个巧合，科学家认为，这两个事件恰恰证实了超新星理

论。事实上，中微子的爆发正是天文学家在超新星爆发事件中预期会出现的现象。

在拉丁语中，“新星”的意思是“新的”，但超新星1987A并不是一颗刚诞生的新恒星。事实上，这是一颗旧恒星在一次壮观的爆炸中的死亡。超新星出现在大麦哲伦星云的边缘，这是一个位于大约17万光年之外的微型星系。该星系离银河系非常近，就像银河系的一颗卫星。在南半球，人们可以用肉眼看到它，看起来就像一个模糊的光斑，但若想发现它的各个恒星，就需要大型望远镜。在谢尔顿发现超新星后仅仅几个小时，天文学家就已经确定是拥有数十亿颗恒星的大麦哲伦星云中的哪一颗恒星爆炸了。他们通过检查那片天空以前的照片底片完成了这一壮举。这颗受损的恒星是一颗B3型蓝超巨星，其直径大约是太阳的40倍，它还有另一个名字——桑度列克-69° 202a（Sanduleak-69° 202a）。

20世纪50年代中期，天体物理学家弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）、威廉·福勒（William Fowler）、吉奥弗莱·霍伊尔（Geoffrey Hoyle）和玛格丽特·伯比奇（Margaret Burbidge）首次提出了恒星可能会爆炸的理论。若想了解恒星是如何遭此大难的，就必须了解它的内部运作原理。太阳是我们最熟悉的恒星。与大多数恒星一样，太阳似乎是不变的。然而，事实是，太阳深陷在与毁灭性力量的持续斗争中。所有的恒星都是由引力连接在一起的气体球体。如果引力是唯一的作用力，它们会因自身巨大的质量发生内爆，并在数小时内消失。之所以没有发生这种现象，是因为恒星内部压缩气体的压力的向外力平衡了引力的向内力。

气体的压力与其温度之间存在一种简单的关系。当固定体积的气体被加热时，压力通常会随着温度的升高而增加。相反，当温度下降时，压力也会下降。恒星内部有着巨大的压力，因为它的温度高达数百万摄氏度。热量是在核聚变反应中产生的。在恒星整个生命周期的

大部分时间内，为恒星提供能量的主要反应是通过核聚变将氢转化为氦。这个反应需要很高的温度才能克服作用于原子核之间的电斥力。核聚变能可以使一颗恒星维持数十亿年，但燃料迟早会耗尽，到那时，反应堆将会萎缩。当这种情况发生时，压力支撑岌岌可危，恒星将会失去与引力进行长期抗衡的压力。恒星会通过封存其燃料储备来避免引力坍缩，但从恒星表面流向太空深处的每千瓦能量都会加剧其终结的速度。

据估计，太阳上的氢能够燃烧大约100亿年。现在，太阳大约50亿岁了，已经消耗掉了将近一半的储备能量（暂时不必惊慌）。恒星消耗核燃料的速度与其质量密切相关。较重的恒星燃烧速度要快得多，因为它们更大、更亮，因此会释放出更多的能量。额外的质量会将气体压缩至更高的密度和温度，从而提高熔融反应速度。比如，一颗具有10个太阳质量的恒星会在1 000万年内燃烧掉其大部分氢。

我们来看看大质量恒星的命运。大多数恒星最初主要由氢组成。氢的“燃烧”是通过氢原子核聚变发生的，氢原子核是单个质子，可以形成氦原子核，每个氦原子核由两个质子和两个中子组成。氢“燃烧”是最有效的核能来源，却不是唯一的来源。如果核心温度足够高，氦原子核可以聚变形成碳，而进一步的聚变反应会产生氧、氖和其他元素。一颗大质量的恒星可以产生超过10亿摄氏度的内部温度，使这一系列连续的核聚变反应得以进行，但释放的能量却在稳步减少。核聚变反应每锻造一个新元素，释放的能量就会下降一个等级。至此，核燃料消耗得越来越快，直到恒星的成分每月、每天，直至每小时都在发生变化。恒星的内部就像一个洋葱，每层都在以越来越疯狂的速度不断地合成化学元素。从外部来看，恒星的体积会膨胀得异常巨大，比整个太阳系的体积都大，成为天文学家所称的红超巨星。

核燃烧链终止于铁元素，铁元素具有特别稳定的核结构。实际上，通过核聚变反应合成比铁元素还重的元素会消耗能量而不是释放

能量，因此当恒星合成铁原子核时，就意味着恒星的中心区域不再产生热能，此时引力必然会占尽上风。恒星在灾难性的不稳定边缘摇摆，最终落入自己的引力坑中。

这就是恒星内部发生的事，发生的速度很快。恒星无法通过核的燃烧产生热量，无法支撑其自身的质量，在引力作用下强烈收缩，直至原子都被压碎。最终，恒星核区达到原子核的密度，在该密度下，一个顶针的体积将能容纳近万亿吨的物质。在这个阶段，受损恒星内核的直径有200千米，核物质的坚固特性会引起恒星内核的反弹。如此强大的引力使得这个巨大的反弹过程只需要几毫秒。当这种巨大的变化在恒星内核展开时，周围的恒星物质层就会在一次突然的灾难性震动中向内核坍缩。在以每秒数万千米的速度向内移动的过程中，数万亿吨的内爆物质遇到了反弹的高度紧凑的内核，比钻石还要坚硬。接下来发生的将是一场剧烈的碰撞，一股巨大的冲击波从恒星内部向外发射。

伴随着冲击波的是巨大的中微子脉冲，它在恒星最后的核转变过程中突然从恒星的内部区域释放出来。在这个转变过程中，恒星中原子的电子和质子被挤压在一起形成中子。恒星的内核实际上变成了一个巨大的中子球。冲击波和中微子一起通过恒星的上覆层向外输送大量能量。当吸收了大部分能量后，恒星外层会在无法想象的、剧烈的核大屠杀中爆炸。在接下来的几天中，这颗恒星会以100亿颗太阳的强度发光，几周后才逐渐消失。

在银河系这样的典型星系中，超新星平均每个世纪会出现两到三次，这些超新星都被天文学家记录在册，其中最著名的一个超新星是由中国和阿拉伯观察家在公元1054年发现的。今天，这颗破碎的恒星看起来就像一团不规则的膨胀气体云，又被称为蟹状星云。

当超新星1987A爆发时，不可见的中微子的闪光照亮了宇宙。这是一种惊人的脉冲，即使距离爆炸有17万光年远，地球上每平方厘米还

是会被1 000亿个中微子穿透。安居乐业的地球居民没有意识到，他们竟然被来自另一个星系的数万亿个粒子瞬间穿透了。位于神冈和俄亥俄州的质子衰变探测器阻止了其中的19个中微子，如果没有这个设备，它们将会像1054年那样被忽视。

尽管超新星爆发意味着恒星的死亡，但爆发本身是具有创造性的。巨大能量的释放非常有效地加热了恒星的外层，因此在短时间内可能发生进一步的核聚变反应，这些反应可能会吸收能量而不是释放能量。除铁以外的重元素，如金、铅和铀，都是在最后的、强度最高的恒星炉中锻造的。这些元素连同在原子核合成早期阶段产生的较轻元素，比如碳和氧，都被炸入太空中，与无数其他超新星的残骸混合在一起。在随后的世纪中，这些重元素被吸收到了新一代的恒星和行星中。没有这些元素的产生和传播，就不可能有像地球这样的行星。赋予生命的碳和氧、银行中的黄金、屋顶上的铅板、核反应堆中的铀燃料之所以能在地球上存在，都要归功于一些恒星在濒临死亡时发出的“呻吟”，而这些恒星在太阳存在之前就已经消失了。谁能得到，组成我们身体的全部原材料都来自死去恒星的核灰烬。

超新星爆发并不会完全摧毁恒星。尽管大部分物质被分散，但引发爆炸的内爆核仍保留在原位。然而，它的命运也是危如累卵。如果恒星内核的质量太低，比如相当于一个太阳的质量，那么它将形成一个小城市大小的中子球。最有可能的是，这颗“中子星”将以极快的速度旋转，可能超过每秒1 000转，或者是光速的10%。它之所以会产生这种令人头晕的旋转，是因为内爆极大地放大了原恒星相对缓慢的自转；这与滑冰运动员收回手臂时旋转更快的原理相同。天文学家发现了许多这样快速旋转的中子星。但当物体失去能量时，旋转速度会逐渐减慢。比如，位于蟹状星云中间的一颗中子星的旋转速度现在已经减慢到了每秒33转。

如果恒星内核的质量稍大一些，比如有几个太阳的质量那么大，它就不能像中子星那样稳定下来。因为它的引力会非常大，即使是已知最坚硬的物质——中子物质，也无法抵抗进一步的压缩。这一阶段将是一个比超新星爆发更可怕、更灾难性的事件。恒星的内核继续坍缩，不到一毫秒，它就会消失在一个黑洞中。

一颗大质量恒星的命运就是将自身炸成碎片，留下一颗中子星或一个被扩散性喷射气体包围的黑洞。没有人知道有多少恒星已经以这种方式死去，仅在银河系中就可能包含数十亿个这样的恒星残骸。

小时候，我常常担心太阳会爆炸，但现在我知道它根本不会成为一颗超新星，因为它太小了。与庞大的表亲恒星相比，小质量恒星的命运要温和得多。首先，小质量恒星消耗燃料的核聚变过程会以更稳定的速度进行；位于恒星质量范围低端的矮星可能会稳定地发光一万亿年。其次，一颗小质量恒星无法产生足够高的内部温度来合成铁，因此不会引发灾难性的爆炸。

太阳是典型的质量较低的恒星，通过氢燃料稳定地燃烧着，并将内核转变为氦。就核聚变反应而言，氦主要位于不活泼的中央核区，而核聚变发生在内核表面。因此，恒星内核本身无法提供关键的热量，而这些热量足以支撑太阳不出现毁灭性的引力收缩。为了防止坍缩，太阳必须向外扩展核聚变活动，以寻找新的氢。同时，氦内核会逐渐收缩。随着时间的流逝，这些内部变化会导致太阳的外观发生不易察觉的变化——它会膨胀，表面温度略降，变得更红。这种趋势将一直持续到太阳变成一颗红巨星，体积可能是现在的500倍大。红巨星是天文学家很熟悉的一类恒星，夜空中几个众所周知的明亮恒星，比如毕宿五、参宿四和大角星，都属于此类。红巨星阶段标志着小质量恒星死亡过程的开始。

虽然红巨星的温度相对较低，但它庞大的体积使其具有巨大的辐射表面，这意味着整体发光度更强。随着热通量的增加，约40亿年

后，太阳系的行星将面临一个艰难的时期，比如地球将变得无法居住，海洋被煮沸，大气层被剥离。随着太阳越来越膨胀，它会吞没水星，然后是金星，最后将地球吞噬在其炽热的包围层中。我们的星球将变成灰烬，即使在焚化后仍顽强地围绕着轨道运行。此时太阳炽热气体的密度非常低，条件接近真空，因此对地球的运动几乎不会产生阻力。

我们之所以存在于宇宙中，是因为恒星（比如太阳）具有非凡的稳定性，它可以稳定地燃烧数十上百亿年之久，而其寿命足以使生命发生进化和繁衍。但在红巨星阶段，这种稳定性将被打断。像太阳这样的恒星，其生命中的后继阶段是复杂、不稳定和无规律的，其行为和外表的变化将非常迅速。老化的恒星可能会花费数百万年的时间来脉动或脱离气体外壳。恒星内核的氦可能会被点燃，形成碳、氮和氧，从而提供能让恒星维持更长时间的重要能量。一旦外壳被抛入太空，恒星便不再继续剥落，最后露出的是碳氧内核。

在这一复杂的活动期之后，中、低质量的恒星会不可避免地屈服于引力并开始坍缩。这种坍缩是无情的，一直持续到恒星被压缩到一个小行星的大小，变成天文学家所称的白矮星的天体。因为白矮星非常小，所以它们非常暗淡，尽管它们的表面温度可能比太阳高得多。如果没有望远镜，我们在地球上根本看不到它们。

太阳注定会在遥远的将来变为白矮星。当太阳到达那个阶段时，它还能继续保持高温数十亿年。到那时，太阳庞大的体积将被压缩，它将比最著名的绝缘体更有效地捕获内部热量。然而，由于太阳内部的核熔炉将永远关闭，因此就没有燃料储备来补充缓慢泄漏的热辐射进入冰冷的太空深处。曾经非常强大的太阳留下的矮小残骸会非常缓慢地变冷变暗，直到最后开始变形，逐渐凝固成一个非常坚硬的晶体。最终，它会完全消失，并安静地消失在太空的黑暗中。

THE LAST THREE MINUTES

05
黑夜降临

黑洞是通向宇宙尽头的一条通道，是一条宇宙死胡同，代表着一个无处可去的出口。

银河系闪耀着千亿颗恒星的光芒，但每一颗恒星都注定会在将来某日死亡。100亿年后，我们现在能看到的大部分恒星都会因为燃料耗尽而熄灭，从我们的视线中消失，成为热力学第二定律运行过程中的牺牲者。

然而，即使这些恒星死亡了，银河系仍将星光闪耀。因为即使曾经的恒星死亡，很快还会有新的恒星补位。在银河系的旋臂中，比如太阳所处的旋臂中，气体云会被引力压缩，继而坍缩、碎裂，最终形成一系列新恒星。这个过程就像正在运作的培育恒星的苗圃，猎户座的一个星群——猎户之剑，就是一个绝佳的例子。猎户之剑的中心有一个模糊的光斑，这个光斑不是一颗恒星而是一团星云，一团布满明亮的年轻恒星的巨大气体云。最近，天文学家对这团星云进行了观测，通过分析它发出的红外辐射而不是可见光，天文学家发现了处于形成初期的恒星，这些恒星仍然被模糊的气体和尘埃包围着，所以并不是很亮。

只要有足够多的气体，银河系的旋臂中就会不断有新恒星形成。银河系的气体一部分来自尚未聚集成型的恒星的原始物质，另一部分是由老年恒星以超新星、星风（stellar wind）、小规模爆炸性喷发或其他过程喷射产生的气体。然而，物质的再循环不会无限期地进行下去。当老恒星消亡并坍缩成白矮星、中子星或黑洞时，这些恒星就无法再补充星际气体。慢慢地，原始物质会融入新生的恒星中，直到完全耗尽。当这些新生的恒星走过了它们的生命周期并死亡时，星系将不可避免地变暗。不过，这个光芒逐渐减淡的过程将会很漫长。最小、最年轻的恒星在耗尽核燃料后坍缩为白矮星的过程需要数十亿年的时间，在经历这个缓慢而痛苦的过程之后，结局依然会到来，永恒的黑夜终将降临。

类似的命运正等待着所有散布在不断膨胀的宇宙裂缝中的其他星系。当前，可见宇宙在核聚变反应产生的巨大能源照耀下星光熠熠，

但这宝贵的资源终会耗尽，届时，光明的时代将永远结束。

然而，当宇宙之光熄灭时，宇宙的末日并不会到来，因为还有另一种比核聚变反应更强大的能源在维持着宇宙，它就是引力。在原子层面上，引力虽然是最弱的自然力，但在天文尺度上却是占主导地位的力。与核力不同，引力的作用可能相对温和，但非常持久。数十亿年来，恒星都是靠核聚变反应来支撑自己的，以抵抗自身的质量，引力似乎并没有起到什么作用。一直以来，引力都在等待施展拳脚的时机。

虽然原子核中的两个质子之间的引力仅仅是核力的十万亿亿亿亿分之一（10^{-37}），但这种引力是累积而成的。恒星中每增加一个质子，总质量就会增加，引力也会增强。最终，引力会大过一切其他作用力。这种压倒性的力量是释放巨大力量的钥匙。

没有任何天体能比黑洞更生动有力地说明引力的力量。在黑洞中，引力的作用完胜，能将一颗恒星压得灰飞烟灭，并在周围的时空中留下无限扭曲的印记。关于黑洞，有一个令人着迷的思想实验。想象一下，将一个小物体（比如100克重的小球）从很远的地方投进黑洞，它会掉进黑洞中，脱离你的视线，随即消失。然而，当我们聚焦于黑洞的结构时，就会发现小球的痕迹。由于吞噬了重物，黑洞变得更大了。计算表明，如果这个小球从很远的地方落进黑洞，那么黑洞增加的质量就会与小球的初始质量相等，甚至不会有能量或质量逃逸。

我们再来看看另一个实验，在该实验中，小物体朝着黑洞慢慢降落。可以通过以下方式操作完成：将一根绳子固定在小物体上，将绳子穿过滑轮，系到盒子上，然后放开绳子（见图5-1，假设绳子没有弹性，没有重量，这是习惯假定，为了避免实验复杂化）。小物体降低时会传递能量，这个过程通过转动连接在滑轮上的发电机便能实现。小物体越接近黑洞表面，黑洞施加于小物体的引力就越大，因此小物

体的质量会增加，因而小物体对发电机所做的功就越来越大。通过一个简单的计算便可以得出：在小物体到达黑洞表面之前，总共可以将多少能量传递给发动机。在理想情况下，答案是小物体的全部静止质量的能量。

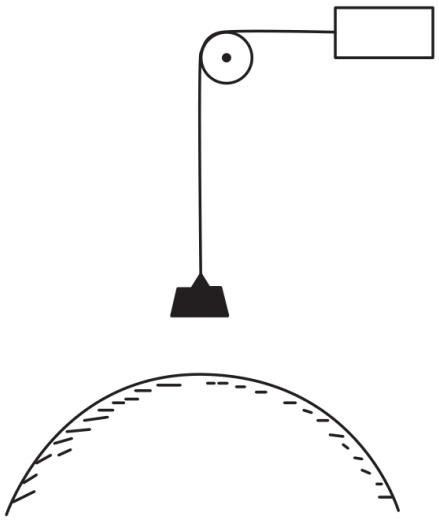


图5-1　关于黑洞的思想实验

注：在这个理想化的思想实验中，绳子系住的小物体通过一个固定的滑轮系统（图中未显示固定装置）向黑洞表面缓缓下降。下降的小物体会做功，并将能量输送到盒子。当小物体接近黑洞表面时，所传递的总能量接近小物体的全部静止质量的能量。

爱因斯坦的著名方程式$E=mc^2$表明，质量为m的物体包含的能量大小为mc^2。换句话说，利用黑洞，我们从理论上可以回收物体的这份能量。比如，对一个重100克的小球来说，这份能量意味着大约30亿千瓦时的电功率。相比之下，太阳通过核聚变反应燃烧100克的燃料，释放的能量还不到这个的1%。因此从理论上来说，引力能的释放，比作为能源的热核聚变强百倍以上。

然而，上述这两种人为假设都是不现实的。毫无疑问，物体会不断地掉进黑洞，绝不会以最有效的方式悬挂在滑轮上获取能量，而且物体实际释放的静止质量的能量是0～100%的某个值。换言之，物体在

不同情况下的能量损耗各不相同。在过去的几十年中，天体物理学家进行了各种各样的计算机模拟，并研究了其他一些数学模型，目的就是解释气体进入黑洞的具体过程，并试图估算所释放能量的大小和形式。虽然气体进入黑洞所涉及的物理过程是非常复杂的，但可以肯定的是，这一过程将会释放出大量的引力能。

一次观测抵得上1 000次计算，天文学家已经展开了广泛的搜索，搜索那些可能正在吞噬物质的黑洞。他们还没有找到一个完全令人信服的黑洞存在的证据。不过，天鹅座方向的一个星系中很有可能存在黑洞（这个星系又被称为天鹅座X-1），线索有两个。一个线索是，通过光学望远镜观察，科学家发现，这个星系中可能存在一颗巨大而炽热的恒星，因其颜色它被称为“蓝巨星”。光谱研究表明，这颗蓝巨星并不孤单，因为它会产生有节奏的摆动，这表明它很有可能正在被附近天体的引力吸引，做着周期性的运动。显然，这颗恒星和另一颗暗天体是在彼此的近地轨道上互相环绕转动的。然而，光学望远镜没有发现这颗伴星的踪迹，所以这颗伴星要么是一个黑洞，要么是一颗非常暗的致密星。这颗伴星是一个黑洞只是一种可能，绝不是证据。

另一个线索来自对这个暗天体质量的估计。只要我们知道了这颗蓝巨星的质量，就可以根据牛顿定律推算出它的伴星的质量，又因为恒星的质量和颜色之间有着密切的关系——蓝色恒星很热，由此可得出这颗蓝巨星的质量很高。计算表明，看不见的伴星的质量是太阳质量的几倍。它显然不是一颗普通的小质量暗天体，而是一颗坍缩的大质量恒星，要么是白矮星，要么是中子星，要么是黑洞。不过，根据一些基本的物理现象推测出，这颗大质量的致密天体不可能是白矮星或者中子星。这个问题与能够粉碎物体的强大引力场有关。只有存在某种足够强大的内部压力来抵消引力的挤压作用，天体才能避免完全坍缩成黑洞。但是，如果坍缩的天体质量有太阳质量的几倍大，那么现在还没有哪种已知的力能够抵抗这种能压碎一切的质量。事实上，如果恒星的内核足够坚硬而不会被压碎，那么物质中的声速就必然会

超过光速，这就违背了狭义相对论。所以，大多数物理学家和天文学家认为，在这种情况下，黑洞的形成是必然的。

天鹅座X-1中存在黑洞的确凿证据来自另一项完全不同的观察。之所以命名为X-1，是因为该系统是一种强X射线源，人造卫星上携带的传感器能够检测到这种射线源。基于天鹅座X-1的暗伴星是一个黑洞的假设，一些理论模型对这些X射线做出了令人信服的解释。科学家通过计算得出，黑洞的引力场非常强大，可以吸走蓝巨星上的物质。当气体被吸引向黑洞且被完全吞没时，天鹅座X-1的旋转轨道将使下落的物质围绕黑洞旋转，并形成一个圆盘。这种圆盘不完全稳定，因为中心附近的物质围绕黑洞运行的速度比边缘附近物质围绕黑洞运行的速度快得多，而黏性力将试图消除这种差异旋转。结果，气体将被加热到足够高的温度，不仅能发出光，还能发出X射线。最终，轨道能量的损失导致气体慢慢地旋入黑洞。

天鹅座X-1中存在黑洞的证据来自一系列推理，包括观测细节和理论模型。这是当今许多宇宙学研究的典型特征。虽然单一的证据不足以服人，但关于天鹅座X-1和其他一些类似系统的各种研究加在一起，可以有力地证明黑洞存在的可能性。无论如何，黑洞的解释是最简洁、最自然的。

综上所述，黑洞越大，其活动所产生的效应也就越壮观。现在看来，许多星系的中心很可能都包含超大质量的黑洞，这个结论的推测依据是这些星系核心中的恒星所表现出的快速运动。很显然，恒星正被吸引向一个具有强烈吸引力、高度致密的物体。据估计，这类天体的质量可能为1 000万～10亿个太阳质量，如此大的质量使得这类天体可能对漂浮在附近的任何物质张开贪婪的大嘴，恒星、行星、气体和尘埃都可能被这些怪物捕获。在某些情况下，吸引过程中的暴力行为足以破坏整个星系的结构。天文学家对各种各样的活跃星系核都非常熟悉。有些星系呈现出爆炸的状态，更多的活跃星系是强大的无线电

波、X射线和其他形式能量的来源，最有特色的是这样一类活跃星系，它们在数千年甚至数百万光年的时间长度上产生了巨大的气体喷射，其中一些此类天体的能量输出大到惊人。比如，非常遥远的类星体可能会释放出多达数千个星系的能量，但这类天体的直径只有一光年，它们看起来更像恒星。

许多天文学家都相信，这些被严重破坏的天体的中央引擎都是一些巨大的旋转黑洞，它们正在吞噬附近的物质。任何恒星靠近黑洞，都有可能被它的引力撕裂，或与其他恒星碰撞而破碎。就像天鹅座X-1那样，分布的物质可能会形成一个尺度更大的热气体盘，绕着黑洞运行并缓慢向内下沉。1994年5月，有报道称，哈勃空间望远镜在星系MB7的中心发现了一个快速旋转的气体盘。观察结果表明，那里极有可能存在着一个超大质量的黑洞。

可能会发生这样的情况：从流入黑洞的气体盘中释放出的大量能量沿着黑洞的自转轴释放出来，产生一对方向相反的射流，正如人们经常观察到的那样。这种能量释放和射流的形成机制可能非常复杂，不仅涉及引力，还涉及电磁力、黏性力和其他力。这个主题一直是许多理论和观测工作的研究重点。

银河系的未来会如何呢？它是否也会以这种方式被破坏？银河系的中心位于距离地球有3万光年的人马座，该中心区域被大量的气体和尘埃遮蔽，天文学家利用无线电、X射线、伽马射线和红外仪等测量手段，已经确定那里存在一个高致密度、能量巨大的天体，被称为人马座A*。虽然人马座A*的直径不超过几十亿千米（按照天文标准，这很小），却是银河系中最强大的射电源，它的位置与一个非常强烈的红外线源的位置重合，并与一个不同寻常的X射线物体靠得很近。尽管那里情况很复杂，但天文学家能肯定至少有一个巨大的黑洞潜伏在那里，而且它至少可以解释一些现象。然而，这个黑洞的质量可能不超过1 000万个太阳的质量，处于超大质量范围的下限。天文学家也没有

在这个黑洞中发现，发生在其他一些星系核中的那种剧烈的能量和物质发射，这也可能是因为该黑洞目前处于静止状态。在未来的某个阶段，如果它获得了更多的补充气体，就可能会被激活，不过，这个黑洞可能不会像许多其他已知的星系那样具有破坏性。至于这种激活会对星系旋臂上的恒星和行星产生什么影响，我们尚不清楚。

只要黑洞附近有物质供给，黑洞就会继续释放被吞噬物的静止质量的能量。随着时间的推移，越来越多的物质会被黑洞吞噬，因此黑洞会变得越来越大，越来越容易吸收周围的物体。即使在非常遥远的轨道上绕着黑洞运行的恒星，最终也难逃被吞噬的厄运，原因来自一种非常微弱但起决定作用的现象——引力辐射。

1915年，爱因斯坦提出了广义相对论，不久之后，通过对该理论引力场方程的研究，他发现了引力场的一个显著特性：这些引力场方程预测了以真空中光速的速度传播的引力波的存在。这种波以引力辐射的形式传播，容易使人联想到电磁辐射，比如光波和无线电波。然而，尽管引力辐射能携带大量的能量，但引力辐射作用于物质的强度不同于电磁辐射。无线电波很容易被诸如金属丝网这样的小巧结构吸收，但引力波的作用非常微弱，它可以直接穿过地球而几无损耗。如果能制造出一个引力激光器，那么煮沸一壶水则需要1万亿千瓦的射束，效率相当于1 000瓦的电热丝。引力辐射较弱是因为，目前为止，引力是自然界已知力中最弱的。比如，一个原子的引力与电力之比约为$1:10^{40}$。我们发现引力的唯一原因是它的累积效应。所以，引力在行星这种大型天体中占据主导地位。

引力辐射的作用不仅极其微弱，而且它们的产物也十分微弱。从原则上来说，只要质量受到干扰，就会产生引力辐射。比如，地球围绕太阳的运动会发射连续的引力波，但总输出功率仅为1毫瓦！这种能量损耗会导致地球轨道衰变，但衰变的速度极其缓慢：每10年大约减小1 000万亿分之一厘米。

对于接近光速运动的大质量天体来说，情况就截然不同了。有两种现象可能会导致重要的引力辐射效应。一种现象是突然发生的激烈事件，比如，超新星爆发，或者恒星坍缩形成黑洞。这样的事件会产生一个短暂的脉冲式引力辐射，虽然可能会持续几微秒，但能带走10^{44}焦耳的能量（太阳的热输出约为每秒3 x 10^{26}焦耳）。另一种现象是轨道上的大质量天体彼此做高速互绕运动。比如，一个间隔紧密的双星系统将产生大量连续的引力辐射。如果轨道上的两颗恒星是坍缩天体，比如中子星或者黑洞，那么这个过程将会产生巨量的引力辐射。天鹰座中就有两颗做轨道互绕运动的中子星，两星之间的轨道距离只有几百万千米，它们的引力场极其强，8小时就可以转动一周，所以这两颗恒星的运动速度接近光速。这种异常快速的运动极大地增强了引力波的发射率，我们可以据此测量出轨道每年的衰减量（运动周期约改变75微秒）。随着这两颗恒星向内盘旋接近，引力波的发射率将逐渐上升，这就注定了它们将会在3亿年后发生碰撞。

天文学家估计，在每个星系中，这种双星系统合并事件大约每10万年发生一次。这种天体密度极大，引力场极强，在恒星撞击前的最后时刻，它们会以每秒数千圈的速度做互绕运动。与此同时，引力波的频率将剧增，并发出独有的“滋滋”声。爱因斯坦的方程式预测，在这个最后阶段，引力输出功率极其巨大，轨道将会迅速坍缩。同时，恒星的形状将被相互的引力严重扭曲，因此当它们接触时，外形看起来就像巨大的旋转雪茄。这两颗恒星最后的合并将会极其混乱，会旋转形成一个复杂的、疯狂跳跃的团儿，发出大量的引力辐射，直到它变成一个大致呈球形的形状，像一个具有独特振动模式的巨大的钟一样响亮和摇晃。这种振荡也会产生一定量的引力辐射。这个球形的天体会消耗更多能量，直到它安静下来，最终变成毫无生气的天体。

虽然引力辐射的能量损失率相对较低，但它的发射很可能对宇宙结构产生长期深远的影响。科学家必须通过观察来证实他们对引力辐

射的看法。对天鹰座中双中子星系统的研究表明，其轨道正在减小，衰变速度与爱因斯坦理论预测的速度一致。虽然该系统为引力辐射的发射提供了直接的证据，但更具有决定性作用的是在实验室中检测到这种辐射。许多研究小组已经建造了设备来记录一系列引力波爆发时转瞬即逝的信息，但迄今为止，这些设备都因为不够灵敏，没有探测到任何引力波。我们很可能要等到新一代的探测器诞生时，才能充分证明引力波的存在。[(6)]

两个中子星的合并可能会产生一个更大的中子星或者黑洞。一颗中子星和一个黑洞，或者两个黑洞的合并，则必然会产生一个黑洞。类似于中子星双星的合并过程同样伴随着引力波能量的损失，随后是复杂的振动和摇摆运动，这些运动会因引力波能量的损失慢慢地减弱。

探索两个黑洞在合并过程中释放的引力能的理论极限是极为有趣的。20世纪70年代早期，罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）、斯蒂芬·霍金、布兰登·卡特（Brandon Carter）、雷莫·鲁菲尼（Remo Ruffini）、拉里·斯马尔（Larry Smarr）和其他科学家一起提出了有关这种合并过程的理论。如果两个黑洞是非旋转的，且质量相同，则可以释放出约29%的总静止质量能。如果黑洞在某种程度上受到控制，比如受到某种先进技术的控制，那么合并产生的能量就不一定完全以引力辐射的形式存在。事实上，在自然合并过程中，释放的大部分能量本就该以这种高度不显眼的形式存在。如果这些黑洞以物理定律允许的最大速度旋转（粗略地说，就是以光速），并以反向旋转的方式沿着它们的旋转轴合并，那么就会释放50%的能量。

即使合并释放的能量达到这么大的比例，但这还不是理论上的最大值。最大的可能是，黑洞会携带电荷。带电黑洞既有电场也有引力场，两者都能储存能量。如果带正电荷的黑洞遇到带负电荷的黑洞，就会发生“放电”现象，这个过程会同时释放电磁能和引力能。

一个给定质量的黑洞只能携带一个不超过某个最大值的电荷量，因此这种放电是有极限的。对于无自转的黑洞，电荷量的极限值是由以下因素决定的。假定有两个相同的黑洞带有等量的电荷，黑洞的引力场会在它们之间产生引力，而电场则会产生排斥力（类似于电荷相斥）。当荷质比达到某个临界值时，这两个相反的力将完全达到平衡状态，两个黑洞之间便没有净力。正是这个条件决定了黑洞所能容纳的电荷量的极限。你可能想知道，如果黑洞的电荷量超过这个极限值会发生什么。一种方法是迫使更多的电荷进入黑洞。虽然这种做法有助于增加电荷量，但克服电斥力的过程中会消耗能量，而这些能量会被传递到黑洞中。因为能量当中也蕴藏着质量（记住质能方程式$E=mc^2$），所以当黑洞的质量增大时，黑洞的体积也随之增大。简单的计算表明，在这个过程中，质量的增加超过了电荷量的增加，因此荷质比实际上减少了，试图打破极限的尝试将以失败告终。

带电黑洞的电场会使黑洞的总质量增加。对于携带最大电荷量的黑洞来说，电场代表了一半的质量。如果两个无自转的黑洞都携带有最大电荷量，但电荷符号相反，那么它们彼此之间存在两种吸引力：引力吸引力和电场吸引力。当它们合并时，电荷将中和，而电能就可以释放出来。从理论上来说，电能可以达到该系统总质量能的50%。

如果两个黑洞都在自转，并且它们携带着相反的最大电荷量，那么每个黑洞所能释放的电能都将达到最大值。这样就可以释放出总质量能的2/3。当然，这些数值仅在理论上有意义，因为在实践中，黑洞不太可能携带大量电荷，并且两个黑洞也不可能以最佳方式合并，除非有先进的社会技术在进行巧妙的控制。然而，即使两个黑洞的合并效率很低，也有可能瞬间释放出两个天体总质量能的一大部分能量。在恒星数十上百亿年的生命中，通过核聚变反应大约释放了1%的质量能，相比之下，这点儿质量能就微不足道了。

引力作用的重要意义在于，一颗燃烧殆尽的恒星非但不会死亡，还有可能以坍缩残骸的形式释放出巨大的能量，甚至远超当初它作为灼热的气体球时通过核聚变释放出的能量。大约几十年前，人们就已经认识到了这个事实，物理学家约翰·惠勒（John Wheeler，他第一个提出“黑洞”一词）设想了一种文明。这种文明因为不断增长的能量需求放弃了恒星，移居到了一个自转的黑洞周围。每天，这个文明产生的废弃物都被装上了卡车，然后按照一个精心计算过的轨迹被送进黑洞。在靠近洞口的地方，卡车上的废弃物被卸下来并倒进黑洞，通过这种方式，垃圾被永久地处理掉了。被倾倒的废弃物沿着与黑洞的自转方向相反的路径运动，会产生轻微制动旋转的效果。在这个过程中，黑洞的自转能被释放出来，并被这个文明世界用来为其工业提供能源。因此，这个过程具有彻底消除废弃物并将它们转化成能源的双重优点！通过这种方式，这个文明世界在需要时可以从死星中释放出比其在发光阶段释放出的更多的能量。

尽管利用黑洞的能量仅仅是科幻小说中的场景，但许多物质最终都会进入黑洞，要么恒星坍缩形成黑洞的一部分，要么成为在一次偶遇中被吞噬的碎片。每当我做关于黑洞的讲座时，人们总是想知道进入黑洞的东西会遭遇什么。但很遗憾，我们无从得知。我们对黑洞的理解几乎完全基于理论上的考虑和数学模型。根据定义，我们无法从外部观测到黑洞的内部，所以即使我们对黑洞有很好的观察通道（事实上并没有），也无法知道它内部发生了什么。不过，既然相对论一开始就预言了黑洞的存在，那么也可以用来预测落入黑洞的宇航员会发生什么。

黑洞的表面实际上只是一个数学结构，那里没有真正的膜，只有空旷的空间。下落的宇航员进入黑洞时，根本不会发现什么特别之处。但这个表面也具有某种戏剧性的物理意义。黑洞里的引力非常强，它能捕获光线，将向外跑的光子重新拉回来。这意味着光无法从黑洞中逃逸，这也解释了为什么黑洞从外面看起来是黑色的。没有任

何一种物体或信息能比光传播得更快，所以一旦越过这个边界，任何东西都无法逃离黑洞。黑洞内发生的事件对外部观察者来说永远是一个谜。黑洞的表面被称为“事件视界”，因为它将外部的事件（可以从远处看到）与内部的事件（不能从远处看到）分隔开来。但是，这种视界只是单向的。事件视界内的宇航员仍然可以看到外面的宇宙，即使外面没有人能看到宇航员。

当宇航员越来越深入黑洞时，引力场也会变得越来越强，由此产生的一个影响是，他的身体会变形。如果宇航员先用脚着地，那么他的脚会比头部更靠近黑洞的中心，因为那里的引力更强。最终，宇航员的脚会被更大的力拉扯，身体被也会被纵向拉伸。同时，肩膀被拉向黑洞中心，整体看来，宇航员将被侧向挤压。这种拉伸和挤压过程有时被称为“意大利面化”（spaghettification）。

理论研究表明，在黑洞的中心，引力的增强是没有上限的。由于引力场表现为时空的弯曲，或者翘曲，如果引力不断增强，时空就会更加扭曲，并且没有上限。数学家将这一特征称为时空奇点，它代表空间和时间的边界或边缘，穿过这个边界，正常的时空概念将不复存在。许多物理学家认为，黑洞内的这个奇点代表着时空的真正终结，任何遇到它的物质都会被完全抹去。如果是这样的话，那么组成宇航员身体的原子会在1纳秒意大利面化的过程中消失在这个奇点中。

如果黑洞的质量为1 000万个太阳的质量，与银河系中心可能存在且不旋转的黑洞质量相同，那么宇航员从事件视界坠落到湮灭奇点的时间大约为3分钟。这最后的3分钟肯定非常不舒服。事实上，在奇点到来之前，意大利面化过程就已经杀死了这个倒霉的人。在最后阶段，宇航员无论如何都无法看到那个致命的奇点，因为光线无法从奇点中逃逸。如果我们讨论的黑洞的质量只有1个太阳质量，那么它的半径约为3千米，从事件视界到奇点的旅程只需几微秒。

虽然从坠落宇航员的参考系来看，毁灭的过程非常快，但从远处看，黑洞的时间扭曲会使宇航员的最后旅程呈现为一种慢动作。当宇航员接近事件视界时，在遥远的观察者看来，附近事件发生的速度越来越慢，仿佛宇航员到达事件视界需要无限长的时间。因此，宇航员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。从这个意义上来说，黑洞是通向宇宙尽头的一条通道，是一条宇宙死胡同，代表着一个无处可去的出口。黑洞是一个包含了时间尽头的狭小空间。那些对宇宙的终结感到好奇的人，只要跳入黑洞就能亲身体验到。

虽然引力是迄今为止最微弱的自然力，但它的潜在和累积作用不仅决定了单个天体的最终命运，而且决定了整个宇宙的最终命运。摧毁恒星的无情引力同样能作用于比恒星尺度更大的整个宇宙。这种结果微妙地取决于产生引力的物质总质量。为了找到答案，我们必须称出宇宙的质量。

THE LAST THREE MINUTES

06
称称宇宙的质量

如何称出宇宙的质量？这似乎是一项艰巨的任务，因为我们无法对其进行直接测量。不过，我们可以用引力理论来推导出结果。

人们常说有上必有下。地心引力的作用是阻止投向天空的物体继续飞行，并将其拉回到地球上。但情况并不总是这样的。如果物体移动得足够快，它就可以脱离地球的引力，飞到太空中，永远不回来。发射宇宙飞船的火箭就达到了这样的速度。

地球的临界“逃逸速度”约为每秒11.2千米，比协和式飞机快20倍以上。这个临界数值是借由地球的质量（即地球所含物质的总质量）和地球的半径推导出的。给定质量的物体越小，其表面引力就越大。逃离太阳系意味着要克服太阳的引力，所需的逃逸速度为每秒617.7千米。逃离银河系也需要每秒几百千米的速度。而逃离中子星这样的致密天体所需的速度是每秒数万千米，逃离黑洞所需的速度是光速（每秒30万千米）。

那么，逃离宇宙的速度是多少呢？正如我在第2章指出的，宇宙似乎没有边界，逃逸无从谈起。但如果我们假定它有边界，并且位于我们可观察到的极限（大约离我们150亿光年远），那么逃逸速度将约等于光速。这是一个非常重要的结论，因为最遥远的星系似乎正以接近光速的速度远离我们。从表面上来看，这些星系似乎飞得极快，可能真的是在逃离宇宙，或者至少在远离彼此，永不返回。

尽管没有明确的边界，但膨胀宇宙的行为方式与从地球上投射出的物体的行为方式非常相似。一方面，如果膨胀速度足够大，退行中的星系就会脱离宇宙中所有其他物质的累积引力而逃逸出去，膨胀就会永远持续下去。另一方面，如果速度太慢，膨胀最终将停止，宇宙将开始坍缩。然后，星系将再次“掉下来”，随着整个宇宙的坍缩，宇宙的终极灾难将随之发生。

以上哪种情况会发生呢？答案取决于两个量的大小。第一个量是膨胀速度，第二个量是宇宙的总引力，即宇宙的质量。引力越大，宇宙必须越快膨胀才能克服这种引力。天文学家可以通过观测红移现象

来直接测量宇宙的膨胀速度。然而，这个问题的答案仍然存在争议，而测量第二个量——宇宙的质量，更是一个棘手的问题。

如何称出宇宙的质量？这似乎是一项艰巨的任务，因为我们无法对其进行直接测量。不过，我们可以用引力理论来推导结果。计算出质量的下限值是很容易做到的。我们可以通过测量太阳对行星的引力，称出太阳的质量。银河系大约有1 000亿颗恒星，每颗恒星的质量等同于一个太阳的质量，由此，我们就得到了银河系质量的大概下限值。虽然我们目前可以推算出宇宙中有多少个星系，但不能简单地将每个星系的质量相加，因为宇宙中的星系太多了，比较合理的估计是100亿个。因此宇宙总质量为10^{21}个太阳，重约10^{48}吨。根据星系群的半径为10亿光年，我们可以计算出宇宙逃逸速度的最小值：约为光速的1%。由此，我们可以得出这样的结论：如果宇宙的质量只由恒星决定，那么宇宙就可以摆脱自身的引力，永远膨胀。

虽然许多科学家对此深信不疑，但并非所有的天文学家和宇宙学家都相信这些计算是正确的。我们看到的宇宙物质比实际存在的要少，因为宇宙中并非所有的天体都在发光，诸如暗星、行星和黑洞等暗天体，这些天体中的大多数并没有引起我们的注意。宇宙中还有更多不起眼的尘埃和气体，而星系之间的空间也存在物质，比如大量稀薄的气体。

还有一个更有趣的可能性已经让天文学家兴奋了好几年。宇宙起源于大爆炸，它是我们所看到的所有物质的来源，也是我们看不到的许多物质的来源。如果宇宙最初是由亚原子粒子组成的热汤，那么除了组成普通物质的电子、质子和中子之外，其他各种粒子（由粒子物理学家在实验室中发现）必定也会被大批量创造出来。有大部分粒子高度不稳定，很快就会衰变，但有些粒子作为宇宙起源的遗迹一直存在到现在。

在这些遗迹中，最重要的是中微子，这些幽灵般的粒子的活动已在超新星中被发现。据我们所知，中微子不能衰变成其他任何东西[(7)]。因此，我们可以预测出宇宙沐浴在宇宙大爆炸遗留下来的中微子海洋中。假定原始宇宙的能量在所有亚原子粒子中被均分，我们就可以计算出宇宙中总共有多少中微子。答案是，每立方厘米空间中大约有100万个中微子，或者说每一个普通物质颗粒中大约有10亿个中微子。

我一直对这个非凡的结论着迷不已。在任何时刻，都会有1 000亿个中微子正在穿越每个人的身体，几乎全是大爆炸的遗迹，而且这些遗迹自存在的第一毫秒就被保存下来，几乎未受破坏。因为中微子以光速或接近光速运动，所以它们会飞快地穿过你，每时每刻都会有1000亿个中微子穿透你！因为中微子与普通物质的相互作用非常微弱，所以我们完全不会注意到这种持续的侵入，在有生之年，甚至可能没有一个中微子会留在你的身体内。如此众多的中微子遍布整个看似空旷的空间，可能会对宇宙最终的命运产生深远的影响。

尽管中微子的相互作用非常微弱，但它们确实与所有粒子一样产生了引力。它们可能不会经常大幅度地推拉周围其他物质，但它们的间接引力效应增加了宇宙的总质量。为了确定中微子对宇宙质量有多大的贡献，我们有必要先搞清楚中微子的质量。

在引力这方面，重要的是实际质量，而非静止质量。因为中微子的运动速度接近光速，所以即使它们的静止质量很小，实际质量也可能很大。事实上，它们的静止质量甚至可能为零，并以光速精确地运动。如果是这样，我们可以通过参考它们的能量来确定它们的实际质量。对于遗留在宇宙中的中微子来说，它们的能量可以从大爆炸中所获的能量中推导出来，同时必须考虑宇宙膨胀的衰减效应并予以修正。结果表明，静止质量为零的中微子不会对宇宙的总质量产生显著影响。

但我们不能确定中微子的静止质量是否为零，也不能确定三种中微子的静止质量是否都相同。我们目前对中微子理论的理解并不能排除中微子具有有限的静止质量。若想确定具体情况，就需要实验来证明。我们知道，如果中微子确实有静止质量，那么它肯定比任何其他已知粒子的静止质量小得多。然而，宇宙中的中微子如此之多，即使很小的静止质量也会对宇宙的总质量产生很大的影响。这就需要仔细权衡。即使中微子的质量只有电子质量的千分之一（已知最轻的粒子），也足以产生巨大的影响，因为中微子的总质量将超过所有恒星的总质量。

若想检测这么小的静止质量是非常困难的，并且实验结果一直互相矛盾，令人感到困惑。而对超新星1987A的中微子的探测提供了一个重要线索。一方面，如前所述，如果中微子的静止质量为零，那么所有的中微子都必须全部以光速运动。另一方面，如果中微子有一个很小但非零的静止质量，那么其运动速度就会有确定范围。来自超新星的中微子可能非常活跃，因此即使它们的静止质量非零，也会以非常接近光速的速度运动。由于中微子会在太空中旅行很长一段时间，所以，即使速度变化微小，该变化也会引起到达地球的时间的变化，这些变化是可测量的。通过研究超新星1987A中的中微子随时间扩散的程度，可以将其静止质量的上限设定为电子质量的约三万分之一。

实际情况更加复杂，因为已知的中微子有多种类型。静止质量的大多数测定都是按照最初由沃尔夫冈·泡利假设的中微子进行的，但自从泡利发现中微子以来，人们已经发现了第二种中微子，第三种中微子也相继被发现。这三种中微子都是在大爆炸中被大量创造出来的。我们很难直接确定其他两种中微子的质量范围。实验表明，可能的数值范围很广，目前理论家的想法是，中微子可能并不会主导宇宙的质量。根据最新的针对中微子质量的实验测定结果，这种观点很容易被推翻。

更为复杂的是，中微子不是估算宇宙质量时唯一要考虑的宇宙遗迹元素。大爆炸发生时还产生了其他稳定的、弱相互作用的粒子，它们的质量也许更大，被称为弱相互作用大质量粒子（Weakly Interacting Massive Particles，简称WIMPs）。据理论家预测，宇宙中存在好几种弱相互作用大质量粒子，它们有着古怪的名字，比如引力微子（gravitinos）、希格斯粒子（Higgsino）和光微子（photino）。没有人知道它们是否真的存在，但如果真的存在，那么在确定宇宙的质量时就必须考虑它们。

我们可以通过假设弱相互作用大质量粒子与普通物质相互作用的方式，直接测量它们是否存在。尽管这种相互作用非常微弱，但弱相互作用大质量粒子的大质量使这些粒子具有很强的冲击力。为此，在英格兰东北部的一个盐矿和旧金山附近的一个大坝中，研究人员进行了相关实验，目的是发现经过的弱相互作用大质量粒子。假设宇宙中充满了弱相互作用大质量粒子，那么每时每刻都会有大量这样的粒子穿过我们的身体和地球。这个实验的原理令人难以置信，因为它需要探测出弱相互作用大质量粒子撞击原子核时发出的声音。

该实验的仪器由冷却系统中的锗晶体或硅晶体组成。如果有一个弱相互作用大质量粒子撞击到晶体中的一个原子核，它的动量将导致原子核反冲。这种突然的冲击会在晶体中产生微小的声波，也就是晶体振动。随着波的传播，它将衰减并转化为热能。该实验旨在探测与衰减声波有关的微小热脉冲。由于晶体被冷却到接近绝对零度，因此探测器对任何热能的注入都极为敏感。

理论家推测，星系被淹没在大量缓慢移动的弱相互作用大质量粒子中，其质量可能是1个质子质量到1 000个质子质量，平均速度为每秒几千千米。当太阳系绕着银河系运行时，它会扫过这片看不见的海洋，地球上的每千克物质每天可以散射多达1 000个弱相互作用大质量

粒子的能量。鉴于此事件的发生频率，直接检测出弱相互作用大质量粒子应该是可行的。

在继续寻找弱相互作用大质量粒子的同时，天文学家也在着手解决宇宙质量的问题。即使一个物体不能被看见或者听见，它的引力效应仍然是显而易见的。比如，海王星的发现是因为天文学家注意到天王星的轨道正受到未知天体引力的干扰。围绕亮星天狼星旋转的暗白矮星伴星天狼星B也是这样被发现的。因此，通过监测可见天体的运动，天文学家也可以建立任何不可见物质的图像，而前文中已经解释过这种技术是如何促使人们怀疑天鹅座X-1中可能存在黑洞的了。

在过去的10年或20年中，我们对银河系中恒星的运动方式进行了仔细的研究。恒星围绕银河系中心运转一周通常需要超过2亿年。银河系的形状很像一个圆盘，中心附近聚集着一大团恒星。因此，银河系与太阳系有着粗略的相似之处；不过，水星和金星等内行星比天王星和海王星等外行星运动得更快，因为内部行星受到来自太阳的引力吸引更强。你可能也期望这条规则适用于银河系：靠近银河系外围的恒星的运动速度应该比靠近银河系中心的恒星的速度要慢得多。

然而，观察结果与此相反。在整个银河系内，所有恒星都在以相同的速度运动。对此的解释只可能是，银河系的质量不是集中在中央，而是或多或少地均匀分布的。看上去银河系的质量好像集中在中央附近这一事实说明，发光物质仅仅反映了真实情况的一部分。很显然，银河系中存在很多暗物质或者不可见的物质，其中大部分存在于银河系的外围，从而加速了该区域内的恒星运动。甚至可能有大量的暗物质超出了银河系的可见边缘和整个发光盘的平面，将银河系包裹在一个不可见的巨大光晕中，这个光晕一直延伸到星系际空间。在其他星系中，天文学家也观察到了类似的运动。测量表明，星系可见区域的平均质量是其亮度所反映质量的（与太阳相比）的10倍以上，这一比例在最外层区域甚至上升到了5 000倍以上。

对星系团内星系运动的研究也得出了同样的结论。显然，如果星系运动的速度足够快，它将会逃脱星系团的引力束缚。如果星系团中的所有星系移动的速度都这么快，星系团就会很快解体。然而，通过对位于后发座星系团中一个由几百个星系组成的星系团的研究，科学家却得出了不同的结论。后发座星系团运转的平均速度太大了，星系团应该无法保持在一起，但情况并非这样。该星系团至少包含质量是发光物质质量300倍的物质，否则该星系团无法长期存在。一个典型的星系穿过后发座星系团只需要10亿年左右，所以到目前为止，该星系团有足够的时间分解。然而这种情况并没有发生，而且星系团的结构好像被引力束缚住了。似乎存在大量某种形式的暗物质，影响着星系的运动。

对宇宙更大尺度结构的研究进一步说明了暗物质的存在，在这个结构中，星系团和超星系团聚集在一起。如第3章所述，星系的分布方式很容易让人联想到气泡，它们呈丝状排列或铺开成巨大的薄片，包围着巨大的空洞。如果没有暗物质的额外引力作用，这样一个团块样的气泡状结构就不可能在大爆炸发生后到现在的时间内出现。但是，直到我撰写这本书时，科学家都无法用任何一种简单形式的暗物质，通过计算机模拟产生之前观察到的气泡结构，这可能意味着需要某种复杂的混合型暗物质。

最近，奇异的亚原子粒子作为暗物质的候选成功地引起了科学家的注意，不过这种亚原子粒子以更常见的形式存在也不无可能，比如行星尺度的物质或暗物质。这些暗物质可能非常之多，可能成群结队地在太空中漫游，而我们对此一无所知。天文学家近来找到了一种方法，它能提示不受可见天体引力束缚的暗天体的存在。这个方法利用了爱因斯坦广义相对论得到的一个结果，即引力透镜效应。

这个方法基于这样一个事实：引力可以弯曲光线。爱因斯坦曾经预言，如果一束光从太阳附近经过，会发生轻微的弯曲，使恒星在天

空中的视位置发生位移。通过比较一颗恒星在太阳附近的位置和在没有太阳的情况下的位置，我们就可以检验爱因斯坦的预测结果。1919年，英国天文学家阿瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）首次做了这种检验，并出色地证实了爱因斯坦的理论。

引力透镜效应会使光线发生弯曲，因此也能使光线聚焦形成图像。如果一个巨大的天体足够对称，它就可以像透镜一样，将来自远处的光聚焦。图6-1就展示了这种情况。来自光源*S*的光落在一个球形天体上。天体的引力使它周围的光线弯曲，并将其导向远侧的焦点。对大多数天体而言，这种弯曲效应非常小，但在天文学距离上，即使光线路径出现轻微的弯曲，最终也会产生焦点。如果天体位于地球和遥远的光源*S*之间，则该效应将使*S*的图像极大地增亮，或者在视线精确的特殊情况下，以明亮的爱因斯坦环的形式出现。对于形状更复杂的物体，透镜最有可能产生多重图像，而不是单一的聚焦图像。地球和遥远的类星体之间近乎完美地排列在一起，差不多恰好位于同一视线方向，促成了引力透镜的形成。天文学家在宇宙尺度上已经发现了许多这样与大质量星系有关的引力透镜，使遥远的类星体形成多重图像，在某些情况下还产生了弧和整个类星光圈。

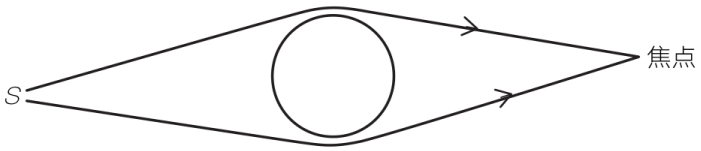


图6-1　引力透镜效应

注：大质量天体（图中的球）的引力使来自远处光源*S*的光线发生弯曲。在适当的条件下，这种作用会产生聚焦效应。在焦点处的观察者会看到该天体周围出现一个光圈。

天文学家在寻找暗行星和暗淡矮星的过程中，极力寻求引力透镜效应的迹象。如果暗行星或者暗淡矮星位于地球和恒星之间，就会发生引力透镜效应，天文学家便可捕捉到这种信号。当暗天体穿过视线

时，恒星的图像将以一种独特的方式出现亮度时强时弱的现象。虽然天体本身依然无法被看到，但我们可以从引力透镜效应中推断出它的存在。一些天文学家正在利用这项技术寻找银河系光晕中的暗天体。就算暗天体与遥远的恒星精确对齐，但它们恰好位于同一视线方向上的概率非常小。不过，如果有足够多的暗天体存在，应该能观测到引力透镜效应。1993年年底，在澳大利亚新南威尔士州的斯特罗姆洛山天文台，一个由澳大利亚人和美国人组成的联合小组在大麦哲伦星云中观测到了类似的引力透镜效应。报告称，这是银河系光环中一颗矮星引力透镜效应的第一个明确的例子。

黑洞也能产生引力透镜效应，科学家已经借助银河系外的射电源（透镜对射电波的作用方式与光波相同）进行了广泛的搜索，以探查黑洞的数量。结果发现，可能的候选天体少之又少，这就说明，用恒星或星系级质量的黑洞不能解释为什么存在大量暗物质。

并非所有的黑洞都能通过引力透镜效应探测到。在大爆炸发生后不久，宇宙中的极端条件很可能一度十分盛行，这促成了微小黑洞的形成，其大小也许比原子核大不了多少，质量相当于小行星，大量这样的黑洞以这种微小的形式非常有效地隐藏起来，遍布于整个宇宙。令人惊讶的是，我们有可能通过观测来确定这些怪异实体的数量范围。原因与霍金效应有关，我将在第7章对此做适当的解释。简而言之，微小黑洞的爆炸可能表现为带电粒子阵雨。黑洞爆炸发生在一定的时间之后，其时间长短取决于黑洞的大小：黑洞越小，爆炸得越早。具有小行星质量的黑洞将在100亿年后爆炸，大约就是现在。这种爆炸产生的一个效应是，产生突发性的射脉冲。射电天文学家一直在检测这种脉冲。因为至今还没有检测到任何可能的脉冲，由此可推测得出，每立方光年的空间每300万年不会发生超过一次爆炸。这意味着，小行星质量大小的微小黑洞只占宇宙质量的很小一部分。

总体而言，不同天文学家估计的宇宙暗物质总量各不相同。暗物质与发光物质的质量比至少是10:1，有时也会出现100:1这类比值。令人吃惊的是，天文学家居然还不确定宇宙主要由什么组成。长期以来，他们认为恒星占据了整个宇宙的很大部分，但结果只是占据了宇宙的一小部分。

对于宇宙学来说，关键的问题是，是否有足够多的暗物质阻止宇宙的膨胀。不能阻止膨胀的物质的最小密度称为“临界密度”，它的值可以被计算出来，大约为可见物质密度的100倍。这样的数额仍然是可能的，尽管也许只是刚刚好。人们希望，对暗物质的研究可以很快得出明确定论，因为宇宙的最终命运取决于它。

鉴于目前的状况，我们不能确定宇宙是否会永远膨胀下去。答案完全取决于宇宙的质量超过临界质量的程度。如果它比临界质量多1%，宇宙将在大约1万亿年后开始收缩；如果它比临界质量多10%，那么收缩将提前到1 000亿年以后。

一些理论家相信，宇宙的质量可以单独计算，无须进行困难的直接观测。有一种传统信念认为，人类仅凭推理能力就能对深奥的宇宙学知识做出预测，这一传统可以追溯到古希腊哲学家。在科学时代，许多宇宙学家试图通过一些深奥的原理以及制定数学方案，得出数值确定的宇宙质量。特别令人迷惑的是那些系统，在这些系统中，宇宙中粒子的确切数量是根据一些数值公式确定的。这些大多是纸上谈兵的想法，并没有被大多数科学家接受，尽管它们很具有诱惑性。近年来，一种更具说服力的理论开始流行起来，即第3章讨论过的暴胀理论，该理论对宇宙质量做出了明确的预测。

暴胀理论的一个预测涉及宇宙中物质的密度。假设宇宙开始时的质量密度远大于或小于坍缩不发生的临界值，当宇宙开始暴胀时，密度会急剧变化，事实上，该理论预测宇宙密度会迅速接近临界值。宇宙暴胀的时间越长，密度就越接近临界值。在标准版本的理论中，暴

胀只持续了很短的时间。所以，除非出现奇迹，宇宙正好是从临界密度开始的，否则它将从膨胀阶段出现，密度略大于或小于临界密度。

然而，在暴胀过程中，宇宙是以指数级的形式逼近临界密度的，因此宇宙密度的最终值可能非常接近临界值，即使在暴胀期，其持续时间也只有几分之一秒。这里“指数级”的意思是，如果暴胀每多坚持一次额外的滴答，大爆炸和宇宙再次开始收缩之间的时间就会翻倍。比如，100次滴答的暴胀导致了1 000亿年后的再次收缩，那么101次滴答意味着2 000亿年后再收缩，而110次滴答则意味着宇宙收缩会在100万亿年后开始。以此类推。

宇宙暴胀持续了多久？没有人知道，但若想用这个理论成功地解释我所描述的众多宇宙学难题，就必须坚持一定数量的滴答——大约100次，不过这个数字相当有弹性。这个数量没有上限。如果特别巧合，宇宙是按照目前我们观测的最少滴答数量暴胀的，那么暴胀后的密度仍然可能远远高于或者低于临界值。在这种情况下，将来的观测应该能够确定宇宙坍缩即将发生的时代，或者确定坍缩不会再发生。但是，坍缩什么时候发生不会有时间上的上限值。更有可能的是，暴胀持续了比最小值更多的滴答，导致密度非常接近临界值。这就意味着，如果宇宙开始坍缩，也是在相当漫长的时间之后——这段时间将是宇宙目前年龄的很多倍。如果情况确实如此，那么人类将永远不会知道宇宙的最终命运。

THE LAST
THREE
MINUTES

07
永远很远

科学对遥远未来宇宙的预测相当令人失望，似乎任何形式的生命最终都会走向灭亡。不过，灭亡并没有想象中那么简单。

关于无穷大，重要的是它不只是一个很大的数字。无穷大与那些大得惊人、无法想象的东西有着本质上的区别。假设宇宙会一直膨胀，永无尽头，那么宇宙将永远存在，拥有无限的生命。如果是这样的话，任何物理过程总有一天会发生，无论多么缓慢或不可能，就像一只永远在打字机上胡乱摆弄的猴子最终会打出一部威廉·莎士比亚的作品一样。

引力辐射现象就是一个很好的例子。只有在最剧烈的天文过程中，以引力辐射的形式产生的能量损失才会显现明显的变化。地球围绕太阳公转所产生的大约一毫瓦的引力辐射对地球运动的影响极小。然而，即使是一毫瓦的电力消耗，如果持续几万亿年，最终也会导致地球螺旋式地靠近太阳，而在这之前，地球很可能早就被太阳吞没了。在人类的时间尺度上可以忽略不计的过程，如果时间持续得够久，就有可能最终占据主导地位，从而决定这些微不足道的物理系统的最终命运。

我们想象一下宇宙在非常遥远的未来的状态，比如在一亿亿亿年以后。那个时候，恒星早已燃烧殆尽，宇宙虽然陷入一片黑暗，但并非空无一物。浩瀚无垠的宇宙中潜伏着旋转的黑洞、离群的中子星和黑矮星，甚至还有一些行星级的天体。到那个时代，这类行星级天体的密度将非常低，因为宇宙已经膨胀到了现有尺度的一万亿亿倍。

在宇宙膨胀的过程中，引力会进行一场奇怪的拉锯战。不断膨胀的宇宙试图将每一个天体远远拉离它的邻居，但天体间的引力却恰恰相反，后者试图将各天体聚集在一起。结果是，某些天体的集合（比如星系团，或是经过多年的结构退化之后形成的星系）仍然会因受到引力的束缚而集中在一起，但这些集合会越来越远离邻近的集合。这场拔河般的拉锯战结果取决于宇宙膨胀的减速有多快。宇宙中物质的密度越低，就越会“促使”这些集合脱离它们的邻居，自由独立地分开。

在一个引力束缚的系统中，缓慢但不可避免的引力作用发挥了主导作用。引力辐射虽然很微弱，却暗中消耗了恒星的能量，导致其缓慢地转向死亡旋涡。渐渐地，死亡的恒星将向其他死亡的恒星或黑洞靠近，并开始大规模地相互吞噬、合并。引力波需要一万亿亿年才能完全破坏太阳绕银河系中心运动的轨道，然后太阳会变为一颗黑矮星残骸，静静地向银河系中心滑动，一个巨大的黑洞正等待着吞没它。

然而，我们不能确定死亡的太阳最终是否会以这种方式消亡，因为它向内缓慢漂移时，偶尔会遇到其他恒星，有时它会靠近一个双星系统——一对因引力作用“紧紧拥抱”并被锁定在一起的恒星，之后进入一个被称为“引力弹弓”的奇怪阶段。两个天体在轨道上彼此围绕的运动比较简单，正是行星围绕太阳运行之类的问题让开普勒和牛顿十分着迷，并促成了现代科学的诞生。在理想情况下，排除引力辐射，行星的运动是有规律的，而且呈周期性。无论你观察多久，这颗行星都会在同样的轨道上永远运行下去。如果存在第三个天体，比如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，运动就不再是简单的周期性运动了。三个天体之间相互作用力的模式总是以一种复杂的方式变化着。这个系统的能量并不是均匀地平分给各个成员的，哪怕两个成员是完全相同的天体，得到的能量也不同。实际情况是，其中一个天体获得最多的能量，另一个天体获得剩下能量中的最大份额，这就像一场复杂的舞蹈。经过很长一段时间以后，该系统的运动完全是随机的——引力动力学中的三体问题是混沌系统的一个很好的例子。两个天体也有可能“结伙”，将大量的可用能量输送给第三个天体，然后第三个天体便会被完全踢出系统，就像弹弓上被射出的弹丸一样，“引力弹弓”这个术语由此而来。

引力弹弓机制可以将恒星从星团中弹射出去，甚至将其从星系本身中弹射出去。在遥远的将来，绝大多数死亡的恒星、行星和黑洞将会以这种方式被抛入星系际空间，它们之后也许会遇到另一个正在瓦解的星系，或者永远在广阔而膨胀的太空中漫游。这一过程是极其缓

慢的，若想完成这一解体过程，所需要的时间是现在宇宙年龄的10亿倍。相比之下，剩下百分之几的天体将运动到星系的中心，合并形成一些巨大的黑洞。

正如第5章所述，天文学家有可靠的证据表明，一些星系的中心已经存在着巨大的黑洞，贪婪地吞噬着旋涡状的气体，并释放出巨大的能量。随着时间的推移，大多数星系终将被疯狂地吞噬，直到黑洞周围的物质被吸食一空或者被弹射出星系。这些物质也许最终会再次回落，或者加入不断减少的星系间的气体中。吃饱后膨胀的黑洞会保持短暂的安静，偶尔会有游荡的中子星或小黑洞钻进来。但这不是黑洞故事的最终结局。1974年，斯蒂芬·霍金发现，黑洞并不完全是黑色的。相反，它们会发出微弱的热辐射辉光。

霍金效应只有在量子场论的帮助下才能被正确理解。量子场论是物理学中一个深奥难懂的分支，与暴胀理论有关。回想一下，量子理论的一个核心原则是海森堡提出的不确定性原理。根据该原理，量子粒子的所有属性都不具备明确定义的值。比如，就某个特定的时刻而言，一个光子或者一个电子都不可能具有确定的能量值。实际上，一个亚原子粒子可以“借贷”能量，只要能迅速地归还就可以。

正如我在第3章提到的，能量的不确定性导致了一些奇怪的效应，比如在明显空无一物的空间中存在着“短命”的粒子，即虚粒子，它们瞬间即逝，寿命短暂。这就引出了“量子真空”这个奇怪的概念——一个完全不同于惰性真空的真空，充斥着不安的虚粒子活动，且永无休止。虽然我们通常不会注意到这种虚粒子的活动，但它们会产生物理效应。当真空活动由于引力场的存在而被破坏时，就会产生这种效应。

一个极端的例子是出现在黑洞视界附近的虚粒子。回想一下，虚粒子以借来的能量为生的时间很短暂，之后必须“偿还”能量，并且粒子必须消失。如果出于某种原因，虚粒子在短暂的分配时间内从某

个外部来源获得了足够多的能量，就可以偿还“能量贷款”。因此，虚粒子就不再通过消失的方式来偿还它，结果便是虚粒子变为实粒子，并且这些粒子能够或多或少地永久存在。

按照霍金的说法，这种偿还“能量贷款”的善行发生在黑洞附近。在这种情况下，提供所需能量的“债主”是黑洞的引力场。交易是这样达成的：虚粒子通常是成对产生的，它们向相反的方向移动。想象一下视界外有这样一对新出现的粒子，假设粒子的运动是这样的，其中一个粒子穿过视界落入黑洞，当它移动的时候，会从黑洞的强大引力中吸收大量的能量。霍金发现，这种能量的提升足以偿还“能量贷款”，并将正在下落的粒子和它的伙伴（仍然在事件视界之外）都转变为实粒子。因此，霍金预测，应该会有一股稳定的气流从黑洞附近流向太空，构成所谓的“霍金辐射”。

霍金效应在微小黑洞中的表现最为明显。比如，在正常情况下，一个虚电子在还清“能量贷款”之前最多可以移动10^{-11}厘米，因此只有比它更小的黑洞（原子核大小）才能有效地产生电子流。如果黑洞比这个大，那么大多数虚电子就没有足够的时间穿过视界，这时就必须偿还“能量贷款”。

一个虚粒子可能穿过的距离取决于它的寿命，而寿命又由“能量贷款”的大小通过海森堡不确定性原理决定。“能量贷款”越多，粒子的寿命就越短。“能量贷款”的一个主要组成部分是静止质量能。对于电子来说，“能量贷款”至少要等于电子的静止质量能。对于一个具有较大静止质量的粒子，比如一个质子，它的“能量贷款”更大，寿命就会更短，所走的距离也就更短。由此可以推出，通过霍金效应产生质子需要一个比原子核还要小的黑洞。相反，一个比原子核大的黑洞会产生比电子质量低的粒子（比如中微子）。任何尺度的黑洞都会产生质量为零的光子。即使是只有一个太阳质量的黑洞，也会

因霍金效应产生光子，可能还有中微子；不过在这种情况下，霍金效应是非常微弱的。

这里使用“微弱”一词并不夸张。霍金发现，黑洞产生的能量谱与热体辐射的能量谱相同，所以可以用温度来表示霍金效应的强度。一个原子核大小的黑洞（直径10^{-13}厘米），温度会非常高——大约100亿开尔文。相比之下，一个拥有一个太阳质量、直径超过1 000米的黑洞，相比绝对零度，其温度差不会超过千万分之一开尔文，整个黑洞释放出的霍金辐射不超过十亿亿亿分之一瓦。

霍金效应的一个奇怪之处是，随着黑洞质量的下降，辐射温度会升高。这意味着小黑洞比大黑洞温度更高。当黑洞发生辐射时，它会损失能量，并随之损失质量，所以黑洞便会收缩。黑洞的温度越高，辐射就越强烈，因此收缩得就越快。这一过程本质上是不稳定的，随着黑洞越来越多地释放出能量，并以越来越快的速度缩小，这一过程终将消失。

霍金效应预测，所有的黑洞都会在一阵辐射中消失。最后的时刻将会很壮观，就像一颗大型原子弹爆炸一样，伴随着一阵短暂的强烈热能释放之后，一切都将消失无踪，至少从理论上来说是这样的。不过，一些物理学家并不认同这种观点——有形天体会坍缩成黑洞，然后黑洞会消失，只留下热辐射。他们提出的一种预测是，两个完全不同的天体在寿命将尽之时会产生相同的热辐射，而不会留下有关原始天体存活时的任何信息。这种消失的方式违反了人们所珍视的各种守恒定律。另一种预测是，蒸发的黑洞留下了微小的残骸，以某种方式记录了大量的信息。这些预测的共同点在于，黑洞绝大部分的质量都将以光和热的形式辐射掉。

黑洞辐射的过程非常缓慢。一个太阳质量的黑洞需要10^{66}年才会消失，而一个超大质量的黑洞则需要10^{93}年。而且，只有宇宙的背景温度降到黑洞的背景温度以下时，这个过程才会发生，否则，从周围

宇宙流入黑洞的热量将抵消通过黑洞辐射流出的热量。宇宙大爆炸遗留下来的宇宙微波背景辐射目前的温度大约比绝对零度高3开尔文，若想冷却到使一个太阳质量的黑洞产生净热量损失，则需要10^{22}年。霍金辐射过程不是你坐在那里等着就能看到的事件。

永远是一段极其漫长的时间，但只要发展下去，那么最终所有的黑洞，即使是超大质量的黑洞，都可能会消失，它们的死亡带来的阵痛会在永恒的、漆黑的宇宙之夜中短暂地发出一道亮光，一个一闪即逝的墓志铭，上面记载着曾经存在过10亿个炽热太阳的信息。

那么剩下的还有什么呢？

并非所有的物质都会落入黑洞。我们需要考虑到中子星、黑矮星和独自在广阔的星系际空间中漫游的行星，更不用说那些从未与恒星结合在一起的稀薄气体和尘埃，还有小行星、彗星、陨星和奇怪的岩石块，它们会使恒星系统变得杂乱无章。但是，这些东西会永远存在吗？

在这里，我们遇到了一些理论上的困难。我们需要知道原始的物质是否绝对稳定，就是构成你、我和地球的原材料是否稳定。未来的终极关键在于量子力学。在通常情况下，量子过程与原子系统和亚原子系统有关，但量子物理定律适用于一切事物，包括宏观物体。尽管大型物体的量子效应非常微小，但累积很长一段时间后，这些原本微小的效应仍然能够带来重要变化。

量子物理学的特点是不确定性和概率。在量子领域，没有什么是确定的，除了赌博式的可能性之外。这意味着，如果一个过程是完全可能的，只要有足够长的时间，它最终会发生，无论它发生的概率有多低。我们以放射性元素为例来看看这一规律是如何发挥作用的。铀238的原子核几乎是完全稳定的。然而，它有很小的概率会喷出一个α粒子，并转化为钍。准确地来说，在单位时间内，一个给定的铀原子核发生衰变的概率是非常低的。平均而言，大约45亿年发生一次。但

由于物理学定律要求单位时间内的概率是固定的，任何给定的铀原子核最终都会发生衰变。

放射性粒子α发生衰变的原因是，组成铀原子核的粒子（质子和电子）的位置存在微小的不确定性，很可能瞬间位于原子核外，被迅速驱走。同样，原子在固体中的精确位置也存在非常小但非零的不确定性。比如，金刚石中的一个碳原子位于晶体内一个非常明确的位置，据预测，在遥远未来宇宙接近零度的温度下，这个位置将非常稳定。但情况并非完全如此。碳原子的位置始终存在微小的不确定性，这意味着存在微小的概率使碳原子自发地跳出其在晶格中的位置，并出现在其他位置。这种迁移过程中没有什么东西是真正固定不变的，连金刚石这样坚硬的物质也不例外。相反，由于量子力学效应，固体物质就像是一种非常黏稠的液体，它可以流动很长时间。理论物理学家弗里曼·戴森（Freeman Dyson）估计，大约10^{65}年后，不仅每颗经过精心切割的钻石会变成球珠，每块岩石也会发生形变，成为光滑的球。

如果时间足够长，位置不确定性甚至可能导致核嬗变。以金刚石晶体中两个相邻的碳原子为例。在极少数情况下，其中一个碳原子会自发位移，然后导致其原子核瞬间出现在其相邻原子核的旁边。这时候，核吸引力就可能导致两个原子核发生聚变形成镁原子核。核聚变并不一定需要很高的温度：冷核聚变也是有可能发生的，但它需要很长的时间，长到令人难以置信。戴森估计，在$10^{1\ 500}$年后，所有物质都将以这种方式转化为最稳定的原子核——铁元素。

鉴于这种非常缓慢的嬗变过程，无论如何，核物质可能无法存在那么长时间。戴森假设，质子和原子核中的中子是绝对稳定的。换句话说，如果一个质子没有落入黑洞，也没有受到干扰，它就会永远存在下去。但我们可以完全确定吗？当我还是学生的时候，从来没有人怀疑过质子是永恒的，是完全稳定的粒子。但关于这一点，我们总有

一个挥之不去的疑问，这个问题涉及一种叫作正电子的粒子的存在，除了和质子一样带正电荷外，正电子与电子是完全相同的。正电子比质子轻得多，因此，如果当其他条件相同时，质子更愿意转化为正电子：物理学领域正在探测它们的最低能量状态，这涉及一种深刻的物理学原理——低质量意味着低能量。现在，没有人能解释为什么质子没有发生这种嬗变。物理学家简单地假设，有一条自然定律在禁止质子这么做。直到最近，这个问题也没有得到很好的解释。不过，20世纪70年代后期，关于核力如何促使粒子以量子力学的方式转化成另一种粒子的问题，物理学家有了更清晰的认识。最新的理论为禁止质子衰变的定律提供了解释，但这些理论中的大多数同时也预测，该定律并非百分之百有效。一个给定的质子转化为正电子的可能性很小。根据预测，剩余的质量会以电中性粒子的形式出现，比如所谓的介子，部分以运动能量的形式出现（衰变产物将在高速运动中产生）。

在一个最简单的理论模型中，质子衰变所需的平均时间是10^{28}年，这比目前宇宙的年龄长了100亿倍。因此，你可能会认为质子衰变的课题仍然是纯粹的学术好奇。然而，我们必须记住，这个过程属于量子力学的范畴，本质上是概率事件：10^{28}年是预测的平均寿命，而不是每个质子的实际寿命。如果有足够多的质子，其中一个质子就很有可能在你眼前发生衰变。事实上，如果有10^{28}个质子，那么你就可以预期每年会发生一次质子衰变，而10千克的物质当中就包含10^{28}个质子。

事实上，在这一理论流行之前，实验已经排除了质子拥有如此长寿命的可能性。其他版本的类似理论则给出了更长的寿命——10^{30}年或者10^{32}年，甚至是更长的10^{80}年。前者较低的寿命值还可以通过实验来检测。比如，衰减时间为10^{32}年，则意味着你的身体在一生中可能会损失一两个质子。但是我们如何检测这种罕见的事件呢？

我们可以将数千吨物质聚集起来，用能被质子衰变事件的产物触发的灵敏探测器对其进行数月连续的监测。然而，寻找质子衰变现象相当于大海捞针，因为这种衰变会被大量由宇宙辐射产物引起的类似事件掩盖。地球不断受到来自太空的高能粒子的轰击，这些高能粒子产生了无处不在的亚原子碎片。为了减少这种干扰，实验不得不在地下深处进行。

其中一个实验是在俄亥俄州克利夫兰附近的一个离地面500米深的盐矿里进行的。该实验装置包括一个装有一万吨超纯水的水箱和围在水箱周围的探测器。水之所以被选中是因为它的透明性，能使探测器同时“看到”尽可能多的质子。这个实验的思路如下：如果一个质子按照当前盛行的理论所预期的方式衰变，那么除了正电子外，它还会产生一个电中性的介子。然后，介子反过来会迅速衰变，通常会变成两个能量极高的光子，即伽马射线。最后，这些伽马射线在水中遇到水原子核，每一束都会产生一对电子—正电子对，它们的能量也非常大。这些次级电子和正电子的能量非常大，能以接近光速的速度运动，即使在水中也是如此。

光在真空中以每秒30万千米的速度传播，这是任何粒子可能具有的运动速度的极限。然而在这里，水有减缓光速的作用，所以光在这里传播的速度是大约每秒23万千米。如果高速亚原子粒子在水中以每秒近30万千米的速度运动，其实际速度会比光在水中的速度还要快。当一架飞机的飞行速度超过音速时，就会产生某种轰鸣声。同样，当一个带电粒子在介质中的传播速度比光速还快时，就会产生一种独特的电磁激波，称为切伦科夫辐射（Cerenkov radiation）。俄亥俄州的实验人员设置了一组光敏探测器来寻找切伦科夫辐射。为了区分质子衰变事件与宇宙中微子和其他虚亚原子碎片，实验人员找到了一种独特的信号——背对背的成对切伦科夫光脉冲，这种光脉冲由相对运动的正负电子对发射出来。

经过几年的持续观测，俄亥俄州的实验装置仍未能找到关于质子衰变的令人信服的证据，尽管它确实捕捉到了超新星1987A的中微子。就像在科学实验中经常发生的事情那样，寻找一个事物会促使意外发现另一个事物。直到撰写本书时，其他使用不同设计的实验也得出了无效的结果。一方面，这可能意味着质子不会衰变。另一方面，这可能意味着它们确实会衰变，但它们的寿命超过了10^{32}年。若想测量比现在更慢的衰变率，则超出了目前的实验可能性。因此，在可预见的将来，质子衰变仍将是一个未知数。

对质子衰变的研究曾在各种大一统理论的激发下风行一时，目标是将强相互作用力（将质子和中子束缚在原子核中的力）、弱相互作用力（造成β衰变的力）和电磁力统一起来。这些力的微小混合会导致质子衰减。但是，即使这个大一统理论被证明是错误的，质子仍然有可能通过另一种途径衰变，这涉及自然界的第四种基本力，即引力。

为了了解引力如何引起质子衰变，我们必须知道质子不是点状基本粒子这一事实，它实际上是由三个被称为夸克的更小粒子组成的复合体。在大多数情况下，质子的直径约为十万亿分之一厘米，这是三个夸克之间的平均间距。然而，由于量子力学的不确定性，夸克并不会保持静止，而是会不断改变其在质子内部的位置。有时，两个夸克会非常接近彼此。更罕见的是，所有三个夸克会非常接近，以至于它们之间的引力（通常完全可以忽略不计）完胜所有其他的引力。如果发生这种情况，这些夸克将一起坍缩，形成一个微小的黑洞。事实上，质子是在自引力作用下通过量子隧穿效应坍缩的。根据霍金效应，这样生成的微小黑洞是非常不稳定的，迟早会瞬间蒸发掉，最有可能的情况是产生正电子。通过这条路径来估计质子衰变的寿命是非常不确定的，从10^{45}年到10^{220}年不等。

如果质子确实会在极长的时间后发生衰变，那么将会对宇宙遥远的未来产生深远的影响。所有物质都是不稳定的，最终都会消失，即使像行星这样能避免落入黑洞的固体也不会永远存在，它们会逐渐蒸发掉。如果一个质子的寿命是10^{32}年，就意味着地球每秒钟会失去一万亿个质子。按照这个速度，在10^{33}年之后，如果地球还没有被其他东西摧毁，实际上也已经消失了。

中子也无法幸免。中子也由三个夸克组成，并且可以通过类似于导致质子死亡的机制嬗变为较轻的粒子（孤立的中子在任何情况下都是不稳定的，并且大约会在15分钟内发生衰变）。只要时间够长，白矮星、岩石、尘埃、彗星、稀薄的气体云以及所有其他天体都会因同样的原因消亡。我们目前观察到的10^{48}吨普通物质散布在宇宙各处，它们注定要么消失在黑洞中，要么消失在缓慢的核衰变中。

当质子和中子衰变时，它们会产生衰变产物，所以宇宙未必一点物质都留不下。比如，质子的一种可能衰变路径是变成正电子和中性介子。介子非常不稳定，会迅速衰变为两个光子，或者衰变成一对电子—正电子。无论哪种情况，由于质子的衰变，宇宙将逐渐获得越来越多的正电子。物理学家认为，宇宙中带正电荷的粒子（目前主要是质子）的总数与带负电荷的粒子（主要是电子）的总数相同。这意味着，一旦所有的质子都衰变了，电子和正电子的混合物就会相等。正电子就是电子的反粒子，如果一个正电子遇到一个电子，它们就会相互湮灭。这个过程很容易在实验室里得到证实。这种湮灭以光子的形式释放能量。

科学家已经进行了计算，试图确定在遥远的将来，宇宙中留下的正电子和电子是否会完全相互湮灭，或者是否会永远留下一小部分残留物质。湮灭不会突然发生，相反，电子和正电子首先要排列组合成一种叫作电子偶素的微原子，它们绕着共同的质量中心旋转，同时受相互之间的电引力的约束，跳起死亡之舞。然后这些粒子会做旋涡式

运动，随即碰到一起发生湮灭。它们旋转到一起的时间取决于电子偶素“原子”形成时电子与正电子之间的初始距离。在实验室里，电子偶素的衰变发生在极短的时间内，但在外层空间，由于几乎不受干扰，电子和正电子可能被束缚在一个巨大的轨道上。据估计，大多数电子和正电子形成电子偶素需要10^{71}年，但在大多数情况下，它们的轨道直径将达到数万亿光年！这些粒子移动得非常慢，移动一厘米需要100万年。电子和正电子的运动速度如此缓慢，以至于旋入时间达到了惊人的10^{116}年。然而，这些电子偶素原子的最终命运从它们形成的那一刻起就注定了。

奇怪的是，并非所有的电子和正电子都会相互湮灭。在电子和正电子寻找异性伙伴的同时，由于湮灭和宇宙的持续膨胀，这些粒子的密度会稳步下降。随着时间的推移，形成正电子的难度越来越大。因此，尽管残留物质的微小残留物越来越少，但从来没有完全消失过。在某个地方总会发现一些奇怪的电子或正电子，即使每一个这样的粒子都孤独地生活在一个不断膨胀的真空空间中。

我们现在可以描绘出在所有这些不可思议的缓慢过程完成后宇宙的样子。首先，会有大爆炸遗留下来的物质，也就是说，宇宙背景一直会存在。这些遗留物质由光子和中微子组成，也许还有其他一些我们还不知道的完全稳定的粒子。随着宇宙的膨胀，这些粒子的能量将持续减少，直到它们形成一个完全可以忽略不计的背景。宇宙中的普通物质将消失，所有的黑洞都会蒸发，最终消失殆尽。尽管黑洞中一些遗留物质也会以中微子的形式存在，但大部分遗留物质的质量将会转化成光子。在黑洞最后的爆炸过程中所发射出来的极小一部分质量会以电子、质子、中子和一些较重的粒子的形式存在。这些较重的粒子会迅速衰变，不过中子和质子的衰变速度将会慢得多，最后会留下一些电子和正电子，它们便是我们今天所看到的普通物质的最后残留物。

遥远未来的宇宙将是一锅稀薄得令人难以置信的“稀汤”，由光子、中微子、电子以及数量不断减少的电子和正电子组成。所有这些粒子都在缓慢地彼此远离，再也不会发生进一步的基本物理过程。没有什么重大事件能够中断宇宙的黯淡贫瘠，它终将走完自己的路程，但仍然拥有永恒的生命，也许永恒的死亡是一个更好的描述。

这种冷酷、黑暗、无特征、接近虚无的凄凉景象，与现代宇宙学与19世纪物理学所描述的“热寂”现象是最接近的。虽然宇宙退化到这种状态所需的时间太长，超出了人类的想象，但它只是无限时间中有限的一部分。如前所述，永远是一段很长的时间。

尽管宇宙的消亡时间极其漫长，远远超过了人类的各种时间尺度，以至于这种衰亡对我们来说几乎毫无意义，但人们仍然很急切地想知道：“我们的后代将会遭遇什么？缓慢但必然降临的宇宙末日是否注定会毁灭他们？”科学对遥远未来宇宙的预测相当令人失望，似乎任何形式的生命最终都会走向灭亡。不过，灭亡并没有那么简单。

THE LAST THREE MINUTES

08
慢车道上的生命

能源危机迟早会降临，地球人口也不可能无限地增长。在宇宙消失之前，人类的出路在哪里？

1972年，一个名为罗马俱乐部的组织发表了一篇关于人类未来的悲观文章，标题为《增长的极限》（*The Limits to Growth*）。在他们众多关于灾难迫在眉睫的断言中，有一个预言是，世界上的化石燃料将在几十年内耗尽。当时的人们惊慌失措，油价飙升，替代能源研究一时成为风尚。然而，到目前为止，还没有迹象表明化石燃料即将耗尽。人们又开始沾沾自喜。然而不幸的是，即使用简单的算术也能算出，有限的资源会以持续递减的有限速度被耗尽。能源危机迟早会降临，地球人口也不可能无限地增长。

一些人相信，下一次能源危机和人口过剩危机将彻底摧毁人类。但在我看来，我们没必要将化石燃料的耗尽和人类的灭亡相提并论。我们周围就有巨大的能量来源，重点是我们是否有意志和聪明才智去驾驭它们。太阳的能量足以满足人类的需要。一个更为棘手的问题是，我们必须抑制人口增长，以避免发生大规模的饥荒。这需要借助社会、经济和政治手段，而不仅仅是科学手段。如果我们能够突破化石燃料消耗所造成的能源瓶颈，能够稳定世界人口增长并防止毁灭性的冲突的发生，能够限制地球的生态破坏，能够控制小行星撞击地球，那么我相信，人类将走向繁荣，没有明显的自然规律会限制人类的寿命。

我已经解释了在人类无法想象的漫长时间里，宇宙的结构将如何改变，而宇宙的消亡将是缓慢的物理过程发展的结果。人类存在的历史最多有500万年（这取决于对人类的定义），而人类文明只存在了几千年。如果人口数量保持在适当的范围内，在未来二三十亿年内，地球仍然会是适宜居住的地方，时间之久，难以想象，非常接近无限。然而，与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，即使是10亿年也是微不足道的。在10亿个10亿年后，银河系的其他地方仍然会存在类似地球的栖息地，供人类居住。

我们可以想象人类后代的生活，他们还有相当长的时间可供支配，发展太空探索和各种各样的奇妙技术。在地球被太阳烤焦之前，他们有足够的时间离开地球，找到另一颗适宜居住的星球，然后再找到下一颗……通过向太空扩张，人口规模也可能膨胀。要知道我们在20世纪为生存而进行的斗争并不是徒劳无功的，这是否令你感到安慰？

太阳系注定会走向灭亡，伯特兰·罗素对热力学第二定律的后果感到非常沮丧，对人类生存的徒劳感到痛苦。罗素清楚地认识到，人类的栖息地不可避免地会消亡，这在某种程度上使人类的生活变得毫无意义，甚至滑稽可笑。这种信念无疑促成了他对无神论的推崇。如果知道黑洞的引力能比太阳强很多倍，而且在太阳系解体后还能持续数万亿年，他会不会感觉更好点儿呢？可能不会。重要的不是时间的长短，而是宇宙迟早会变得不适合居住。这种想法必然会让一些人觉得我们的存在是毫无意义的。

我们已经讨论过，在遥远的未来，宇宙的环境会发生难以想象的变化，它将不再稳定，不再友好。但我们不必因此陷入沙文主义或悲观主义。毫无疑问，在一个由稀薄的电子和正电子组成的宇宙中，人类会面临一段艰难的时期，但重要的问题肯定不是人类物种本身能否长生不老，而是我们的后代能否幸存下来。不过，即使他们幸存下来，也不太可能是今天意义上的人类。

人类出现在地球上，是生物进化的结果，而进化过程正在迅速地被人类活动改变。我们已经干涉了自然选择的运作，设计出新的变种的可能性也越来越大。我们可能很快就能直接通过基因工程，设计出具有规定属性和生理特征的人类。所有这一切都发生在科技社会的短短几十年里。而在几千年、甚至几百万年后，科学技术会取得怎样的成就呢？

现在，人类已经能够离开地球，进入近太空探险。在今后的亿万年内，我们的后代将可以从地球扩展到更广阔的太阳系，然后再扩展到银河系内的其他恒星系。人们常常有这样一种误解，认为这类计划会耗费无限长的时间。事实并非如此。移民计划可能会通过行星之间的短途飞行不间断地进行下去：移民会离开地球，去往几光年以外合适的星球上，如果他们能以接近光速的速度旅行，整个旅程将只需要几年时间。即使我们后代的飞行速度永远不会超过光速的1%，也只需要几个世纪就可以实现目标。新移民地的实际建立可能需要几个世纪才能完成，到那时，移民者的后代就可以考虑派遣移民远征队到更远的适宜居住的星球上去。然后过几百年，下一颗星球上的居民将会继续移民，以此类推。波利尼西亚人就是以这种方式殖民了太平洋中部的岛屿。

光穿过银河系只需要10万年的时间，如果以1%的光速旅行，那么穿越银河系需要1 000万年。即使一路上有10万颗行星作为移民驿站，并且每颗移民行星都需要2个世纪才能建立起来，总共所需的时间也只不过是以1%的光速穿越银河系的时间的3倍。以天文学甚至地质学的标准来衡量，3 000万年时间很短，太阳围绕银河系运行一周大约需要2亿年；地球上的生命存在的时间至少是这个时间的17倍。只有在二三十亿年后，老化的太阳才会严重地威胁到地球，所以在3 000万年内，地球环境几乎不会发生任何变化。由此可推算出，我们的后代可以用地球上的生命进化到科技社会所需时间的一小部分时间来移民银河系。

成为移民者的人类后代会是什么样子呢？如果我们自由地发挥想象力，便可以推测出移民者可能会通过基因工程轻松地适应目标星球。举个简单的例子，如果在恒星天苑四周围发现了一颗类地行星，并且发现它的大气中只有10%的氧气，那么移民者就可以通过基因改造，使自身拥有更多的红细胞。如果这颗新行星的表面引力更大，移民者就可以塑造更强健的骨架和更强壮的骨骼，等等。

即使要花几个世纪的时间才能完成这段旅程，途中的能量供应也不成问题。人们可以将宇宙飞船建造成一个方舟，一个完全独立的生态系统，用以满足许多代移民者的需求。或者，人们也可以选择在旅途中对移民者进行冷冻。而更合理的做法是，只派出一只小型飞船和一小队宇航员，同时让他们携带数以百万计的冷冻受精卵子，在到达目的地后对其进行“孵化”，即时“生育”一批人，这样就避免了长期运送大量成年人口带来的保障问题和社会问题。

我们可以预测，无论是在外表上还是在心理上，这些移民者没有理由和当前的人类一样。如果人类可以借助基因工程来满足各种各样的需求，那么每次探险都可能涉及以特定目标为前提而设计的生命实体，这些实体具有适应特定环境的解剖学结构和心理素质。

移民者不必是通常定义的生命有机体。现在我们已经有希望可以将硅片微处理器植入人体。这项技术的进一步发展有可能带来有机部件和人工电子部件组成的混合体，它们同时具有生理功能和思考功能。比如，为人脑设计的“可插式”存储器，类似于现在可用于计算机的那些额外存储器。科学家可能很快就会证明，用有机材料来进行计算比用固体材料更高效。现代科学技术可能会通过生物学方式“培育”计算机组件。数字计算机将更可能被神经网络取代。神经网络已经被用来代替数字计算机，来模拟人类智能并预测经济行为。使脑组织中生长有机神经网络可能比从头开始制造它们更有意义。构建有机和人工网络的共生混合体也是可行的。随着纳米技术的发展，生物与非生物、自然与人工、大脑与计算机之间的区别将会变得越来越模糊。

目前，这种推测属于科幻小说的范畴。这些推测会成为科学事实吗？毕竟我们能想象到某些事情并不意味着未来一定会发生。我们可以将同样的原理应用于技术发展过程，就像应用于自然过程一样：只要时间足够长，任何可能发生的事情都会发生。如果人类或其后代一

直保持着充分的能动性（这可能是一个非常大胆的设想），那么技术的约束条件可能只有物理定律了。对于一代科学家来说，像“人类基因组计划”这样的挑战可能是一项艰巨的任务，但如果有一百代、一千代或一百万代的科学家来从事这项工作，那么这项任务的完成就绝对不成问题了。

让我们乐观地设想，人类将来会生存下去，并继续朝着技术的极限发展。这对探索宇宙意味着什么呢？构建出为特定目标而设计的智能生命体将会开启这样一种可能性：派遣代理人进入迄今为止完全不适合人类居住的栖息地，以执行目前无法想象的任务。虽然这种代理人可能是人类发起的技术革命的最终产物，但它们本身并不是人类。

我们是否应该特别关注一下代理人这类奇怪的生命体的命运？许多人可能会对这些怪物取代人类的前景感到厌恶。如果生存需要人类让位于基于基因工程的有机机器人，我们也许会选择灭绝。但是，如果人类灭亡的可能性令我们感到沮丧，就必须明确我们希望保留人类的哪些特质。答案当然不是我们的身体形态。如果知道100万年后，我们的后代可能会失去脚趾，又或者拥有更短的腿或更大的头和大脑，我们会感到不安吗？事实上，在过去的几个世纪里，我们的身体形态已经发生了很大的变化，不同种族之间的差异也很大。

当被追问类似的问题时，我猜想大多数人更重视所谓的人类精神，即我们的文化、价值观、独特的精神构成，比如在艺术、科学和智力方面的成就。这些东西当然值得保存和延续下去。如果我们能将人类最基本的人性传递给后代，那么无论他们的身体形态如何变化，最重要的东西就能够留存并延续下来。

将来是否有可能创造出类似人类的生物，向宇宙进军并散布到宇宙中去，这个问题在很大程度上还只是一种推测。撇开别的不说，人类可能对这种宏伟的计划缺乏积极能动性，或者由于经济、生态或其他灾难的影响，我们可能在真正离开地球之前就已经灭亡了，也有可

能外星人比人类早一步占领了大多数适合居住的行星（显然不包括地球，至少现在还没有）。但是，无论这项任务是落在人类后代还是落在某些外星人后代的肩上，在宇宙中散播生命并通过技术获得对宇宙的控制的可能性令人神往。我们不禁要问，这样一个超级种族应该如何与宇宙的缓慢退化相抗衡？

我们在第7章已经讨论过，物理衰变的持续时间极其漫长，以致任何试图通过地球上的当前趋势来推测遥远未来的技术发展情况的尝试都是徒劳的。谁能想象一万亿年后的科技社会呢？它似乎可以实现任何目标。然而，无论多么先进，任何技术都可能仍然受制于物理学的基本定律。比如，如果相对论的结论是正确的，即没有任何物体的速度可以超过光速，那么即使再有一万亿年的技术发展也无法跨越这个障碍。更严重的是，如果所有有趣的活动都会消耗一些能量，那么对宇宙中可用自然能源的持续消耗最终会对这个技术社会构成严重威胁，无论它多么先进。

通过将基本物理原理应用于广泛定义下的智慧生物，我们便可以研究宇宙在遥远未来的退化是否会给它们的生存带来任何真正的威胁。一种生物若想获得“智慧生物”的地位，它至少能够处理信息。思考问题和获取经验都会涉及信息处理活动。那么这对宇宙的物理状态有什么要求呢？

信息处理的一个特征是消耗能量，这也是文字处理器必须连接到主电源的原因。每条信息消耗的能量取决于热力学因素。当处理器在接近其环境温度的条件下运行时，消耗的能量最少。人脑和大多数计算机的运行效率非常低下，并以热量的形式消耗了大量多余的能量。比如，大脑产生的大量热量，许多计算机需要特殊的冷却系统来降温。这种废热的来源可以追溯到信息处理运行的逻辑，在此过程中需要丢弃信息。比如，如果计算机执行1+2=3的计算，则两条输入信息（1和2）则会替换为输出信息（3）。一旦执行了计算，计算机就可以

丢弃输入信息，从而用一个数字代替两个数字。事实上，为了防止内存阻塞，机器必须持续丢弃这些无关的信息。根据定义，擦除过程是不可逆的，因此涉及熵的增加。由此看来，在非常基础的层面上，信息的收集和处理将不可逆转地消耗可用能量并提高宇宙的熵。

弗里曼·戴森对智慧生物所面临的局限性进行了认真的思考。在宇宙朝热寂状态冷却的过程中，这些智慧群体会受到以一定速度消耗能量（如果只是为了思考）的限制。第一个约束条件是，生物的温度必须高于其环境的温度，否则余热将无法从它们体内排出。第二个约束条件是，物理系统向环境辐射能量的速度受到物理定律的限制。如果智慧群体产生的余热快于其消除的速度，它们就不能长期运转。这些要求对生命消耗能量的速度提出了一个较低的限制。一个基本的要求是，必须存在某种自然能源，来为这种重要的热量流失提供补充燃料。戴森总结说，所有这些能源注定会在宇宙遥远的未来减少，因此所有智慧生物最终都会面临能源危机。

现在，有两种方法可以延长智慧生物的寿命。一种是尽可能长时间地生存；另一种是加快思考和体验的速度。戴森做出了一个合理的假设，即一个人对时间流逝的主观体验取决于他对信息的处理速度：使用的处理机制越快，他每单位时间产生的思想和感知就越多，时间就过得越快。罗伯特·福沃德（Robert Foreword）在其科幻小说《龙蛋》（*Dragon's Egg*）中以一种有趣的方式运用了这个假设。这部小说讲述了一群生活在中子星上的某个智慧生物的故事。这些生物利用核聚变过程而非化学过程来维持生存。由于原子核的相互作用比化学相互作用快数千倍，中子星上的这种生物处理信息的速度也就快得多。人类时间尺度上的一秒钟相当于它们的许多年。有可能当人类第一次接触到中子星上的这些生物时，它们还是一个相当“原始的群落”，但随着时间的推移，它们的发展很快将会超越人类。

采用这种策略作为在遥远未来的生存手段有一个缺陷：信息处理得越快，能量消耗速度越高，可用的能源消耗得也就越快。你可能会认为这将不可避免地给我们的后代带来厄运，无论他们采取何种形体。但情况并非一定如此。戴森已经表明，有一个聪明的折中办法，可以使这种社会逐渐减缓活动速度，以适应宇宙的衰退，比如，进入休眠状态，以不断增加时间长度。在每个休眠阶段，来自前一个活跃阶段的努力工作得来的能量可以慢慢消耗，并积累有用的能量，用于下一个活跃阶段。

不过，采用这种策略的智慧生物所经历的主观感受时间在实际流逝时间中所占的比例会越来越小，因为这种社会的休眠时间会越来越长。但是，正如我所说的，永远是一段很长的时间，我们必须与相反的两个极限做斗争：资源趋向于零，而时间趋向于无穷。戴森对这两个极限做了简单的研究后表明，即使资源总量是有限的，主观时间总量也可以是无限的。他引用了一项惊人的统计结果：一个与今天人类人口水平相当的某个生物群落，只需要6×10^{30}焦耳的总能量就可以永远生存下去，而这相当于太阳在8小时内输出的能量。

真正的不朽需要的不仅仅是处理无限信息的能力。如果一个生物的大脑状态是有限的，那么它只能思考有限数量的不同思想。如果它将永远持续下去，这将意味着同样的想法将被反复思考。这样的存在和一个注定灭亡的物种一样毫无意义。为了摆脱这条死胡同，这个社会或者单个超人类必须无限制地发展下去。这对遥远的未来提出了一个严峻的挑战，因为物质蒸发的速度比其作为大脑物质被吸收的速度要快得多。一个绝望而聪明的人也许会试图利用难以捉摸但又无处不在的宇宙中微子来扩展其智力活动的范围。

数字计算机是一台有限的机器，因此它所能达到的目标会受到严格限制。然而，也有其他类型的系统，比如模拟计算机。以计算尺为例，这种模拟计算机可以通过不断地调整规则进行计算，在理想情况

下可以有无限种状态。因此，模拟计算机摆脱了数字计算机的一些限制，数字计算机只能存储和处理有限数量的信息。如果信息是按照模拟计算机的方式进行编码的，比如，通过物体的位置或角度，那么计算机的容量则是无限的。因此，如果某个超人类可以像一台模拟计算机一样工作，那么它不仅可以思考无限多的想法，而且可以思考无限种不同的想法。

我们不知道宇宙作为一个整体，是像一台模拟计算机还是一台数字计算机。量子物理学认为，宇宙本身应该是“量子化”的，也就是说，它所有的属性都表现为离散跳跃，而不是连贯的变化。但这纯粹是一种猜测。我们还没有真正理解大脑活动和生理活动之间的关系，也许思想和经验不能简单地与这里所说的量子物理思想联系起来。

无论思想的本质是什么，遥远未来的生物面临着终极的生态危机：所有能源将被宇宙耗尽。不过，通过“省吃俭用”，它们仍旧可以获得一种不朽、无限的体验。在戴森的设想中，它们的活动对宇宙的影响会越来越少，而宇宙则对它们的需求置之不理。这种生物会无限长地保持休眠状态，保留记忆，但不会增加记忆，而且几乎不会干扰黑暗的垂死宇宙。通过巧妙的组织，它们仍然可以思考无限多的想法，感受无限多的经验。我们还能奢求什么呢？

宇宙的热寂一直是我们这个时代经久不衰的神话之一。我们看到了罗素和其他人是如何抓住热力学第二定律所预测的宇宙不可避免的退化，来支持无神论、虚无主义和绝望的哲学的。随着对宇宙的进一步理解，我们今天可以描绘出一幅略有不同的图景。宇宙可能在退化，但它并不会耗尽。热力学第二定律当然适用，但它并不一定会排除文化永生的可能性。

事情甚至可能没有戴森设想的那么糟糕。到目前为止，我一直在假设，宇宙在膨胀和冷却的过程中会或多或少保持均匀性，但这可能是不正确的。万有引力是许多不稳定性的来源，我们今天看到的宇宙

的大规模均匀性可能会在遥远的未来让位于更复杂的结构。比如，不同方向上的膨胀率的微小变化可能会放大。巨大的黑洞可能会聚集在一起，因为它们的相互引力克服了宇宙膨胀的分散效应。这种情况会导致一种奇怪的竞争：黑洞越小，温度就越高，蒸发得就越快；如果两个黑洞合并，黑洞会变大，因此温度会变低，蒸发过程会受到很大限制。关于宇宙遥远的未来，关键的问题是黑洞合并的速度是否与蒸发的速度相一致。如果答案是肯定的，那么总有一些黑洞会通过霍金辐射为技术熟练的群体（譬如人类）提供有用的能源，以使他们维持正常生活而无须休眠。物理学家唐·佩奇（Don Page）和兰德尔·麦基（Randall McKee）的计算表明，这场竞争就像在走钢丝，并且在很大程度上取决于宇宙在不断衰退的过程中膨胀速度究竟有多大。在某些模型中，黑洞合并确实会胜出。

不过，戴森忽略了这样一种可能性，即我们的后代可能会试图修改宇宙的结构，使自身永远生存下去。天体物理学家约翰·巴罗和弗兰克·蒂普勒设想过这样一种方式：一个先进的技术团体可能会对恒星的运动进行轻微的调整，以设计一种对它们自己有利的特殊引力。比如，核武器可以用来扰乱小行星的轨道，于是行星的弹射式推动就会使它撞向太阳。撞击的动量将会轻微地改变太阳在银河系中的轨道。虽然这种影响很小，却具有累积性：太阳移动得越远，产生的位移就越大。在数光年的距离内，如果太阳接近另一颗恒星，这一变化可能会产生重大影响：点头之交将转变成剧烈改变太阳运行轨道的碰撞。通过操纵许多恒星，这个技术团体可以创造和管理大量天体，以造福社会。而且，由于这种效应会放大和累积，因此，通过一点一点的推动来控制系统的大小是没有限制的。如果时间足够长（当然我们的后代肯定有足够的时间来支配），整个星系都可以被操纵。

为了完成这项宏伟的宇宙工程，这个技术团体将不得不与恒星和星系无规则的行为做斗争，因为随机运动会将天体从受引力束缚的星团中抛出，从而使系统走向瓦解，如第7章所述。巴罗和蒂普勒发现，

通过操纵小行星来重新排列星系需要10^{22}年的时间。不幸的是，星系的自然瓦解大约会发生在10^{19}年后，所以这场战斗显然是有利于大自然的。此外，我们的后代还可能控制比小行星更大的天体。自然瓦解的速度取决于天体的轨道速度，对于整个星系来说，这种速度会随着宇宙的膨胀而减小。如果轨道速度变慢了，也会使人为操作过程变慢，但这两种效应不会以相同的速度减小。随着时间的流逝，自然瓦解的速度可能会低于技术团体对宇宙重新排序的速度。这就提出了一个有趣的可能性，即随着时间的推移，智慧生物可以越来越多地控制一个资源越来越少的宇宙，直到整个大自然基本上被“技术化”为止，而那时，自然与人工之间的区别也就消失了。

戴森分析的一个关键假设是，思维过程会不可避免地消耗能量。事实的确如此。直到最近，人们还认为任何形式的信息处理都必须付出最低的热力学代价。令人惊讶的是，这并不完全正确。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，可逆计算在原则上是可行的。这意味着某些物理系统（目前完全是假设的）可以处理信息而不产生损耗。我们可以设想这样一种系统，它可以在不需要任何电源的情况下思考无限多的想法！目前我们还不清楚这样一种系统能否收集和处理信息，因为从环境中获取的任何重要信息都涉及某种形式的能量消耗，哪怕是从噪声中提取信息都是如此。因此，无需求的生物对周围的世界可以没有任何感知，但它可以记住宇宙是什么，说不定还能做梦。

一个多世纪以来，垂死的宇宙形象一直困扰着科学家。人们假设我们生活在一个因熵的肆意挥霍而稳步退化的宇宙中，但这个假设是如何建立的呢？我们能确定所有的物理过程都会不可避免地导致混乱和衰退吗？

生物学的情况又是如何呢？一些生物学家认为，达尔文进化论所采取的极端防御态度给了我们一些启示。我相信，他们的这种反应源

于这样一种令人不安的矛盾：在物理力量的驱动下，这个过程显然是建设性的、进步的，而在本质上，物理力量又是毁灭性的。地球上的生命可能起源于某种原始的黏液。当前的生物圈是一个丰富而又复杂的生态系统，是一个复杂而多样的有机体在微妙的相互作用中形成的网络。尽管生物学家否认任何系统性进化的证据，但科学家和普罗大众都很清楚，自从地球上有生命起源以来，某些东西或多或少是单向向前发展的。关键问题是，我们如何更加清晰地描述这种进步，究竟是什么进步了？

上文关于生存的讨论集中在信息（或有序）和熵之间的斗争上，熵总是占上风。但信息本身就是我们应该关注的量吗？毕竟，系统地思考所有可能的想法就像把整本电话簿认真阅读一遍一样令人不寒而栗，重要的当然是经验的质，或者更广泛地说，是有待收集和利用的信息的质，而不是量。

据我们所知，宇宙开始之初，根本无特征可言。随着时间的推移，我们今天看到的物理系统的丰富性和多样性才逐步显现出来。因此，宇宙的历史就是结构复杂性不断增长的历史。这似乎是一个悖论。我开始介绍宇宙时首先介绍了热力学第二定律，该定律告诉我们，宇宙正在消亡，它不可避免地从低熵的初始状态走向最大熵的最终状态——热寂。所以情况是在好转还是在恶化呢？

实际上并不存在悖论，因为结构的复杂性不同于熵。熵，或者说无序，是信息即有序的反义词：你处理的信息越多，产生的秩序越多，所付出的熵的代价也就越大，这里的有序意味着另外某个地方的无序。这就是热力学第二定律——熵总是赢家。但是结构和复杂性并不仅仅是有序和信息，它们只与特定类型的有序和信息有关。举例来说，我们能够清晰地认识到细菌和晶体之间的重要区别，两者都是有序的，但方式不同。晶格代表了有规律的均匀性，虽然非常漂亮，但本质上很乏味。相比之下，细菌的构造可以说是非常精巧、有趣。

这些想法看上去只是主观判断，但我们可以用数学使之更有说服力。近年来，科学家开辟了一个全新的研究领域，目的是使结构复杂性这类概念定量化，并力图建立一些普适性原理，使其与现有的物理定律并驾齐驱。该领域虽然仍处于起步阶段，但已经挑战了许多关于秩序和混乱的传统假设。

在《宇宙的蓝图》（*The Cosmic Blueprint*）一书中，我提出了一种假设，在宇宙中起作用的还有“复杂性增加定律”，该定律与热力学第二定律并立。这两条定律之间并没有不相容之处。实际上，物理系统复杂性的增加是以熵为代价的。比如，在生物进化的过程中，只有在发生了许多破坏性的物理和生物过程（比如，适应不良的突变体的过早死亡）之后，才会出现一种新的、更复杂的有机体。即使是雪花的形成也会产生余热，使宇宙的熵增加。但是，这里不存在任何直接的替换关系，因为结构不是熵的反义词。

我很高兴地发现，许多研究人员也得出了类似的结论，正试图使复杂性增加定律公式化。虽然复杂性增加定律与热力学第二定律并不矛盾，但复杂性增加定律对宇宙的变化给出了一个非常不同的解释：宇宙的发展过程是从基本上毫无特征的初始状态开始，然后发展到越来越复杂、越来越精细的状态的。

复杂性增加定律正在不断完善之中，它对宇宙的结局有着深远的意义。如果结构的复杂性不是熵的对立面，那么负熵在宇宙中的有限存储就不需要在复杂性的层次上设置一个界限。为提高复杂性而支付的熵代价可能纯粹是偶然的，而不是必需的，就像单纯的排序或信息处理那样。如果是这样的话，那么我们的后代就可以在不浪费日益减少的资源的情况下实现更加复杂的组织状态。虽然他们处理信息的数量可能受到限制，但他们的精神和身体活动的丰富性和质量可能不会有限制。

在本章和第7章，我试着让读者看到：宇宙正在衰退，但可能永远不会将精力消耗殆尽。只有在奇异的科幻小说中才会发生智慧生物在逆境中生存下来的奇迹，而这种生存环境会对它们越来越不利，并且热力学第二定律会在无情的逻辑下检验它们的创造力。它们为生存而进行的绝望的但不一定是徒劳的斗争可能会使一些读者感到兴奋，也可能使另一些读者感到沮丧，而我自己的心情好坏参半。

所有的推测都是基于这样一个假设：宇宙将会永远膨胀下去。我们已经看到，这仅仅是宇宙的一种可能命运。如果膨胀速度减慢得非常快，则宇宙有一天可能会停止膨胀，并开始收缩，走向巨大的危机。如果情况真是这样，人类生存的希望又是什么呢？

THE LAST THREE MINUTES

09
快车道上的生命

我们希望，宇宙超人类或超级计算机至少能在可用的时间内对自身的存在有足够的了解，并接受自己必然走向灭亡的命运。

除非有“永恒”，否则无论是人类还是外星人，无论其数量有多少，他们的智慧都不可能让生命无限制地延续下去。如果宇宙只能存在有限的时间，那么世界末日就不可避免了。在第6章，我解释了宇宙的最终命运如何受制于它的总质量。观察表明，宇宙的质量非常接近于永恒膨胀和最终坍缩之间的临界点。如果宇宙最终开始坍缩，任何智慧生物的未来都将与第7章描述的结局大相径庭。

宇宙坍缩的早期阶段一点儿也不可怕。就像一个被抛向天空并到达轨道顶端的小球那样，宇宙将开始缓慢地向内下落。我们假设这个时间的顶点是1 000亿年以后：那时仍将有大量恒星在燃烧，而我们的后代也能够用光学望远镜观察遥远星系的运动——星系团的退行速度逐渐变慢，然后开始回落，逐渐落向彼此，各个恒星间相隔得越来越近。我们今天能看到的星系在那个时候会处于比现在远4倍的距离外。由于宇宙的年龄越来越大，天文学家将能够看到比我们现在所能看到的远10倍的宇宙，因此他们看到的可见宇宙所包含的星系应当比我们这个时代所能看到的多得多。

在1 000亿年以后的很长一段时间内，天文学家都不会注意到宇宙在坍缩。他们首先会注意到，平均而言，相对较近的星系在不断地接近而不是后退，但来自遥远星系的光谱似乎仍然是红移的。只有经过数百亿年，系统性的涌入才会变得明显。此时更容易识别的是宇宙微波背景辐射温度的细微变化。我们应当记得，宇宙微波背景辐射是大爆炸遗留下来的，目前的温度大约比绝对零度高3开尔文。随着宇宙不断膨胀，该温度会下降。在1 000亿年以后，它将下降到1开尔文左右。温度将在膨胀的最高点降至最低，一旦坍缩开始，温度会再次回升，当宇宙坍缩到今天的密度时，温度将会回到3开尔文，这又要花1000亿年——宇宙的兴衰在时间上大致是对称的。

宇宙不是在一夜之间坍缩的。在数百亿年的时间里，即使处于收缩阶段，我们的后代也能好好地生活。如果转折点发生在更长的时间

之后，比如，一万亿亿年后，情况就没有这么乐观了。这种情况下，在膨胀到达最高点之前，所有的恒星将被烧尽，任何幸存的地球居民都将面临在永恒膨胀的宇宙中所遇到的相同问题。

无论转折何时发生，如果从现在开始以年为单位衡量，在同样的年数之后，宇宙将恢复到现在的大小。不过它的外观会非常不同。即使转折真的发生在1 000亿年之后，同现在相比，那时将有更多黑洞，更少恒星，可供居住的行星将弥足珍贵。

当宇宙坍缩到目前的大小时，它将会以更快的速度坍缩，在大约35亿年后，宇宙的尺度将减半，并且加速偏小。在此100亿年后，宇宙微波背景辐射温度的上升将成为一个严重的威胁，真正紧张的时刻才会真正到来。当温度上升到约300开尔文时，像地球这样的行星会很难将热量释放出去。它会变得越来越热，而且无可挽回。任何冰冠或冰川都会融化，海洋开始蒸发。

4 000万年后，宇宙微波背景辐射的温度将达到今天地球的平均温度。那时像地球一样的行星是完全不适合居住的。当太阳膨胀成一个红巨星时，地球也会面临这样的命运。我们的后代将没有别的地方可去。宇宙微波背景辐射充满了整个宇宙，整个空间的温度都在300开尔文，并且还将不断上升。无论是那些已经适应了这种炎热环境的科学家，还是创造了一种制冷生态系统来拖延被“煮熟”的威胁的科学家，都会注意到，宇宙正在极速坍缩，每几百万年就会缩小一半。任何仍然存在的星系都将无法被识别，因为它们合而为一了。然而，宇宙空间还是很大的，个别恒星之间发生碰撞的可能性仍然很小。

当宇宙接近最后阶段时，所处的状态将越来越类似于大爆炸后不久就出现的情况。天文学家马丁·里斯（Martin Rees）[(8)]对坍缩的宇宙进行了研究。通过应用一般的物理原理，他建立了宇宙最终坍缩阶段的图像。最终，宇宙微波背景辐射会变得非常强烈，以至于夜空会出现暗红色的辉光。宇宙将会慢慢地变成一个无所不包的宇宙熔

炉，炙烤着所有脆弱的生命形式，无论它们藏身何处，都难逃此命运，而此时行星的大气层早已被剥离得干干净净。渐渐地，红光会变成黄色，然后变成白色，直到充满宇宙的强烈热辐射威胁到恒星本身的存在。由于无法辐射出能量，恒星会在内部聚集热量并发生爆炸。此时的宇宙空间充满了炽热的气体等离子体，它们一直在猛烈地燃烧，变得越来越热。

随着变化的步伐加快，情况变得更加极端。宇宙开始发生明显变化的时间只需要10万年，然后是1 000年，再然后是100年，朝着灾难加速前进，温度随之上升到数百万开尔文，数十亿开尔文，而占据宇宙广袤空间的物质将被无限压缩，一个星系的质量所占据的空间直径只有几个光年——宇宙的最后三分钟来临了。

宇宙的温度最终变得极其高，原子核也解体了，物质被剥离成了一锅均匀的基本粒子汤。宇宙大爆炸和摧毁一代又一代恒星所创造的重元素的时间，比你我阅读这一页书所花费的时间都要短。持续了数万亿年的稳定的原子核结构，此时会被彻底摧毁。除了黑洞之外，其他所有的结构早已不复存在。宇宙此时显现出一种优雅但险恶的相似性，但时间非常短暂，只有几秒钟而已。

随着坍缩的速度越来越快，温度也随之上升，而且上升的速度越来越快。物质被强烈地压缩，以至于单个质子和中子不复存在，只剩夸克汤。

坍缩会继续加速，此时将是宇宙终极灾难来临前的几微秒。黑洞开始相互融合，其内部情况与宇宙本身的总体坍缩状态几乎没有区别。它们现在只是提前到达末日的一些时空区域，并且正在与宇宙的其他部分连接在一起。

在最后的时刻，引力变成了主导力量，无情地粉碎了物质和空间。时空曲率不断增大。越来越大的空间区域被压缩到越来越小的体

积之内。根据传统理论，内爆将在奇点处变得异常强大，将粉碎一切物质，包括空间和时间本身。

这就是世界末日。

据我们了解，这种“大危机”不仅意味着一切物质的结束，更是代表着所有事物的结束。大危机来临时，时间本身就会停止，所以问“接下来会发生什么”将毫无意义，就像问“大爆炸之前发生了什么”一样。任何事情都不存在“下一步”会发生什么，因为没有不流动的时间，也没有虚无的空间。大爆炸时从虚无中诞生的宇宙将会在大危机中化为虚无。曾经辉煌了数亿年的宇宙，此时什么都不会留下。

我们应该为这样的前景感到沮丧吗？哪一种情况更糟糕呢？是宇宙缓慢地退化和膨胀，直至走向黑暗的虚无状态，还是炙热到内爆，以致被遗忘？在一个注定要走向时间尽头的宇宙中，不朽的希望又在哪里呢？

比起遥远未来不断膨胀的宇宙，面对不断趋近灭亡的生活才更加无望。此时的问题不是缺乏能量，而是能量过剩。然而，可能要在数十亿年甚至数万亿年后，我们的后代才需要准备应对最后的大灭绝。在此期间，生命仍然可以在宇宙中扩展。在最简单的坍缩模型中，空间的总体积实际上是有限的。这是因为空间是弯曲的，并且可以在与球体表面等效的三维空间中相互连接。由此可以想见，聪明的人类可以在整个宇宙中扩散并获得对空间的控制权，从而利用所有可能的资源来应对这场大危机。

我们可能很难理解后代为什么要如此费心。既然无法从大危机中幸存下来，把痛苦延长一点点又有什么意义呢？在宇宙的万亿年中，毁灭发生在末日来临之前的1 000万年还是100万年，这对年龄为几万亿年的宇宙来说是完全不一样的。但我们不能忘记时间是相对的，人类后代的主观时间将取决于他们的新陈代谢率和信息处理速度。假设

他们有足够的时间来改造身体形态，那么就有能力在冥王[(9)]逼近的过程中获取永生。

温度升高意味着粒子运动得更快，物理过程也将发生得更快。一个有思想的人必须具备处理信息的能力。在一个温度不断升高的宇宙中，信息处理速度必然也要加快。对于可以在10亿年的时间尺度上利用热力学过程的超人类来说，宇宙的毁灭似乎还需要几年的时间才会到来。只要剩余的时间能在头脑中被无限延长，就不必担心时间的终结。从原则上来说，随着坍缩增速至最后的大危机，未来人类的主观经验可以更快地膨胀，这样就能够以不断加快的思考速度去应对加速到来的世界末日。只要有足够的资源，人类就可以赢得时间。

有人可能想知道，在最后时刻，居住在坍缩宇宙的超人类在有限可用的时间内是否拥有无限的独特思想和经验呢？约翰·巴罗和弗兰克·蒂普勒对此展开了研究。答案取决于最后阶段的物理细节。比如，在接近最终奇点的过程中，如果宇宙的速度保持一致，就会出现一个关键的问题。无论思考的速度如何，光速都保持不变，并且光每秒最多可以传播一光秒的距离。由于光速决定了任何物理效应传播的极限速度，因此，在最后一秒内，在间隔大于一秒的宇宙空间之间不会发生通信（这是事件视界的另一个例子，类似于防止信息从黑洞中逃脱）。随着末日的来临，可通信区域的大小和它们所包含的粒子数量会缩小到零。为了使系统能够处理信息，系统的所有部分都需要通信。很明显，随着末日的来临，有限的光速会限制任何可能存在的“大脑”的大小，这反过来又会限制这种大脑可能拥有的不同独特状态的数量，也就是大脑拥有的想法的数量。

为了逃避这种限制，宇宙坍缩的最后阶段必须偏离均匀性。事实上，这种限制发生的可能性非常大。对引力坍缩的大量数学研究表明，随着宇宙的内爆，坍缩的速度将在不同的方向上发生变化。奇怪的是，这不仅仅是宇宙物质在一个方向上比另一个方向收缩得更快的

问题，而是会发生振荡，所以坍缩最快的方向会不断变化。事实上，宇宙会在不断增加的暴力和复杂性的周期摆动中走向灭绝。

巴罗和蒂普勒推测，这些复杂的振荡会导致事件视界首先在一个方向上消失，然后又在另一个方向上消失，这样变来变去的形式使空间的所有区域都能保持联系。任何超级大脑都需要快速思考，并将通信从一个方向切换到另一个方向，因为振荡会使一个又一个方向的坍缩加速。如果超人类能跟得上这个速度，振荡本身就可以提供必要的能量来驱动思维过程。此外，在简单的数学模型中，终止于大危机的振荡在大危机到来前的有限时间中，似乎是无穷无尽的，这就提供了无限量的信息处理能力。根据这个假设可以得出，超人类的主观时间是无限的。因此，即使物质世界在大危机中突然终结，精神世界也可能永远不会结束。

一个拥有无限能力的大脑能做什么呢？按照蒂普勒的说法，它不仅能够研究自身存在的各个方面和宇宙的各个方面，凭借其无限的信息处理能力，它还能继续在虚拟现实的狂欢中模拟虚拟世界。以这种方式内化的可能宇宙的数量将是无限的。这样一来，宇宙的最后三分钟不仅会延续到永恒，而且还能模拟各种各样的宇宙。

不过，这些推测取决于非常特殊的物理模型，可能完全不现实。这些推测还忽略了量子效应，而量子效应可能会主导引力坍缩的最后阶段，而且可能会对信息处理速度设置终极限制。如果是这样的话，我们希望，宇宙超人类或超级计算机至少能在可用的时间内对自身的存在产生足够的了解，并接受自己必然走向灭亡的命运。

THE LAST THREE MINUTES

10
暴卒和突生

即使我们的后代有一天必须面对最后三分钟，某种有意识的生物可能总是存在于某个地方。

到目前为止，我总是假定宇宙的终结发生在非常遥远的未来，无论是轰轰烈烈的大事件，还是凄凄惨惨的小悲切（或者更准确地说，是大危机或者冷冻）。如果宇宙开始坍缩，我们的后代将有数十亿年的时间来准备应对。不过，还有一个更令人担忧的可能性。

正如我之前解释的那样，当天文学家观察天空时，他们看不到宇宙的当前状态，看到的只是宇宙瞬间的一张快照。因为光从遥远的地方到达地球需要时间，所以我们在空间中看到的任何天体，都是该天体在光出发之时的一瞬。望远镜也是一个望时镜。天体离得越远，其年代就越久远。天文学家眼中的宇宙其实是向前穿越时空得到的一张快照，专业术语是“过去光锥”，见图10-1。

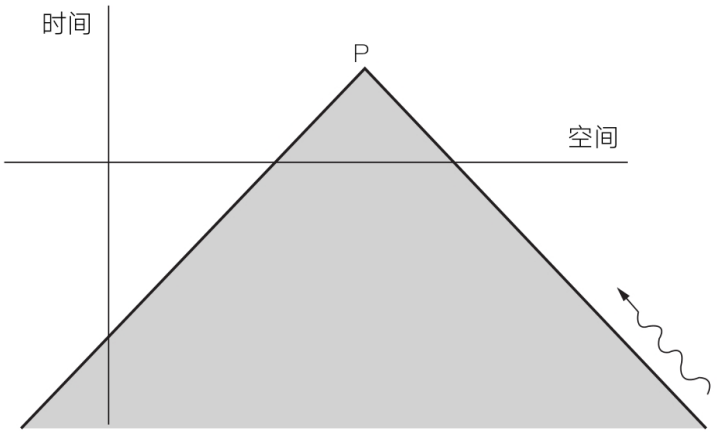


图10-1　天文学家眼中的宇宙

注：一位天文学家从某个时空点P（此时此地）观察宇宙，他实际上看到的是过去而非现在的宇宙。沿着以P为顶点的“过去光锥”到达的信息用斜线表示。这些斜线表示过去从宇宙的遥远地方汇聚在地球上的光信号的路径。由于没有任何信息或物理现象能比光传播得更快，所以，观察者在图示时刻只能知道阴影区域发生的影响或者事件。“过去光锥”之外的世界末日事件可能正在向地球发送灾难性的信号（波浪线），但观察者在影响到达之前并不会注意到这一点，这大约也是一种幸福。

根据相对论，没有任何信息或物理现象能比光传播得更快。因此，“过去光锥”不仅标志着所有关于宇宙的知识的界限，而且也标

志着此刻所有可能影响我们的事件的界限。由此可见，任何以光速向我们袭来的物理影响都是毫无预兆、无法预防的。如果大灾难沿着“过去光锥”朝我们而来，厄运就会在没有预兆的情况下来临。我们首先要知道的是，大灾难什么时候会来临。

举一个简单的例子，如果太阳现在发生爆炸，那么大约8分半钟后我们才会知道这一事实，这是光从太阳到达地球所需要的时间。同样，附近的一颗恒星很有可能已经爆发成超新星了，这一事件可能使地球沐浴在致命的辐射中，但当坏消息以光速穿越银河系时，我们仍将对此一无所知。尽管现在的宇宙看起来非常安静，但我们并不能确定真正可怕的事情有没有发生，有可能已经发生了。

宇宙中大多数突发性暴力事件所造成的损害仅限于宇宙的直接受害区域。恒星死亡或者物质进入黑洞，只会扰乱行星和附近那些距离几光年远的恒星。最壮观的爆发可能源于一些降临到某些星系核心的事件。正如我所描述的，巨大的喷射物有时会以接近光速的速度喷射出来，同时释放出巨量辐射，这就是银河系尺度上的暴力事件。

宇宙大毁灭事件又会是何种情形呢？可能会发生大震动吗，就像中年时的一次中风摧毁一个人那样，一下子摧毁整个宇宙？真正的宇宙大灾难可能已经触发了吗？会不会它令人不快的影响正在席卷“过去光锥”，正在向时空中脆弱的生态位逼近？

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）在《物理评论D》（*Physical Review D*）期刊上发表了一篇题为《引力对真空衰变的影响以及真空衰变对引力的影响》（*Gravitational Effects on and of Vacuum Decay*）的令人担忧的论文。他们所指的真空不仅是真空空间，而且是量子物理的真空状态。在第3章中，我已经解释了，人类眼中的真空状态实际上是被短暂的量子填充，就像幽灵般的虚粒子在随机的嬉戏中出现又消失一样。回想一下，这种真空状态可能不是唯一的，可能会

有几个量子态，它们看起来都是空的，但拥有不同程度的量子活动和不同的关联能量。

高能量态趋向于衰变为低能量态，这是量子物理学中的一条原理。比如，一个原子可能存在于一系列的激发态中，所有这些激发态都是不稳定的，并且会试图衰变到最低能量，即稳定的基态。同样，一个激发态的真空会衰变为最低能量态，或者真真空。非常早期的宇宙处于激发态或者伪真空状态，在此期间，它急速暴胀，但在很短的时间内，这种状态会衰减到真真空状态，暴胀就此停止。

通常的假设是，宇宙的当前状态对应的是真真空，也就是说，我们这个时代的真空是能量最低的真空。但这一点是确定的吗？科尔曼和德·卢西亚认为，目前的真空可能不是真真空，而是一种长期存在的、可转移的伪真空，这种真空使我们陷入了一种虚假的安全感中，因为它已经持续了数十亿年。我们知道许多量子系统的半衰期为数十亿年，比如铀原子核。你认为当前真空属于这一类吗？科尔曼和德·卢西亚论文标题中提到的“真空衰变”是指灾难的可能性，即当前真空可能会突然失效，使宇宙进入一个更低的能量状态，从而带来可怕的后果。

科尔曼和德·卢西亚假说中的关键是量子隧穿效应。量子粒子被力的势垒俘获的情景可以很好地解释量子隧穿效应。假设粒子位于两个由丘陵中间的小山谷中，如图10-2所示。当然，这不一定是真正的山丘，比如，它们可以是电场或者核力场。在没有超越山丘（或克服力障）所需能量的情况下，粒子就会永远被捕获。但请记住，所有的量子粒子都受制于海森堡提出的不确定性原理，该原理允许粒子在短时间内借用能量。这带来了一个有趣的可能性。如果粒子能借用足够的能量到达山顶，并且必须在能量耗尽之前穿过另一侧，它就可以从陷阱里逃逸出来。实际上，它会借助隧道穿越势垒，好像它根本就没有在来的地方待过一样。

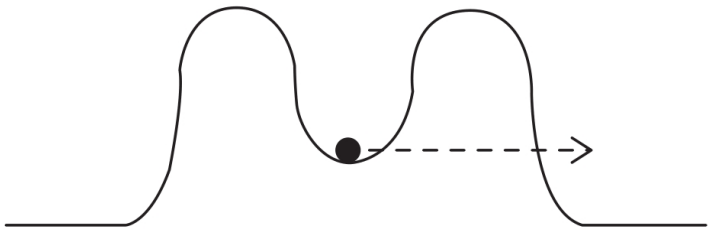


图10-2　量子隧穿效应

注：如果量子粒子被困在两个山丘之间的山谷中，那么它将通过借用的能量越过山丘而逃逸的可能性很小。实际上，这是通过穿越势垒形成的量子隧穿效应。一种常见的情况是，某些元素原子核中的α粒子穿过核力势垒，然后飞离原子核，这种现象被称为α放射性。在这个例子中，“山”由核动力和电力组成，这里画的只是示意图。

量子粒子从这样的陷阱中穿洞而出的概率在很大程度上取决于势垒的高度和宽度。势垒越高，粒子需要借用的能量就越多，才能到达山顶。此外，根据不确定性原理，相应的能量借贷期限也越短。因此，只有当高势垒很薄时，量子粒子才能利用隧穿效应足够快地穿过势垒，按时偿还借来的能量。量子隧穿效应在日常生活中并不明显，因为宏观势垒太高太宽，量子无法产生巨大隧穿效应。从原则上来说，一个人可以步行穿过一堵砖墙，但促使发生这种奇迹般的量子隧穿效应的概率非常小。而在原子尺度上，量子隧穿效应是非常常见的。比如，α放射性正是通过这种机制出现的。量子隧穿效应还被用在了半导体和其他一些电子产品上，比如扫描隧道显微镜。

关于真空可能衰变的问题，科尔曼和德·卢西亚推测，构成真空的量子场可能会受到如图10-3所示的力的影响（这里只是一种比喻）。目前的真空状态对应A谷底部，真真空对应B谷底部，低于A谷。真空想要从高能量状态A衰变到低能量状态B，会受到分离它们的“小山”或力场的阻止。尽管山丘阻碍了衰变，但由于量子隧穿效应，它并不能完全阻止衰变：系统可以从A谷穿到B谷。如果这一理论是正确的，那么宇宙就是在借来的时间上生存，挂在A谷的上方，但它一定有机会在某个任意时刻借助量子隧穿效应进入B谷。

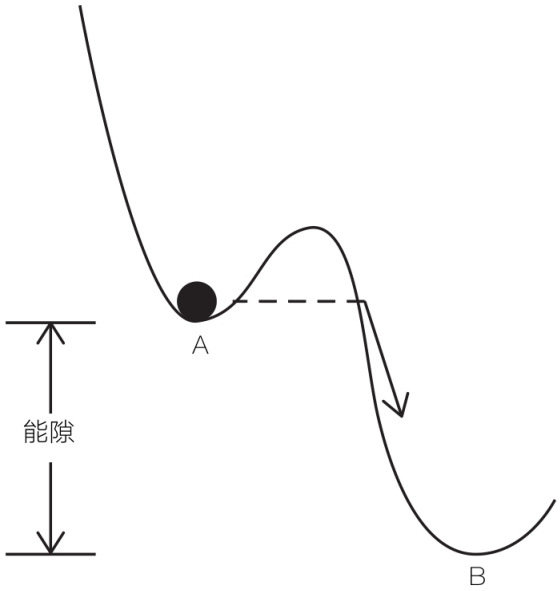


图10-3　伪真空态和真真空态

注：可能出现这样的情况：真空A的当前量子态可能不是最低能态，但即使如此，该真空A却能通过一种高空谷状态保持准稳。然后，这种量子态借助隧穿效应衰减到真正稳定的基态B的可能性很小。真空气泡的形成促成了这些状态之间的转换，从而释放出大量的能量。

科尔曼和德·卢西亚用数学方法模拟了真空的衰变，以追踪这种现象的发生方式。他们发现，衰变从空间中的一个随机位置开始，以一个真真空的小气泡的形式出现，周围是不稳定的伪真空。一旦真真空的气泡形成，它将以接近光速的速度快速膨胀，吞没越来越大的伪真空区域，并瞬间将其转化为真真空。这两种状态之间的能量差可能具有我在第3章讨论过的那种巨大价值，它集中在气泡壁上，并横扫整个宇宙，这意味着它经过时遇到的一切事物都会被毁掉。

只要当气泡壁出现，世界的量子结构突然发生变化时，我们才会知道真真空气泡的存在。我们甚至连三分钟的警告时间都没有。瞬间，所有亚原子粒子的性质及其相互作用都会发生剧烈变化；比如，质子可能会立即衰变，在这种情况下，所有物质都会突然蒸发。剩下

的东西会处于真真空气泡中——一种与我们目前所观察到的状态非常不同的真空态。最重要的区别与引力相关。

科尔曼和德·卢西亚发现，真真空的能量和压力会产生一种强烈的引力场，该引力场极其强烈，即使气泡发生了膨胀，真空气泡所包围的区域也会在不到一微秒的时间内坍缩。这一次，不像缓缓到来的大危机那样，真空气泡所包围的区域会内爆缩成一个时空奇点，一切都会突然湮灭。简而言之，这是一场瞬时的大灾难。“这太令人沮丧了，”两位作者巧妙而又轻描淡写地进行了评论，“我们生活在一个伪真空中的可能性从来都不令人振奋和值得期待。真空衰变是生态大灾难。当真空衰变后，我们所知道的生命不可能幸存，也不可能出现化学反应。然而，人们总是试图从这样一种可能性中获取安慰：也许在一段时间后，新的真空会持续下去，即使不是我们所熟悉的生物，至少也是我们知道的某些结构。然而，这种可能性现在已经被排除了。”

科尔曼和德·卢西亚的论文发表后，真空衰变可能会产生的可怕后果成为物理学家和天文学家讨论的热门话题。在发表于《自然》上的一项后续研究中，宇宙学家迈克尔·特纳（Michael Turner）和物理学家弗兰克·威尔茨克（Frank Wilczek）得出了一个天启式的结论：“从微观物理学的角度来看，我们的真空是亚稳态的，这是完全可以想象的……真真空气泡可能会毫无预警地在宇宙的某个地方成核，并以光速向外移动。”

特纳和威尔茨克的论文发表后不久，彼得·胡特（Piet Hut）和马丁·里斯也在《自然》上发表了一篇文章，提出了一个令人恐慌的论点，即一个使宇宙遭到破坏的真空气泡之所以成核，可能是由粒子物理学家无意中触发的。令人担忧的是，亚原子粒子的高能碰撞可能会在一个很小的空间内瞬间创造条件，并促使真空原子衰变。一旦发生这种转变，即使在微观尺度上，也无法阻止新形成的气泡快速膨胀

到天文尺度。那么，我们应该禁止建造下一代粒子加速器吗？胡特和里斯对此进行了重新评估，他们指出，一方面，宇宙射线所获得的能量比我们在粒子加速器中所能获得的能量要高，而这些宇宙射线已经在地球大气中撞击原子核有数十亿年了，并没有引发真空衰变。另一方面，随着加速器能量提高几百倍左右，我们也许能够制造出比宇宙射线对地球的撞击更有能量的碰撞。然而，真正的问题不是真空气泡的成核现象是否会在地球上出现，而是它是否在大爆炸之后的某个时刻在可见宇宙中的某个地方已经成核。胡特和里斯还指出，两条宇宙射线发生迎面碰撞的概率非常小，其能量比现有加速器可能的能量高出10亿倍。综上所述，我们现在还不需要完善的监管设备对其进行监管。

矛盾的是，真空气泡成核的现象虽然会威胁宇宙的存在，但在稍有差异的背景下，这又被证明是宇宙居民唯一可选的拯救方式。逃避宇宙灭亡的一个可靠方法是，创造一个新的宇宙并逃到那里。这听起来像一种疯狂的幻想，但近年来，“婴儿宇宙”已经成为科学家广泛研究的话题，有关它是否存在的争论也非常严肃。

这一课题最初是1981年由一个日本物理学家小组提出来的，他们用一个简单的数学模型对一个被真真空包围的伪真空小气泡的行为变化特性进行了研究，结果与刚才讨论的情况相反。据预测，伪真空气泡将以第3章描述的方式膨胀，在大爆炸中迅速膨胀成一个大宇宙。起初，伪真空气泡的膨胀必然会引起气泡壁的膨胀，以至于伪真空区域发生增长，代价是牺牲真真空区域。但这与低能量态的真真空应该取代高能量态的伪真空的预期相矛盾。

奇怪的是，从真真空来看，伪真空气泡占据的空间区域似乎没有膨胀。实际上，它看起来更像一个黑洞，类似神秘博士的时间机器塔迪斯(10)，里面看起来比外面大。位于伪真空气泡内的观察者会看到宇宙膨胀到巨大的尺度，但从外部看，这个气泡仍然是致密的。

为了观察这种特殊情况，我们可以用一块橡胶板来做类比。设想橡胶板的一个地方起了一个气泡，然后膨胀起来（见图10-4）。气泡形成一种婴儿宇宙，通过脐带或“虫洞”与母体宇宙相连。从母体宇宙来看，虫洞的喉部似乎是一个黑洞。这种结构是不稳定的，因为黑洞很快会被霍金效应蒸发，完全从母体宇宙中消失。结果是，虫洞被挤压掉了，与母体宇宙分离的婴儿宇宙变成了一个新的、独立的宇宙。假设从母体宇宙那里萌芽出来之后，婴儿宇宙的发展与当前宇宙的发展是一样的：短暂的暴胀，然后减速。这个模型有一个明显的含义，即我们自己的宇宙可能是以这种方式作为另一个宇宙的后代而产生的。

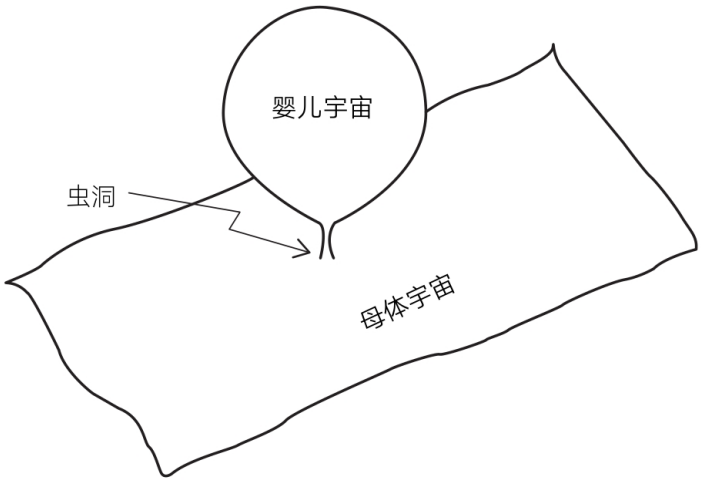


图10-4　婴儿宇宙模型图

注：气泡像气球那样从母体宇宙中被释放出来，形成一个婴儿宇宙，通过一个脐带一样的虫洞与母体宇宙相连。从母体宇宙的角度来看，虫洞的喉部似乎是一个黑洞。随着黑洞的蒸发，虫洞的喉部被掐掉，进而切断了母体宇宙与婴儿宇宙的连接，使婴儿宇宙成为一个独立存在的宇宙。

暴胀理论的提出者艾伦·古斯（Alan Guth）和他的同事已经研究了在实验室里创造出新宇宙的可能性。这个实验不像将伪真空衰变为真真空气泡那样骇人听闻，创造一个被真真空包围的伪真空气泡，并不会威胁到宇宙的存在。事实上，尽管实验可能会引发大爆炸，但爆

炸将完全局限在一个很快会蒸发的小黑洞内。新宇宙将创造一个属于自己的空间，而不是吞噬掉宇宙中任何一个空间。

尽管这个想法仍然是推测性的，并且完全基于数学推理，但一些研究表明，沿着这种思路，通过以精心设计的方式集中大量的能量，我们有可能会创造出一些新宇宙。在遥远的将来，当目前的宇宙变得不适合居住或接近大危机时，我们的后代可能会永远离开之前的宇宙，启动新宇宙的萌芽过程，然后在虫洞的脐带被掐掉之前，爬进临近的宇宙，完成移民的终极目标。当然，没有人知道这些无畏的人类如何完成或者能否完成这一壮举。至少，穿过虫洞的旅程会很不舒服，除非他们钻进去的黑洞非常大。

忽略这些实际问题，婴儿宇宙的这种可能性为我们的后代以及宇宙带来了真正永恒的前景。我们应该考虑的不是宇宙的生死，而是一个宇宙家族的无限繁衍，每一个家族都会孕育出新一代的宇宙，新宇宙也许会成批诞生。有了这样的宇宙繁衍，宇宙的集合或元宇宙（正如它真正应该被叫的名字）可能没有开始也没有结束。每一个单独的宇宙都会以本书前几章所描述的方式诞生、演化和消亡，但作为一个整体，这个集合将永远存在。

这种设想引发了这样一个问题：创造出一个像当前宇宙一样的新宇宙是自然事件（比如自然分娩的婴儿），还是蓄意操纵的结果（比如试管婴儿）。我们可以假设母体宇宙中有一个相当先进而又利他的人类社会，他们决定创造一个幼小的宇宙，但目的不是为自己的生存提供逃生之路，而仅仅是为逃离宇宙注定消亡的结局，让生命永久存在。这就消除了在决定建造可穿越的虫洞进入婴儿宇宙时面临的巨大障碍。

我们尚不清楚婴儿宇宙会在多大程度上带有其母亲的遗传印记。物理学家还不明白各种自然力和物质粒子为什么具有各自的特性。一方面，这些特性可能是自然规律的一部分，在任何宇宙中一旦被确

定，所有宇宙中的物质都会受这些规律的制约。另一方面，某些特性可能是演化中发生的意外事件的结果。比如，可能有几个真真空都具有相同或者几乎相同的能量，也有可能当伪真空衰退到暴胀期结束时，它只是从众多可能的真空状态中随机选择了一个。就宇宙的物理学而言，真空态的选择将决定粒子的许多特性以及它们之间的作用力，甚至可以决定空间的维度。婴儿宇宙可能和母体宇宙有完全不同的性质，也许只有极少数的后代才有可能拥有生命，婴儿宇宙的物理学与当前宇宙的物理学应该非常相似。或者，也许有一种遗传原理可以确保婴儿宇宙紧密地继承母体宇宙的属性，除了奇怪的变异之外。物理学家李·斯莫林（Lee Smolin）就提出，婴儿宇宙中可能存在一种达尔文式的进化在宇宙间运行，间接地鼓励生命和意识的出现。

更有趣的是，宇宙可能是在母体宇宙中通过智能操控的方式被创造出来的，并被刻意赋予了产生生命和意识的必要属性。这些想法都不是毫无根据的胡思乱想，宇宙学仍然是一门非常年轻的科学。上述奇思妙想至少可以作为前几章悲观预测的某种安慰。它们暗示了这种可能性：即使我们的后代有一天必须面对宇宙的最后三分钟，但某种有意识的生物可能总是存在于某个地方。

THE LAST THREE MINUTES

11
世界没有尽头吗

宇宙可能会膨胀到最大尺度，然后发生大坍缩，但坍缩并不一定意味着完全自我毁灭，也可能是以某种方式“反弹”，开始另一轮膨胀和坍缩的循环。

我在第10章末尾讨论的奇怪想法并不是逃避宇宙末日的唯一可能性。每当我讲述宇宙的终结时，总会有人问我关于循环宇宙模型的问题。我对此的想法是：宇宙膨胀到最大尺度后会发生大坍缩，但坍缩并不一定意味着完全自我毁灭，而是以某种方式“反弹”，开始另一轮膨胀和坍缩的循环（见图11-1）。这一过程可能会永远持续下去，在这种情况下，宇宙将没有真正的开始或结束，即使每一个宇宙的循环都有一个独特的开始和结束。循环宇宙模型是一种理论，特别吸引那些受印度教和佛教神话影响的人，在这些神话中，出生和死亡、创造和毁灭的循环是教义的重要组成部分。

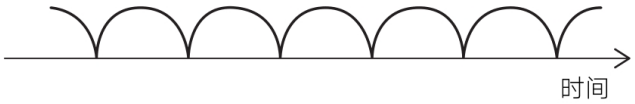


图11-1　循环宇宙模型

注：宇宙以周期性的方式在非常紧密的状态和非常膨胀的状态之间波动。每轮循环都从大爆炸开始，以大危机结束，并且在时间上近似对称。

关于宇宙的终结，我提出了两种截然不同的科学设想，每一种设想都会让人产生不安的情绪。第一种设想是，宇宙会在大危机中完全湮灭，但这一事件可能在遥远的将来才会发生。第二种设想是，宇宙在有限的辉煌活动期之后，会永恒地陷入一种苍凉虚无的热寂状态，这也是非常令人沮丧的。事实上，每种设想都有可能使我们的超人类后代获得无限的信息处理能力，这对热情的我们来说可以算作一种冷酷的安慰。

宇宙循环模型的魅力在于，它避开了“完全湮灭”这个幽灵，其中的宇宙不会永久地退化和衰变。为了避免无止境的徒劳重复，每次循环之间应该有所不同。这个理论的一个流行版本是，每一个新的循环都像凤凰涅磐一样从死亡中重生，新宇宙从上一个宇宙的死亡中诞

生，演变出新的系统和结构，并在下一次大危机清除干净往事之前，探索新的丰富多彩的世界。

尽管这个理论看起来很有吸引力，但不幸的是，它也存在严重的物理问题亟须解决。其中之一是，确定一个可信的过程，能允许坍缩的宇宙以某个非常高的密度反弹，而不是在大危机中湮灭。在坍缩后期，必须存在某种逐渐增强的反引力，以扭转内爆的势头，对抗强大的引力挤压力。目前我们还不知道是否存在这种力，如果它存在，其性质一定很奇特。

暴胀理论正是假设了存在这种强大的排斥力。然而，产生暴胀力的激发态真空是高度不稳定的，很快就会衰退。虽然我们可以想象这种微小而又简单的新生宇宙本就应该起源于这样一种不稳定的状态，但如果假定宇宙在一个复杂的宏观条件下会收缩，并可以在任何地方恢复到激发态真空，就是另一回事了。这种情况类似于将一支铅笔笔尖朝下立起，铅笔很快倒掉一样，倒掉很容易，但使它笔尖朝下立起来就难多了。

即使假设可以以某种方式克服这些问题，但循环宇宙理论仍然存在严重的问题。其中一个难题我已经在第2章讨论过。受以有限速度进行的不可逆的过程支配的系统在一段有限的时间后，趋向于达到最终状态。正是这个原理在19世纪引出了宇宙热寂的预测。宇宙循环理论并不能克服这一困难。我们可以将宇宙比作一个缓慢减速的时钟，除非以某种给定的方式重新运转，否则它的活动将不可避免地终止。什么机制能够在宇宙时钟自身不受不可逆转过程支配的情况下重新运转起来呢？

乍一看，宇宙的坍缩阶段似乎是膨胀阶段出现的那些物理过程的逆转。分散的星系被拉回到一起，冷却的宇宙微波背景辐射被重新加热，复杂的元素又被分解成一锅基本粒子汤。大坍缩前的宇宙状态与大爆炸后的宇宙状态非常相似。然而，对称只是表面的。我们可以从

下面这个事实中得到证明：当宇宙膨胀变成坍缩时，生活在坍缩时期的天文学家在数十亿年中还能继续看到遥远的星系在退行，宇宙看起来仿佛仍然在膨胀，尽管它正在坍缩。这种错觉是由有限的光速造成的滞后现象。

20世纪30年代，宇宙学家理查德·托尔曼（Richard Tolman）展示了这种滞后现象是如何破坏循环宇宙的表面对称性的。原因很简单。宇宙是携带着大爆炸后遗留的大量热辐射开始向外膨胀的。随着时间的推移，星光增强了这种辐射，因此在经过几十亿年后，宇宙空间中积累的星光所包含的能量几乎与背景热能一样多。这意味着，宇宙在接近大危机时，散布在整个宇宙中的辐射能比大爆炸刚刚发生后的辐射能要多得多。所以，当宇宙最终坍缩到与当前宇宙相同的密度时，它会变得更热。

根据爱因斯坦的方程式$E=mc^2$，超额的热能是由宇宙包含的物质提供的。在产生热能的那些恒星内部，氢等轻元素被加工成铁等重元素。一个铁原子核通常含有26个质子和30个中子。这样的原子核的质量应该是26个质子和30个中子的质量，但事实并非如此。这个组装后的原子核比单个粒子的质量总和轻约1%。“遗失”的质量是由强大的核力在原子核内产生的巨大束缚能造成的。这部分能量所代表的质量被释放出来提供给了星光。

这一切的结果便是，能量从物质完全转化为辐射。因为辐射的引力与具有相同能量的物质的引力大不相同，所以这种转化对宇宙坍缩的方式有着重要的影响。托尔曼指出，宇宙坍缩阶段的超额辐射会使宇宙的坍缩速度变得更快。如果以某种方式使反弹出现，那么宇宙也会以更快的速度膨胀。换句话说，每一次大爆炸都应当比上一次更大。结果便是，随着每个新的循环的开始，宇宙将会膨胀到更大的尺度，因此循环将逐渐变大，时间变长（见图11-2）。

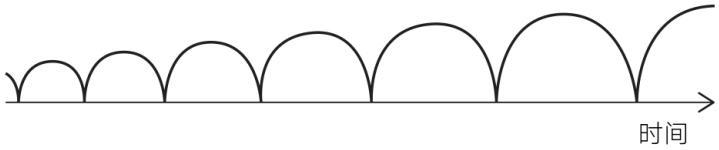


图11-2　不断增大的循环宇宙模型

注：一些不可逆的过程导致宇宙循环变得越来越大，从而破坏了真正的循环。

宇宙循环这种不可逆的增长过程并不神秘，这是热力学第二定律的必然结果。辐射的累积代表着熵的增加，它以循环越来越大的形式在引力上表现出来。然而，它确实终结了真正的循环，因为宇宙会随着时间的推移而演化。回溯过去，这些循环串联在一起形成了一个复杂而混乱的开始，而未来的循环无限膨胀，直到它们变得很长很长，以至于任何一个给定的循环在很大程度上都无法与宇宙膨胀模型的热寂情景区分开来。

自托尔曼提出宇宙循环的对称性会遭到破坏的观点以来，其他宇宙学家也发现，一些物理过程也会破坏每一次循环的膨胀和坍缩阶段的对称性。其中一个例子是黑洞的形成。在标准模型中，宇宙开始时没有任何黑洞，但随着时间的推移，恒星的坍缩和其他过程会导致黑洞形成。随着星系的演化，越来越多的黑洞出现了。在宇宙坍缩的最后阶段，压缩将促使形成更多的黑洞，一些黑洞还可能合并形成更大的黑洞。因此，宇宙在接近大危机时的引力结构比大爆炸刚发生时更加复杂，因为此时的黑洞更多。如果宇宙开始反弹，下一轮循环将会以比前一轮拥有更多的黑洞开始。

这一结论似乎是不可避免的，任何一种循环宇宙，只要它允许将物理结构和物理系统从一轮循环传播到下一轮循环，就无法规避热力学第二定律的退化影响，热寂还是会出现。回避这一令人沮丧的结局的一种方法是，假设宇宙反弹时的物理条件是非常极端的，以致有关早期循环的信息无法传递到下一轮循环宇宙。所有先前的物理物体都被摧毁，所有的影响统统消失，新宇宙完全是从无到有重生的。

然而，这种模式并没有什么吸引力。如果每个循环在物理上与其他循环是断开的，那么一定要说这些循环是相互继承的，或者说代表同一个宇宙以某种方式获得了延续，有什么意义呢？这些说循环宇宙实际上是截然不同的独立宇宙，可以说是平行存在的，而不是以某种次序存在的。

另一种方法是，假设热力学第二定律被违反了，所以在宇宙反弹时，“时钟重新运转起来”。热力学第二定律失效导致的破坏意味着什么？我们举一个热力学第二定律起作用的简单例子，比如香水从瓶子里蒸发出来。逆转香水的命运将需要大规模的、有组织的协调安排，如同一场大阴谋。在这场阴谋中，整个房间里的每一个香水分子都要被吸回到瓶子里去。这就像一部倒放的“电影”。正是从热力学第二定律中，我们认识到了过去与未来之间的区别——时间箭头。因此，违反热力学第二定律就意味着时间的倒转。

当然，当听到世界末日的霹雳声时，假定时间可以发生简单的逆转，以逃避宇宙的灭亡，这多多少少是一种无能的表现。这就好比当旅途变得艰难时，人们只是在倒放这部伟大的宇宙影片！尽管如此，这个想法还是吸引了一些宇宙学家。20世纪60年代，天体物理学家托马斯·戈尔德（Thomas Gold）提出，对于一个再次坍缩的宇宙来说，在坍缩阶段，时间可能会倒流。他指出，这种倒流将包括在那段时间周围的任何生物的大脑功能，因此这使他们的主观时间感也倒了过来。因此，坍缩阶段的居民不会看到他们周围的一切东西在“往回跑”，而是会像我们一样经历事件的向前流动。比如，他们会发觉宇宙在膨胀，而不是坍缩。但在他们看来，我们的宇宙正处于坍缩阶段，我们的大脑则是向后退行处理问题的。

20世纪80年代，斯蒂芬·霍金也曾考虑过时间逆转宇宙的想法，后来放弃了，不过他也承认这是他“最大的错误”。霍金起初认为，将量子力学应用于循环宇宙需要详细的时间对称性。然而，事实证

明，至少在量子力学的标准公式中，情况并非如此。最近，物理学家默里·盖尔-曼（Murray Gell-Mann）和詹姆斯·哈妥（James Hartle）讨论了对量子力学规律的某种修正。修正的规律简单地强制设定了时间的对称性，然后探讨了这种情况在当前宇宙中是否会引起任何可观察到的结果。到目前为止，我们还不清楚答案是什么。

俄罗斯物理学家安德烈·林德（Andrei Linde）提出了一种完全不同的避免宇宙灭亡的方法，该方法基于宇宙暴胀理论。在最初的暴胀宇宙设想中，人们认为非常早期的宇宙的量子状态对应的是一个特定的激发态真空，这种真空有暂时驱动失控的暴胀现象。1983年，林德提出，早期宇宙的量子态可能会以一种混沌的方式因地而异，有些区域是低能态，有些是中等激发态，而某些区域则是高激发态。处于激发态的地方就会发生暴胀。此外，林德对量子态行为的计算清楚地表明，高激发态的暴胀速度最快，衰变速度最慢。因此，在特定的空间区域中，能态激发得越高，宇宙在该区域的暴胀就越剧烈。很明显，在很短的时间后，能量达到最大化，暴胀最快的空间区域膨胀得也最大，占据了整个空间的最大部分。林德还将这种情况同达尔文进化论或者经济学联系了起来。如果一个量子成功地涨落到一个非常强烈的激发态，尽管这意味着要借用大量的能量，但作为回报，该区域的体积会出现巨大增长。因此，那些借了很多能量、处于超级暴胀的区域很快占据了主导地位。

这种无序暴胀的结果便是，宇宙将被分割成一个个小宇宙，或者气泡，有些在疯狂地暴胀，有些则完全不暴胀。因为一些区域（仅仅是随机波动的结果）会有非常大的激发能，这些区域的暴胀会比原始理论中假设的暴胀强烈得多。但因为这些恰恰是暴胀最严重的区域，在后暴胀宇宙中随机选择的一个点很可能位于这样一个高度暴胀的区域。因此，我们的宇宙可能就位于一个超级暴胀区域的深处。林德计算出，这样的大气泡可能已经膨胀了10^8倍，即1后面跟着1亿个零！

当前的超级宇宙不过是众多高度暴胀的宇宙气泡中的一个，因此，在巨大的宇宙尺度上，宇宙看起来仍然非常混乱。我们这个宇宙气泡的延伸距离之远大大超出了当前可见宇宙的范围，在它的内部，物质和能量几乎均匀地分布，但在我们的气泡之外，还存在着其他气泡以及仍处于暴胀过程中的区域。事实上，在林德的模型中，暴胀永远不会停止：总有一些空间区域正发生暴胀，新的气泡正在形成，即使其他的一些气泡走完循环已经死亡。这是另一种形式的永恒宇宙，类似于第10章讨论的婴儿宇宙理论。在这种宇宙中，生命、希望和宇宙都是永恒的。目前这种宇宙模型还存在一些争论，因暴胀产生的新气泡宇宙可能永不会结束，也可能不会开始。

其他宇宙气泡的存在能否为我们的后代提供一条生命线呢？他们能否在适当的时候转移到另一个更年轻、拥有大量时间的宇宙气泡中，来避免宇宙气泡的末日呢？1989年，林德在《物理快报》（*Physics Letters*）上发表了一篇题为《暴胀后的生命》（*Life after Inflation*）的文章，探讨的正是这个问题。他写道：“这些结果意味着，在暴胀宇宙中，生命永远不会消失。不幸的是，这个结论并不意味着人们可以据此对人类的未来会感到乐观。”林德指出，任何特定的领域或宇宙气泡，都将慢慢变得不适合居住。林德总结道：“我们现在所能看到的唯一可能的生存策略是从旧区域搬到新区域。”

令人沮丧的是，在林德的暴胀理论版本中，一个典型的宇宙气泡的尺度是巨大的。他计算出，离我们最近的宇宙气泡可能非常遥远，如果以光年为单位，1后面必须跟几百万个零，这个数字太大了，要一本百科全书才能完整地写出来。即使以接近光的速度旅行，若想到达另一个宇宙气泡，也要花费同样的时间，除非我们运气非常好，碰巧处于宇宙气泡的边缘。林德指出，即使发生上述这种幸运的情况，也只有当我们的宇宙继续以可预测的方式不断暴胀才能获得。

一旦支配宇宙的物质和辐射被无限稀释，即使最微小的物理效应——在当下完全不明显的物理效应，也可能最终会决定宇宙的暴胀方式。比如，宇宙中可能一直就存在着一种极其微弱的暴胀力，目前完全被物质的引力效应淹没，但考虑到人类逃离当前宇宙气泡所需的时间非常长，暴胀力终将被人类觉察到。在那种情况下，因为时间充裕，宇宙将再次暴胀，但这次暴胀不是在疯狂的大爆炸中发生，而是非常缓慢地进行，这种方式就像是对大爆炸的微弱模仿。尽管这种暴胀可能是微弱的，但它将会永远持续下去。宇宙的增长只会以很小的速度加速，而它的加速源自一个至关重要的物理效应。该效应会在气泡中生成一个事件视界，它就像一个里外颠倒的黑洞，实际效果就像一个陷阱。任何活下来的生物都会无助地被深深地埋在我们的宇宙气泡中，这是因为，当它们加速向宇宙气泡的边缘前进时，由于新的暴胀，边缘会退得很快。林德的计算虽然很荒谬，却很好地说明了一点，即未来对人类或我们后代的最终命运产生决定作用的微小的物理效应，在表现出宇宙学意义之前，我们没有希望可以探测到它们。

林德的宇宙学理论在某些方面让人想起了旧的宇宙恒稳态理论，该理论在20世纪50年代和60年代早期非常流行，即使到了今天，它仍然是避免宇宙末日最简单和最有吸引力的学说。在赫尔曼·邦迪（Hermann Bondi）和托马斯·戈尔德所阐述的最初版本中，恒稳态理论假定，宇宙在大尺度上永远保持不变。因此，它没有开始，也没有结束。随着宇宙的膨胀，不断会有新的物质来填补空隙，依次保持总的密度不变。任何给定星系的命运都与我在前面章节中所描述的相似：出生、演化和死亡。但是，越来越多的星系总是在形成，并且总是从新创造的物质中形成，这种物质供应是取之不尽的。因此，从一个时代到下一个时代，宇宙作为一个整体的总体面貌看起来都是相同的，在一个给定的空间中，由不同时代星系组成的星系总数是一样的。

宇宙恒稳态理论不需要解释宇宙是如何从无到有诞生的，它将有趣的变化通过演化与宇宙的永不终结结合了起来。事实上，这种理论保障了恒稳态宇宙可以永远保持年轻，因为尽管单个星系会慢慢死亡，但宇宙作为一个整体永远不会变老。我们的后代也不需要四处寻找难以捉摸的能源，因为新物质是免费提供的。当旧星系的燃料耗尽时，我们的后代就会转移到一个更年轻的星系上。这种状态可以无限地延续下去，宇宙的活力、多样性和活动也将永远保持下去。

然而，若是宇宙恒稳态理论成立，还需要某些必要的物理条件。由于膨胀，宇宙体积每几十亿年便会增长一倍。若想保持恒定的密度，在这段时间内需要创造出大约10^{50}吨的新物质。这虽然看起很多，但平均来说，只相当于每100年在机舱大小的空间内出现一个原子。这种现象我们不太可能会注意到。这个理论还存在一个更严重的问题，其涉及负责创造物质的物理过程的性质。至少，我们应该知道提供额外质量的能量从哪里来，以及这个神奇的能量魔瓶是如何做到取之不尽的。弗雷德·霍伊尔和其合作者贾扬特·纳利卡（Jayant Narlikar）共同解决了这个问题，他们非常详细地发展了宇宙恒稳态理论，提出用一种新的能量场——创造场，来提供能量。创造场被假定具有负能。每一个质量为m的新物质粒子的出现，都会对创造场贡献一个大小为mc^2的负能量。

尽管创造场从技术上解决了创生这个难题，但它仍然存在许多无法解释的问题。创造场很特别，我们从这个神秘场中看不出任何其他表征。然而，20世纪60年代开始，科学家通过观测发现的证据与恒稳态理论相悖，其中最重要的是宇宙微波背景辐射的发现。这种统一的背景辐射被认为是宇宙大爆炸的遗迹，它在恒稳态理论中很难得到令人信服的解释。此外，对星系和射电星系的探测明确无误地证明，宇宙在大尺度上是不断演化的。当证据变得确凿无疑时，霍伊尔和他的同事放弃了宇宙恒稳态理论的简单版本。不过有时候，还是有人会重新提出更复杂的版本。

除了物理和观测问题外，宇宙恒稳态理论还提出了一些奇怪的哲学难题。比如，如果我们的后代拥有无限的时间和资源，他们的技术发展就不会受到限制，他们可以自由地在宇宙中传播，从而控制越来越多的空间。因此，在遥远的未来，大部分宇宙都会实现技术化。但是根据假设，宇宙的大尺度性质应该是不会随时间而变化的，因此恒稳态理论迫使我们不得不得出这样的结论：我们今天看到的宇宙已经被技术化了。由于恒稳态宇宙中的物理条件在所有时期都是完全相同的，所以智慧生命也必须在所有时代出现。因为这种状态永恒存在，有一些人类社区可能已经存在了任意长的时间，并且将会扩展并占据任意大小的空间（包括我们的宇宙），将其技术化。即使假设智慧生命没有移民宇宙的意愿，我们也无法回避这个结论。只要有一个这样的社区在很久以前出现过，这个结论就有效。另外一个难题是：在无限的宇宙中，任何事情，哪怕只有极微小的可能性，都必定会在某个时间段发生，而且会无限次地发生。根据这个逻辑可以得出一个痛苦的结论，恒稳态理论预测，宇宙的种种过程与其居民的技术活动是同一的。事实上，我们所说的大自然就是某种超人类或超人类社会的活动。这似乎是柏拉图式的“造物主”(11)的一个版本，有趣的是，霍伊尔在他后来的宇宙学理论中毫不掩饰地鼓吹了这种超人类。

任何关于宇宙末日的讨论都会迫使我们面对宇宙的目标问题。我已经指出，一个走向灭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，史蒂文·温伯格也表达了同样的观点，他在《最初三分钟》一书中提出了一个鲜明的结论：“宇宙变得越容易理解，它就越显得毫无意义。”我认为，宇宙突然死于一场大危机仍然是有可能发生的，人们最初对宇宙缓慢走向热寂的恐惧有可能被夸大了，甚至可能是错误的。我已经详细介绍了超人类的活动，它们可以在逆境中实现不可思议的物质和精神目标。我还简要地研究了思想没有界限的可能性，即使宇宙有界限。

这些备选方案是否减轻了我们的不安呢？我的一个朋友曾经说过，相比于他所听说的天堂，他对这些方案都不太感兴趣。他觉得永远生活在一种崇高的平衡状态中完全没有吸引力。与其面对永恒生命的无聊，不如快点死去，终结一切。如果永生仅限于一次又一次地永远拥有相同的思想和经验，这确实看起来毫无意义。然而，如果永生与进步相结合，那么我们可以想象，未来人类会生活在一种充满新奇感的状态中，总是在学习或做一些新的、令人兴奋的事情。问题是，这是为什么呢？当人类为了某个目的开始一个项目时，他们心里就有一个特定的目标。如果目标没有实现，项目就失败了（尽管经验未必毫无价值）；如果目标实现了，就意味着项目成功了，活动就会停止。一个从未完成的项目会有真正的目标吗？如果存在一段没有终点的旅程，那么它还有意义吗？

如果宇宙拥有目标，并且已经实现了，那么宇宙就必须终结，因为它的持续存在将毫无理由，也毫无意义。反过来说，如果宇宙永远存在，我们很难想象宇宙会有什么终极目标。宇宙的灭亡可能是宇宙成功的代价。也许我们最希望的是，在宇宙的最后三分钟结束之前，我们的后代就已经得知了宇宙的目标。

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的 “湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

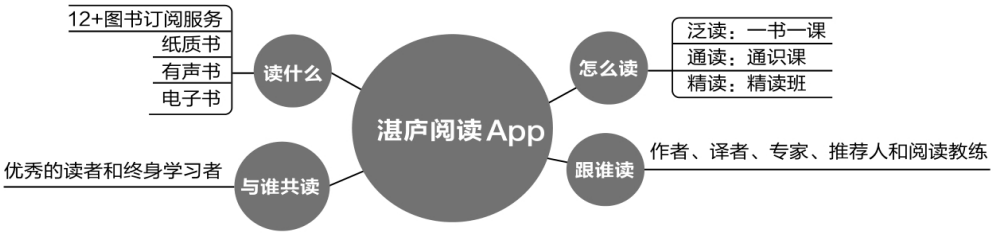
- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：
安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store
直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！

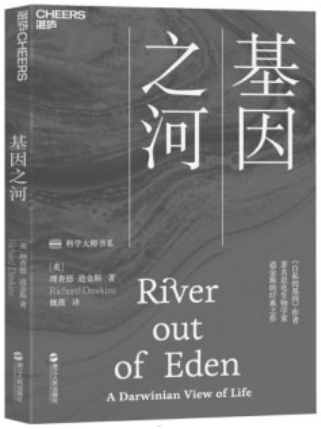


湛庐CHEERS

延伸阅读

《基因之河》

◎ 关于基因，没有人能比理查德·道金斯写得更好！《基因之河》是继《自私的基因》之后，理查德·道金斯的又一经典名作！生命的“复制炸弹”——基因从何而来？它又将走向何方？阅读本书，我们将通过一位热情、睿智、理性的科学家的视角直面基因的亘古谜题，获得对于生命的全新看法！

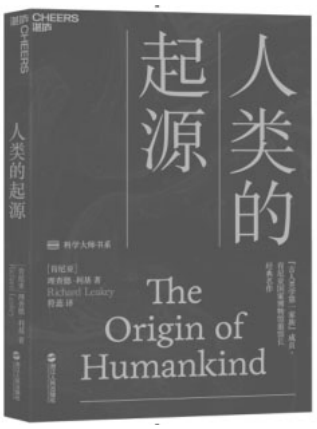


使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09485-9

《人类的起源》

◎ 理查德·利基以直立人骨架“图尔卡纳男孩”这一20世纪古人类学最重要的发现为起点，清晰明了地勾画了人类进化的四大阶段：700万年前人科的起源；两足行走的猿类的“适应性辐射”；250万年前人属的起源；现代人的起源。除此之外，《人类的起源》还将带领我们利用有限的证据，提出种种出人意料的假说，推断人类的艺术、语言和心智起源之谜。

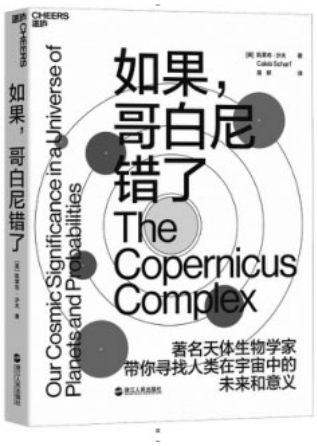


使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09300-5

《如果，哥白尼错了》

◎ 《星期日泰晤士报》年度最佳科学图书，《出版商周刊》年度十大科学图书，爱德华·威尔逊科学写作奖获奖图书。

◎ 英国皇家学会前主席、皇家天文学家马丁·里斯，美国理论物理学家劳伦斯·克劳斯，著名科学记者李·比林斯等科学界大咖联袂推荐。



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09390-6

《人类为什么要探索太空》

◎ 英国著名天文学家、太空旅行专家克里斯·英庇颠覆式新作。本书讲述了人类从走出非洲到飞出地球的史诗般历程，揭示了冒险

基因如何驱动人类的进化以及人类将来如何在地球之外的浩瀚宇宙中繁衍生息。



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09462-0
9 787213 094620

---

(1)此书写作完成前人类还没有探测到引力波的存在，而现在引力波的存在已被证实。——编者注

(2)英国天体物理学家，著名科学作家，其经典著作《宇宙的起源》简明扼要地讲述了宇宙起源的故事，包括宇宙早期的历史、宇宙的演化过程、人类与宇宙的关系以及宇宙起源的最新理论。本书中文简体字版已由湛庐文化策划，天津科学技术出版社出版。——编者注

(3)20世纪80年代，科学家认为地球物种有周期性灭绝的规律性，并认为这是太阳伴星作用的结果，所以给它起名“复仇女神星”。21世纪初，新的科学研究证明这些观点是错误的。——编者注

(4)绝对零度是热力学的最低温度，单位是开尔文。绝对零度，也就是0开尔文约等于零下273.15摄氏度。——编者注

(5)宇宙丰度是描述天体性质的一种重要物理量。丰度是指一种化学元素在某个自然体中的重量占这个自然体总重量的相对份额。——编者注

(6)在作者写作本书时，科学家还没有探测到引力波，但作者的预测实现了，2015年9月14日，LIGO探测器探测到了第一个引力波信号。——编者注

(7)实际上，宇宙中存在三种不同类型的中微子，它们可能会相互转换，但我想先忽略这一复杂性。

(8)英国知名天体物理学家和宇宙学家，霍金同门师兄，其讲述事关宇宙结构的六个常数的重磅新书《六个数》中文简体字版由湛庐文化策划、天津科学技术

出版社出版。——编者注

(9)古希腊神话中的冥界之王，同时还是掌管瘟疫的神。——编者注

(10)塔迪斯（Tardis）是英国科幻电视剧《神秘博士》（*Doctor Who*）中的宇宙飞船和时间机器。——编者注

(11)一个在已经制定的物理法则范围内工作的神。

CHEERS
湛庐

六个数

科学大师书系

[英]
马丁·里斯 著
Martin Rees
高晓鹰 译

Just Six Numbers

The Deep Forces That Shape The Universe

权威物理学家马丁·里斯讲述
物理世界的伟大巧合——
塑造宇宙命运的六个神奇数字

天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

版权信息

本书纸版由天津科学技术出版社于2020年9月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：六个数

著者：马丁·里斯

电子书定价：62.99元

First published in 1999 in Great Britain

By Weidenfeld & Nicolson

Just Six Numbers : The Deep Forces That Shape the Universe

Copyright © 2000 by Martin Rees

Published by Basic Books, A Member of the Perseus Books Group

All rights reserved.

前言

天文学是最古老的数字科学，在古代对历法和航海至关重要。在当代，天文学领域正不断涌现出新的发现。对时间本质的探索正使人们对宇宙的兴趣逐渐上升。迄今为止，天文学仍然是数字的科学，而这本书恰恰就是关于六个数的故事，这些故事对理解宇宙和人类在宇宙中的地位至关重要。

在古代地图模糊的边角上，制图师写着“可能有龙”的字样。古代航海领域的先驱环游地球，勾画出了主要的大陆和海洋，后继的探险家也补充了很多细节，但自此之后，人们再无可能发现新大陆，也不可能对地球的大小和形状进行彻底的重新评估。

21世纪初，我们在绘制宇宙地图方面也到达了同样的阶段：那些大的宇宙轮廓受到了关注。这是成千上万名天文学家、物理学家和工程师运用许多不同的技术取得的成就。借助现代望远镜，人们得以深入地探测宇宙。来自遥远天体的光需要经过漫长的时间后才能到达地球，我们由此可以瞥见遥远的过去；同时，我们还发现了生成于宇宙历史最初几秒钟的“化石”。宇宙探测器揭示了中子星、黑洞以及其他极端现象的存在，大大拓展了我们的物理知识。上述这些进步极大地扩展了人类的宇宙视野。与此同时，人们对原子内部的微观世界也进行了探索，这些探索在最微小的尺度上为我们提供了关于空间本质的新见解。

从时间和空间的维度上绘制的这幅全新宇宙蓝图出乎大部分人所料。它为我们提供了一个新的视角，提示我们去探索这样一些问题：单一的“创世纪事件”如何创造了数十亿个星系、黑洞、恒星和行星？原子在地球和其他可能的星球上又是如何被组装，构成那些足以吸引我们去探索其根源的复杂生物的？在恒星和原子之间，以及宇宙和微观世界之间存在着深刻的联系。《六个数》这本书描述了控制万

物和整个宇宙的力量，而且书中没有晦涩难懂的专业术语。事实上，人类的出现和生存依赖于宇宙中的一些非常特殊的“调谐”，而宇宙很可能比我们看到的大得多。

目 录

前言
01　宇宙与微观世界
02　宇宙的栖息地（一）：行星、恒星和生命
03　大数N：宇宙中的引力
04　恒星、元素周期表和 ε
05　宇宙栖息地（二）：超越我们的银河系
06　精心调谐的膨胀：暗物质和 Ω
07　数字 λ：宇宙膨胀是在减速还是在加速
08　宇宙原始时代的“涟漪”：数字Q
09　宇宙栖息地（三）：我们的视野之外有什么
10　数字D：三维及更多维
11　巧合、天意，还是多元宇宙
致谢



扫码获取湛庐阅读App，
搜索“六个数”，
获取趣味测试及彩蛋！

JUST SIX NUMBERS

01
宇宙与微观世界

在“大爆炸”发生之时，宇宙的特性就印在了它自身的空间里，而这六个数，就是我们描述宇宙特性的一条微妙的线索。

人类与所有已知和未知的现实之间有着密不可分的联系……小到海上磷光闪闪的浮游生物，大到旋转的行星、不断膨胀的宇宙，都被时间这根弹力线紧紧地捆绑在一起。立足海洋，望向太空，再回首海洋，这便是了解宇宙的明智之举。

——约翰·斯坦贝克（John Steinbeck）

六个数

数学定律是宇宙结构的基础，不仅对原子而言，对人类、恒星以及星系而言也是如此。原子的性质，即它们的大小、质量、种类以及将它们连接在一起的力，决定了现实世界的化学组成。原子的存在又取决于其内部的粒子和作用力。天文学家研究的对象——行星、恒星和星系，都受到引力的控制。这一切都发生在一个不断膨胀的宇宙中，在“大爆炸”发生之时，宇宙的特性就已经印在了它自身的空间里。

科学的发展过程就是辨别自然界的模式和规律的过程，在这个过程中，越来越多的现象能够被归入普遍性和规律中。理论物理学家旨在将物理定律的本质纳入一组统一的方程或几个数字中。虽然这方面的工作还有很长的路要走，但现在已然成果显著。本书介绍了关于宇宙的六个数，这些数字特别重要，作用很大。其中两个与基本的自然力有关；两个确定了宇宙的大小和整体结构，并决定着它是否会永远存在下去；剩下的两个则确定了空间本身的属性。

- 第一个数字是N，宇宙之所以如此浩瀚，就是因为自然界中存在着这个至关重要的巨大数字，它的值等于1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000（10^{36}）。这个数字是用将原子结合在一起的静电力除以原子之间的引力得到的商。如果N后面少几个零，那么只能产生一个寿命短暂的微型

宇宙，其中的生物不会长得比昆虫大，也没有足够的时间来进化。

- 第二个数字是 ε，其值为0.007。 ε 决定了原子核结合的牢固程度以及地球上所有原子的构成方式。它的值控制着来自太阳的能量，而且还更精确地控制着恒星将氢转化为元素周期表中的所有元素的方式。正是发生在恒星内部的种种反应使得碳和氧比比皆是，而金和铀则较为罕见。如果 ε 为0.006或0.008，就不会有生命存在。

- 第三个数字是宇宙常数 Ω，它表示宇宙中的物质，包括星系、弥散气体和暗物质的数量。 Ω 可以告诉我们宇宙中引力和膨胀能量之间的关系。如果两者之间的比值远远高于特定的“临界值”，那么宇宙早就分崩离析了；如果比值太低，就不会形成星系或者恒星。宇宙的起始膨胀速度似乎经过了精密的调谐。

- 第四个数字是 λ，它测量的是1998年最大的科学发现：一种从未预料到的新作用力——宇宙的“反引力”。“反引力”控制着宇宙的膨胀，在小于10亿光年的尺度上，我们很难分辨出它的影响。当宇宙变得越来越暗、越来越空时， λ 注定将取代引力和其他力，占据统治地位。幸运的是， λ 非常小（理论物理学家对此感到非常惊讶）。否则，它的作用力将会阻止星系和恒星的形成，宇宙的演化甚至在未开始之前就会被遏制。

- 第五个数字是常数 Q。所有宇宙结构（恒星、星系和星系团）的种子都铸成于“大爆炸”之中。宇宙的结构取决于常数 Q，它表示两种基本能量的比值，大小约为1/100 000。如果 Q 比这个值小很多，宇宙将变得死寂而无序；如果 Q 比这个值大很

多，宇宙将变得暴力肆虐，由一些巨大的黑洞主宰，恒星或者太阳系根本无法存在。

- 第六个关键数字的存在于多个世纪前已经被证明了，现在我们正用一种新的视角研究它。它就是当前可见宇宙的空间维数*D*，其值为3。如果*D*为2或者4，生命将不复存在。时间虽然是第四维，但与其他维度截然不同，因为它有一个与生俱来的方向：只能“迈向”未来。在黑洞附近，空间极度扭曲，以至于光线沿着圆圈传播，时间也停滞不前。此外，在接近“大爆炸”的时间和微观尺度上，空间将在10维向度上显现出其终极的基本结构：被称为“超弦”[(1)]的物质的振动与和谐。

这些数字之间可能存在某些联系。目前，我们还无法从其中一个数字的值中推导出另一个数字的值。我们也不知道是否存在一个包罗万象的理论可以推导出一个公式，将这六个数联系起来，或者能使它们被唯一确定。我之所以强调这六个数，是因为每一个数字都在宇宙中起着至关重要又各不相同的作用，它们共同决定了宇宙的演化方向及其内部潜在的一切。此外，其中的三个数字，也就是与大尺度宇宙有关的三个数字，现在还可以以任意精度对其进行测量。

这六个数组成了构造宇宙的“秘方”，而且它们的值对所构造出的宇宙具有特别精确的影响：如果其中任何一个数字的值“失调”，就不会形成恒星，也就不会有生命出现。这种调谐究竟是一种残酷的现实，还是只是一种巧合，或者出自一位仁慈的造物主的旨意？我认为都不是。在这些数字有着不同赋值和组合的地方，很可能存在无限多个其他宇宙，其中大多数要么夭折，要么是不毛之地。只有在这六个数组合“正确”的宇宙里，人类才得以出现（因此我们能发现自己的存在）。这一认识让我们可以从一个全新的视角出发，去认识当前的宇宙、人类在其中的位置以及相关物理定律的性质。

一个起点如此简单、仅用几个数字就可以决定的宇宙，经过不断变化，就可以演化成当前结构如此复杂的宇宙（只要这些数字经过了适当地调谐），实在令人惊讶。接下来，我们将跨越所有尺度来审视这些结构：从原子到星系。

通过变焦镜头观察宇宙

我们从在几米外为一对男女拍摄的普通照片开始，然后依次拉大距离拍摄相同的场景，每一次拍摄的距离比前一次扩大10倍。第二个镜头显示他们躺在一块草地上；第三个镜头显示他们在一个公园里；第四个镜头显示他们在一些高层建筑之间；接下来是整个城市，再往远处就是一段地平线，从这么高的地方往下看，地平线明显是弯曲的。再过两个镜头，我们就看到了20世纪60年代以来人们熟知的震撼画面：整个地球——大陆、海洋和云层，还有生物圈，看上去就像一个精致的玻璃球，与月球荒芜的地貌形成鲜明对比。

再跳过三个镜头我们就仿佛置身于太阳系，从这张照片可以看出，相比于水星和金星，地球的公转轨道距离更远；下一个镜头将会显示出整个太阳系；往下四个镜头（相当于在几光年之外取景），太阳看起来就是众恒星中的一员，并无特殊之处；再往下三个镜头，我们就能在银河系的扁平圆盘上看到数十亿颗类似的恒星，它们分布在几万光年的范围内；再过三个镜头，银河系看起来就像一个旋涡星系，与仙女星系一样。从更远的地方看，这两个星系又变成了室女星系团外围的数百个星系中的两个。再往下一个镜头，室女星系团本身也变得普通，不过是一个微不足道的星系团。即使我们设想的长焦镜头有哈勃太空望远镜那样的高分辨率，在最后一个镜头中，整个星系也会变成几十亿光年远的一块难以辨认的光斑。

变焦摄影到此结束，我们的视野不再向前延伸了。以几米远的人为拍摄起点，我们需要变焦25次，每一次变焦的距离都扩大10倍，才

能达到当前可见宇宙的视界极限。

在同样的情境下，现在我们把镜头朝内推而不是向外拉。在距离拍摄对象不到一米远的地方，我们会看到一只手臂；在用肉眼所能看到的最近处——大约是几厘米远的地方，我们看到了一小块皮肤。下一个镜头将带我们进入精巧的人体组织内部，然后进入单个细胞（我们体内的细胞数量比银河系中恒星的数量多100倍）。接着，在高倍显微镜的极限分辨率下，我们将会看到单个分子的结构：复杂的蛋白质长链和DNA的双螺旋结构。

接下来的拍摄将聚焦在单个原子上。此时，量子的不确定性开始发挥作用：图像的清晰度将受到限制。现实中没有一台显微镜可以探测到原子内部，在那里，有一群电子围绕着带正电荷的原子核运动。不过，我们可以通过研究加速到接近光速的粒子撞击原子时发生的情况，来探测大小是原子核1/100的子结构。这是人类可以直接测量到的最精细的结构。然而，我们怀疑自然界中最基本的结构可能是“超弦”或者“量子泡沫”形式的，它们的体积非常小，小到我们需要再向内变焦17次才能显示出来。

望远镜可以观测到的最远距离比超弦大60个变焦镜头：在我们描绘宇宙的“变焦镜头”中，应该有60幅画面（其中43幅位于我们目前能够观测的范围）。在这些画面中，我们一般能够看到的最多只有9幅画面——从眼睛可以看到的最小事物（约1毫米）到一次洲际飞行跨越的距离。这揭示了一些重要且被我们认为理所当然的事实：宇宙包含了各种各样的尺度，具有各种各样的结构，相比于我们日常感知到的，它既可谓无穷大，也可谓无穷小。

大数字和多尺度

每个人都是由10^{28}～10^{29}个原子组成的。从数量上来说，这个“人体尺度”处于原子质量和恒星质量之间。大约与太阳的质量相当，而太阳只不过是银河系中一颗普通的恒星，银河系中约有1 000亿颗恒星。当前可见宇宙中存在的星系数量至少与银河系中的恒星一样多。自然界中有超过10^{78}个原子位于望远镜可观测的范围内。

生物由一层又一层的复杂结构组成。原子结合形成复杂的分子，分子又通过每个细胞中的复杂途径发生各种反应，间接形成相互联系的整体结构，最终形成树木、昆虫以及人类。人类介于宇宙和微观世界之间，大小介于直径十亿米的太阳和直径十亿分之一米的分子之间。事实上，自然界在这个中间尺度上达到最复杂的程度并非偶然。无论位于哪一颗适宜居住的星球上，任何一个超出这个尺度的生物都很容易被破坏或者被引力压碎。

我们总是认为，人类是由微观世界塑造的，因为我们很容易受到长度只有百万分之一米的病毒的攻击，而且微小的DNA双螺旋编码了我们全部的遗传基因。同样，我们也明白自己依赖于太阳及其能量。那么在更大的尺度上，情况又是怎样的呢？即使离我们最近的恒星也要比太阳远几百万倍，而可见宇宙的范围比这个距离还要远10亿倍。为什么太阳系之外还有这么大的空间呢？在本书中，我将会阐述我们与恒星之间的几种联系，从而证明，如果没有宇宙这个大背景，我们就无法理解自己的起源。

亚原子世界的“内部空间”和宇宙的“外层空间”之间的联系非常密切，我们可以通过图1-1中所绘的奥拉波鲁斯环（ouraborus）来了解。据《大英百科全书》记载，奥拉波鲁斯是古埃及和希腊的一种具有象征意义的蛇，它将尾巴咬在嘴中，象征不断地吞噬和重生……它表示的是万物的统一性，包括物质和精神，它们会在一个永恒的破坏和再创造的循环中不断地改变形式，永远不会消失。

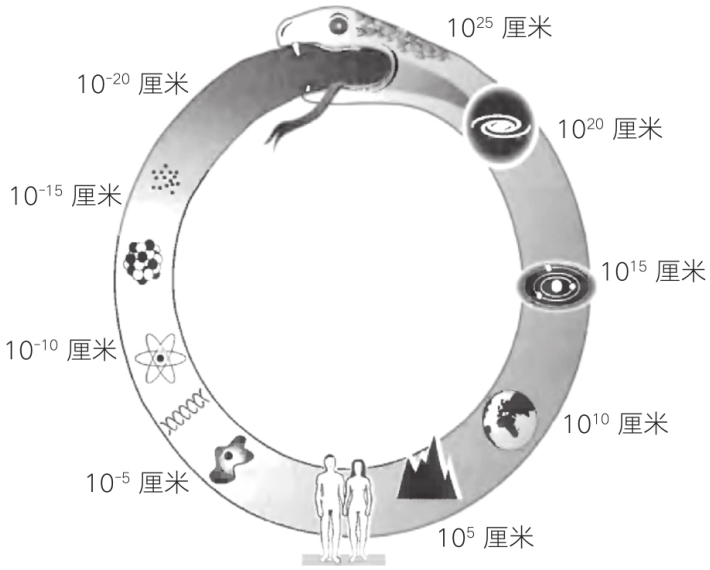


图1-1　奥拉波鲁斯环

此图主要用于说明粒子、原子核和原子构成的微观世界（左边）与宏观世界的宇宙（右边）之间的相互联系

图1-1左边代表的是原子和亚原子粒子，也就是所谓的“量子世界”；右边代表的是行星、恒星和星系。本书将着重介绍左边的微观世界和右边的宏观世界之间的一些重要联系。原子及其结合成分子、矿物质和生命细胞的方式决定了我们的现实世界。恒星的发光形式取决于其原子中的原子核，不同星系可以被一大群核内粒子的引力聚集到一起。奥拉波鲁斯环顶部那“饕餮”的蛇头象征着令人匪夷所思的终极结合——宇宙和量子之间的终极结合。

奥拉波鲁斯环中标出的尺度横跨了10^{60}，这个如此巨大的空间是一个充满“生机”的宇宙存在的先决条件。首先，一个空间不够大的宇宙永远不可能演化出复杂的结构层次：它将是缺乏生机的，也不适合居住。其次，一个“有生机”的宇宙还必须具备很长的时间跨度。虽然原子中的有些反应过程只需要十亿分之一秒就能完成，原子核内的反应速度甚至更快，但使胚胎转化为血肉之躯是一个非常复杂的过程，其中包含一系列细胞分裂和相伴而生的分化，而每一个过程都涉

及成千上万次分子的复杂重组和复制。而且，只要我们还在进食和呼吸，这些过程就不会停止。事实上，我们的生命只是人类进化过程中的一个世代，而这个世代也只是整个生命总体进化过程中的一个阶段。

宇宙演化过程中呈现出的巨大的时间跨度为我们思考“为什么宇宙如此之大”提供了一个新的视角。在地球上，从生命诞生到进化出人类用了45亿年；在太阳及其行星形成之前，早期的恒星已经将原始的氢转化成了碳、氧和元素周期表上的其他原子，这个过程花费了大约100亿年；当前可见宇宙的大小大约是自“大爆炸”以来光走过的距离，直径在100亿光年左右。

这是一个惊人的结论。初看之下，宇宙的巨大尺度使人类在宇宙体系中显得微不足道，但实际上，这个因素正是人类出现的必要条件。不过，这并不意味着不可能存在一个更小的宇宙，只是说人类不可能存在于这个更小的宇宙中。宇宙中广阔的空间并非是多余的，而是在太阳系形成和人类出现之前，一系列事件漫长、持续发展的结果。

这看上去似乎又倒退回了古代的“人类中心论”，这一观念早被哥白尼的“日心说”推翻了。不过，我们不应该过分强调哥白尼式的“谦虚”。像人类这样的生物需要特殊的条件才能进化出来，因此在某种意义上，我们的观点肯定是不合常规的。宇宙的浩瀚不应该使我们感到惊讶，我们仍然需要对其特征进行更深层次的探究。

我们有望了解宇宙吗

物理学家马克斯·普朗克（Max Planck）曾断言，直到一个理论的支持者全部死亡，该理论才会被抛弃——科学是在“一个葬礼接着一个葬礼”中进步的。这种观点太愤世嫉俗了。一些长期存在争议的

宇宙学问题早已尘埃落定，一些早期的争论已经平息。不过也有许多人经常改变想法，我也是这样。本书中的一些内容曾一度令我感到十分震惊。尽管许多人不会完全赞同我的解释，但我接下来抛出的宇宙学理论已经得到了广泛的认同。

宇宙学理论并不像关于地球历史的理论那样脆弱和易被推翻。地质学家推断，地球上的大陆正在漂移，其速度大约和指甲生长的速度相同，在2亿年前，欧洲和北美洲是连在一起的。尽管我们很难理解如此漫长的时间跨度，但我赞同这个观点。至少在大体上，我们认同地质学家有关生物圈如何演变以及人类如何出现的观点。宇宙环境的一些关键特征现在也得到了可靠数据的支持。关于100亿～150亿年前的那次“大爆炸”，我们得到的证据与地质学家找到的关于地球历史的证据一样可靠。这是一个惊人的转变：我们的祖辈可以毫无阻碍地依据事实来构建理论，而直到不久前，宇宙学看上去也不过是数学推理，毫无事实依据。

几年前，我确信宇宙有90%的可能曾经发生过一次“大爆炸”——当前可见宇宙中的一切都源自一个压缩的火球，这个火球比太阳中心的温度高得多。现在我更加确信这个假设了。20世纪90年代，观测技术和实验设备的巨大进步使广阔的宇宙图景变得日益精细，现在我对“大爆炸”这一事件的确信度提高到了99%。

爱因斯坦曾讲过一句著名的格言：“宇宙最不可理解之处在于它是可以理解的。”他借这句话表达了对以下事实的惊讶：第一是物理定律，那些需要换个角度才能理解的物理定律不仅在地球上适用，在最遥远的星系上也适用。第二是，牛顿告诉我们，使苹果落下的作用力与维持月球和行星运转的作用力相同。我们现在知道，正是这种作用力将星系捆绑在一起，将一些恒星拉进黑洞，并且最终可能导致仙女星系在我们上空坍缩。最遥远星系中的原子与我们在实验室里研究

的那些原子具有一个共同的起源。没有这一共同点，宇宙就不会生成。

宇宙学的最新进展促使我们探讨宇宙的起源、支配宇宙的法则，甚至宇宙的最终命运。所有这些谜题都与“大爆炸”发生后的最初几秒钟有关，当时的条件非常极端，以至于相关的物理学都难以理解，但我们想要知道那几秒钟内时间的特性、维度的数量以及物质的起源。在最初的那一瞬间，一切都被压缩到非常高的密度，使宇宙和微观世界相互重叠在一起，就像奥拉波鲁斯环所示的那样。

空间是不能无限分割的，其精巧的结构仍然是一个谜。大多数物理学家怀疑，宇宙在10^{-33}厘米的尺度上存在粒子性，其大小是原子核的$1/10^{20}$，就像“变焦镜头”所描述的那样，这一比例相当于从原子核大小增大到一个大型城市的大小。在这个尺度上，我们会遇到一个阻碍，即使还存在更小的结构，它们也超越了我们对空间和时间的认知。

最大尺度下的情况又是怎样的呢？自“大爆炸”以来的大约100亿年里，有没有一些星球发出的光还没来得及传播到地球上？显然，对于这个问题，我们还没有找到直接的证据。宇宙的大小以及遥远未来可能出现的事物不存在理论上的界限（在空间和未来的时间方面）。宇宙的延伸范围可能不只是目前的数百万倍，而是10的数百万次方倍，甚至比这还要大。宇宙远远超出了我们目前的视野，而且它本身可能只是无限集合中的一员，这也是“多元宇宙”这个概念的含义，尽管它只是一个推测，但也是当前宇宙学理论的自然延伸。这个概念之所以被认可，是因为它解释了我们观察到的一些现象。其他宇宙中的物理定律和几何学可能会有所不同，而这个不同给我们提供了一个新的视角，来审视本书描述的六个数所包含的看似特别的取值。

JUST
SIX
NUMBERS

02

宇宙的栖息地（一）：行星、恒星和生命

只有非常特殊的行星才能孕育出与地球上的生命类似的生命，这些行星就像茫茫宇宙中漂浮着的生命栖息地。

该死的太阳系。那黯淡的光线；过于遥远的行星；纠缠不休的彗星；脆弱不堪的结构。要是由我去创造宇宙，肯定能造出一个更好的。

——杰弗里勋爵（Lord Jeffrey）

原行星

猎户座中有一片巨大的星云，其中包含的原子足以形成一万颗太阳。这片星云有一部分是发光的，因为被明亮的蓝色恒星加热了；其余的则是冰冷、黑暗的尘埃。星云的内部是温暖的块状物，它们并不发光，借助装有红外线探测器的望远镜，我们可以测出这些块状物释放的热量。这些温暖的块状物最终会形成恒星，但目前还处于“原始恒星”阶段。它们之后会在自身引力的作用下收缩，同时各自被气体和尘埃包围，看上去像一个扁盘。

这些扁盘的出现并不意外。猎户座星云的密度虽然比大多数星际空间都要大，但仍然非常稀薄。在形成恒星的过程中，一些气体会持续收缩，直至密度上升到原来的100亿亿倍。任何轻微的自旋都会在收缩过程中被加强（类似于宇宙级别的自旋，就像滑冰选手在旋转时内收双臂会转得更快一样），直到旋转过程中的离心力大到足以阻止所有物质落到恒星表面上为止。那些没有落到新生的恒星上的多余物质会围绕在恒星周围运转。由此形成的扁盘就是行星系统形成的基础：尘埃颗粒会频繁碰撞，聚合在一起形成岩石块，这些岩石块又会进一步合并成更大的星体，最终形成行星。太阳系就是以这样的方式从一个“原始太阳扁盘”中形成的。其他恒星的形成过程与太阳类似，因此我们完全有理由相信，它们也会被行星环绕。

这一设想得到了恒星周围新形成的扁盘的证实，并推翻了20世纪初期流行的“大灾变”理论。该理论认为，行星的形成源自一场罕见

而特殊的灾难。在这场灾难中，太阳与另一颗恒星发生碰撞（这是一种极为罕见的现象，因为恒星间的平均距离非常大），恒星的引力使太阳释放出一些气体，这些气体凝结成“珠子”，有些珠子最后变成了行星。

实际上，几个世纪之前的天文学家也认为存在其他的太阳系。在光学领域做出突出贡献的荷兰科学家克里斯蒂安·惠更斯（Christiaan Huygens）就写道：“为什么不是每一颗恒星都像太阳一样拥有众多的行星相伴，同时这些行星又有各自的月亮侍伴当空呢？”

存在其他太阳系吗

相比于最终会形成行星的扁盘，那些完全成形且围绕其他恒星运转的行星更难被探测到。因此，当20世纪90年代末，人们发现第一个能够确切证明行星普遍存在的证据时，便引发了天文学界的震动。太阳系之外的行星难以被发现的原理很简单。即使使用地球上性能最为优良的巨大望远镜，如果从很远的距离观测，比如在40光年以外观察太阳，观测者也无法看到任何围绕太阳运行的行星。不过，通过仔细测量太阳的光线，天文学家推断出了木星（太阳系质量最大的行星）的存在。这是因为太阳和木星都围绕各自的质量中心旋转，也就是所谓的“质心”，而太阳的质量比木星的质量大1 047倍，并且这个质心离太阳中心的距离比离木星中心的距离要近（实际上质心位于太阳内部），因此，太阳绕质心运转的速度是木星绕质心运转速度的1/1000。由于其他行星引起的额外扰动，太阳的实际运动更为复杂。由于木星是太阳系内质量最大的行星，因此发挥着主导作用。与此同理，通过对光线的仔细分析，天文学家发现了其他恒星在运动过程中受到的微小干扰，这些干扰是由轨道上的行星引起的，就像木星对太阳运动造成的影响一样。

由于组成恒星的各种原子（碳、钠等）能够吸收或者发射特定的光，因此恒星的光谱会呈现出不同的特性。相比于实验室中测得的原子的光谱，如果恒星远离我们，它的光就会向光谱的红端偏移（就像汽笛声会随着距离的增大变低一样），这就是著名的多普勒效应。如果恒星正在靠近我们，其光谱便会向光谱的蓝端偏移。1995年，日内瓦天文台的两位天文学家米歇尔·梅耶（Michel Mayor）和迪迪埃·奎洛兹（Didier Queloz）发现，飞马座51号恒星的多普勒频移存在轻微的波动，好像这颗恒星正在做圆周运动，先朝向地球运动，然后远离，接着再次靠近，非常有规律地循环运转。该恒星的运转速度大约是50米每秒。据推断，有一颗与木星大小相当的行星围绕着这颗恒星运行，两者围绕共同的质心旋转。如果这颗看不见的行星的质量是恒星质量的1/1 000，那么它的轨道速度将是50千米每秒，比恒星的运动速度快1 000倍。

杰弗里·马西（Geoffrey Marcy）和保罗·巴特勒（Paul Butler）是20世纪90年代末期最著名的行星探寻者，他们的仪器可以记录小于一亿分之一的波长变化，因此可以测量多普勒效应，即使恒星的运行速度只有光速的一亿分之一（3米每秒），他们也可以凭借仪器测出多普勒效应。事实上，他们已经发现了许多恒星周围存在行星的证据，这些推测出来的行星都像木星一样拥有很大的体积。不过，这两位行星探寻者所用仪器的测量敏感度是有限的。一颗质量只有木星质量几百分之一的类地行星所能引起的太阳运动速度的变化仅为几厘米每秒，多普勒频移也只有百亿分之一左右，这个变化太小了，根本无法用现有的大行星探测技术进行识别。

事实上，行星探寻者使用的望远镜只有中等大小，其直径只有2米左右。因此，并不是所有的重大发现都需要最大、最昂贵的设备，这一点有时常被与大型项目相关的夸大之词掩盖。借助新型的普通仪器，那些坚持不懈、独具匠心的科学家仍然能够获得许多成果。

太阳系的结构是许多“意外”造成的结果。那些穿过地球轨道的流星群仍然是我们面临的威胁。例如，6 500万年前，一颗直径为10千米的小行星撞击地球，在墨西哥湾的希克苏鲁伯（Chicxulub）附近造成了一个巨大的海底陨石坑。这次撞击事件造成的全球性气候变化可能是导致恐龙灭绝的原因。给局部区域造成灾难的较小撞击，则更加普遍。在太阳系年轻的时候，这种撞击事件时有发生。目前，太阳系中大多数原始行星的胚体要么已经被摧毁，要么被踢出了太阳系。月球就是另一颗原始行星撞击地球时从地球上撕下来的一块，月球表面大型的陨石坑见证了其早期历史的暴力性灾变。天王星可能在形成后不久就经历了一次毁灭性的斜向撞击，否则我们很难理解，为什么它的自转轴几乎躺倒在公转轨道平面上，而其他行星的自转轴则或多或少垂直于该平面。太空探测器传回的图片显示，太阳系的所有行星和一些比较大的卫星都拥有非常独特的环境。

其他行星系统不太可能拥有和太阳系一样多的行星，其中的行星排列方式也可能不尽相同。在已被发现的行星系统中，有几个系统拥有一颗类似于木星的大行星，但它们离恒星的距离比水星（太阳系最内层的成员）离太阳的距离更近。不过，这些发现在一定程度上取决于目前的观测技术。沿短周期轨道快速运行的重行星更容易被探测到，而已经发现的重行星很可能有小型的类地行星相伴。

只有非常特殊的行星才能孕育出与地球上的生物类似的生命，这种特殊性主要表现在三个方面。第一，行星自身的引力必须足够强大，以防止它们的大气层蒸发到太空中。如果月球上曾经有过大气层，可能早已蒸发了。第二，液态水能够储存于行星表面，此类行星既不能太热也不能太冷，必须与一颗长寿且稳定的恒星保持适当的距离。第三，这类行星的公转轨道必须是稳定的，如果有一颗类似于木星且沿偏心轨道运行的行星不断穿过它们的公转轨道，那么轨道就会不稳定。行星探寻者的高“命中率”表明，银河系中有非常多的类太

阳恒星周围存在行星。在这数十亿颗候选行星中，如果没有许多与年轻地球相似的行星，反倒会令人感到惊讶。

美国国家航空航天局（NASA）前执行主任丹·戈尔丁（Dan Goldin）强调，天文学家应该将探索类地行星作为太空探索计划的主要推动力，并且这种探索的目标应该是直接获取它们的影像，而不仅仅是间接地推断。然而，仅仅是发现像地球一样的微弱斑点，也就是卡尔·萨根所说的“暗淡蓝点”，就可能需要15年才能完成，而且必须在太空中部署大型望远镜阵列。

来自遥远世界的昏暗光线可以传递这些信息：类地行星表面（陆地或海洋）和云层的一些特征，以及每日或季节性的变化情况。根据一颗行星的光谱，我们可以推断出它的大气中存在何种气体。虽然地球的大气层富含氧气，但在最初并非如此，氧气是地球早期演化过程中原始细菌作用的结果。这便引出一个非常有趣的问题：这样的改变是否也会发生在其他地方？如果一颗行星拥有适宜的环境，那么它演化出简单的有机体并形成生物圈的概率有多大？

从物质到生命

直到19世纪的最后5年，我们才确切地了解到，其他恒星的轨道上存在着一些行星，但不确定其中是否存在生命。这个问题应该由生物学家而非天文学家来解答。到目前为止，科学家并没有对此达成共识。

地球上的生命占据了各种各样的生态位。深海底部热液喷口附近的生态系统表明，对于生命来说，连阳光也不是必不可少的。我们仍然不知道生命是如何以及在何处开始形成的。当前，在生命的起源地这个问题上，炎热的火山比达尔文提出的“温暖的小池塘”更受欢

迎。不过，生命也有可能形成于地下深处，甚至形成于太空中的分子云团。

我们也不知道，其他行星能够演化出生命的概率有多大，以及生命的出现是自然的还是包含了一系列极不可能发生的意外，以至于银河系的任何其他行星上都没有发生过类似事件。因此，我们应该在太阳系的其他地方探测生命，这具有非常重要的意义，即使找到的只是简单生命的遗迹。19世纪以来，火星一直是人们关注的焦点。最近几十年，科学家向这颗“红色星球”发射了太空探测器绕其飞行，以分析它的表面，并将样品送回地球。据推测，木星的冰冻卫星木卫二和木卫四被冰层覆盖的海洋中也可能存在生命，科学家计划发射一个潜水探测器，以在冰层下面进行探测。

如果太阳系中出现过两次生命，这将意味着整个银河系可能充满了生命，或者至少存在简单的生命形式。不过，这种重大的结论必须有一个前提：这两个起源是彼此独立的。这个前提非常重要，如果火星上的陨石曾经撞击过地球，那么也许我们都是火星人；相反，火星也可能被来自地球的流星反向播下了生命的种子！

从简单生命到智慧生命

正是由于各种复杂的历史和偶然事件，人类才得以出现。10亿年来，原始生物呼出的氧气改变了年轻地球的有毒大气，为多细胞生命扫清了道路。化石记录表明，5.5亿年前的寒武纪时期出现了大量水生和爬行动物。在接下来的2亿年里，地球被绿色植物覆盖，为之后形态奇特的动物提供了栖息地，比如像海鸥一样大的蜻蜓、一米长的千足虫、蝎子和两栖动物，随后还出现了恐龙，其之前模糊而又呆滞的形象被《侏罗纪公园》等这类电影中充满活力的形象（与当前的科学观点一致）取代。之后，恐龙在一次突然、始料未及的灾难中彻底灭绝了（此次灭绝被认为是地球史上最突然、最难以预料的一次大灾

难）。这个灾难就是，一颗小行星撞击了地球，引起巨大的海啸，扬起的灰尘遮蔽了地球上空很多年。不过，这次巨变为哺乳类动物的出现开辟了道路，直至最后人类出现。

即使我们知道原始生命普遍存在，但关于智慧生命何以存在的问题仍然没有定论。在地球生物圈漫长的演化史中，有一大批形态各异的物种（现在几乎都已灭绝）在其中游过、爬过和飞过。人类是时间和机会的产物，如果进化重新进行一次，结果一定不同。智慧生命的出现似乎并不是注定的，一些前沿生物学家认为，即使宇宙中普遍存在简单的生命，智慧生命也可能极其罕见。我们虽然对此了解甚少，无法精确地评估智慧生命出现的概率，但也没有理由怀疑它们出现的可能性。

地球生命的进化呈现出的惊人而又迷人的复杂性和多样性，使我们意识到无生命的世界是多么简单。不过，这种简单（至少是相对简单）恰好是天文学家研究对象的一大特征。事物之所以难以理解，不是因为它们大，而是因为复杂。若想完全阐明原子是如何在地球上（或其他行星上）组合成复杂到足以思考自身起源的生物，真是一项令人生畏的挑战，其难度超过宇宙学的任何难题。正因为如此，我认为立志去了解大尺度宇宙并不算狂妄。

多年来，“存在众多可居住的星球”的想法一直是玄想者的研究领域。2000年是乔达诺·布鲁诺（Giordano Bruno）在罗马火刑柱上殉难的400周年。他坚信：

> 太空中有无数的星座、太阳和行星，但我们只能看到太阳，因为它们能发出光；行星仍然不可见，因为它们又小又暗。太空中还有无数的地球围绕着它们的太阳旋转，这些地球并不比我们这个地球逊色，也不比它更小。任何理性的人

都会相信，比地球大很多的天体上肯定存在生物，它们与地球上的生物相似，甚至更高级。

自布鲁诺之后，这种观点得到了广泛认同。18世纪，伟大的天文学家、天王星的发现者威廉·赫歇尔（William Herschel）就认为，行星、月亮甚至太阳上都有人居住。19世纪80年代，美国富豪珀西瓦尔·洛厄尔（Percival Lowell）在亚利桑那州的弗拉格斯塔夫（Flagstaff）建造了一座天文台，主要用于研究火星。他认为，火星上的那些“运河”是一种灌溉工程，其作用是将水从冰冻极地输送到赤道地带的“沙漠”中。结果证明，这种想法只不过是一厢情愿的希望和视觉错觉相结合的产物。1900年，一家法国基金会出资10万法郎设立了古兹曼奖，用以奖励第一次接触外星物种的人。不过，经过慎重考虑，他们将火星探测排除在外，因为他们认为找到火星人过于容易！

外星人与人类有共同的文化吗

美国加利福尼亚州山景城“搜寻地外文明计划”（Search for Extra-Terrestrial Intelligence，简称SETI计划）研究所的科学家是搜索地外文明的先锋，他们正在致力于寻找可能由人工发出的无线电信号，为此在世界各地部署了各种大型射电望远镜。这种情节在科幻小说中很常见，比如卡尔·萨根的小说《接触》（*Contact*），在小说中，这种行为是值得的。在向遥远的宇宙发射信号这个问题上，发射无线电波并不是唯一可行的方式，我们还可以利用窄束激光，因为它可以以更小的能量消耗跨越星际空间。我们已经拥有了相关技术，只要愿意，就可以通过这两种方法中的任何一种向数光年之外的宇宙发射信号，以证明我们的存在。事实上，借助无线电发射器、雷达等众多仪器，我们能向任何使用敏感射电望远镜的外星人昭示自己的存

在。对于生命的起源和潜力，我们还知之甚少，因此很难评估哪种探测生命的方法最有效。因此，明智的做法是使用所有可用的技术，并对所有的可能性保持警惕。不过，我们应该注意“观测对象的选择”：即使我们确实获得了一些发现，也不能断定它们代表的一定就是“典型”，因为我们的仪器和技术限制了观测结果，导致我们对实际观测对象可能产生偏见。

其他星球上可能并不存在智慧生命，即使存在，也可能是在某个水下世界，高等海豚在那里专注地享受着海洋生活，根本不会做任何事情来昭示自己的存在。虽然搜寻地外生命的成功概率不是很大，而且系统性地检测人工信号是一项充满风险的工作，但这些都值得去做，因为任何探索都具有哲学上的重要性。任何一种明显的人工信号，即使它像质数或圆周率一样枯燥无味，都意味着“智慧”并非为地球生命所独有，它也存在于其他星球。即使离我们最近并可能存在智慧生命的天体，其距离仍旧非常遥远，无线电信号需要花费许多年才能到达地球。仅仅因为这个原因，无线通信在很大程度上将是单向的。我们也许有时间发送一份慎重的回电，但没有机会快速回应！

能与我们通信的外星生命应该具有某些与我们相似的数学和逻辑概念。它们应该也知道支配整个宇宙的基本粒子和力。虽然它们的栖息地可能与地球大不相同，生物圈甚至更不相同，但它们及其星球也是由原子组成的。与我们一样，对外星生命来说，最重要的基本粒子是质子和电子：一个电子绕着质子运动就形成一个氢原子，电流和无线电发射器都含有电子的流动。质子比电子重1 836倍，这个数字对于任何有能力并已经实现了传输无线电信号的智慧生命来说，都具有同样的内涵。所有的基本力和自然法则都应该是一样的。事实上，这种一致性（没有它，宇宙将更加令人困惑）似乎延伸到了天文学家所能研究的最遥远的星系。在本书后面的章节中，我将会介绍一些不同的“宇宙”，这些宇宙超出了我们所能观测的范围，它们可能受不同的法则支配。

显然，外星人不会使用米、千克或秒等单位，但我们可以与它们交换关于两个质量或者两个长度之间比率的信息，比如质子和电子的质量比，这种比率是纯数字的，与单位无关，比如一根杆的长度是另一根杆的10倍，这种说法正确与否，与我们以英尺、米或者某些外星单位来测量长度都没有关系。正如理查德·费曼（Richard Feynman）所说，如果他告诉外星人，他“有170亿个氢原子那么高”，它们应该能听懂。

在知识方面，有些智慧生物与我们可能并不存在关联，不过，任何向我们传递信号的生命一定对它们周围的物理世界有了一定程度的控制。只要有一定的思考能力，它们肯定会和我们一样，对宇宙的起源感到好奇，因为我们共同诞生于其中。它们可能也会对这些问题感兴趣：宇宙是如何构成恒星和星系的，以及包含了哪些物质？宇宙是如何膨胀的，它最终的命运又会如何？这类知识将成为我们和所有外星人共有的文化。它们也会注意到，宇宙中存在少数几个关键数字，它们对宇宙环境的营造至关重要。

本书的主题是对这些数字中的六个数进行探讨。这六个数决定了宇宙的主要特征：它是如何膨胀的；能否形成行星、恒星和星系；是否存在有利于进化的化学条件。而且，宇宙的本质敏感地取决于这些数字。如果你想通过调谐这六个数来构造一个可以孕育生命的宇宙，那么调谐必须精确。这六个数的出现是天意还是巧合？它们是“万物理论”唯一确定的结果吗？相关解释似乎都没有说服力。我认为，这种明显的“调谐”暗示了一种更值得关注的东西：当前的可见宇宙，也就是我们借助最大倍数的望远镜所能看到的一切，只是整体的一部分，而整体的宇宙中存在各种各样的物理定律。这虽然只是一种推测，但与我们现有的理论相一致。

众所周知，有些恒星也有行星相伴，就像地球绕着太阳运行一样。那么，这些行星拥有什么样的栖息地呢？它们的引力是不是太弱

而不能留住大气层？它们是否太热、太冷或者太干燥而无法孕育出生命？它们之中可能只有少数能提供适合生存的环境。所以，在更大的尺度上，可能存在无数其他的宇宙，我们无法观测到它们，因为它们的光永远无法到达地球。这些宇宙是否适宜于进化出某种生命形式，就像在当前的可见宇宙中，至少有一颗恒星周围至少有一颗行星进化出了生命？在大多数宇宙中，这六个数可能是不同的，因此只有少数宇宙会被恰当调谐成适合生命存在的状态。在当前的宇宙中，这些数字似乎是按照天意调谐的，对此我们不应该感到奇怪，因为我们自己正处于一颗相当特殊的行星之上，它的引力维持着一个大气层，适宜的温度保证了水的存在，这颗行星自身正围绕着一颗稳定且长寿的恒星运行。

JUST
SIX
NUMBERS

03
大数 *N*：宇宙中的引力

如果我们准备与另一颗行星上的智慧生命对话，首先应该从引力开始，而引力比任何自然界中的基本力都更令人感到困惑。

谁会相信理论上的蚂蚁呢？

谁又会相信愿景中的长颈鹿呢？

一万名探索宇宙的博士

也只能探究出丛林一半的秘密。

——约翰·查尔迪（John Ciardi）

牛顿与“机械钟”

如果我们准备与另一颗行星上的智慧生命对话，首先应该从引力开始。引力将行星固定在各自的轨道上，并将恒星聚集在一起。在更大的尺度上，引力控制着由数以亿计的恒星组成的整个星系。任何物质都逃不过它的魔掌，包括粒子和光。它控制着整个宇宙的膨胀，也许还控制着宇宙的最终命运。

我们至今仍未完全了解引力，它比自然界中的任何基本力都更令人费解。不过，引力是第一种可以用数学方式描述的力。17世纪，牛顿告诉我们，任何两个物体之间的引力都遵循“平方反比定律”。引力大小的减弱与两个物体之间的距离的平方成正比，比如，将物体间的距离拉开2倍，它们之间的引力就会减弱至原来的1/4。

牛顿意识到，让苹果掉落和控制炮弹轨道的力，与使月球绕地球轨道运行的力是一样的。他提出，自己的定律可以解释行星按照椭圆轨道运行的原因——这一点有力地证明了数学在预测自然界这架“机械钟”[(2)]的强大威力。

牛顿的伟大著作《自然哲学的数学原理》出版于1687年，共分三卷，用拉丁语写成，书中附有几何学论证的复杂定理，为一些杰出的科学家树立了一座丰碑。牛顿的著作（和他的个性）极其严肃，他对哲学家和诗人都产生了巨大的影响，并且这种影响还渗透到了更广泛

的公众中，1737年出版的《女性牛顿主义》（*Newtonianism for Ladies*）就是例证。此外，一本名为《世界体系》（*The System of the World*）的通俗易懂的书中引入了引力理论的精髓观点。

在《世界体系》这部著作中，作者用一幅从山顶水平发射炮弹的插图巧妙地阐述了一个重要发现：炮弹抛出的速度越快，在落地之前就射得越远。如果速度非常之快，炮弹会脱离弹道，进入轨道运动。在牛顿时代，还没有炮弹能达到这个速度（大约8千米每秒），但今天我们所熟悉的人造卫星就是基于这个原理进入绕地轨道运行的。牛顿还证明了正是同样的力使得行星沿着椭圆轨道围绕太阳运行。在更大的尺度上，引力同样作用于星系，比如在银河系中，数十亿颗恒星被引力固定在轨道上，围绕着一个中心轴运行。

在太阳和其他类似的恒星中，引力和内部压力之间存在着一种平衡，引力将恒星内部物质压缩在一起，如果没有引力的作用，内部的压力就会使它们分开。在地球的大气层内，地面的压力同样平衡了我们上方所有空气的重量。

大尺度和小尺度上的引力

地球引力对大物体的影响比对小物体的影响更强烈。如果灾难片的摄制者准备使用模型来拍摄一座桥梁或大坝倒塌的场景，他们不会用真正的钢筋混凝土来建造模型，而是用非常易碎的材料，这种材料从桌面高度掉落就会弯曲或粉碎。这种影片需要采用高速摄影拍摄，并以慢动作回放，才能达到逼真的效果。然而，即使再谨慎细致，也会露出破绽，使我们明白那些场景是微缩模型，而非真实的场景。比如，小型水箱中的水的波纹会因为水的表面张力（把雨滴聚成团的力）变得平滑，但在真正水流湍急的河流或海洋中，这种影响是可以忽略的，根本观察不到。表面张力能使蜘蛛在水面上行走，但无法使人类也能如此。

在生物界，合适的尺寸有时至关重要。巨型动物并不仅仅是小型动物的简单放大版，因为它们身体各部分之间的比例是不同的，例如，身体越高，腿就越粗。假设将一只动物的尺寸放大1倍，但体型保持不变，那么它的体积和重量会增加到原来的8倍（2^3），而不是2倍；与此同时，它的腿的横截面只会增加到原来的4倍（2^2），这就会造成支撑力不足，因此需要重新设计。动物的体型越大，摔得就越重，像“哥斯拉”（Godzillas）[(3)]这种巨大的动物需要比身体更粗的腿，但即使如此也经不住一摔；相反，老鼠却可以垂直爬树，即使从几倍于自己身高的地方摔下来也安然无恙。

伽利略，这位在牛顿出生那一年逝世的著名物理学家第一个清楚地认识到了尺寸的重要性，他写道：

> 大自然不会创造出无法度量的大树，因为它们的枝干最终会因自身的重量而倒下……当身体变小时，力量不会随之按比例减弱；相反，在非常小的身体里，力量会以更大的比例增长。我相信一只小狗可以在背上驮两三只同样大的狗，但我不认为一匹马能驮起一匹跟自己一样大的马。

类似的原理也限制了鸟类的大小。相比于惯于滑翔的信天翁，盘旋的蜂鸟受到的尺寸限制更严格。不过，对于水生生物来说，这种尺寸上的限制很宽松，海洋中允许存在巨型海兽。然而，尺寸过小也会产生问题：皮肤表面积与体重之间的比例会变大，导致体内的热量很快散发掉；因此，小型哺乳动物和鸟类必须快速进食和代谢才能保持体温。

其他世界也存在类似的限制。比如，物理学家埃德温·萨尔皮特（Edwin Salpeter）曾和卡尔·萨根一起从生态学的角度推测，一些类似气球的假想生物能在木星稠密的大气中生存。这类生物每一代出生之后都将面临一场与时间的赛跑：它们必须尽快膨胀到足够大的体

积，以获得足够大的浮力，从而避免引力将它们拉到黑暗深处的低层大气中，在高压中毁灭。

*N*的巨大值及其原因

尽管引力对人类、生物圈以及宇宙都很重要，但与其他影响原子的力相比，引力的作用实际上是极其微弱的。极性相反的电荷相互吸引：一个氢原子由一个带正电荷的质子和一个带负电荷的电子组成，电子被锁定在绕质子运动的轨道上。根据牛顿定律，两个质子在引力作用下相互吸引，同时产生相互排斥的静电力。这两种力与距离具有同样的关系，都遵循“平方反比定律”，两者的相对强度可以用一个重要的数字*N*来表示，其大小与质子间的距离无关。但是，当两个氢原子结合形成一个分子时，质子之间的静电力就会被两个电子中和。质子之间的引力为静电力的$1/10^{36}$，几乎无法测量。当化学家研究原子团如何结合在一起形成分子时，完全可以忽略引力的作用。

那么，引力又是如何占据主导地位，将我们固定在地面上，并将月球和行星固定在各自的轨道上的呢？原因在于，引力会随着质量的增加不断累加。如果一个物体的质量增加一倍，那么它产生的引力就会增加一倍。与引力不同的是，电荷可以相互排斥，也可以相互吸引，它们可以为正，也可以为负。如果两个电荷的极性相同，那么两者的静电力就是一个电荷的两倍。任何物体都是由大量的原子组成的，而原子都是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成的，两者会相互抵消。即使我们“充电”到头发都竖起来了，静电力之间的不平衡也不到十亿分之一个电荷。与电荷不同的是，所有物体都具有相同的“引力子”符号，因此，相对于较大物体的静电力，引力会增加。当固体被压缩或拉伸时，静电力的平衡只会受到轻微的干扰。因此，只有当地球上所有原子的引力联合起来克服将苹果固定在树枝上

的电作用力时，苹果才会掉下来。引力对人类而言很重要，因为我们生活在质量很大的地球上。

对此，我们可以给出定量解释。在第1章，我们假设拍摄了一组照片，每一张照片的视觉距离都是上一张的10倍。现在我们设想一组不同大小的球体，分别包含10、100、1 000……个原子，换句话说，按照从小到大的顺序排列，每颗球的质量都是前一颗球的10倍。这样便可以估算出，第18颗球就像一粒沙子那么大，第29颗球像一个人那么大，而第40颗球则有一颗稍大一点儿的小行星那么大。质量每增加1 000倍，体积也会相应增加1 000倍（假定这些球体的密度相等），而半径只会增加10倍。球体本身的引力强度可以通过将一个原子从它的引力场中移除所需要的能量来表示，其大小取决于球体质量与半径的商，所以引力强度只增加100倍。在原子的尺度上，引力已经足够强，为10^{36}。但是，由于质量每增加三个量级（即10^3），引力强度只增加两个量级（即10^2），所以上述的引力强度已经达到第54颗球的引力大小（54=36×3/2），其质量和木星差不多。任何比木星质量更大的天体，其引力之大足以成为将固体结合在一起的主导力量。

就像我们一样，沙粒和糖块也会受到地球引力的影响。不过，它们的自引力(4)可以忽略不计。对于小行星来说，自引力并不重要，在火星的两颗土豆形状的小卫星（火卫一和火卫二）上，自引力也不重要。像行星一样大的天体（甚至是月球）都不够坚硬，也就是密度不够大，保持不了固定的形状，引力使它们大致呈球形；而质量比木星大的天体则会被自身的引力挤压，达到非常高的密度，除非中心变得足够热，能够提供平衡引力的压力，这正是太阳和其他恒星内部发生的情况。正是因为小尺度上的引力如此之弱，像太阳这样的典型恒星的质量才会如此之大。在任何较轻的天体中，引力既无法与压力相抗衡，也无法挤压物质产生足够高的热量和密度，使天体发光。

太阳的质量大约比木星大1 000倍。如果太阳没有热量，引力会将它挤压成比普通固体密度大100万倍的物体，这样太阳将会变成一颗与地球体积相同的白矮星，但质量却是地球的33万倍。实际上，太阳内核的温度高达1 500万摄氏度，比其发光的表面高出数千倍，这种巨大的高温气体的压力使太阳发生“膨胀”，并处于平衡状态。

英国天体物理学家阿瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）是最早了解恒星物理性质的人之一。他曾经设想，如果人类生活的星球永远笼罩在云层中，单凭理论知识，我们对恒星能知多少。显然，我们无法估算出它们的数量。不过，根据我刚才概述的思路进行简单的推理，我们可以知道它们有多大，进一步估算出这些天体有多亮，这个过程并不太难。爱丁顿总结道：“一旦拨开笼罩在物理学家头顶上的云层，仰望天空，他们就会发现10亿颗气态恒星，它们几乎都跟太阳一样具有很大的质量。”

引力约为控制微观世界的力的$1/10^{36}$。如果引力没有这么弱，会发生什么呢？请设想这样一个宇宙，那里的引力只比静电力弱10^{30}，而不是10^{36}。在这种情况下，原子和分子的运动仍然与当前宇宙的一样，但在引力战胜其他作用力之前，物体无须变得非常大。在这个设想的宇宙中，形成一颗恒星（一个受引力约束的核聚变反应堆）所需的原子数量将会是当前宇宙的十亿分之一，行星的质量也将仅为当前质量的十亿分之一。无论这些行星能否保留在稳定的轨道上运动，它们的引力强度都会阻碍生命的进化。在一个拥有强引力的世界中，即使是昆虫也需要粗壮的腿来做支撑，没有动物能够长得更大，像人类这么大的实体都会被引力压碎。

在这样的强引力宇宙中，星系形成的速度会快得多，但尺寸会小很多。其中的恒星不是广泛地分散在各处，而是密集地聚集在一起，以至于经常发生近距离的接触。这本身就会阻碍稳定的行星系统的形

成，因为轨道会被经过的恒星扰乱，这在当前的太阳系中是不可能发生的，对地球来说这是一种幸运。

不过，在这个设想的强引力宇宙中，形成复杂生态系统的更大障碍是演化时间的限制。这个宇宙中的“微型恒星”的热量散发得很快，其寿命将是当前宇宙中的恒星的$1/10^6$倍，也就是说，一颗普通恒星只能存活大约1万年，而不是100亿年。微型恒星的燃烧速度很快，甚至在有机物进化出现之前就已经耗尽了所有的能量。引力变得越大（假定其他条件不变），就越不利于复杂结构的进化。在当前宇宙中，天文演变过程的巨大时间跨度与任何物理或化学反应过程的基本的微观时间尺度之间存在着巨大的鸿沟，但在强引力宇宙中，不存在这种鸿沟。与此相反，引力越弱，越有利于发展出更精细、更长寿的结构。

引力是组织宇宙秩序的力。我们将会在第7章看到，“大爆炸”之后，引力在宇宙结构从无到有的过程中起着至关重要的作用。正因为引力相对于其他力来说比较弱，大而长寿的结构才能存在。然而矛盾的是，引力越弱（假定它不是零），导致的后果就越严重、越复杂。没有理论能推导出N的值，我们所知的只有，如果N远小于1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000，像人类这么复杂的生物就不会出现。

从牛顿到爱因斯坦

牛顿之后两个多世纪，爱因斯坦提出了自己的引力理论，也就是著名的“广义相对论”。根据这一理论，行星实际上在“时空”中是沿着直线路径运行的，只是因为太阳的存在，其路径才发生了弯曲。人们常说爱因斯坦“推翻了”牛顿物理学，这实际上是一种误导。牛顿定律仍然能够很精确地描述太阳系中的运动(5)，并且适用于计算月球和行星探测器的运行轨迹。然而，与牛顿的理论不同，爱因斯坦的

理论可以用于描述速度接近光速的物体、能产生如此巨大速度的超强引力，以及引力对光本身的影响。更重要的是，爱因斯坦的理论深化了我们对引力的理解。为什么所有粒子以同样的速度遵循相同的轨迹下落——为什么所有物质的引力和惯性的比值都是完全相同的（这与“电荷”和“质量”不成比例的静电力不同）？这一切对于牛顿而言，都是未解之谜，而爱因斯坦证明，这不过是以下原理的自然结果：所有物体在时空中都沿着同一条“最直”的路径运动，该路径因质量和能量而发生弯曲。因此，广义相对论是一个概念上的突破，尤其值得注意的是，它源于爱因斯坦深刻的洞察力，而非任何具体的实验或者观察。

爱因斯坦并没有“证明牛顿是错的”，而是超越了牛顿的理论，将牛顿的理论融入更深刻、更广泛、更普适的理论体系之中。我认为，用另一个名字来命名爱因斯坦的理论也许会更好：不是“相对论”，而是“不变论”。爱因斯坦的成就是发现了一组可以被任何观察者应用的方程，并包含了以下著名的假设：无论观察者如何移动，由任何“局部性”实验测量的光速都是相同的。

任何科学发展的标志都是其理论越来越具有普遍性，这些理论包含了以前看似不相关的事实，并扩大了旧有理论的适用范围。物理学家兼历史学家朱利安·巴伯（Julian Barbour）将这比喻成登山，我觉得很有道理：

> 我们爬得越高，视野就越开阔。每登高一步，就更有助于理解事物之间的相互联系。更重要的是，每当视野不断地突然扩大，逐渐积累的理解就会随之不断更新，就像我们到达山顶时，看到了在攀登中从未想象过的景象。一旦我们在新的环境中找到了自己的方向，通往最近可到达的高峰的道路就会显现出来，进而在新世界中占据重要地位。

经验塑造了人类的直觉和常识，所以人类更容易接受直接影响自身的物理定律。从某种意义上来说，牛顿定律被“存录”在猴子的大脑中，所以它们可以自信地从一棵树荡到另一棵树上。然而，遥远的太空中的环境与我们的截然不同，在巨大的宇宙尺度上，在高速运动中，或者在引力强大时，常识性的观念就会失效。对此，我们不应该感到惊讶。

如果有一种智慧生物可以在宇宙中快速漫游[(6)]，那么它们对空间和时间的直观感觉将被大大拓宽，会将独特而有些怪异的相对论效应印入脑海。光速具有一种非常重要的特征：它只能被接近，但永远不会被超过。不过，这个“宇宙极限速度”并不会限制你一生能在宇宙中走多远，因为当宇宙飞船加速并接近光速时，时钟将会变慢（因为飞船上的时间会“伸长”）。如果你去100光年外的一颗恒星上旅行，当返回地球时，无论你觉得自己多么年轻，相对于地球上的人来说，你已经度过了200多年的光阴。虽然宇宙飞船的速度不可能比光速还快（通过地球上观察者的测量），但它的速度越接近光速，你就越不容易衰老。

这些效应是违反直觉的，因为我们的经验仅限于低速情况。一架客机的飞行速度仅为光速的百万分之一，远不足以让人察觉到时间的伸长效应，即使对最习惯于飞行的人来说，其一生所经历的这种效应加起来也不到一毫秒。虽然这种效应很小，但通过精确到十亿分之一秒的原子钟，人们已经测量出来了，而且与爱因斯坦的预言相符。

引力同样可以让时间“伸长”：在大质量物体附近，时钟往往运行得比较缓慢。这种变化在地球上几乎是不可察觉的，因为就像我们只习惯于低速运动一样，我们只经历过“弱”引力作用。不过，在设置极为精确的全球定位系统（GPS）时，我们就必须考虑这种效应及其对轨道运动的影响。

我们可以用一个物体逃逸出所在天体的速度来衡量该天体的引力大小。逃逸出地球所需的速度是11.2千米每秒。虽然这个速度与30万千米每秒的光速相比很小，但对工程师来说，达到这个速度是一项巨大的挑战，他们被迫使用化学燃料，这种燃料只能将其所谓的“静止质能”[(7)]的十亿分之一转化为有效能量。逃逸出太阳所需的速度是618千米每秒，仍然只有光速的五百分之一。

“强引力”和黑洞

牛顿的理论在太阳系的任何地方都适用，只需作极小的修正即可。实际上，当引力变得特别强大时，情况就会变得令人匪夷所思。天文学家已经发现了引力特别强大的地方，例如，中子星附近。当恒星爆炸形成超新星时，会留下这些超高密度的残留物（我们将在下一章讨论这个问题）。中子星的质量通常是太阳的1.4倍，但直径却只有20千米左右。它们表面的引力比地球的强一万亿倍。在那里，升高1毫米所需要的能量比完全摆脱地球引力所需要的能量还要多；一支笔从1米高的地方掉下来会产生相当于1吨TNT炸药的能量（尽管中子星表面的巨大引力实际上会立即将这些物体压扁）。在那里，物体需要达到光速的一半才能摆脱中子星的引力，而任何从很高的位置自由落在中子星上的物体，其下落速度都将超过光速的一半。

当引力变得和中子星周围的引力一样强大时，牛顿的理论就无法适用，这时需要用到爱因斯坦的广义相对论。中子星表面附近的时钟会比远离表面的时钟慢10%～20%。从中子星表面发出的光会发生严重的弯曲，如果你从远处看，不仅能看到中子星的正面，还能看到其背面的一部分。

一个体积比中子星小许多或重几倍的天体会捕获它周围的所有光，从而形成一个黑洞，而该黑洞周围的空间也会自我“封锁”起来。如果太阳被压缩到半径为3 000米以内，它就会变成一个黑洞。幸

运的是，自然界已经为我们做了这样的实验，因为宇宙中的确存在这种坍缩了的天体，它们“刺穿”了空间，并与外部宇宙相互隔绝。

银河系中有数百万个黑洞，每个黑洞的质量约为10个太阳质量，它们是大质量恒星的最终状态，或者是恒星之间碰撞的产物。当这些天体在太空中被隔绝时，它们就变得非常隐蔽，只能通过施加在其他物体上的引力效应或者通过它们附近的光线才能被探测到。有些黑洞带有一颗普通恒星绕其运行，形成双星系统，这样的黑洞更容易被探测到，对应的探测技术与通过测量恒星运动所受到的扰动来探测行星的技术相同，只不过这里更加简单。因为在这种情况下，可见恒星的质量小于暗天体的质量（而不是重1 000倍或更多），所以会在一个较大的轨道上以更快的速度运转。

天文学家总是对宇宙中最“极端”的现象特别感兴趣，因为通过研究这些现象，我们才最有可能有一些全新的发现。最引人注目的极端现象是一种惊人的剧烈闪光，被称为“伽马射线暴”。这类事件的威力非常强大，以至于在几秒钟内，它们的亮度就能超过100万个恒星星系。导致这种现象的可能是正在形成过程中的黑洞。

一个个的星系中心可能潜伏着更大的黑洞，我们可以通过观测在它们周围以接近光速旋转的气体所产生的强烈辐射，或者通过探测经过它们附近的恒星的超高速运动来推断黑洞的存在。离银河系中心非常近的恒星运行得非常快，就如同受到了一个暗天体的引力作用，这个暗天体就是一个质量为250万个太阳质量的黑洞。黑洞的大小与其质量成正比，而位于银河系中心的这个黑洞的半径为600万千米。其他星系的中心存在着一些更巨大的黑洞，其质量相当于几十亿个太阳质量，与整个太阳系一样大，尽管与藏身的星系相比，它们仍然非常小。

尽管黑洞很奇特，违反了我们的直觉，但描述它们实际上比任何天体都更容易。地球的结构取决于它的历史和构成元素，而且，围绕

其他恒星运转的行星，即使大小相同，构造也肯定大不相同。太阳基本上是一颗巨大的气态星球，表面不断呈现出湍流和耀斑，如果它包含了不同于当前的原子“组合”，外观可能会有所不同。然而，黑洞失去了所有关于它是如何形成的“记忆”，很快就进入了一个标准的稳定状态，这种状态只需用两个量便能描述：一是进入黑洞的质量是多少，二是它自转的速度有多快。

1963年，远在没有任何证据证明黑洞存在之前，也就是在美国物理学家约翰·阿奇博尔德·惠勒（John Archibald Wheeler）提出“黑洞”这个名称之前，新西兰的一位理论物理学家罗伊·克尔（Roy Kerr）就求出了爱因斯坦方程应用于自转物体时的一组精确解。之后，其他学者继续研究，并获得一个重要结论：任何坍缩的物体最终都会变为一个黑洞，克尔的公式准确地描述了这种特性。由此，黑洞和基本粒子一样成为标准化概念，而爱因斯坦的理论则准确地告诉我们黑洞如何扭曲空间和时间，以及它们“表面”的形状。

在黑洞周围，我们对空间和时间的直觉将会出现重大错误。按照我们的直觉，光沿着“最直”的路径传播，但在一个强烈扭曲的空间中，这条路径可能是一条复杂的曲线。在黑洞附近，时间过得很慢（甚至比中子星附近还要慢）。相反，如果你在离黑洞很近的地方悬停，或绕着黑洞旋转，就会看到外部宇宙在加速运转。黑洞周围有一个定义明确的“表面”，在处于安全距离的观察者看来，时钟（或一个下落中的实验者）似乎被“冻结”了，因为时间的伸长几乎是无限的。甚至连光也无法从这个表面以内逃逸出来，这是因为空间和时间的扭曲可能更加严重，就像空间自己在吞噬自己，速度极其快，即使向外照射的光线也会被拉回内部。在黑洞中，你无法在空间中向外移动，就如同你不能在时间中向后移动。

自转的黑洞扭曲时空的方法更为复杂。为了说明这一点，我们想象这样一个涡流，其中的水朝着中心旋涡旋进。在远离涡流的地方，

你可以驾船随心所欲地航行，要么顺流而下，要么逆流而上。但在靠近涡流的地方，水的旋转速度超出船速，虽然你仍然可以向外（沿一条向外的螺旋线）和向内移动，但你不得不跟着水流转；再往里，水向中心旋进的速度会变得比船速更快，如果你胆敢进入某个“临界半径”之内，就无法掌控自己的命运，只能被吸入涡流，走向毁灭。

黑洞有一个表面，类似于单向膜，任何从黑洞内部发出的信号都无法传送给位于黑洞之外安全距离处的伙伴，任何进入“表面”的人都会被困住，并注定会被吸入一个区域。根据爱因斯坦的方程，在有限的时间（用他们自己的时钟计时）内，这个区域的引力将达到无限大。这个“特异现象”意味着，这一切超越了我们所知的物理过程，正如它们在宇宙形成之初所表现的那样。任何坠入黑洞的人都会遭遇“时间的终结”。这是大危机的前兆吗？我们的宇宙最终难逃大坍缩的命运，还是会有一个永恒的未来？或者一些未知的物理过程可以保护我们摆脱这种命运？

众所周知，爱因斯坦的理论是根据这样一种“愉快的想法”构建起来的，即引力与加速运动是不可区分的。在自由下落的电梯中，我们测量不出引力的作用。如果一队视死如归的宇航员排成固定方阵向地球自由落体，那么他们之间的水平间距将会缩小，但垂直间距将会增加。这是因为他们的轨迹都向地球的中心汇聚，并且引力对处于地层中较低位置的物体施加的引力更大，所以越靠下的宇航员所受的引力越大，离地球也就更近。每个宇航员身体的不同部位之间也会有类似的引力效应：在双脚朝下的坠落中，宇航员的身体会被纵向拉伸和横向压缩。在地球引力场中，人是无法察觉到这种“潮汐力”的，但在黑洞周围，这种力的影响是灾难性的，恐怕宇航员还没有到达黑洞中心的特异之处，就已经被撕成碎片，拉成“意大利面条”。当一名宇航员向着一个恒星质量的黑洞坠落时，即使在到达黑洞表面之前，也会感受到强烈的潮汐效应；此后，他将在几毫秒（根据宇航员的时钟测量）内到达黑洞中心。不过，在银河系中心的超大质量黑洞周

围，潮汐效应要温和得多：即使在穿过其表面之后，在足够接近中心地点、让人感到严重不适之前，宇航员仍会有几小时的时间进行从容的探索。

原子尺度的黑洞

黑洞并不只是一个非凡的理论构想。黑洞确实存在的证据越来越令人信服。与我们在宇宙中观察到的最为壮观的现象（比如类星体和超新星爆炸）相比，黑洞更为复杂。关于它们究竟是如何形成的，目前仍存在激烈的争论。不过，在一颗死亡的恒星上或者在星系中心的气体云中，引力为何会战胜所有其他的力，这个问题已经没有什么神秘可言。黑洞的形成要求其质量至少和恒星的质量一样大，因为我们已经看到，对于小行星和行星来说，引力无法压倒其他力。事实上，即使处于一颗云雾包裹的行星上，物理学家也有信心预言，如果存在恒星，那么也可能存在恒星质量的黑洞。

正如我们所看到的那样，恒星的大小一方面由引力和原子力之间的平衡决定，另一方面又反过来决定成形黑洞的质量。根据爱因斯坦的理论，黑洞中并不存在任何特殊的物质，它是由空间本身的结构形成的。由于空间是一个平滑、连续的整体，因此，除非按比例进行测量，否则我们无法判断，一个黑洞一旦形成，是像原子一样大，还是像恒星一样大，或者像当前的可观测宇宙一样大。

即使一个只有原子大小的黑洞，也可能拥有一座山那么大的质量。从定义上来说，黑洞是引力压倒所有其他的力而形成的天体。若想形成一个原子大小的黑洞，必须将10^{36}个原子压缩到一个原子的大小。这个令人生畏的要求是宇宙数字N巨大取值的另一个后果，这一常数反映了在原子尺度上引力的微弱程度。那么，是否存在比原子还小的黑洞呢？由于空间在最小的尺度上具有粒子性，这里会存在一个最终的极限，我们将在第10章重新回到这个话题。

如果存在原子大小的黑洞，那么它们可能形成于宇宙最初阶段压力极大的环境中。如果它们真的存在，那将会是宇宙和微观世界之间的一条“迷失的纽带”。

JUST
SIX
NUMBERS

04
恒星、元素周期表和 ε

确定不同原子之间的比例是天体物理学的一大胜利，
而原子的本质主要取决于一个数字：ε。

我相信，即使一片草叶也是恒星的杰作。

——沃尔特·惠特曼（Walt Whitman）

作为“核聚变反应堆”的恒星

地球的年龄有多大了？通过对放射性原子的测量，地球的年龄被确定为45.5亿年。早在19世纪，人们已经提出了地球拥有悠久历史的有力论据。一方面，地质学家通过测算侵蚀和沉积过程的速度，估算出地球的年龄至少有10亿年。通过对物种进化速度的估算，达尔文主义者也提出了相同的观点。另一方面，伟大的物理学家威廉·汤姆逊（William Thomson，又称开尔文勋爵）却计算出，只需地球年龄1%的时间，太阳就会因为内部所有热量散失殆尽而熄灭。因此，他消极地断言：“几百万年以后，地球上的居民将会失去生命所必需的光和热，除非光和热还存在于我们未知的来源之中，并且已经在造物主的大仓库中准备好了。”20世纪的科学研究证实，这样的能源确实存在，就在原子核里，氢弹就是储藏在原子核内的能量的一种极具杀伤力的应用。

太阳的能量来源于由氢原子（最简单的原子，原子核由一个质子组成）转化为氦原子（第二简单的原子，原子核由两个质子和两个中子组成）的过程。长期以来，人们希望利用核聚变获得新的能源（“受控核聚变”），但无法达到发生核聚变所需的数百万度高温。更大的问题是，如何用物理方法将这种超热气体限制在一定范围内，并用磁力将其困住，因为很显然，任何固体容器都会被它熔化。太阳的质量如此之大，以至于引力将包裹在外部的较冷层向内拉，从而“盖住”了高压内核区。太阳就这样调整了自己的结构，使原子能在其内核里产生，并以能够平衡表面损失的热量所需的速率向外扩散，而这些损失的热量正好是地球上生命形成的基础。

这种燃料使太阳照耀了我们近50亿年。然而，再过50亿年左右，它的燃料就会耗尽，那时，太阳的内核就会收缩，而外层会膨胀。在此后1亿年[(8)]的时间里，太阳将会变得更亮，并膨胀为一颗被称为“红巨星”的恒星，届时太阳将会吞噬内行星，并蒸发掉地球上的所有生命。与此同时，太阳的一些外层会被吹走，但内核会收缩成一颗白矮星，并在太阳系干涸的残骸上发出暗蓝色的光芒，亮度还不及现在的满月。

天体物理学家对太阳的内部结构进行了测算，并与观测到的太阳的半径、亮度、温度等进行了拟合，得出的结果与测算结果相符。因此，他们可以自信地告诉我们太阳内部的具体情况。他们还可以计算出未来几十亿年太阳将如何演变。显然，这些计算结果还不能得到直接验证。不过，我们可以观察其他与太阳相像但处于不同演化阶段的恒星。如果我们有大量形成于不同时间段的恒星可供研究，那么为每颗恒星的一生提供一张“快照”并非难事。这就好比，通过观察不同阶段的大量生命，一个刚着陆在地球上的火星人很快就能推断出人类或树木的生命周期。即使在最邻近地球的恒星中，我们也能分辨出哪些还很年轻，不超过100万年，而哪些处于濒死状态，已经吞噬了它们曾经拥有的所有行星。

上述推论其实基于这样一个假设：原子及其原子核在任何地方都是一样的。虽然牛顿的伟大理论将地球和天体运行轨道上的引力联系了起来，但他只研究了太阳系内部的运动。我们花了很长时间才意识到，引力一样作用于其他恒星，甚至其他星系。在古代，人们认为，天体是由一种特殊的物质“精华”构成的，这些物质比土、空气、火和水都纯净。直到19世纪中叶，我们对太阳的构成还是一无所知。通过使用棱镜对太阳和其他恒星的光谱组成的分析，人们发现，来自太阳和其他恒星的光包含了地球上常见原子的特征谱线。恒星的物质成分和“月下界”地球上的原子并无不同。

天体物理学家可以像计算太阳的演化过程那样，简单地计算出一颗恒星的生命周期，并判断该恒星的质量是太阳的一半、2倍或者10倍。较小的恒星燃烧燃料的速度较慢。相比之下，质量是太阳质量10倍的恒星比太阳亮几千倍，消耗燃料的速度也更快，例如猎户座中排列成梯形的4颗蓝色恒星。这类恒星的寿命比太阳要短得多，而且死亡方式更为惨烈，会以超新星的形式爆炸。在几个星期内，它们的亮度相当于几十亿个太阳，其外层以两万千米每秒的速度被抛射出去，形成一股爆炸波，冲击周围的星际气体。

1987年2月24日，加拿大天文学家伊恩·谢尔顿（Ian Shelton）与其助手在智利北部的拉斯坎帕纳斯天文台进行例行观测。在南方的天空，他们发现了一种陌生的光团，很亮，足以用肉眼看到。然而，前一天晚上它并不存在。事实证明，这是近代以来观测到的距离最近的超新星。从最早的几个星期，直到随后几年里亮度逐渐减弱的过程中，天文学家使用现代天文学技术对其进行了持续的监测，用以检验这类大爆炸的已有理论。这是唯一一颗其前身恒星已经为人所知的超新星：从过去的照片来看，原来处在这颗超新星位置上的是一颗蓝色恒星，其质量大约为太阳质量的20倍。

超新星代表了恒星生命中的灾难性事件，涉及一些极端的物理过程，天文学家自然会为之着迷。然而，地球上只有万分之一的人是天文学家，其他人更关注地球表面上的活动。那么，这些数千光年外的恒星爆炸与所有发生在地球表面或靠近地球表面的活动有什么关系呢？答案令人惊讶不已，它们竟然对每个人的生存环境起着至关重要的作用。没有它们，我们就不会存在。正是超新星创造了构成地球的原子“组合”——这是复杂生命的化学基石。自达尔文以来，我们已经了解了人类出现之前的进化和自然选择，以及我们与生物圈其他部分的关联。现在，天文学家将地球的起源追溯到太阳系形成之前就已经毁灭的恒星，而正是这些古老的恒星构成了人类和地球的原子。

恒星里的炼金术

在自然界中，有92种不同的原子，它们被排列成“元素周期表”。每个原子在表中的位置取决于其原子核中质子的数量。元素周期表从1号元素氢开始，到92号元素铀。原子核中不仅含有质子，而且含有另外一种粒子，叫作中子。中子比质子稍重一些，但不带电荷。一种特定元素的原子可以有几种变体，叫作同位素，所含中子数各不相同。例如，碳元素在元素周期表中属于6号元素：它的原子核中含有6个质子。最常见的碳原子是^{12}C，它包含6个中子，但还存在拥有7个和8个中子的同位素，分别被称为^{13}C和^{14}C。铀是自然界中最重的元素，但实验室里已经制造出了更重的原子核，其原子序数高达114。这些超重元素不稳定，易于衰变。有些元素的寿命长达数千年，比如钚（94号元素）。那些编号超过100的元素可以在原子核碰撞实验中被制造出来，但很快就会发生衰变。

当一颗大质量恒星内核的氢元素全部转化为氦元素（2号元素）后，恒星的内核便会向内收缩，使内部温度继续升高，直到氦元素能够参与核聚变反应。由于氦原子核的电荷是氢原子核的2倍，因此它们需要更快地碰撞，以克服更强烈的电斥力，这就需要更高的温度。当氦耗尽时，恒星会进一步收缩并升温。像太阳这类普通大小的恒星无法获得足够高的温度，使核聚变长久地进行下去，但大质量恒星因为具有更强大的引力，其中心温度可以达到10亿摄氏度。在生成碳元素（6号元素）的过程中，这些恒星会释放出更多能量，并引起一系列核聚变反应，产生更重的原子核：氧、氖、钠、硅等原子核。特定原子核形成时所释放的能量取决于将其质子和中子“黏合”在一起的核力与质子之间的静电排斥力之间的对抗程度。铁原子核（包含26个质子）比其他任何原子核结合得都要紧密，必须增加能量（而不是释放能量）才能形成比它更重的原子核。因此，当恒星的内核都被转化为铁原子核之后，将会面临一场能源危机。

随后的发展充满了戏剧性。一旦铁原子核所占的比例超过一定的阈值（约1.4个太阳质量），引力就会占上风，铁原子核向内坍缩到中子星大小，同时释放出巨大的能量，形成一次大爆炸，外部物质被抛向太空，最终变为一颗超新星。此时的恒星形成一种“洋葱”似的结构：氢和氦仍在外层燃烧，而较热的内层物质按照元素周期表的排列顺序由外向内依次分布。被抛回太空的碎片中包含了这些混合在一起的元素，氧是最常见的，其次是碳、氮、硅和铁。结合所有类型的恒星及其所经历的各种演化阶段，我们可以计算出这些元素之间的比例，得出的结果与在地球上观察到的比例一致。

铁元素在元素周期表中仅仅排列在第26位。初看之下，形成比铁原子重的原子似乎是一个问题，因为必须注入更多能量才能合成它们。不过，恒星在坍缩过程中产生的高温，加上外层爆炸产生的冲击波，二者的能量一起促进了少量元素周期表中的其余元素的产生，直到第92号元素铀。

银河系的生态系统

第一批恒星形成于大约100亿年前，由原始物质构成，这种物质只含有最简单的原子，没有碳，没有氧，也没有铁，那时的化学是一门非常乏味的学科。第一批恒星周围也没有行星环绕。在太阳形成之前，可能有几代大质量恒星已经经历了它们的整个生命周期，将远古时的氢转化为生命的基本组成部分，并通过强风或爆炸将它们抛入太空。其中一些原子融入了一个类似于猎户座星云的星际云团，大约45亿年前，一颗新的恒星在那里诞生，它周围被充满尘埃的气体盘包围着，最终形成了太阳系。为什么碳和氧在地球上随处可见，而金和铀却非常罕见呢？答案在太阳形成之前那些爆炸的恒星身上。地球和人类都源自那些古老恒星的灰烬。银河系是一个生态系统，一代代的恒星在不断地循环利用、加工着原子。

太阳系中的碳原子、氧原子和铁原子最初都是在大质量恒星中形成的，这类恒星将自己的碎片抛入太空，形成尘埃云。在45亿年前，太阳系就在这片尘埃云中形成。这些“污染物”（指碳原子、氧原子和铁原子）只占全部物质的2%，氢原子和氦原子仍然占据主导地位。不过，地球上之所以出现重原子比例过高的现象，是因为氢原子和氦原子是挥发性气体，它们已逃离了所有的内行星。同太阳一样，木星这样巨大的行星主要由氢和氦组成。在新生太阳周围的尘埃扁盘中，靠外的部分比较冷，木星就是在这种环境中形成的，它自身的引力足以拉住这些轻原子。

比太阳更古老的恒星应该在银河系遭受这种“污染”之前就已经形成了。因此，与太阳相比，重元素在这些恒星表面上会比较缺乏。恒星具有复杂的光谱，其中每种原子都具有一组独有的特征颜色。例如，街灯中的钠发黄光，而汞蒸汽会发出特有的蓝光。事实上，在最古老的恒星中，所有较重的原子的数量往往比较少，这恰恰为银河系历史的总体格局提供了佐证。相比之下，即使在最古老的恒星中，氦含量也非常丰富，其中的原因可以追溯到“大爆炸”发生后的最初几分钟。我们将在下一章对此展开讨论。

原子核系数：ε=0.007

确定不同原子的比例并意识到“造物主不需要转动92个不同的旋钮”是天体物理学的一大胜利。关于原子，仍存在一些不确定的细节性问题，但其本质主要取决于一个数字，那就是将构成原子核的粒子（质子和中子）结合在一起的力的强度。

爱因斯坦著名的质能方程$E=mc^2$告诉我们，质量（m）通过光速（c）与能量（E）相关。因此，光速就有了重要的意义。光速决定了“转换因子”，即告诉我们每千克物质的能量是多少。将质量百分之百转化为能量的唯一方法是，将它与等质量的反物质放在一起。不

过，银河系中不存在成块的反物质（对于我们的生存来说，这是幸运的）。仅仅1千克反物质所产生的能量就相当于一座大型发电站在10年内产生的能量。像汽油这样的普通燃料，甚至TNT这样的炸药，释放出的静止质能也只有大约十亿分之一。这些物质的燃烧只涉及化学反应，原子核仍保持不变，只是改变了其电子的轨道和原子之间的联系。然而，核聚变的威力是惊人的，因为它比任何化学爆炸的效能都要高出数百万倍。一个氦原子核的质量是构成它的两个质子和两个中子的总质量的99.3%。剩下0.7%的质量主要以热量的形式释放出去了。因此，太阳的燃料（太阳内核的氢气）在聚变成氦时，将其质量的0.7%，即0.007转化为能量，这个数字就是 ε，它决定了恒星的寿命。从氦到铁的进一步核聚变反应仅多释放0.001。因此，恒星生命的后期相对短暂，甚至更短，因为在温度更高的恒星内核中，额外的能量会在不可见的情况下被中微子带走。

当简单的原子进行核聚变反应时，释放的能量取决于“黏合”原子核的力的大小。这个力不同于我们已经讨论过的两种力——引力和静电力，因为该种力仅在非常短的距离内才起作用，而且只有在原子核的尺度上才有效。我们可以感觉到静电力和引力的力量，但感觉不到这种力。在原子核内部，这种力能将质子和中子牢牢地结合在一起，足以对抗电斥力，否则电斥力会使带正电荷的质子相互分离。物理学家称这种力为“强相互作用力”。

这种强相互作用力支配了微观世界，将氦原子中的质子和较重原子核内的质子牢牢地结合在一起，由此聚变出巨大的能量，为太阳提供持久的热量，这也是人类出现的先决条件。就像威廉·汤姆逊一个世纪前就意识到的那样，如果没有核能，太阳将在大约1 000万年内萎缩。由于强相互作用力仅作用于短距离，因此它在较大和较重原子核中的作用力较小。这就是比铁原子核重的原子核变得松弛而不是更紧密的原因。

ε的调谐

我们虽然知道核力至关重要，但它到底有多重要呢？例如，如果ε的取值是0.006或0.008，而不是0.007，将会发生什么变化呢？初看之下，人们可能会认为这不会带来太大的改变。如果ε变小，氢将会变成效率较低的燃料，太阳和恒星就不会存活那么久。这本身并不重要，毕竟，人类已经生活在地球上，而太阳目前的年龄还不到其应有寿命的一半。然而，事实证明，在将氢转化为元素周期表中其余元素的过程中，存在一些微妙的效应，它们对数字ε的变化非常敏感。

在这个核反应链中，第一个关键环节（由氢合成氦）相当敏感地取决于原子核的强相互作用力。氦原子核包含两个质子和两个中子，它的形成并不是4个粒子一次性叠加形成的，而是通过氘（重氢）这个中间环节分阶段形成的，氘由一个质子和一个中子组成。如果原子核的“黏合”力较弱，则ε的取值为0.006而不是0.007，那么质子就不能与中子结合，氘也就不稳定，氦的形成之路就会被堵死。结果便是，我们只会得到一个由氢组成的简单宇宙，其原子由一个质子和一个绕之运转的电子构成。在这个世界，不存在化学反应。恒星仍然可以在这样的宇宙中形成（如果其他一切都保持不变），但它们将不会有核燃料，而是会收缩并冷却，最后变成一堆残骸，不会有爆炸以将碎片抛入太空，因此也就不会形成新的恒星，也不会存在任何能够形成岩石行星的元素。

初看起来，人们可能会从这个推理中猜测，更强大的核力会使核聚变更有效，更有利于生命的存在。然而，如果ε大于0.008，我们也不可能存在，因为不会有氢从“大爆炸”中保存下来。在现实的宇宙中，两个质子之间的相互排斥力非常强烈，以至于如果没有一两个中子的帮助[(9)]，原子核内的强相互作用力根本就无法将它们结合在一起。如果ε等于0.008，那么两个质子就可以直接结合在一起，这种现

象应该发生在早期宇宙。这样带来的结果便是，普通的恒星中没有氢可供燃烧，水也就不可能存在。

因此，任何具有复杂的化学性质的宇宙都要求 ε 的取值在0.006～0.008之间。某些特殊细节甚至更加敏感。英国理论物理学家弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）在推算碳和氧在恒星中形成的过程时，偶然发现了“精细调谐”的最著名例证。碳（原子核中有6个质子和6个中子）是由3个氦原子核结合而成的，但同时出现3个氦原子核的概率几乎可以忽略不计，因此碳的形成也是分阶段进行的。在与另一个氦原子核结合形成碳之前，这一过程会经历一个中间阶段，即2个氦原子核结合形成铍原子核（含有4个质子和4个中子），然后再与另一个氦原子核结合形成碳。然而，霍伊尔发现一个问题，这个铍原子核非常不稳定：它很快就会衰变，以至于在它衰变之前，第三个氦原子核出现并黏附在它上面的可能性微乎其微。那么，碳究竟是如何产生的呢？事实证明，碳原子核有一个特性，即与一种特别的能量之间存在“共振”，从而增加了铍原子核在衰变前的短暂时间内与另一个氦原子核结合的可能性。实际上，霍伊尔预言了这种共振的存在，并敦促自己的同事探测这种现象，结果被证明是正确的。原子物理学中的这种“意外”使碳得以形成。然而，在接下来碳捕获另一个氦原子核形成氧的过程中，这种“共振”效应却消失了。事实证明，“共振”对核力的变化非常敏感，即使核力只改变4%，也将会严重限制碳的生成量。因此，霍伊尔认为，即使 ε 仅有几个百分点的变化，也会危及我们的生存。

无论元素是如何形成的， ε 的变化都会影响元素周期表的长度。如果核力变弱，原子核结合最紧密的元素（现在是26号元素铁）的排序将会在元素周期表中降低，稳定元素的数目也将减少到92以下。这将导致化学变得比较贫乏。相反， ε 若增大，将会提高重元素的稳定性。

初看之下，由大量不同原子组成的更长的“菜单”似乎开辟了一条道路，可以将我们引向更有趣、更多样的化学世界。然而，事实全非如此。例如，如果英文字母表中包含更多字母，英语语言也不会因此而变得更加丰富。同样，即使只存在几个常用元素，复杂分子照样多种多样，变化无穷。如果没有氧和铁（分别是8号和26号元素），尤其是大量的碳（6号元素），化学将会变得枯燥无味，因为生命所必需的任何复杂分子都不会生成。不过，无论是通过增加原本就十分丰富的元素的数目，还是在已有的92种稳定的元素之外再增加若干种稳定的元素，这一切都不会对化学有任何助益。

所以，元素的实际组合取决于数字 ε。不过，值得注意的是，假如这个数字是0.006或0.008，而不是0.007，那么以碳为基础的生物圈就不可能存在。

JUST
SIX
NUMBERS

05

宇宙栖息地（二）：超越我们的银河系

最初的质子和氢原子是从哪里来的呢？若想回答这个问题，我们要回到第一颗恒星诞生之前的时代。

望远镜（名词）：一种装置，它与眼睛之间的关系就像电话之于耳朵，能使远处的物体以大量不必要的细节折磨我们。

——安布罗斯·比尔斯（Ambrose Bierce）

星系的宇宙

我已经介绍了元素周期表中的原子是如何形成的：我们皆来自恒星的星尘。如果不用这么浪漫的表述，那就是都来自“核废料”，即能使恒星发光的燃料。原子形成的过程取决于“核力”的大小，这种力将原子核内的质子和中子黏合在一起，其大小由宇宙常数 ε=0.007 来衡量，这个数字表示氢聚变成氦时释放的能量比例。那么，最初的质子和氢原子是从哪里来的呢？这些原始物质又是如何聚集成第一批星系和恒星的呢？若想回答这些问题，我们必须拓展自己的时空视野，放眼银河系以外的领域，回到第一颗恒星诞生之前的时代。在这个过程中，我们将会遇到更多可以描述整个宇宙的数字，人类的出现也依赖于这些数字的精细调谐。

恒星聚集成星系，星系构成了宇宙的基本单位。银河系就是一个典型的星系，其千亿颗恒星主要分布在一个圆盘中，围绕着明亮的内部“核球”运转，相比于平均情况，“核球”里的恒星彼此靠得更近。“核球”正中心潜藏着一个质量为250万个太阳质量的黑洞。从银河系中心发出的光大约需要2.5万年才能到达地球，而地球到银河系中心的距离则比圆盘半径的一半还远。从太阳的位置来看，圆盘中的其他恒星集中分布在一条横贯天空的玉带中，我们称之为银河。平均而言，恒星围绕银河系中心运行一周（有时被称为“银河年”）需要1亿多年。

仙女星系是离银河系最近的太空邻居，距离地球大约有200万光年。对于仙女星系中围绕一颗恒星运行的某颗行星上的天文学家来

说，银河系看起来就像我们眼中的仙女星系：一个由恒星和气体组成的倾斜圆盘正围绕中心一个“轮毂”运转。借助大型望远镜，我们还可以看到数百万个其他星系。不过，并不是所有的星系都是圆盘状的，另一种重要的类型是所谓的“椭圆星系”。在这类星系中，恒星没有组织成圆盘状，而是聚集在任意的轨道上，而且每一颗恒星都能受到其他所有恒星的引力作用。

星系并不是随意地散布在空间中，大多数都通过引力成团地聚集在一起。我们所在的本星系群的直径达几百万光年，包括银河系、仙女星系以及34个较小的星系。不过，这只是最新的统计结果，还有许多暗淡的小成员仍待发现。引力正在以100千米每秒的速度将仙女星系拉向银河系，大约50亿年后，这两个星系可能会彼此相撞。这样的碰撞事件在宇宙中很“常见”。实际上，在太空深处，许多星系看上去正在经历这样的碰撞。

星系的分布非常广阔和分散，恒星排列得也非常稀疏，因此恒星之间的碰撞极为罕见，在太阳附近明显如此，因为即使最近的恒星，看起来也像一个微弱的光斑。即使两个星系发生碰撞并合并在一起，恒星之间的碰撞概率也极低。当两个星系发生碰撞时，每颗恒星都会受到另一个星系中所有物体的联合引力作用，导致其轨道发生变形，从而使所有恒星最终混合成一个群体，而不再是两个独立的圆盘，这就形成了所谓的椭圆星系。我怀疑大型的椭圆星系就是这样形成的，尽管这个问题仍然存在争议。

宇宙的结构：宇宙网

我们所在的星系群位于室女星系团的边缘。室女星系团是由数百个星系组成的宇宙岛，其中心距离地球约5 000万光年。星系群和星系团又会聚合成更大的集群，在这些巨大的集群中，离地球最近且最显著的是所谓的“巨壁”（Great Wall），这是由星系组成的片状集

群，距离地球约2亿光年。另一种物质集中的集群叫作“巨引源”（Great Attractor），它对银河系和整个室女星系团施加引力，使两者以几百千米每秒的速度向它靠近。

自然界中的许多现象（如山地景观、海岸、树木，血管等）都是“分形”[(10)]。分形具有特殊的数学特征：其中一小部分被放大后与整体具有相似的特征。如果宇宙也是如此：它是星系团套星系团，直到无穷，那么，无论我们对空间的探测范围有多广，以及所研究的样本体积有多大，星系的分布仍然不均匀，并且随着探测范围的增大，我们采样的星系团的规模也会越来越大。然而，宇宙看上去并非如此。借助高分辨率望远镜，我们可以观测到星系的分布范围达数十亿光年。在这样的大尺度空间中，天文学家已经发现了许多像室女星系团和“巨壁”这类星系团，以及星系集群的更多特征。但是，随着探测范围的增大，我们并没有在更大的尺度上发现任何显著的特征，用天文学家罗伯特·科什纳（Robert Kirshner）的话来说，我们到达了“伟大的终点”。一个边长为两亿光年的正方体盒子[(11)]足以容纳最大的星系团，成为宇宙的一个“恰如其分的样本”。无论放置在哪里，这样一个盒子都会包含数目大致相同的星系，以统计上相似的方式组成星系团和丝状结构等。星系集群的层次结构不会无限度增大。

因此，宇宙不是一个简单的分形。此外，与望远镜可以探测到的最大距离相比，这个分形的“平滑度”很小。打个比方，假设你在大海中的一艘船上，周围是复杂的波纹，并且一直延伸到地平线。你的视野所及之处有数量足够多的波纹，因此你可以对它们进行统计研究。即使海面上最大的波纹也比你视野的极限距离小得多，因此你可以将看到的所有波纹分成许多单独的区域，每个区域都大到足以成为适合的样本。然而，陆地风景和海上风景却显著不同：在山地中，一座山峰通常就能填满你的视野，这时你无法像在海面上那样定义出具有平均大小的适合样本。[(12)]

宇宙结构由相当多的层次组成：恒星、星系、星系团和超星系团。在比视野小1/300的尺度上，星系密度在不同地方的变化超过了2倍；而在更大的尺度上，星系密度的波动很小，即使存在像巨引源那样显著的集群。超星系团就像上述提到的海上引人注目的最长波纹。在第8章，我们将会看到这个尺度取决于一个唯一的宇宙常数Q，而该常数则在宇宙极早期就已经确定下来了，而星系团和超星系团的“胚胎”（大小延伸至数百万光年的结构）可以追溯到整个宇宙尚处于微观尺度的时期。这也许是宇宙的外层空间与微观内在空间之间存在的最令人惊讶的联系。

人们起初可能会猜想：宇宙在巨大尺度上的结构与太阳系内局部的栖息地并无联系。银河系的恒星数目究竟是1 000万亿颗，或者仅仅是100万颗，而不是我们观测到的1 000亿颗，这似乎并不重要；银河系所属的星系团含有的星系数目究竟有数百万个，还是仅仅几个，这也无足轻重。过于平滑的宇宙将会了无生趣，因为恒星和星系不会形成，所有物质将会稀疏而无序地分布在太空之中。

这将是第8章的主题。不过现在，我们将注意力放到大尺度上的平滑性的另一个重要作用上：它使我们能够定义宇宙的一般属性，从而使宇宙学的兴起成为可能，包括对星系和星系团的统计等。除了星系和星系团以外，我们还可以思考宇宙的平滑性，就如同我们将地球描述为“圆的”，而不用考虑山脉和海洋深处的复杂地形。然而，如果地球的山脉有几千千米高，而不只有几千米，那么用“基本上是圆的”来描述地球就不可行了。

更重要的是，我们可以提出这样一个有意义的问题：整个宇宙是静态的，还是正在膨胀或坍缩呢？

宇宙膨胀

星系是宇宙的“建筑基石”，通过研究它们发出的光，我们可以推断出它们是如何运动的。在一个典型的星系中，数千亿颗恒星中每一颗的亮度太过微弱，无法被单独观测到，而望远镜只能看到许多恒星汇聚在一起的光。不过，我们可以对这些光进行光谱分析。来自单颗恒星的光可以揭示该恒星靠近或远离我们的速度，反复地测量甚至能够捕捉到由绕该恒星运转的行星引起的微小振动。同样，整个星系的光谱揭示了它的移动速度，要么是向我们移动，也就是朝光谱的蓝端移动，要么是远离我们，也就是朝光谱的红端移动。

关于宇宙的一个最重要的事实是，所有遥远星系的光都向光谱的红端移动：它们全都在离我们远去，除了与我们同在一个星系团中的少数几个邻近星系。此外，那些距离我们更遥远的星系，红移(13)更大。我们似乎处于一个不断膨胀的宇宙中，随着时间的推移，星系团之间的距离将越来越远，它们在空间中的分布也变得越来越稀疏。

红移和距离之间的简单关系被称为“哈勃定律”，这是根据埃德温·哈勃（Edwin Hubble）的名字命名的，他在1929年首次提出了这一定律。位于其他星系的观测者也会发现，离他们较遥远的星系也因膨胀而相互远离。这种膨胀是一种广义效应：单个星系（甚至星系团）本身并没有膨胀，而且，范围越小，受膨胀的影响就越小，对太阳系来说就是如此。

在图形艺术家莫里茨·柯内里斯·埃舍尔（Maurits Cornelis Escher）所画的《空间立体划分图》这幅画中（图5-1），假设节点之间的“棒子”以同样的速度伸长，那么任何节点上的观测者都会看到其他节点都在远离他们，远离的速度取决于观测者和节点之间有多少根棒子。换句话说，节点之间的远离速度与它们之间的距离成正比。虽然宇宙中的星系并不是按照比例呈网格状分布，而是组成了星系群或星系团，但你仍然可以对宇宙的膨胀进行这样的设想：星系团都由棒子连在一起，并且都以相同的速率伸长。图中的任何节点都没有什

么特殊之处，银河系在宇宙中的位置也是如此（虽然星系是随机分布的，但我们观测它们的时间并不是随机的；我将会在后文阐明原因）。宇宙学之所以取得进展，只是因为宇宙结构在大尺度上是均匀的，所有节点都在以类似的方式膨胀，只需用“哈勃膨胀”就可以进行简单的描述。对于局部区域来说，这种膨胀可以被看作一种多普勒效应，但在大尺度上，当光远离的速度加快并且可与光速相比拟时，红移应该被看作光传播通过的空间的“伸长”。换句话说，光的红移量，即波长被拉长的量，等于宇宙已经膨胀的程度，用埃舍尔的网格来描述就是，棒子也变长了。



图5-1　埃舍尔的《空间立体划分图》

如果这个网格里的棒子都以同样的速度伸长，节点之间就会相互远离，这符合哈勃定律。不过，这里没有一个节点是特殊的，也不存在中心

我们可能想确切地知道，红移是否真的意味着宇宙的膨胀，而不是在长距离上才能发挥作用的新的物理效应。有人时常提及“光疲倦”效应，但目前还没有人能提出与所有事实相一致的可靠理论，例如，这种效应必须使所有颜色的光产生相同的波长变化，而且不会使

遥远物体的图像变模糊。与“大爆炸”理论相比，一个不膨胀的宇宙会导致更糟糕的悖论。恒星的能量储备不是取之不竭的，随着不断地演化，它们最终会耗尽燃料。星系也是如此，它们本质上是恒星的聚合体。通过对恒星的演化方式进行理论上的计算，并将银河系和其他星系中最古老恒星的性质同计算结果进行比较，我们就可以确定它们的年龄。最古老的恒星大约有100亿年的历史，这与当前的可见宇宙只比这个时间稍微长一点儿的观点完全一致。如果宇宙是静态的，那么在大约100亿年前，所有的星系肯定在现在的位置上同步被神秘地“开启”。一个不膨胀的宇宙会带来概念上的令人费解的难题。

几乎可以肯定的是，宇宙的膨胀开始于100亿～150亿年前，最精确的估计是120亿～130亿年前。宇宙的年龄之所以存在这种不确定性，主要有两个原因：一是星系间的距离（不像它们的远离速度）仍然无法得到精确的测量；二是对宇宙年龄的估计依然取决于其膨胀速度。

回顾过去

光是以有限的速度进行传播的，所以我们目前看到的遥远区域的情况并不是它们此时的情况，而是很久以前的情况。在更早的时代，宇宙比现在更加紧缩，也就是埃舍尔所画的网格中的棒子比现在更短。埃舍尔的第二幅画《天使与魔鬼》（图5-2）更好地表示了我们实际看到的情形。

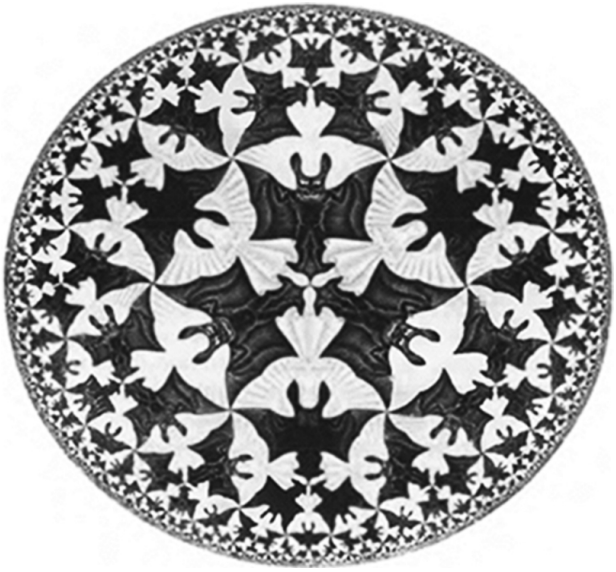


图5-2　埃舍尔的《天使与魔鬼》

由于光速是有限的，我们所看到的遥远区域属于遥远的过去。

朝地平线望去，一切似乎显得更加紧缩了

遥远星系的外观与附近星系的会有所不同，因为遥远星系的光在旅途中经过了很长一段时间，所以当它们发出光时会比被我们看到光时更年轻，演化程度更低，而且在此阶段，并非所有的原始气体都凝聚成了恒星，这个演化过程非常缓慢，只能在数十亿年后才会显现出来。为了搞清楚星系的演化趋势，我们必须探测遥远的星系，研究它们在几十亿年前就已经发出的光。

哈勃太空望远镜（以宇宙膨胀的发现者哈勃的名字命名的）在远离大气干扰的地球轨道上运行，它拍摄到了迄今为止最清晰的非常遥远区域的照片。哈勃太空望远镜非常灵敏，即使在不到满月面积1%的视野范围内，一次长时间的曝光就可以准确地拍摄到数百个微弱的光点，它们在天空中挤在一起，如果用普通望远镜观察，则显示为一片空白。我认为，哈勃太空望远镜拍摄的这些令人惊叹的照片对公众的影响，不亚于20世纪60年代从太空拍摄的第一批照片，它们展示了整个地球及其貌似精致的生物圈。该望远镜所拍摄到的星系特征模糊、形状多样，比我们肉眼所能看到的任何恒星都要暗淡得多。不过，它

们每一个代表的都是一个完整的星系，大小达数千光年，由于距离我们太远，所以看起来又小又暗。这些星系的外观看起来与附近的星系有所不同，因为我们所看到的是它们形成不久时的情况：此时，它们尚未形成稳定旋转的圆盘结构，成为像大多数天文学书籍中描述的那种旋涡星系。其中一些星系主要由发光的弥散气体组成，尚未分裂成恒星。它们中的大多数比现在的星系更蓝（当然是在红移校正之后），因为当光线离开这些遥远的星系时，本该已经消亡的大质量蓝色恒星仍然在发光。

这些非常深奥的图像向我们揭示了在银河系这样的星系中，第一批恒星发出明亮的光芒时的外观情况。当我们观测仙女星系时，可能会想，仙女星系上是不是也有观测者用更高分辨率的望远镜回望我们呢？也许是。不过在这些非常遥远的星系中，不可能有任何如此“先进”的东西，因为当我们看到对方的星系时，这个星系正处于非常原始的演化阶段，其中许多恒星需要很长一段时间才能完成自己的生命历程；那里尚未出现复杂的化学反应，几乎没有氧、碳之类的元素，更不用说形成行星了。所以，这些星系中出现生命的机会很渺茫。实际上，这些星系正处于铺设行星系统的建筑材料阶段。根据检测，这些星系的光实际上属于远紫外线，这种射线无法用肉眼探测到，也无法穿透地球大气层。然而，当这些星系发出的远紫外线到达我们这里时，已经变成了红光。

来自最遥远星系的光都发生了严重的红移现象：光的波长被拉长了6倍以上。这就是自光发出以来宇宙必定膨胀的程度。假设膨胀是稳定的，也就是星系的远离速度既不加速也不减速，那么当宇宙是其当前大小的1/6时（就星系间的距离而言，埃舍尔网格中的棒子被缩小至1/6），其年龄就是现在的1/6。这种说法似乎存在问题：如果光需要当前宇宙年龄的5/6的时间才能传回到我们这里，那岂不意味着星系必须以5倍于光速的速度远离我们？不过，这并不矛盾。爱因斯坦的狭义相对论告诉我们，当时间由我们的时钟测量时，相对于我们，没有什

么能比光速更快。这个理论也告诉我们，高速运动的时钟会变慢。一个时钟的速度如果能达到光速的98%，那么它记录的每一年实际上可以走5光年。

然而，实际情况更复杂一些，因为远离的速度不是恒定的。宇宙中所有物体对其他物体施加的引力会导致膨胀速度减慢，结果使宇宙膨胀的早期阶段变得更短。但是，另一种力可能正在使宇宙加速膨胀（在第7章，我会对此展开详细解说）。因此，这些遥远的星系到底有多古老，或在空间上距离地球有多远，这个问题仍然存在一些不确定性，最精确的猜测是，当它们发出这些光时，宇宙的年龄大约是现在的1/10。

宇宙学家正在研究过去的“化石”，即古老的恒星以及银河系年轻时合成的化学元素等。在这方面，他们的工作就像地质学家或古生物学家推测地球及其动物群是如何演化的一样。事实上，宇宙学家比那些无法做实验、依赖“历史”证据的科学家更有优势。将望远镜对准遥远的物体，宇宙学家便可以看到他们所声称的演化：遥远的星系在几十亿年前就已经发出光，所以它们的外观看起来与近距离的星系不同。由于宇宙在大尺度上的一致性，其每个部分应该具有相似的历史。因此，至少从统计学的角度来看，这些遥远的星系看起来应该与银河系、仙女星系和其他邻近星系在数十亿年前的外观相似。望远镜的视场是一个细长的圆锥体，并一直延伸到视力极限。不同距离上的天体会告诉我们过去某个特定时期的特征。当我们探测的距离越来越远时，就越能回溯到星系更古老的过去，就如同在南极冰层上连续钻孔可以揭示地球气候的历史。

哈勃太空望远镜自诞生之日起，经常出现延迟、误差和成本超支等不利状况，尽管姗姗来迟，但它现在已经实现了天文学家所寄予的希望。1994年，第一次载人维修任务矫正了其面镜的聚焦偏差，所配置的光探测器也得到升级。除非发生意外，哈勃太空望远镜还会持续

工作几十年，届时，更大的太空望远镜可能已经被送入太空。同样重要的一点是，新一代地面大型望远镜已经问世，它们的直径达8～10米，受光面积将是哈勃太空望远镜的16倍，可以捕获到更暗和更遥远星系发出的光。夏威夷莫纳克亚山（Mauna Kea）上的两架凯克望远镜（Keck Telescope）是第一批投入使用的新型仪器，目前为止，又有好几架这种望远镜投入使用，其中最令人印象深刻的是巨型望远镜（VLT），它由4架望远镜组成，每架望远镜的直径都达8米长。这架巨型望远镜位于智利的安第斯山脉，由欧洲的一些国家联合建成。

由于大气湍流的扰动（这与导致星星闪烁的原因相同），这些地面望远镜拍摄到的图像在清晰度上会受到限制。有两种方法可以克服这种限制：一是将两架或更多的望远镜连接在一起，来合成图像；二是通过所谓的“自适应光学”（adaptive optics），即通过不断转动和调整镜面来弥补大气湍流造成的波动，从而克服这一限制。

这些精湛的仪器提供了第一批星系形成时宇宙的快照。实际上，第一批恒星可能形成得更早，并且以比现在的星系还要小的集群的形式存在，但它们的颜色太暗，无法被我们看到。这些集群后来凝聚成更大的集团。气体凝结成恒星的速率就是星系的“代谢速率”。当宇宙的年龄大约是当前的1/4时，这种速率似乎达到了顶峰（即使第一束星光出现得更早）。目前正在形成中的明亮的恒星越来越少了，因为“成年”星系中的大多数气体已经用于形成较古老的恒星了。

以上观点至少是大多数宇宙学家所认同的。若想获得更多细节，就需要更多的观测，需要对恒星的形成有更全面的了解。我们的目标是得到一个统一的理论，它不仅要与所有关于星系的已知知识相协调，而且还要将星系早期历史的所有新发现考虑在内。这些新发现涉及早期星系的外观及其聚集成团的方式。当相关数据比较少时，它们可能同时满足几个完全错误的理论，但随着证据越来越多，我们应该“聚焦”于同一幅图景。

> 随着距离的增加，我们关于星系的知识会迅速变少，对更远距离上的宇宙空间所知越来越少，最终到达暗淡光线的边界，也就是望远镜所及的极限。在那里，我们测量阴影，在飘忽不定的测量误差中寻找几乎不存在的界标。不过，搜寻工作会一直继续下去，直到经验的来源枯竭，我们才需要转入沉思的梦想王国。

以上这段话是哈勃于1936年出版的经典著作《星云王国》（*The Realm of the Nebulae*）的结束语。最近的进展可能会让哈勃感到高兴，也可能会让他大吃一惊。这一进步归功于以他的名字命名的哈勃太空望远镜和新型的地面巨型望远镜。

在星系形成之前

那么，在任何星系尚未形成之前，宇宙是什么样子的呢？有一种理论认为，万物皆从一个密集的“起点”开始，其最好的证据就是，星际太空并不完全是寒冷的。这股暖流就是“创世的余晖”，其以微波的形式存在。这种波与微波炉里产生热量的电磁波属于同一类型，但强度要小得多，它就是“宇宙微波背景辐射”（cosmic microwave background）。早在1965年，科学家首次探测到了这种辐射，这是宇宙学领域自发现宇宙正在膨胀以来取得的最重要的进展。后来的测量证实，宇宙微波背景辐射有一个非常独特的特性：当把它们在不同波长上的强度绘制在图表上时，会形成物理学家所说的“黑体辐射”或者“热辐射”曲线。只有当辐射与其环境达到平衡时，才会得到这样的曲线，比如，恒星内部深处或长时间稳定燃烧的炉膛中就会出现这种情况。如果这种辐射确实是“火球”阶段的遗迹，那正是我们所期待的。在这一阶段，宇宙中的一切都被挤压成炽热、稠密和不透明的

状态。当时的场景确实是一个谜，而宇宙微波背景辐射可以帮助我们揭开这个谜。

20世纪90年代，美国国家航空航天局发射了宇宙背景探索者卫星，对宇宙微波背景辐射进行了目前为止最精确的测量。当实验人员报告测量结果时，通常会绘制“误差起伏线”，用以表示不确定性的范围。然而，对于宇宙背景探索者卫星提供的数据来说，这种“起伏线”根本无法显示出来，因为它们的误差起伏曲线比辐射曲线还要细。这项测量任务意义非凡，其精确度达到了万分之一，并且无可置疑地证实，宇宙中的一切，即组成星系的所有的物质，都来自一种比太阳内核还要热的压缩气体。

宇宙目前的平均温度比绝对零度(14)高2.7度，这是极其寒冷的。不过有一点很明确，星际空间仍然包含大量热量，每立方米空间里包含4.12亿个光子。相比之下，宇宙中原子的平均密度仅为每立方米0.2个左右。后面的这个数字不太精确，因为我们不确定弥散气体或暗物质中究竟包含了多少原子。宇宙中的光子数和原子数之比约为20亿比1。随着宇宙的膨胀，虽然原子和光子的密度都下降了，但两者都是同比例降低的，因此光子与原子的比率保持不变。由于“热量”与“物质”的比率非常大，因此早期宇宙通常被称为“炽热”的“大爆炸”。

宇宙早期的这个炽热阶段没有持续太久。仅过了几分钟，宇宙的温度就超过了10亿摄氏度。大约50万年后，温度就降到了3 000摄氏度，比太阳表面的温度还要低。这标志着膨胀过程中的一个重要阶段：在此之前，一切物质都非常炽热，连电子都脱离了原子核的束缚，自由地移动；但之后，电子减速到足以附着在原子核上，形成中性原子。然而，相比于早期更加炽热状态下的自由电子，这些原子并不能有效地释放出辐射。此后，原始物质变得透明，“云雾”也开始消散。在宇宙的膨胀过程中，温度的高低与宇宙的大小成反比。宇宙

背景探索者卫星探测到的微波辐射是早期宇宙的遗迹，那时宇宙中物质的密度比当前的高1 000多倍，温度高达3 000度而不是2.7度，星系也远未形成。原始火球中强烈的辐射虽然被膨胀冷却和稀释了，但仍然充满了整个宇宙。

人们常用“大爆炸”比喻宇宙的膨胀，这实际上是一种误导，因为它传达了“‘大爆炸’是在某个特定中心被触发的”这一信息。然而就我们所知，无论在地球上还是在仙女星系，甚至离我们最远的星系上，任何观察者都会看到形式相同的膨胀。虽然宇宙曾经可能被压缩成一个单一的点，但任何人都可以声称自己来自这个起点，所以我们不能将当前宇宙中的任何一处特定位置设定为膨胀开始的原点。

膨胀是由宇宙早期的高压状态“驱动”的，这种观点也是不正确的。爆炸都是由压力不平衡引起的，无论是人类制造的炸弹，还是宇宙中超新星的爆炸，都是因为内部压力剧增，致使碎片向周围低压环境散射。然而在早期宇宙中，各处的压力都是一样的：没有界限，没有“空”的区域。原始气体冷却并扩散，就如同被装在一只膨胀的箱子里。伴随着压力和热能而产生的额外引力实际上减慢了宇宙膨胀的速度。

虽然“大爆炸”理论为宇宙的演化提供了一幅统一的画面，但也留下了一些谜团。最重要的是（因为爆炸的比喻存在缺陷），它根本没有说明宇宙发生膨胀的原因。标准的“大爆炸”理论只是简单地假设，宇宙中含有足够的能量来继续膨胀。我们必须从宇宙的更早期寻找发生膨胀的原因。然而关键的问题是，我们还没有关于那个时期的直接证据，对相关的物理现象也缺乏了解。

20世纪50年代，著名理论物理学家弗雷德·霍伊尔（我们在第4章提到过他关于碳的起源的深刻见解）引入了“大爆炸”一词，本意是表达对“大爆炸”理论的嘲讽。霍伊尔更乐意接受一个“恒稳态宇宙”。在这个宇宙中，随着宇宙的膨胀，新的原子和新的星系被想象

成不断地在缝隙中形成，因此宇宙的一般性质保持不变。当时，这两种理论都没有任何证据（宇宙学还处于空想的阶段），因为当时人们的观测距离不够远，无法揭示宇宙的演化。不过，一旦有证据表明，宇宙的过去与现在确实存在不同，宇宙恒稳态理论便不再受青睐。这个理论虽然被证明是错的，但仍然是一个“好”理论，因为它做出了非常明确和可验证的预测，这对宇宙学起到了真正的激励作用，促使观察者将自己的技术推向极限。从这个意义上来说，“坏”理论过于灵活，通过自我调整可以解释任何事实。杰出而又傲慢的物理学家沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）曾讽刺说，这种模糊的观点看起来“一点儿都没错”。霍伊尔本人从未完全接受过“大爆炸”理论，而是采纳了一种折中的观点，对此持怀疑态度的同事将其称为“恒稳爆炸”。

“大爆炸”中的核反应

根据“大爆炸”理论，宇宙的温度一开始比恒星的内核还高。那么，为什么在“大爆炸”中，原始的氢原子核没有全部转化成铁原子核呢？请记住，铁原子核比其他任何原子核更坚硬，它们是在最大、最热的恒星内核中形成的。如果真的发生了这种情况，当前的宇宙中就不可能存在长寿的恒星，因为所有燃料都会在早期的火球中消耗殆尽。不过，可能会存在由铁蒸汽组成的恒星，但它会在数百万年而不是数十亿年内坍缩，这个时间段是威廉·汤姆逊推想的太阳的寿命。幸运的是，膨胀的最初几分钟没有足够的时间进行核聚变反应，以将任何原始物质“加工”为铁，甚至都没有足够的时间转化为碳、氧等。核聚变反应将23%的氢变成氦，但除了极少量的锂，元素周期表中那些排序更靠前的元素并没有从“大爆炸”中产生。

然而，这些原始的氦至关重要，它们为“大爆炸”理论提供了有力佐证。即使在最古老的天体中，氦的含量也达到23%～24%，但其中

碳、氧等的含量是太阳中的1/100。在所有已发现的恒星、星系或者星云中，目前尚未发现哪个的氦含量低于这个比例。看起来，星系起初并不是由纯氢组成的，而是由氢和氦的混合物组成。太阳外层的氦含量约为27%，多出的3%～4%都是在短命的早期恒星中形成的，与这些氦同时产生的还有碳、氧和铁，这些元素在短命的恒星爆炸之后，混入了以后将会形成太阳系的星云之中。

许多缓慢燃烧的小质量恒星幸存了下来，这类恒星的形成比太阳早了几十亿年，那时我们的星系还很年轻。与太阳相比，这些恒星所含的碳、氧和铁相对于氢的丰度来说要少得多。当然，如果像霍伊尔首先指出的那样，这些元素是从大质量恒星中逃逸出来，并在银河系的演化过程中逐渐积累起来的，那么它们拥有较高的丰度就是很自然的事情。霍伊尔的观点与乔治·伽莫夫（George Gamow）的观点相反，后者认为，整个元素周期表中的元素都是在早期宇宙中被“烹煮”而成的。如果伽莫夫的观点是对的，这些元素在第一代恒星和星系出现之前便已经存在了，那么它们的丰度在任何地方都是相同的，无论是在年轻的还是年老的恒星上。

据计算，氦是“大爆炸”中唯一大量产生的元素。这个结论是令人满意的，因为它解释了宇宙中为什么会有这么多的氦，并且它的丰度为什么如此均匀。因此，将氦的形成归因于“大爆炸”，既解决了这个长期存在的问题，也鼓励宇宙学家对宇宙历史的最初几秒进行更认真的探索。

此外，“大爆炸”还解释了另一种原子的产生，它就是氘原子（也被称为“重氢”）。氘原子不仅含有一个质子，而且还含有一个中子，中子增加了原子核的质量但没有增加电荷。从另一个角度来看，氘的存在仍然是一个谜，因为在恒星中，它是被破坏而非被创造的：作为核燃料，它比普通的氢更容易“点燃”，因此新形成的恒星

在其初始收缩过程中就会将氘燃烧殆尽，不会使其留存到稳定而漫长的氢原子核反应阶段。

氦和氘是在原始宇宙高达30亿摄氏度的温度下生成的，这个温度约为当前宇宙温度的10亿倍。当宇宙膨胀时，埃舍尔所绘的网格中的棒子会不断变长（见图5-1）。随着棒子的变长，辐射的波长也会变长，温度则随之成比例下降。这就意味着，当宇宙的温度是30亿摄氏度时，棒子的长度将是现在的$1/10^9$，密度高出的倍数则是这个倍数的立方，即高出10^{27}倍。然而，当前宇宙中物质的分布非常分散，每立方米约有0.2个原子，即使将其压缩10亿倍，其密度仍然小于空气的密度。实验室中的研究人员可以检测出：当氦原子核形成时，氢原子核和氦原子核以其所具有的能量相互碰撞后会出现什么结果。因此，有关计算都是基于非常合理和坚实的物理学之上的。

假设当前宇宙的密度为每立方米0.2个原子，由此计算宇宙“火球”冷却过程中所产生的氢、氦和氘的比例，则计算得出的结果与观察结果一致。这是一个令人满意的结果，因为大量观测结果可能完全与任何“大爆炸”模型所做的预测不相符；或者它们即使相符，也只是对比观测到的密度范围更低或者更高的情况而言的。正如我们所看到的，每立方米0.2个原子的密度确实接近当前宇宙中星系和气体的平滑密度。这对“暗物质”而言具有重要意义，我们将在下一章对此展开讨论。

JUST
SIX
NUMBERS

06
精心调谐的膨胀：暗物质和 Ω

宇宙会永远膨胀下去吗？遥远的星系会离我们越来越远吗？或者这一切会逆向而行，整个宇宙最终重新坍缩成一个“大裂口”？

永恒是很长的，尤其越到后面越长。

——伍迪·艾伦（Woody Allen）

临界密度

大约50亿年后，太阳将会死亡，地球也会随之消亡。大约与此同时（误差不超过10亿年），仙女星系会坠入银河系。仙女星系是离我们最近的大星系邻居，与银河系属于同一星系群，它实际上一直在朝我们坠落。

这些预测是可靠的，因为它们基于这样一种假设：在未来50亿年里，太阳内部的基本物理规律，以及恒星和星系之间的引力，都会像过去的5亿～100亿年一样起作用。然而除此之外，我们再无法预测到更多有趣的细节。我们不能确定，在未来50亿年里，地球是否仍然是离太阳最近的第三颗行星，即使行星轨道在这段时间内发生“混乱”。地球表面的变化更难预测，特别是由我们自己造成的地球生物圈越来越快的变化，即使在上述时间的百万分之一的时间跨度内，我们也无法作出可靠的预测。

目前，太阳还没有燃烧掉一半的燃料，它所剩的时间比过去整个生物进化过程所花的时间要长。银河系的寿命将远远超过太阳。即使现在生命是地球独有的现象，但它也有足够的时间在银河系内外蔓延。生命和智慧可能最终会影响恒星，甚至星系。在这里，我不想对此做进一步的推测，不是因为这条思路是荒谬的，而是因为它会引出各种各样的场景，类似于科幻小说中的场景，以至于我们什么也预测不了。相比之下，对整个宇宙的长期预测则更为可靠。

五六十亿年之后，银河系肯定会在一次大碰撞中毁灭。但宇宙会在之后继续膨胀下去吗？遥远的星系会离我们越来越远吗？或者这一切会逆向而行，整个宇宙最终重新坍缩成一个“大裂口”？

这些问题的答案取决于引力和膨胀能量之间的“竞争”。假设一颗巨大的小行星或行星爆炸成碎片，如果碎片散开得足够快，就会永远逃逸出去，但如果爆炸不那么剧烈，引力可能会逆转碎片的运动，使其重新组合在一起。宇宙中任何大领域的爆炸都与此类似。当前，我们已经估算出了宇宙的膨胀速度。那么，引力会让膨胀停止吗？答案取决于有多少物质在施加引力。如果密度超过特定的临界值，宇宙将停止膨胀，重新坍缩，除非有其他力量介入。

我们很容易就能计算出临界密度，大约相当于每立方米有5个原子。这似乎并不多，事实上，它更接近于一个绝对的真空，地球上的实验人员从未做到过这种程度的真空。实际上，宇宙似乎变得更空了。

假设用橙子代表太阳，那么地球就相当于一颗1毫米大的颗粒，在20米外绕橙子运转。按照同样的比例，离地球最近的恒星在一万千米之外。由此可以看出，像银河系这样的星系中的物质分布是多么稀疏。恒星一般都集中在星系当中，如果将所有星系中的所有恒星都分散到星际空间，那么每颗恒星与其最近邻居之间的距离将比一般星系中的实际距离大数百倍，根据上述提到的比例模型，每个橙子离其最近的邻居有几百万千米远。

如果所有的恒星都被分解，并且其原子均匀地分布在宇宙中，那么每10立方米空间中就会有1个原子。另外，在星系之间还散布着以弥散气体的形式存在的同等数量的物质（似乎不会比这更多），这就相当于每立方米空间中有0.2个原子，是临界密度的1/25。一旦超过这个临界密度，引力会使宇宙停止膨胀。

有多少暗物质

实际密度与临界密度之间的比率是一个至关重要的数字，宇宙学家用希腊字母 Ω 来表示。宇宙的命运取决于 Ω 是否超过1。初看之下，我们对宇宙中原子平均密度的估计 Ω 仅为0.04，与临界密度相差很大。这意味着地球将会永远膨胀下去。不过，我们不应过早得出这样的结论。在过去的20年里，我们逐渐发现宇宙中的物质比我们实际看到的要多得多，这些看不见的物质主要由未知性质的“暗物质”组成。宇宙中的许多发光物体，比如星系、恒星和发光的气体云，只占实际存在物质的一小部分，而且不具代表性。这与下述情形非常相似：地球上空最明显的物质是云状物，但实际上，这些都是稀薄的蒸汽漂浮在密度比它们更大的清澈的空气中。宇宙中的大部分物质，也就是数字 Ω 的主要贡献者，既不发光，也不会发射红外线、无线电波或任何类型的辐射，因此很难被探测到。

当前，关于暗物质存在的证据日益增多，几乎都无可争议。恒星和星系的运动方式表明，肯定存在某些看不见的物质对它们施加了引力。当我们发现一颗恒星围绕着一颗看不见的伴星旋转时，便可以推断出黑洞的存在。19世纪，人们据此推断出了海王星的存在，当时天王星的轨道出现了偏离，表明它受到了更遥远的看不见的物体的引力牵引，由此发现了海王星。

在太阳系中，促使行星向太阳坠落的引力和轨道运动的离心效应之间存在着一种平衡。同样，在整个星系的更大尺度上，引力效应和运动的离心效应之间也存在着一种平衡，引力往往会将所有物质都拉向中心，而运动的离心效应会使组成星系的恒星四处飞散（如果引力不起作用的话）。我们之所以推断出存在暗物质，是因为我们所观测到的天体的运动速度快得惊人，仅靠所看到的恒星和气体的引力是无法平衡的。

我们已经测量出了太阳围绕银河系的“轮毂”运转的速度，以及其他星系中恒星和气体云的运转速度。这些测量结果表明，它们的运

转速度快得令人匪夷所思，特别是那些围绕着大多数恒星运行的“离群区域”的速度。如果最外层的气体和恒星受到的只是我们所看到的物质的引力，那么它们早应该逃逸出去了，就如同如果海王星和冥王星像地球一样快速运动，就会逃离太阳的引力束缚。这些观测结果告诉我们，大星系周围必定存在一种大质量且看不见的巨大光晕，这就如同，如果冥王星的公转速度变得和地球一样快，但仍然保持在轨道上，而不是逃逸，我们便由此可推断出，地球轨道和冥王星轨道之间存在一个重而不可见的壳。

由上述可知，如果宇宙中没有大量的暗物质，星系就不稳定，会四处飞散。人们经常以美丽的圆盘或旋涡来比喻星系，但这些画面仅仅描绘了发光物质，而它们被大量不可见、性质完全未知的物质的引力控制着。星系远比我们过去想象的大和重10倍。这个结论也适用于更大尺度上的整个星系团，其直径都达到数百万光年。若想将所有星系团结合在一起，则提供的引力大约是我们实际看到的物质的10倍。

不过，关于暗物质的推论背后有一个假设，即我们能计算出所看到的物质的引力大小。与光速相比，星系和星系团内部的运动是缓慢的，不存在“相对论性”的复杂性。因此，我们可以通过牛顿的平方反比定律得出，如果你离任何物体的距离增加2倍，那么受到的引力就会减弱至1/4。一些怀疑论者提醒我们，这一定律只在太阳系中得到了验证，将其应用于一亿倍大的尺度上缺乏足够的可信度。事实上，我们已经发现了诱人的线索，在整个宇宙的尺度上，引力可能会被另一种力战胜，这种力起排斥作用而非吸引作用（详见第10章）。

我们应该重新评估对引力的看法。如果施加在远距离物体上的引力比我们根据平方反比定律得出的要大，比如2倍距离上的物体所受到的引力减弱为1/4，那么我们就需要重新思考是否存在暗物质。但是，我们不应该如此轻易地放弃引力理论。如果暗物质没有其他可能的候选者，我们可能会忍不住放弃。不过，我们似乎有许多选择。在我看

来，只有当所有的候选者都可以被排除时，我们才应该准备抛弃牛顿和爱因斯坦的理论。

事实上，其他一些迹象也表明存在大量暗物质。所有具有引力的物质都会使光线发生偏移，无论是发光的还是“暗的”。因此，通过测量光线经过这些物质时其路径偏移的程度，我们就可以称出星系团的质量。1919年，阿瑟·爱丁顿等人在日全食期间观测到的星光在太阳引力下发生了偏移，为相对论提供了早期验证，这使爱因斯坦在世界上声名鹊起。哈勃太空望远镜拍摄的一些远在10亿光年之外的壮观的星系团照片，显示出了许多微弱的条纹和弧线，实际上，它们都是一些遥远的星系，比星系团本身的距离要远好几倍；而星系团的外观是弯弯曲曲的，就好像是通过扭曲的镜头看到的似的。星系团就像一个“透镜”，可以聚焦穿过它的光线，就如同背景墙纸上的常规图案在一块曲面玻璃上看起来是条纹状和扭曲的。就算将星系团中可见的星系全部加在一起，都不足以产生如此大的扭曲。若想光线发生如此大的弯曲，并在背景星系的图像中造成明显的扭曲，该星系团的质量必须比我们看到的大10倍。这些巨大的天然透镜给了那些对星系的演化感兴趣的天文学家意外惊喜，因为它们将非常遥远的星系带入了人们的视野，原本这些星系因为太暗而无法被看到。

据推测，暗物质的数量是我们所看到的物质的10倍左右，是宇宙中引力的主要来源。对此，我们不必感到惊讶。暗物质本身并没有那么令人难以置信：为什么宇宙中的一切物质就应该是发光的，不能是暗淡无光的呢？我们的挑战在于如何缩小候选者的范围。

暗物质是什么样子的

综上所述，暗物质是不发光的，我们探测不到它们的任何一种辐射，它们也不吸收或者散射光。这意味着它们不是由尘埃组成的。银河系中存在一些可以形成星云的尘埃，就类似于那些形成烟草烟雾的

微小颗粒。当光穿过星云时，就会被其中一些尘埃散射，使光的强度减弱。如果这些颗粒累积起来的质量足以构成所有的暗物质，那么任何遥远的恒星都会被它们挡在视线之外。

小而暗的恒星最易被当成暗物质。质量低于太阳质量8%的恒星被称为“褐矮星”，它们不会因为被压缩而热到引起核聚变反应，只会像普通恒星那样发光。宇宙中确实存在褐矮星，它们中的一些是在寻找围绕较亮恒星运行的行星时无意间被发现的，另一些，特别是附近的褐矮星则是通过探测它们发出的非常微弱的红光被发现的。那么，宇宙中一共有多少颗褐矮星呢？这个问题很难从理论上回答。大恒星和小恒星数目的比例是由非常复杂的过程决定的，而我们目前还不了解该过程。当星云凝结成恒星群时会发生什么呢？即使最强大的计算机也无法告诉我们真相。出于相同的原因，准确地预测天气预报也非常困难。

单个褐矮星可以借助引力透镜效应来发现。如果一颗褐矮星从一颗明亮的恒星旁边经过，那么褐矮星的引力就会使光线聚焦，使这颗恒星看起来被放大了，并发生明显的变亮或变暗。但这需要非常精确的瞄准，所以即使有足够多的褐矮星组成银河系的所有暗物质，这样的事件也非常罕见。然而，天文学家已经对这些“微透镜”效应(15)进行了雄心勃勃的搜索。数以百万计的恒星被反复监测，以找出那些每晚亮度都会发生变化的恒星。不过，恒星的亮度发生变化的原因有很多，有些因为存在脉冲，有些因为发生了耀斑，有些则因为围绕双星轨道运行。到目前为止，这项搜索任务已经发现了成千上万颗这样的恒星，一些天文学家对此很感兴趣，尽管搜索微透镜效应是一项非常复杂的工作。人们偶尔会发现有些恒星的亮度发生了明显的变化，当一个看不见的天体从这些恒星的前面穿过并聚焦它们的光线时，就会出现这种情况。目前我们还没有足够多的此类事件来证明存在一个新的“褐矮星种群”，也不清楚从较亮的恒星面前经过的普通暗淡恒星是否足够普遍，足以解释所记录的这些事件。

除了褐矮星，还有几种天体也有可能是暗物质。例如，在星际空间中穿行的“冷行星”，它们不依附于任何恒星，可能大量存在却没有被发现；再比如彗星状的冻结氢团；黑洞也可能是暗物质。

奇异粒子的实例

有人怀疑，褐矮星或彗星（甚至黑洞，如果它们是死恒星的残留物的话）有可能只是暗物质的一个很小的组成部分。因为我们有充足的理由怀疑暗物质根本就不是由普通原子构成的，这个结论源自氘元素（重氢）。

正如上一章所提到的，我们观测到的所有氘元素都是在“大爆炸”中产生的，而不是产生于恒星。截至目前，我们还不确定宇宙中氘元素的实际丰度。不过，天文学家从遥远星系接收到的光中探测到了氘的光谱印记，并将它与普通的氢区别开来。这项成果完全得益于口径为10米的新型望远镜的聚光能力。根据测量结果，氘的丰度非常低——5万个原子中只有1个氘原子。这个比例应该是从“大爆炸”中产生的，其大小取决于宇宙的密度。如果每立方米空间中有0.2个氢原子，那么观测结果就与理论相符。这与发光物质中原子（一半在星系中，另一半在星际之间的气体中）的实际数量相当吻合，但这样就剩下不了多少去构成暗物质了。

如果有足够多的原子组成所有的暗物质——这意味着至少比我们实际看到的物质多5倍（或许10倍），就会打破与理论的一致性。然而，根据“大爆炸”模型预测的结果，氘的丰度甚至比我们实际观测到的还要低，而氦的丰度却比实际观测到的要高。宇宙中氘的起源将成为一个谜。这告诉我们一件非常重要的事情：宇宙中原子的密度为0.2个每立方米空间，只占临界密度的4%，而占主导地位的暗物质是由某种在核反应中具有惰性性质的物质构成的。这意味着，一种根本不是由普通原子构成的奇异粒子对数字Ω起着主要作用。

难以捉摸的中微子可以作为异常粒子的侯选者之一。中微子不带电流，几乎不与普通原子发生作用：所有撞击地球的中微子都会直接穿过地球。在“大爆炸”发生后的第一秒，宇宙的温度超过了100亿摄氏度，所有的物质都浓缩在一起，以至于将光子（辐射的量子）转换成中微子的反应很快达到平衡。因此，从宇宙“火球”中产生的中微子的数量应该与光子的数量有关联。人们可以根据标准且无争议的物理学计算出，中微子的数量是光子数量的3/11。在“大爆炸”遗留下来的宇宙微波背景辐射中，每立方米空间中有4.12亿个光子。宇宙中有三种不同类型的中微子，在每立方厘米的空间中，每种中微子的数目都应该为113个，换句话说，宇宙中原子与中微子的数量之比为一比数亿。当然，在暗物质的组成中，三种中微子中质量最大的一种最为重要。

由于中微子的数量远远超过原子，所以即使它们的质量只有原子的一亿分之一，也极有可能成为占主导地位的暗物质。20世纪80年代之前，几乎所有人都认为，中微子是“零静止质量”的粒子。因此，中微子将会携带能量以光速运动，但它们的引力效应并不明显；同样，早期宇宙遗留下来的光子，即现在被检测到的宇宙微波背景辐射，也不会产生任何显著的引力效应。然而事实证明，中微子可能拥有质量，即使质量非常小。

中微子拥有质量的最佳例证来自在日本神冈的实验。该实验在一个废弃的锌矿的巨大水槽里进行。实验人员测量了来自太阳的中微子（中微子是太阳内核核反应的副产品），以及其他由撞击地球高层大气的高速粒子（宇宙射线）产生的中微子。这些实验表明，中微子质量非零。但是由于它们的质量太小，不足以说明它们对暗物质的重要性。然而，这却是关于中微子本身的一个重要发现。初看之下，它们似乎使微观世界变得更加复杂，但其质量非零的发现可能为中微子和其他粒子之间存在的联系提供额外的线索。

虽然我们还不知道中微子的确切质量，但至少知道中微子是确实存在的。此外，科学家之前假设的一长串粒子也可能真实存在，如果真是如此，它们从“大爆炸”中遗留下来的数量足以在数字Ω中占主导地位。到目前为止，还没有令人信服的证据证明，这些粒子的质量到底有多大，最佳猜测是氢原子的100倍。如果有足够多这样的粒子构成银河系中所有的暗物质，那么在太阳附近，每立方米空间中就会有几千个这样的粒子，它们的移动速度与银河系中恒星的平均速度大致相同，可能是300千米每秒。

这些粒子的质量虽然很大，但呈电中性。一般来说，这些粒子会像中微子一样直接穿过地球。不过，一小部分粒子在穿过物质时有可能会与该物质中的某个原子相互作用。即使每个人体内都有约10^{29}个原子，每天也只会发生几次这样的碰撞。显然，我们自己什么也感觉不到。然而，当这种碰撞发生在硅或类似的物质中时，我们可以通过非常精确的实验探测到微小的“冲击”或反冲。探测器必须冷却到非常低的温度，并放置在地下深处。例如，这些探测器被设置在英国约克郡的一个矿井中和意大利山下的一个隧道中，以避免其他活动淹没暗物质碰撞时所发出的可信赖的信号，造成干扰。

一部分物理学家已经接受了这种“地下天文学”的挑战。虽然这是一项精细且乏味的工作，但如果他们真的取得了成功，不仅会发现宇宙的主要组成成分，而且作为奖励，还会发现一种重要的新粒子。不过，只有极端的乐观主义者才会将赌注压在成功上，因为目前我们还没有理论能说明暗物质粒子是什么，因此很难以最佳方式集中搜索。

此外，人们也提出了许多其他想法。一些理论物理学家更偏爱一种更轻的粒子，叫作轴子（axion）。其他人则怀疑，暗物质粒子可能比目前正在搜寻的那些粒子重10亿倍，如果真是如此，粒子的数量将

减少至$1/10^9$，这使探测工作更加困难。或者，这些粒子可能更加奇特，例如，可能是在早期宇宙的极端高压下形成的原子大小的黑洞。

缩小选择范围

暗物质的一些可能选项是可以被排除的。目前，科学家正在通过各种技术竭力寻找其他可能的候选者。引力微透镜效应可以探测到暗恒星或黑洞，矿井底部的实验人员有可能会发现一些正在穿过银河系的新型粒子。有时消极的结果也具有重要意义，因为它们至少可以排除一些可能的选项。

暗物质可能有几种不同的类型。如果宇宙中不存在褐矮星和黑洞，那将会非常令人惊讶。不过，奇异粒子存在的可能性似乎更大，因为从氘得到的证据表明，大多数暗物质不是由普通原子组成的。

令人尴尬的是，宇宙中超过90%的物质仍未得到解释。更糟糕的是，组成暗物质的粒子的质量可能在10^{-33}克（中微子）到10^{39}克（重黑洞）的范围内，其不确定性高达10^{70}。这一关键问题也许可以通过三种途径得到解决。

- 构成暗物质的实体可以被直接探测到。褐矮星会使恒星产生引力透镜效应。如果银河系中的暗物质是一簇粒子，那么其中一些就可能会被地下深处那些勇敢的实验人员探测到。我很乐观地认为，如果在5年后写这本书，我也许就能说清楚暗物质是什么。
- 实验人员和理论物理学家一直在向我们揭示中微子的更多信息。中微子的质量足以使其成为暗物质的重要组成成分（尽管现在看来并非如此）。当我们能更好地理解极端高能和高密度状态下的物理过程时，就能知道曾经还存在过哪些类型的粒子，并且能够推断出这些粒子是如何从宇宙诞生的第一

毫秒内留存下来的，就如同我们现在能够确切地知道从宇宙的最初三分钟中留存下来的氦和氘的含量。

- 暗物质支配着星系。星系是何时和如何形成的，以及它们是如何聚合的，这些主要取决于其引力的主导部分是什么，以及它们在宇宙膨胀过程中如何起作用。我们可以对暗物质作出不同的预测，然后计算出每种预测的结果，看看哪种结果最接近我们实际观察到的结果。这样的计算可以为暗物质是什么提供间接的线索（我将在第8章对此展开详述）。

为什么是物质而不是反物质

我们还不知道极早期宇宙中究竟存在过哪些类型的粒子，也不知道有多少粒子留存了下来。如果事实真像我认为的那样，对 Ω 贡献最大的是一些新型粒子，那么我们对宇宙的态度不得不再谦虚一些。我们已经习惯了哥白尼之后的观点，知道地球在宇宙中并没有占据特殊的中心地位，而现在，我们也必须放弃“粒子沙文主义”。组成我们身体和所有可见恒星和星系的原子只占整个宇宙组成的很小一部分，宇宙在大尺度上是由一些完全不同且不可见的物质控制的，我们看到的只是浪尖上的白色泡沫，而非巨浪本身。我们必须将整个宇宙栖息地看作一片漆黑之地，主要的组成成分是未知物质。

普通原子似乎只占宇宙组成部分的“少数”，并且淹没在从“大爆炸”最初瞬间留存下来的完全不同的粒子之中。然而，更令人费解的是：为什么会有原子？宇宙为什么不全是由暗物质组成的呢？

每一种粒子都有相应的反粒子。比如，质子（由三个所谓的“夸克”组成）的反粒子是反质子（由三个反夸克组成），电子的反粒子是正电子。反粒子与普通粒子相遇时会发生湮灭，它们的能量（mc^2）转化为辐射。不过，地球内部和表面不存在大量的反粒子。当粒子在

加速器里以足够高的能量相互碰撞时，可以产生微量额外的粒子-反粒子对。反物质是理想的火箭燃料。当它们湮灭时，就会释放出全部的静止质能，相比之下，通过核聚变反应来提供能量的火箭的质能转化率只有 ε=0.007。反物质只有在与普通物质“隔离”的情况下才能生存，否则，它们就会相互湮灭，并释放出强烈的伽马射线。我们可以肯定的是，整个银河系，包括其中所有的恒星和气体，都是物质，而非反物质：其全部物质不断地被恒星的诞生和死亡搅拌和循环利用，如果它当初有一半物质和一半反物质，那么现在的一切将不复存在。然而，在更大的尺度上，这种混合也许不太有效，例如，我们无法反驳这样的推想：“超星系团”是由物质和反物质相间组成的。那么，为什么宇宙在表面上会表现出对一种物质的偏爱呢？

目前的可见宇宙中有10^{78}个原子（占比最多的是氢原子，每个氢原子由一个质子和一个电子组成），但似乎并不存在这么多的反原子。人们可能会推想，最简单的宇宙在刚开始时，拥有等量的粒子和反粒子。所幸的是，宇宙并不是这样的。否则，在早期的高密度阶段，所有的质子已经和反质子相互湮灭了，宇宙中将充满辐射和暗物质，而不会有原子、恒星和星系。

为什么会出现这样的不对称现象呢？宇宙中超出的10^{78}个原子可能从一开始就存在，但将这么大的数字简单地作为“初始条件”的一部分，似乎不太合理。俄罗斯物理学家安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）最为人所知的成就是在研制氢弹方面的贡献，不过他在宇宙学上也提出了一些有先见之明的观点。1967年，他研究了宇宙在“大爆炸”后的冷却过程中是否出现了一种轻微的不对称，使粒子超过它们的反粒子。这种失衡能够使夸克的数量稍微超出反夸克的数量，从而使质子的数量超过反质子的数量。

根据萨哈罗夫的观点，我们必须放弃物质和反物质的行为之间的完美对称关系。1964年，美国物理学家詹姆斯·克罗宁（James

Cronin）和瓦尔·菲奇（Val Fitch）发现了这种效应，引起了巨大轰动。当时，他们正在研究一种叫作K⁰的不稳定粒子的衰变，最终发现这种粒子和其反粒子之间并非完美地呈镜像对称，而是以略微不同的速率进行衰变；在支配衰变的规律中，也存在一些轻微的不对称性。这意味着，如果我们能与一位“外星”物理学家取得联系，他可以报告在另一个星系所做的实验，这样我们就能够判断出这位物理学家是由物质还是反物质组成的，这是在确定接头地点之前必须谨慎地搞清楚的。K⁰的衰变只涉及所谓的弱相互作用力（支配放射性和中微子的力），而不涉及强相互作用力。然而，在一种关于力的统一理论中，这种不对称性会从一种力“传递”到另一种力上。这为萨哈罗夫的理论提供了基础。

假设这种不对称在每10亿对夸克-反夸克中会导致产生一个额外的夸克。随着宇宙的冷却，反夸克将会全部被夸克湮灭，最终释放出光子。现在，这种辐射已经冷却到非常低的温度，构成了弥漫于星际空间的温度达2.7开尔文的宇宙微波背景辐射。

然而，每有10亿个夸克被反夸克湮灭时，就会有一个夸克存活下来，因为它找不到一个可以相互湮灭的伙伴。事实上，宇宙中光子的数量是质子的10亿多倍（每立方米空间中有4.12亿个光子，而只有0.2个质子）。因此，宇宙中的所有原子都可能产生于有利于物质而不是反物质的微小偏差。我们以及周围的可见宇宙之所以存在，可能仅仅是因为夸克和反夸克的数量在个位数上的差别。

当前可见宇宙之所以包含原子而非反原子，是因为宇宙非常早期的某个阶段存在一种占主导地位的轻微“偏向”。当然，这意味着，当质子或其组成成分夸克有时出现或消失时，反质子不会发生同样的现象。这与净电荷形成鲜明的对比：净电荷是完全守恒的，所以如果宇宙一开始不带电荷，那么正电荷和负电荷之间永远会精确地互相抵消。

尽管原子的衰变速度低得令人难以置信，但原子并不会永远存在。对原子寿命的最佳预测是10^{35}年左右，这意味着，在一个装有1000吨水的容器中，平均每年将会有1个原子发生衰变。地下实验室中用来捕获中微子的水箱就具有同样的大小，尽管实验无法达到这种灵敏度，但它已经告诉我们，中微子的寿命至少为10^{33}年。

在遥远的将来，所有的恒星都会变成寒冷的白矮星、中子星或黑洞，而白矮星和中子星本身会随着组成原子的衰变而逐渐被侵蚀，进而消亡。如果这种侵蚀一直持续10^{35}年，这么漫长的衰变所产生的热量将使每颗恒星产生辐射，其能量相当于一台家用电热器的热量。在遥远的将来，当所有的恒星都耗尽它们的核能时，这些微弱的辐射体将成为宇宙中主要的热量来源，除了恒星碰撞时偶尔产生的火光。

初始膨胀的调谐

Ω的值不是正好等于1，但现在至少是0.3。初看起来，这似乎并不是精细调谐的结果。然而，这意味着Ω在宇宙早期确实非常接近均衡值1。这是因为，除非膨胀能和引力能刚好精确地平衡(16)，否则这两个能量之间的差距就会不断增大。一方面，在早期宇宙中，如果Ω一开始就稍微小于均衡值1，那么动能最终会占据主导地位（这样Ω就变得非常小）；另一方面，如果Ω远远超过均衡值1，那么引力很快就会占据上风，从而使宇宙停止膨胀。

当前可见宇宙“演化轨迹”的各种可能性如图6-1所示，这个范围与从暗物质研究中得出的Ω的当前值的结论一致。该图还描绘了其他类型的宇宙，而这些宇宙中是不可能演化出我们所知道的生命形式的。这就引发了一个基本的谜题：为什么在100亿年后，宇宙仍然以与均衡值1相差不大的Ω值膨胀呢？

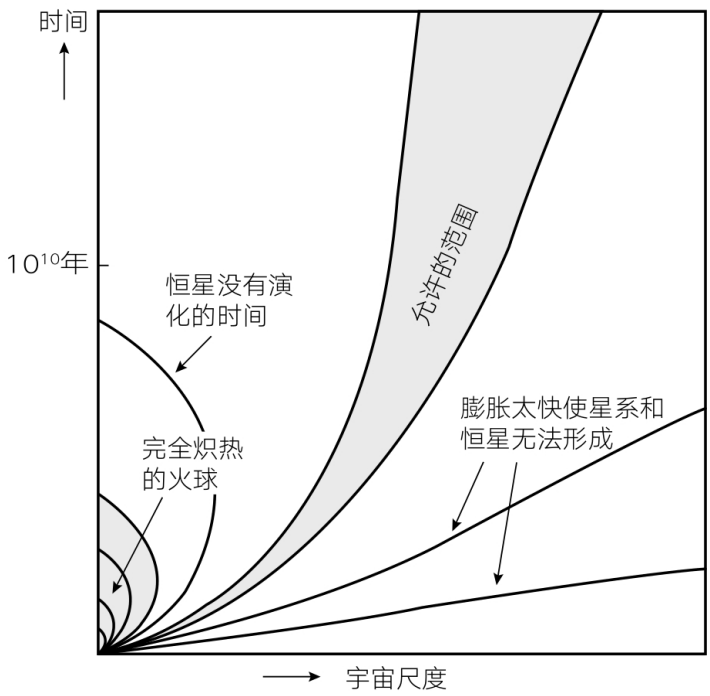


图6-1　宇宙“演化轨迹”的各种可能性

此图展示了宇宙各种可能的演化轨迹。尽管当前Ω的值仍然不确定，但为了确保宇宙最终在允许的范围内，必须对初始条件进行非常精确的调谐。如果没有这种调谐，膨胀要么太快，星系无法形成；要么太慢，以至于宇宙在没来得及进行任何有趣的演化之前就坍缩了。在第9章，我将会对这种调谐进行详细的解释

正如我们在上一章中看到的那样，我们有很好的理论基础来反推出宇宙出现后一秒钟内的情况，当时的温度正好是100亿摄氏度。假设你正在“建造”当时的宇宙，这个宇宙的演化轨迹将取决于它最初所获得的动力。一方面，如果该动力使宇宙启动得太快，那么从很早开始，膨胀能量就会占据主导地位，换句话说，Ω将变得非常小，星系和恒星将永远无法通过引力聚集并收缩形成，宇宙将会永远膨胀下去，但永远无法进化出生命。另一方面，膨胀的速度也不能太慢，否则会造成宇宙大坍缩。

任何紧急出现的复杂现象都必须以密度和温度的不均匀性为基础，例如，地球生物圈通过吸收太阳的热辐射获得能量，然后再将其重新释放到寒冷的星际空间之中。因此，如果我们在定义生命时，放

弃最轻微程度的人类中心主义，就可以得出这样的结论：在任何生命开始之前，宇宙必须膨胀到摆脱原始火球的状态，并且至少冷却到3000摄氏度以下。如果初始膨胀速度太慢，这样的情况就不会发生，生命也就没有出现的机会。

从这个角度来看，宇宙是由一种非常精准的推动力引发的，它正好能够平衡引力的减速趋势。这一点令人感到惊讶，这就如同你坐在井底向上扔了一块石头，它正好落在井口处。这种惊人的精确度意味着，在宇宙“大爆炸”后的一秒钟，Ω与均衡值1的差别不能超过千万亿分之一（10^{-15}），只有这样，在100亿年以后的今天，宇宙才能仍然处于膨胀之中，并且Ω的值肯定从未与均衡值1相差太远。

我们已经指出，任何复杂的宇宙必须包含一个大数N，它表示引力的强弱程度，同时还必须具有一个适当的ε值，以确保核聚变和化学反应的进行。不过，这些条件虽然是必要条件，但不是充分条件。只有当宇宙具有一个“精细调谐”的膨胀速度时，才能为这些过程的展开提供舞台。因此，Ω必须列入宇宙的关键数字之中，它在早期宇宙中必须被调谐得极其接近均衡值1。如果膨胀太快，引力就永远无法将零散的物质拉到一起形成恒星或星系；如果初始动力不足，一场过早的大危机将在宇宙演化刚刚开始时就将其扼杀。

宇宙学家对这种“调谐”的反应各不相同。初看起来，最常见的反应似乎有悖常理。它强调，既然早期宇宙是在Ω非常接近均衡值1的情况下形成的，那么一定存在某种深层次的原因能够证明Ω精确地等于均衡值1。换句话说，因为“调谐”非常精确，所以它一定是绝对完美的。这种反常的推理在另外一些情况下非常管用。例如，我们非常确定，氢原子中质子所带的正电荷完全被核外电子所带的负电荷抵消，误差不会高于10^{-21}。然而，并没有测量可以告诉我们，一个原子所带的净电荷恰好为零：任何测量总会有一些误差。所谓的“大统一理论”试图将电磁力和核力相互关联起来，在过去的20年里，这种理

论已经提出了正负电荷之所以会相互抵消的深层原因。然而，即使在50年前，大多数物理学家也推测，这种抵消是完全的，尽管当时没有任何令人信服的论据。

另一个令人惊讶的现象是，宇宙以相同的速度（哈勃常数）向各个方向膨胀：这种速度可以用一个单独的“标量”来描述，它代表了埃舍尔网格中棒子的伸长。我们可以轻易地设想出这样一个宇宙：其在一些方向上膨胀得快，而在另一些方向膨胀得慢。然而，一个不那么均匀的宇宙似乎会遇到更多问题。为什么当我们从相反的方向观察遥远的区域时，它们看起来如此相似和同步呢？或者，为什么宇宙微波背景辐射[(17)]的温度在太空各处几乎是一样的呢？正如我们将在第9章中看到的那样，关于宇宙的这些特征以及早期宇宙中Ω的精细调谐问题，实际上存在一种更有力的解释，其中会引入宇宙“暴胀相”的概念。

JUST
SIX
NUMBERS

07

数字 λ：宇宙膨胀是在减速还是在加速

尽管暗物质之间具有引力作用，但实际上膨胀却会因此得到加速。因此，我们必须在当前的关键数字中引入另一个数字，来描述这种“反引力”的强度。

宇宙可能像他们说的那样大。但如果它不曾存在，就不会消失。

——皮特·海因（Piet Hein）

回顾过去

宇宙中所含有的暗物质比普通原子多得多，但它们足以使宇宙物质的实际密度达到“临界密度”，使 Ω精确地等于均衡值1吗？按照目前的推断，星系和星系团内的暗物质不足以如此。不过，暗物质均匀地散布在宇宙中，并不会影响星系团内部的运动，也不会影响星系团造成的光线弯曲，这种弯曲会使非常遥远的星系的图像放大和变形。因此，这就使暗物质变得更加难以捉摸。不过，好在多出的物质会通过影响整体宇宙的膨胀过程来显露自己的存在。那么，我们能否发现膨胀率的变化呢？

从原则上来说，这当然是可能的。红移现象告诉我们，远处物体发出光时是如何运动的。通过观测遥远星系或任何其他类型的天体的红移和距离，我们就可以推断出宇宙在早期时代的膨胀率。通过比较当前宇宙的膨胀率，我们就能得知膨胀率的变化有多大（如果变化存在的话）。

然而，膨胀率的变化是极其缓慢的，只有在几十亿年后的“基线”上才能显现出来。所以，除非我们能观测到几十亿光年以外的物体，否则就没有希望探测到膨胀率的变化。不过，这现在已经不成为一个问题了，因为科学家正在用10米口径的超高性能望远镜探测宇宙早期的情况，其时间不超过当前宇宙年龄的1/10。重要的问题是，必须找到足够标准的遥远物体，并与附近的同类物体有本质上的区别，因为我们要观测它们极早期的演化阶段。

最容易探测到的高红移天体是“类星体”，即极度活跃的星系中心。它们远非“标准化的发光体”：红移相似，也就是说距离相似的类星体在视亮度上的变化幅度却很大。更糟的是，我们对它们所知甚少，不知道随着宇宙年龄的增长，它们的原有性质会发生怎样的变化。

在某种程度上，星系比类星体更容易理解，即便星系没有类星体那么明亮，并且星系也可以显现出相似的红移。不过，这里同样存在问题。举例来说，如果动物园里有不同类型的动物，动物就好分类，但现在的情况是，太空中有很多不同类型的星系，因为红移相似，我们很难对它们进行分类。并且，它们会随着年龄的增长不断演化。之所以如此，有几个原因：现有的恒星在演化和死亡，而新的恒星又从气体中形成，或者，有的恒星被引力拉入星系，因为星系在不断地捕获较小的邻居，这种现象被称为“星系吞噬”。

星系太复杂、太多样，而且我们对它们了解甚少，因此它们还不足以作为“标准烛光”。它们远不如单个恒星那么容易理解。然而，单个恒星的光又太过暗淡，在宇宙学的距离上是无法被探测到的：我们的望远镜是通过探测整个星系中数十亿颗恒星的光总量来观测该星系的。不过，有些恒星在濒临死亡之时会爆炸为超新星，并且会持续燃烧好几天，其亮度与包含数十亿颗普通恒星的整个星系一样明亮。

寻找遥远的超新星

有一种特殊类型的超新星，其专业名称为“1a型”。这种超新星会发生核爆炸：当一颗恒星的内核燃烧殆尽，质量达到一定的阈值，变得不稳定并濒临死亡时，其中心会突然发生核爆炸。实际上，这种超新星相当于一颗标准当量的核弹，我们对其物理学机制已经相当清楚，不必在此详述细节。重要的是，这种1a型超新星可以被当作“标准烛光”，其亮度足以在远距离被探测到。根据它们的亮度，我们可

以准确地测算出其距离，同时通过测量红移将其过去一个时期的膨胀速度和距离联系起来。宇宙学家希望这样的测量能够确定，宇宙膨胀减缓的速度究竟是小(18)还是大。如果像许多理论物理学家认为的那样，暗物质的含量超出我们的预料，有足够多的暗物质使宇宙物质的密度达到“临界密度”，使宇宙与最简单的理论模型相似，那么宇宙膨胀减缓的速度就会加快。

这些超新星显示了与其红移直接相关的另一趋势：与较近距离处的同类超新星相比，最遥远和红移最大的超新星变亮和变暗的速度要慢一些。这正是我们所预期的结果：一个远离我们而去的时钟会变慢。如果它发出周期性的“滴滴声”，之后发出的声音就要穿过更长的距离，到达地球的时间间隔就会变长。

超新星的变亮和变暗本身就像一个时钟，其“光变曲线”的减速与红移成正比，这正是当它们远离我们时所发生的情况。在一个静态的宇宙中，我们无法解释这一现象。对于任何怀疑红移是由于某种“光疲劳”效应造成的观点来说，这是最好的反证。

用社会学的说法来说，天文学是一门“大科学”：它需要庞大而昂贵的设备。一般而言，宇宙研究项目通常不需要工业化的团队合作，但在一些情况下，例如在实验室使用大型加速器来研究核内粒子时，这种团队合作是必须的。天文学家仍然可以单独作战，靠争取大型望远镜的几个晚上的使用权来独自研究，当然，他们也可以使用小型望远镜来开展一些创新性的研究，就像最先发现其他恒星周围存在行星的那些天文学家一样。不过，利用超新星进行宇宙学研究需要许多合作者之间的长期努力，并且需要使用好几架望远镜。这些天文学家面临的首要挑战是，捕获一些数十亿年前恒星爆炸时炸出的光子，也就是光的微弱痕迹。通过反复观测同一片天空，在遥远的星系中寻找偶然的瞬变光点，天文学家就可以找出遥远距离上的超新星。这些搜索是用中等大小的望远镜进行的，因为大型仪器有更多来自其他方

面的需求，无法再分配给任何一个单独的项目。接下来，每一颗超新星都会被反复观测，以绘制出其“光变曲线”，并尽可能精确地测量其视亮度。这些工作最好使用10米口径的地面望远镜，或者哈勃太空望远镜。分析所有数据，并评估其可靠性，这也是一项精细的工作。

对于任何新的科学推断，尤其当它出乎人们的意料时，在得到独立证据的证实之前，自然都不会得到注重。在此之前，往往是令人沮丧的漫长等待。幸运的是，有两个独立的团队致力于开展“超新星宇宙学计划”。第一个真正进入这一领域的是索尔·珀尔马特（Saul Perlmutter），他曾是加利福尼亚州劳伦斯-伯克利实验室（Lawrence Berkeley Laboratory）的物理学家。也许因为他一开始在天文学方面没有什么背景，因此没有被困难吓倒，于1990年左右投入了研究。逐渐地，他吸引并激励了一群来自英国和美国的合作者，与他共同开展研究。第二个小组也是国际性的，只是形成较晚，这个小组的几位研究人员提出了一项新技术，可以对超新星进行更加标准化的二级分类，珀尔马特的团队后来也采用了该方法。

到了1998年，每个研究小组都发现了大约十几颗遥远的超新星，并且信心十足地宣布了他们的初步研究成果：宇宙膨胀速度的减慢程度比假定Ω等于均衡值1而推导出来的结果要小。在以往，理论上有一个很深的成见，即认为Ω刚好等于均衡值1时的宇宙会比较简单。尽管上述结果与这一成见相反，但这并不令人吃惊，毕竟没有足够的证据表明，宇宙中有足够多的暗物质使Ω的值超过0.3。然而，真正令人惊讶的是，宇宙膨胀的速度似乎根本没有减慢，而是在不断加快。《科学》杂志将这一发现评为1998年科学领域中的头号发现。

这些观测正好在现有望远镜所能达到的极限范围内。遥远的超新星非常暗淡，很难对它进行精确的测量。此外，一些天文学家担心，星际空间中的尘埃“雾”会减弱光线，使超新星看起来比实际距离更远。除此之外，这些“炸弹”可能还不够标准，例如，它们的发光量

可能取决于原有恒星中碳等元素的含量。然而，在越是宇宙年轻时形成的天体中，换句话说，就是在那些我们观测到的红移最大的天体中，这些元素的含量越会系统性地降低。科学家正在进行交叉对比，每个月都会有更多超新星被加入样本清单中。

宇宙膨胀正在加速？

宇宙膨胀的加速意味着空间本身有一些不同寻常的重要属性，即宇宙中必然存在另外一种力，即使在真空中，它也会导致“宇宙斥力”。这种力在太阳系中无法被察觉，也不会对银河系产生任何影响。不过，在更为稀薄的星际空间中，它可以压倒引力。尽管暗物质之间具有引力作用，但实际上膨胀却在加速。然而，如果只有引力作用，就会导致膨胀逐渐减速。因此，我们必须在当前的关键数字中引入另一个数字，来描述这种“反引力”的强度。

我们通常认为真空是“虚无”的，但如果我们将星际空间某个区域中所包含的少量粒子全部移走，甚至将原来穿过它的辐射也屏蔽开来，并将它冷却到绝对零度，这样得到的空间仍然可能会有一些残留的力。爱因斯坦就曾推测过这一情况。早在1917年，在他提出广义相对论之后不久，他就开始思考如何将这个理论推广到整个宇宙。事实上，那时的天文学家只了解银河系，自然就认为宇宙是静止的，既不膨胀也不收缩。爱因斯坦发现，静态的宇宙会立即开始坍缩，因为其中的物质相互吸引，除非有一种额外的力能抵消引力，否则宇宙不可能保持静态。因此，他在自己的理论中增加了一个被称为“宇宙常数”的数字，用希腊字母 λ 表示。这样，爱因斯坦的方程式便能推导出一个静态的宇宙，只要取一个合适的 λ 值，其中的引力就会被一种宇宙斥力抵消。这个宇宙虽然是有限的，但没有边际：你所发出的任何一束光最终都会折返回来，照在你的后脑勺上。

1929年之后，这个所谓的“爱因斯坦宇宙”只是被当作了一件趣闻。因为那时天文学家已经意识到，银河系只不过是众多星系中的一个，而遥远的星系正在远离我们：宇宙不是静止的，而是在膨胀。此后，爱因斯坦也对 λ 失去了兴趣。事实上，乔治·伽莫夫在自传《我的世界线》（*My World Line*）中回忆了爱因斯坦去世前三年与他的一次谈话，爱因斯坦认为引入宇宙常数 λ 是自己一生中“最大的失误”。如果爱因斯坦没有引入这个常数，他的方程式将会毫无疑问地推导出：宇宙正在膨胀或坍缩。这样，爱因斯坦可能早于埃德温·哈勃预测到宇宙正在膨胀的现象。

虽然爱因斯坦引入宇宙常数 λ 的原因已经被遗忘了70年，但这个概念本身并未因此而失去人们的信赖。恰恰相反，λ 现在不再像爱因斯坦认为的那样是臆想和刻意而为的结果。我们现在意识到，虚无的空间绝非那么简单，各种粒子都潜伏在其中。任何粒子及其反粒子都可以通过适当的能量聚集而被制造出来。在更小的尺度上，虚无的空间可能是一团翻腾纠缠着的弦，并且拥有更多维度的结构。从现代的角度来看，令人感到困扰的问题是：为什么 λ 这么小？为什么所有正在进行的复杂过程，即使在虚无的空间中，也不会产生更大的净效应呢？为什么空间的密度不像原子核或中子星的密度那样大[(19)]？甚至，为什么空间的密度不像宇宙诞生10^{-35}秒时的密度一样大？事实上，空间的密度是极早期宇宙的密度的$1/10^{120}$，这也许是整个科学界在量级估算中最糟糕的一次失败。λ 的值可能不正好为零，但它肯定非常小，以至于只能与星际空间中极其微弱的引力相抗衡。

一些理论物理学家认为，宇宙空间中具有微型黑洞这类复杂的微观结构，它们可以自我调节以补偿真空中的任何其他能量，并促使 λ 恰好为零。如果宇宙膨胀的速度确实在加快，λ 也不等于零，那么这种论点将被推翻，同时也警告我们防止这样的想法：“因为某个事物非常小，所以必定存在某种深层次的原因能够表明，它恰好为零。”

λ非零的证据

在撰写本书时（1999年春季），λ非零的证据虽然很充分，但还不是决定性的。超新星的观测中可能存在一些未被正当认可的倾向或误差。不过，还存在其他的证据能够证明λ非零，它们虽然都属于技术性和间接的证据，但证实了宇宙正在加速膨胀的观点。宇宙微波背景辐射在太空中并不是完全均匀分布的，而是存在温度上的轻微起伏，这是由演化成星系和星系团的不均匀性造成的。最显著的不均匀区域的可能大小是可以计算出来的，它们在太空中的大小（例如，它们是一度见方还是二度见方）取决于视线范围内所有物质的引力聚焦的大小。这种测量直到20世纪90年代末才得以实现（测量地点在干燥的高山之巅、南极或者长时间飞行的飞艇之上），最终得出的结果否定了宇宙是一个低密度的简单宇宙。如果Ω真的为0.3，而且λ正好为零，那么星系团的种子就应该看起来比实际的要小。然而，真空中任何潜在的能量都会增强聚焦效果。如果λ为0.7左右，那就与这些测量结果一致，也与支持宇宙正在加速膨胀的超新星证据相符。

虽然引力是行星、恒星和星系中的主导力量，但在更大的宇宙尺度上，平均密度非常低，引力可能会被另一种力取代。宇宙常数λ描述了自然界中最微弱也最神秘的力，这种力似乎控制着宇宙的膨胀及其最终命运。爱因斯坦的“失误”可能最终被证明是一种成功的洞察力。如果真是这样，他的工作就会产生连他自己都始料未及的影响，而这样的例子并非个例。广义相对论最突出的一个预言是，预示了黑洞的存在。弗里曼·戴森（Freeman Dyson）这样总结了爱因斯坦自己对这个问题的看法：

> 爱因斯坦不仅对黑洞的概念持怀疑态度，而且还积极地反对它。他认为，黑洞的解是一个污点，需要用更好的数学公式从理论中剔除，而不是一个需要通过观测进行验证的结

论。他从未表示过对黑洞的认同，无论是作为一个概念，还是作为一种物理实在。

如果 λ 不为零，我们就会面临这样一个问题：为什么它具有我们所观测到的值，而且这个值比它应该有的“自然”值小非常多。如果宇宙再小一些，就会大有不同（尽管下面将要讨论的长期预测会有所不同）。实际上，数值较大的 λ 值将会带来灾难性的后果：λ 将不会在星系形成之后才开始与引力竞争，而是在密度更大的早期阶段就会超过引力。如果 λ 在星系从膨胀的宇宙中聚集成形之前就开始占据主导地位，或者它提供了足够强大的斥力来扰乱星系，那么就不会有星系存在。不过，我们的存在说明，λ 值不应该太大。

长远的未来

地质学家根据岩石的地层推断出地球的历史，气候学家通过钻穿南极冰层推断出地球在过去100万年来的温度变化。同样，天文学家可以通过拍摄不同距离上星系的“快照”来研究宇宙的历史：那些离我们越远的星系（具有较大的红移）所代表的演化阶段越早。理论物理学家面临的挑战是了解星系及其演化过程，以便用计算机做出与现实相符的模拟（参见第8章）。

宇宙中的大多数星系已经进入了一个稳定的成熟期，一个新陈代谢减慢的平衡状态。星系中形成的新恒星越来越少，蓝色的恒星也越来越少。那么，遥远的未来将会变成什么样子呢？当宇宙增长至10倍大时，也就是宇宙的年龄是1 000亿年而不是100亿年，会发生什么呢？我以前喜欢的猜测（在很多相关证据出现之前）是：到那时，膨胀将停止，大坍缩接踵而至，宇宙重新陷入一场大危机，一切都将面临与落入黑洞的宇航员一样的命运。那时，宇宙存在的时间所剩无几，并坍缩成一团。不过，这种情况要求 Ω 的取值大于均衡值1，这与

近年来获得的证据刚好相反。暗物质虽然确实存在，但似乎不足以使宇宙完全达到“临界密度”，因为Ω看来小于均衡值1。此外，宇宙常数λ描述的额外的宇宙斥力实际上使膨胀加速了。

宇宙似乎会无限期地膨胀下去。我们无法预测生命在100亿年或更长一段时间后将会怎样：一方面，它可能会灭绝，另一方面，它也可能会进化到可以影响整个宇宙的状态。不过，我们可以计算出无生命宇宙的最终命运：即使燃烧最慢的恒星最终也会死亡，我们所在星系群中的所有星系（银河系、仙女星系和几十个更小的星系）会合并成一个单一的系统。到那时，部分原始气体会在死亡恒星的遗骸中集结起来，其中有些可能是黑洞，有些可能是非常冷的中子星或白矮星。

从更长远的角度来看，一些现在难以觉察的极其缓慢的过程将会逐渐显现出来。在一个典型的星系中，恒星之间的碰撞是非常罕见的（这对太阳系来说是幸运的），但碰撞的次数会逐渐增加。银河系漫长的最终阶段偶尔会被强烈的耀斑照亮，每一次耀斑都表明有两颗已死亡的恒星发生碰撞。在相当长的一段时间里，由引力辐射造成的能量损失将会使所有恒星和行星的轨道开始压缩，这种作用在今天慢得几乎察觉不到。即使原子也不会永远存在。最终的结果便是，白矮星和中子星会因为其组成粒子的衰变而受到侵蚀。黑洞也会衰变，其表面会因量子效应变得模糊，并释放出辐射。在当前的宇宙中，除非存在原子大小的微型黑洞，否则这种效应太慢了，不会引起人们的兴趣。一颗恒星质量的黑洞的总衰变时间为10^{66}年，而一个重达10亿个太阳质量的黑洞则需要10^{93}年才会被侵蚀殆尽。

10^{100}年之后，银河系所在的星系群中唯一幸存下来的遗迹将是一大团暗物质和一些电子与正电子。我们本星系群之外的所有星系都会经历同样的内部衰变，而且会一步步离我们远去。不过，它们远离的速度主要取决于λ的值。如果λ为零，原有的引力会使远离速度减慢。实际上，尽管星系会不可避免地远离，并且远离速度（和红移）

会逐渐减小，但绝不会完全降低至零。如果我们遥远的后代有足够强大的望远镜来探测高红移的星系，即使这些星系距离他们越来越远，并且自身正在不断地衰变，但相比于今天的我们，他们实际上能够探测到的东西将会更多。1 000亿年之后，我们可以看到1 000亿光年以外的物体，因为现在远在我们视界之外的物体（因为它们的光还没有到达我们）到那时都会进入我们的视野。

然而，如果 λ 不为零，宇宙斥力将会推动星系以不断加快的速度彼此远离。这样，它们将会更快地从我们的视野里退出，因为它们的红移在增大而非减少。我们的视野范围将会受到一个视界的限定，这个视界很像黑洞里由内而外的视界。当物体落入黑洞时，它们会加速下落，并在接近黑洞“表面”时，红移越来越大，最后逐渐从视野中消失。在一个由 λ 控制的宇宙中，星系会加速远离我们，当它们接近视界时，会越来越接近光速。在以后的时间里，我们不会再比现在看得更远了。除了仙女星系和由引力卷入我们这个星系群的小星系之外，所有星系都注定会从我们的视野中消失，它们遥远的未来将会超出我们的视野，就像黑洞里发生的事件一样令我们不可企及。随着时间的推移，银河系之外的空间将以指数级的速度变得越来越空旷。

JUST
SIX
NUMBERS

08
宇宙原始时代的“涟漪”：数字 *Q*

宇宙中最显著的结构 —— 恒星、星系和星系团，都是由引力约束在一起的。而数字 *Q* 的出现表明，星系和星系团中的引力实际上非常微弱。

宇宙刚被创造出来时虽然处于一种不太成形的状态，但被赋予了一种能力，能够将自己从未成形的物质转变成一种真正奇妙的结构和生命形式。

——圣奥古斯丁（St Augustine）

引力与熵

就像音乐和绘画中表现的那样，自然界中最吸引人的图案既不是完全规则和重复性的，也不是完全随机和不可预测的；相反，它们结合了这两方面的特点。当前可见宇宙的精细构造并不是完全有序的，也不会变成完全随机的状态。自然界中有92种不同类型的原子，不仅有在“大爆炸”中形成的简单的氢原子、氘原子和氦原子。其中一些原子存在于地球生物圈的复杂有机体中，一些存在于恒星中，另一些则分散在星际空间。宇宙各处的温度的反差也非常大，比如，恒星表面炽热（中心温度更高），但黑暗的太空则接近“绝对零度”，借助从“大爆炸”中遗留下来的微波余晖，其温度达到2.7开尔文。

这种错综复杂的结构都来自一个单调、无定形的火球，这似乎违反了一个神圣的物理学原理：热力学第二定律。这个定律描述了一种不可避免地趋向于均衡、远离模式和结构的趋势：热的物体趋向于变冷，冷的物体趋向于变热。墨水和水很容易混合，而相反的过程，即搅拌一种浑黑的液体直到浓缩成一颗黑色的液滴，则会让我们大吃一惊。有序的状态最终会变乱，但反之则不然，用专业术语来说，“熵”永远不会减少。局部熵的明显减少总是被其他地方熵的增加抵消。这条定律的典型例子就是蒸汽机，其中活塞的有序运动总是伴随着热量的损耗。

然而，当引力开始起作用时，我们需要重新思考自己的直觉。举例来说，恒星是由于其内部引力向内拉合而聚集在一起的，这种内拉

的引力与其内部外推的热压力相平衡。恒星在失去能量时会变热，尽管这看起来有点奇怪。假设太阳内核的燃料供应被切断，其表面依然会保持明亮，因为有热量从它更热的内核中散发出来。如果核聚变不再提供热量，太阳就会随着能量的流失而逐渐缩小，就像威廉·汤姆逊在19世纪就已经意识到的那样，太阳将会持续1 000万年的时间。然而，这种收缩实际上会使内核变得比以前更热，因为引力在更短的距离上会产生更强大的内拉力，而为了抵消这种来自外部的巨大压力，内核的温度必须变得更高。当一颗人造卫星由于大气阻力逐渐盘旋进入较低轨道时，也会发生类似的情况：它的温度会升高，但引力释放的能量只有一半转化为热能，另一半用于加快卫星的速度，因为轨道越小，所需的速度越快。

因此，对于新恒星会在由冷尘埃气体组成的不规则云团中凝结而出这一现象，我们不应感到惊讶。密度最大的区域由于自身引力而收缩，进而像恒星一样发光。这种变化究竟是如何发生在猎户座或天鹰座星云这类环境中的，以及这一过程产生的大小恒星之间的比例是多少？即使运用最大的计算机也很难计算出结果，这也就是为什么我们不确定宇宙中有多少褐矮星构成了暗物质的原因。不过，从原理上来说，恒星的形成并不神秘：一旦引力控制了一个系统，它就会不可避免地收缩。

从“大爆炸”到星系

银河系和其他星系中的气体云已经被搅拌和循环利用过太多次了，以至于它们无法保留住关于自己起源的“记忆”。因此，宇宙变得越大，恒星的形成过程就越难以了解。星系的形成过程比恒星更复杂，它们起源于早期的宇宙，其形状是由它们的“遗传特点”和所处的环境塑造的。

如果宇宙一开始是完全平滑和均匀的，那么它会在整个膨胀过程中一直保持这种状态。在100亿年之后，暗物质的分布变得稀薄，氢和氦等元素也会变得非常稀少，每立方米只有不到一个原子。这样的宇宙将是寒冷而沉闷的：没有星系，因此也没有恒星，没有元素周期表，没有复杂性，当然也没有人类。不过，早期宇宙中哪怕只出现非常轻微的不规则性，最终也会产生极其重要的影响，因为在膨胀的过程中，密度的不均匀性会增大。比平均密度稍高一点儿的任何区域，其膨胀速度都会减小很多，因为它受到了额外引力的束缚，膨胀越来越落后于一般区域。比如，如果我们以稍微不同的速度向上抛出两个球，一开始，它们的运动轨迹可能只有细微的差别。接下来，速度较慢的球将完全停止，并开始下落，而速度较快的球仍在向上运动。在一个几乎没有任何特征的火球中，引力会放大这种微小的“涟漪”，增大了密度差别，直到密度过高的区域停止膨胀，并收缩成由引力结合在一起的各种结构。

宇宙中最显著的结构——恒星、星系和星系团，都是由引力维系在一起的。我们可以用它们全部“静止质能”（mc^2）的比例来表示其结合的紧密程度，也可以表示需要多少能量才能打破这种约束，使它们分解。对于宇宙中最大的结构星系团和超星系团来说，答案是1/100 000。这是一个纯粹的数字——表示两个能量之间的比例，我们称之为Q。

Q非常小，量级为10^{-5}，这意味着星系和星系团中的引力实际上非常微弱。因此，用牛顿定律足以精确地描述恒星如何在星系内运动，以及每个星系如何在所有其他星系和星系团内暗物质的引力影响下沿轨道运动。Q的值如此之小也意味着：我们可以将宇宙看作是各向同性的，就像我们看待星球一样；如果一颗星球表面上的起伏只有它半径的1/100 000，[(20)]我们就可以认为它是光滑和浑圆的。

这种微小的涟漪应该很早之前就出现了，其出现的时间早于宇宙能够“区分”星系和星系团之前。当时，这些不同系统的尺度或者当前宇宙中显得重要的任何尺度，都没有什么特别之处。最简单的猜测是，在早期的宇宙中，没有哪个尺度更受偏爱，因此每个尺度上的涟漪都是一样的。当宇宙还处于微观尺度时，这种初始的“粗糙”程度就已经通过某种方式建立起来了，至于这究竟是如何发生的，我们将在下一章进行推测。对于宇宙结构的“特征”来说，数字Q起着决定性的作用，如果Q的值太大或太小，结果将非常不同。

微波余晖中的涟漪

宇宙一开始稠密而不透明，就像恒星内部的发光气体。然而，经过50万年的膨胀，温度下降到3 000摄氏度左右，比太阳表面的温度略低。随着进一步冷却，宇宙实际上进入了黑暗时期，该时期一直持续到第一批原初星系形成并点燃自己为止。

那么，宇宙的黑暗时期究竟是如何结束的？这将是未来10年里天文学家面临的一大挑战。人们寄予了下一代太空望远镜很大的期望。按照计划，这些望远镜将会安装针对红光和红外线的灵敏探测器，以及一个口径为8米的反光镜（相比之下，哈勃太空望远镜的口径只有2.4米）。

作为来自“大爆炸”本身的余晖，宇宙微波背景辐射传递了宇宙早期的直接信息，此时星系还处于“胚胎”阶段。密度稍高的区域的膨胀速度慢于一般区域，注定会演变成星系或星系团；密度稍低的区域则注定被分解成空洞的空间。宇宙微波背景辐射的温度应该带有这些波动的印记，预期的大小约为1/100 000，这基本上与表征涟漪幅度的数字Q的数值相同。

20世纪90年代，人们对宇宙结构进行了绘制，这无疑是宇宙学的巨大胜利。宇宙微波背景辐射大约只有地球辐射的百分之一（地球表面温度约为绝对零度以上300开尔文）。科学家现在要测量的是比这还要小得多的温差，这确实是一项令人生畏的技术挑战。在确认宇宙微波背景辐射具有“黑体”光谱方面，美国国家航空航天局于1990年发射的宇宙背景探索者卫星达到了显著的精度；同时，这颗卫星还携带了第一台足够灵敏的仪器，能够辨别来自某些方向的辐射比来自其他方向的辐射略热。它扫描了整个天空，以足够高的精度测量温度，绘制了这种不均匀性。

这类测量最好在太空中进行，因为大气中的水蒸气会吸收部分宇宙微波背景辐射。在宇宙背景探索者卫星之后，人们还进行了同样的测量，测量地点或在山顶，或在南极（那里的水蒸气较少），或在带有设备的飞艇上。虽然这些新的实验只能描述小区域的情况，不像卫星那样可以描述整片天空的情况，但它们能够灵敏地以极低的成本获得同样的观测结果。

之后的重大进展来自两架比宇宙背景探索者卫星更先进、更灵敏的太空探测器：一个是美国国家航空航天局的微波各向异性探测器（Microwave Anisotropy Probe，简称MAP），另一个是欧洲航天局的普朗克探测器（Planck/Surveyor）。在几年内，这些探测器将会收集足够多的数据，揭示早期宇宙在许多不同尺度上的“粗糙度”，从而解决星系是如何形成的这一关键问题。宇宙微波背景辐射携带了很多关于极早期宇宙的信息，例如，它将有助于明确说明数字Ω、λ以及Q。

“大爆炸”余晖温度的不均匀性达到1/100 000的程度，这实际上令人宽慰，而不是令人惊讶。如果宇宙微波背景辐射暗示的是一个更加平滑的早期宇宙，那么当前宇宙中的星系团和超星系团将会成为一

个谜。如果情况真是如此，除了引力，还需要另外某种力的作用，以更快地加大密度反差。

不过，Q只有1/100 000的事实确实是宇宙最显著的特征。如果你捡到一块石头，它在1/100 000的精度上是球形的，你可能想知道是什么造成了这些小的不规则性，也可能对整体的光滑性感到更加困惑。第9章将要介绍的“暴胀”是关于这个问题的最好理论，而温度的起伏则为这些想法提供了重要的检验。

“虚拟”宇宙的演化

当宇宙的年龄达到100万年时，一切仍在均匀地膨胀。这些结构是如何收缩并发展成我们现在所观察到的宇宙景象的呢？现在，我们可以利用计算机来研究一些“虚拟”的宇宙。在模拟开始时，物质处于膨胀之中，但不是很均匀。原因在于，作为初始条件的一部分，Q的特定值相对应的不规则性已经被考虑在内。

占主导地位的引力源是“暗物质”，即从早期宇宙中留存下来的粒子，它们几乎不会相互碰撞，但都受到了引力的影响。如果你在越来越大的体积上求取平均值，那么就会发现早期宇宙变得越来越平滑。这意味着，如果引力是唯一相关的力，较小的尺度将首先开始收缩。宇宙的结构是由下而上按等级形成的。亚星系尺度下的暗物质首先凝聚，合并成具有星系质量的物体，这些物体再形成星系团。在更大的尺度上，引力需要更长的时间才能逆转膨胀。

然而，这种阶梯式的聚集本身导致了一个黑暗而贫瘠的宇宙。宇宙的“发酵剂”是原子，它们的总质量比暗物质的总质量小得多：原子被动地前进，形成一种能“感受”到暗物质的引力的稀薄气体。实际上，我们所看到的一切都取决于这种气体。

这种气体的运动方式比暗物质更复杂，因为引力并不是唯一作用于它们的力。气体能“感受”到引力，但也会施加压力。这种压力阻止了气体被引力内拉成非常小的暗物质“团块”。不过，在100万倍于太阳质量的量级上，引力将会压倒一切。因此，最初形成的气体浓缩体比恒星重100万倍，这些浓缩体最终形成“第一束光”，结束了宇宙的黑暗时期。计算机程序通常采用的气体运动模型与航空工程师用来研究机翼周围和涡轮内部气流的程序类似。这样的计算被认为足够可靠，可以替代风洞试验。不过，即使如此，若想计算出这些坍缩的云团内部发生了什么，难度仍然很大。迄今为止，还没有人对开始于单个云团，最终形成一个恒星群的过程进行过模拟。一个100万倍于太阳质量的气体云既可以分裂成100万颗像太阳一样的独立恒星，也可以分裂成数目较少但质量更大的天体，甚至还可以保持为一个整体，收缩成一颗超新星或类星体。

最早的这些天体应该是在宇宙只有几亿岁时，也就是在现在年龄的百分之几时形成的。当宇宙到了10亿岁时，星系尺度的结构应该已经形成，其中每个星系都是恒星的集合，它们不仅依靠自身的引力，而且还依靠暗物质的引力维系在一起，这些暗物质形成了一个比宇宙大10倍、重10倍的“团体”。气体不断落向这些物体并冷却下来，如果这些物体正在旋转，气体就会形成圆盘，进而凝结成恒星，由此开始循环过程，合成并散播元素周期表中的所有元素。

计算机模拟至少展示了这些过程的大致轮廓，这种模拟可以像电影一样放映，用以描述宇宙的膨胀和星系的形成过程，只是其速度比实际过程的速度大约快10^{16}倍。图8-1展示了这种模拟中的6个画面。

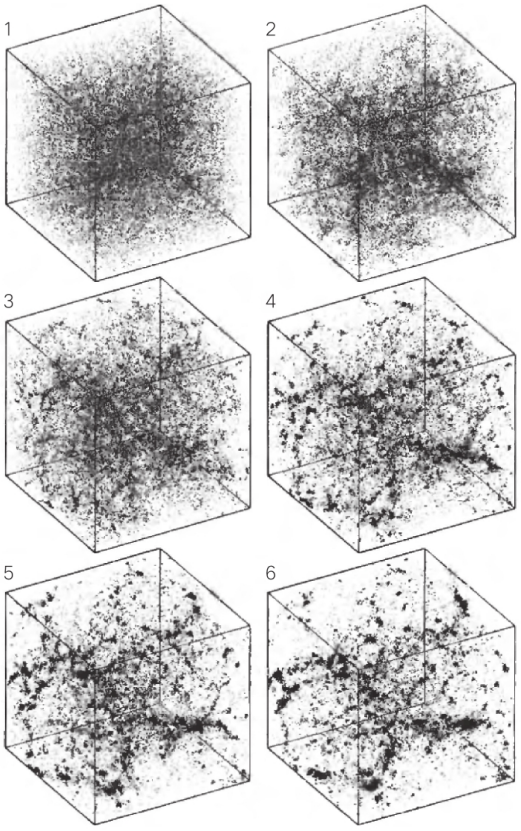


图8-1　计算机模拟的6个画面

这6个画面显示了膨胀的宇宙中是如何出现结构的。这些图片中略去了整体的膨胀过程，所以所有立方体的大小保持不变。最初，初始结构就存在不易察觉的不规则性。在膨胀过程中，密度较高的区域的膨胀速度越来越慢，密度反差不断增大，最终收缩成由引力约束的结构。这些结构结合在一起，产生了星系——这是人类出现的一个先决条件

与单个星系一样，星系团和超星系团也是引力聚集的产物。新形成的星系不会完全均匀地分布，有些地方的密度会比其他地方的高一点儿。随着膨胀的继续，质量较大的区域的膨胀速度将会减慢，因此这些区域的星系最终明显地比平均密度更密集，比一般星系结合得更加紧密。

我们如何才能检验一个虚拟的宇宙是否与真实的宇宙完全相似呢？这些模拟必须再现我们所观察到的星系的特性，包括体现星系特征的大小和形状，圆盘星系和椭圆星系的比例，以及它们的聚集方

式。不过，模拟还必须做更多工作：它必须与宇宙“快照”相匹配，这些“快照”告诉了我们宇宙更早期时星系的外观，以及它们形成星系团的方式。

如前所述，我们当前看到的来自最遥远的星系的光线（新一代的望远镜可以对这些星系进行探测和分析）是它们刚形成时发出的。它们看起来和现在的星系不同，而且没有一个已经成形且稳定旋转的盘状结构，构成它们的气体中也只有一小部分变成了恒星。大多数星系都很小，它们不断合并，我们今天所看到的大星系是由主星系吞噬较小的邻居形成的。

作为早期恒星形成的副产品，宇宙中还会发生一些更有趣的事情。一些气体会沉降到一群暗物质粒子群的中心，并在自身的引力作用下收缩，形成一个比普通恒星重100多万倍的“超级恒星”。如此巨大的天体非常明亮，以至于其核燃料不能持续很长时间，它结束生命的方式不是爆炸，而是坍缩成黑洞。因此，一旦星系开始形成，空间就会被这些黑洞“刺穿”。气体不断落入其中，释放出的能量照亮了星系的其他部分。

这些天体被称为“类星体”或“活动星系核”，它们之所以有趣有两个原因。首先，它们比星系本身更明亮，因此可以作为探测灯照亮遥远的宇宙。类星体的光谱能够揭示视线范围内的气体云，并为宇宙中氘的含量提供最好的证据，正如我们所见，这是对“大爆炸”理论的最好检验。其次，这类天体能使我们对爱因斯坦的广义相对论进行重要检验。它们释放的能量来自非常接近黑洞的旋转的物质，甚至可能来自自转的黑洞本身。我们根本就没有机会捕获这种物质流的实际图像，这比捕获一颗围绕另一颗恒星旋转的类地行星的图像更具挑战性。不过，类星体发出的辐射因强大的引力而发生红移（这是除普通宇宙红移以外的红移）。由于这些气体在黑洞附近高速旋转，所以也会产生很大的多普勒频移，即离我们远去的一侧发出的光变红，而

不断接近我们的另一侧发出的光则变蓝。根据推断出的运动和引力场，我们可以检验黑洞是否具有爱因斯坦理论所预测的那些精确属性。

有多少是我们可以预测的

如果用一句话来总结“‘大爆炸’以来发生了什么”，那么最好的回答可能是深吸一口气，然后说：“从一开始，引力就塑造了宇宙结构，增强了温度反差，这是100亿年后出现人类以及周围这些复杂结构的先决条件。”

一旦重到足以自我吸引的系统形成，对平衡的偏离就会增大。这样，宇宙就可以从一个温度均匀的原始火球演化为包含非常炽热的恒星结构的状态，它们向非常寒冷的空旷空间释放出辐射。这个过程为更加复杂的宇宙演化和生命的出现奠定了基础。虽然单个恒星因演化而密度变得更高了（有些以中子星或黑洞而终结），但整体而言，物质的分布会变得越来越稀疏。这些复杂结构是一系列事件的结果，宇宙学家可以将这些事件追溯到致密的原始介质，它们几乎没有结构。

就像达尔文的生物进化论一样，我们关于宇宙结构是如何形成的观点是一个极具说服力的宏伟蓝图。与达尔文主义一样，这整个过程是如何开始的仍然是一个谜：数字Q到底是如何被确定的（也许源自极早期宇宙的微观振动），这个问题至今仍然令人困惑，就像地球上第一个生命是如何起源的问题一样。不过，宇宙学在一个方面是比较简单的，那就是一旦确定了起点，其结果在很大程度上是可以预测的。宇宙中所有以同样方式开始的大区域的最终结果在统计上都是相似的。相比之下，生物进化的总体过程却很容易受到“意外事件”的影响，比如气候变化、小行星撞击、流行病等。因此，如果让地球的历史重演，最终可能会形成一个完全不同的生物圈。

这就是用计算机来模拟宇宙中结构形成过程的重要性所在。星系和星系团是引力作用于初始不规则性的结果。我们并不尝试解释细节上的特点，只注重最后的统计结果，就像海洋学家想要了解的是波浪的统计结果，而不是在特定地点和时间下的一个特定波浪的细节。

起始点是一个膨胀的宇宙，可以用 Ω、 λ 和 Q 来描述。宇宙的演变结果敏感地取决于这三个关键数字，它们被铭刻在极早期宇宙中，只是我们不能确定这个过程是怎样的。

Q 的调谐

星系、星系团和超星系团的形成显然要求宇宙中含有足够多的暗物质和原子。Q 的值不能太低，因为在一个只有辐射而其他物质极少的宇宙中，引力永远无法战胜压力。 λ 也不能太高，否则在星系形成之前，宇宙斥力就会超过引力。此外，最初在扩散气体中还必须有足够多的普通原子(21)，以便形成所有星系中的所有恒星。然而，我们已经看到，还需要其他一些东西，即最初的不规则性，这是结构得以发展起来的“种子”。数字 Q 描述了这种不规则性或“涟漪”的幅度。Q 为什么约为 10^{-5} 仍然是一个谜。但这个数值的大小至关重要：如果它太小，或太大，宇宙的“结构”就会大不相同，并且不利于生命的出现。

如果 Q 的值小于 10^{-5}，但其他宇宙常数保持不变，那么暗物质聚集的过程就需要花更长的时间，而且它们会更小、更松散。由此产生的星系将是缺乏活力的结构，其中恒星的形成也会变得缓慢、效率低下，“加工”出的物质会被吹出星系之外，而不是被循环利用形成新的恒星和行星系统。如果 Q 的值小于 10^{-6}，气体就永远不会收缩成由引力束缚在一起的结构，这样的宇宙将永远是黑暗的，没有任何特征，即使它最初的原子、暗物质和辐射的“混合”与当前的宇宙是一样的。

如果Q的值比10^{-5}大太多，即最初的“涟漪”被大幅度的波动代替，那么宇宙中将充满动荡和暴力。比星系大得多的区域在宇宙早期就会收缩，但它们不会形成恒星，而是会坍缩成巨大的黑洞，每个黑洞的质量都比当前宇宙中的整个星系团大得多。任何残存的气体都会变得非常炽热，以至于发射出强烈的X射线和伽马射线。星系，即使它们设法形成了，也会比当前宇宙中的星系更加紧密地结合在一起。恒星将会被捆绑在离彼此很近的地方，频繁地发生碰撞，从而无法形成稳定的行星系统。出于相同的原因，太阳系不可能在离银河系中心很近的地方存在，因为与现在所处的非中心地带相比，那里的恒星群更加拥挤。

如果Q的值碰巧为10^{-5}，而不是更大，这一事实也让宇宙学家更容易理解当前的宇宙。一个小的Q值保证了宇宙中出现的结构与视界相比都是小系统，这样，我们的视野就大到足以涵盖许多独立的区域，其中每个区域都大到足以成为一个合适的样本。如果Q的值大得太多，超星系团就会聚集成更大的结构，延伸到我们的视界范围，而不是像当前的宇宙那样，被限制在这个尺度的1%左右。因此，谈论可见宇宙的“平滑”特性就变得毫无意义，而且，我们甚至都无法定义Ω这样的数字。

如果没有Q的小取值，宇宙学家就寸步难行，直到最近，这一点还被认为是一种令人满意的巧合。现在，我们已经意识到，这不仅仅为宇宙学家提供了方便，事实上，如果宇宙没有这种简单的特性，就不可能进化出生命。

JUST
SIX
NUMBERS

09

宇宙栖息地（三）：我们的视野之外有什么

宇宙的奥秘和微观世界的奥秘是相互重叠的。为了探索这些奥秘，我们需要将引力与控制单个粒子的其他力联系起来。

那时，世界确实是被创造出来的，不过，不是在时间里，而是与时间同时出现。因为时间里所创造的一切是在一段时间之后和之前创造的，也就是在过去之后、未来之前。但那时还没有什么过去，因为不存在什么创造物，其运动可以用来计算持续的时间。所以，世界只能是与时间同时被创造出来的。

——圣奥古斯丁

“大爆炸”的故事有多可信

“大爆炸”理论已经岌岌可危地存在了30多年，许多测量都有可能驳倒它，只要得到的结果不同。以下是其中5种可能的测量结果：

- 天文学家可能已经发现了一个天体，其氦丰度为零，或者远低于氢丰度的23%。这将是一个致命的事实，因为恒星内部的氢聚变可以轻易地使氦丰度升至银河系形成之前的水平，但无法将所有的氦重新还原为氢。
- 由宇宙背景探索者卫星精确地测量出的宇宙微波背景辐射的能谱可能与预期中的“黑体”辐射能谱或热辐射能谱不同。
- 物理学家可能已经发现了中微子与“大爆炸”理论不相符的一些现象。在“火球”中，中微子比原子多得多（大约多10亿倍），这与光子的情况一样。所以，一个中微子的质量即使仅为原子的百万分之一，它们总体上也会为目前的宇宙贡献超多的质量，甚至比隐藏在暗物质中的质量还要多。正如第6章所讨论的，中微子的实际质量（如果不是零）似乎太低了，不足以对“大爆炸”理论造成威胁。不过，将来的研究结果可能会证明它们具有更大的质量。
- 氘丰度可能与从“大爆炸”中留存下来的预期数量不符。

- 天空中宇宙微波背景辐射的温度的波动可能意味着，Q的值与从当前宇宙结构中推断出的值不相符，而不是如第8章所讨论的那样，等于10^{-5}。

然而，“大爆炸”理论已经通过了这些检验。这表明，我们得认真对待那个将宇宙反推到开始膨胀后一秒钟时（也就是氦开始形成时）的推理基础。不过，就像根据岩石和化石可以推断出地球的早期历史一样，这些推论同样是间接性的，并且没那么定量化。

也许，我们还可以向更早的时期追溯，不仅是追溯到一秒钟的时候，而是不到一秒钟的时候，以更深入地探测宇宙，甚至解释关键的宇宙数字。

我们可以很自信地退回离“大爆炸”更近一些的时段，但不能太近。我们不太了解宇宙在最初1/1 000秒时的物理过程，因为此时所有物体的密度都比中子星的高。在微观尺度上，科学家可以通过高能粒子的碰撞实验来模拟高温和高密度下的情况。不过，这项技术究竟能让我们回推多远，是有限度的。即使正在日内瓦欧洲核子研究中心建造的巨型高能粒子对撞机（Large Hadron Collider）也无法获得“大爆炸”后10^{-14}秒时所有粒子具有的能量。

在宇宙诞生10^{-35}秒时，甚至在更短的时间内，宇宙的许多重要特征可能已经定型了。在这种情况下，宇宙年龄时钟上的每10^{-1}秒（小数点后每增加一个零）都同样充满变化，也都同样重要。相比于从氦开始形成的第三分钟（大约相当于“大爆炸”后的200秒）到当前时刻（$3x10^{17}$秒，即100亿年）的变化，从10^{-14}秒回推到10^{-36}秒所经历的变化更大，因为它跨越了更多个10的指数级。由此看来，宇宙在极早期阶段很活跃，处于不断的变化之中（图9-1）。

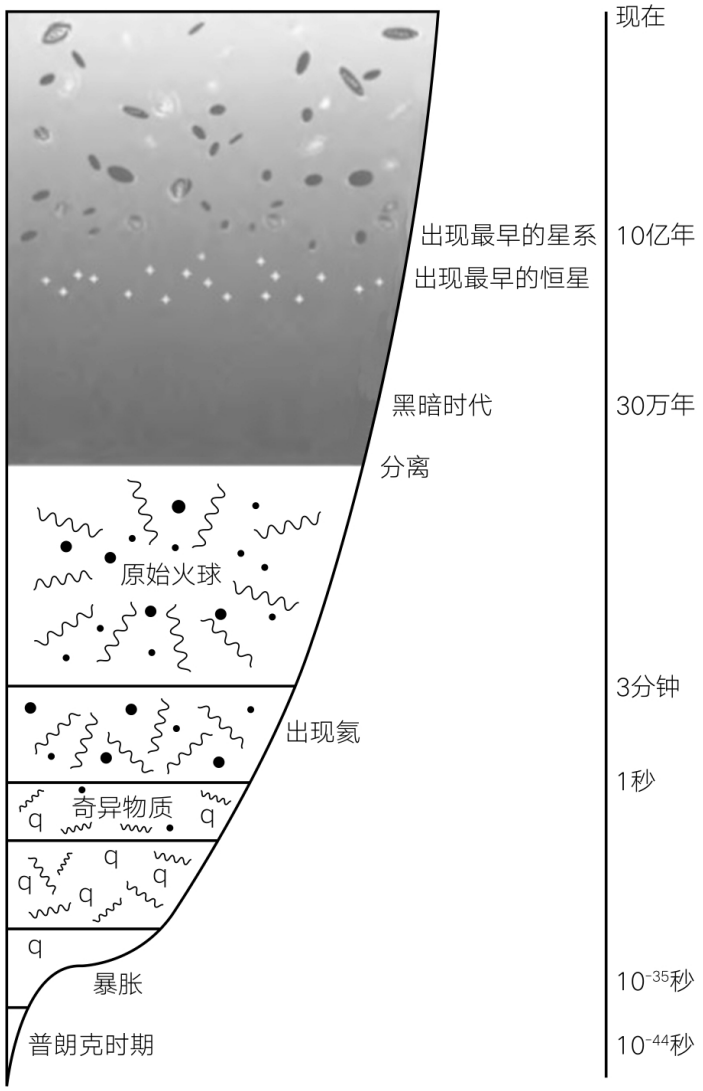


图9-1　宇宙膨胀过程中的一些关键阶段的时间图表

一开始，宇宙的奥秘和微观世界的奥秘是相互重叠的。为了探索这些奥秘，我们需要将引力（在大尺度上起主导作用的力）与控制单个粒子的其他力联系起来。然而，这项工作仍未完成。当前，亚原子世界中的各种力和粒子已被归为同一类型。

微观世界里的统一

早在19世纪，迈克尔·法拉第（Michael Faraday）就认识到了电和磁之间存在的紧密关系：运动的磁铁可以产生电，而运动的电荷会产生磁场。该原理是电动机和发电机出现的基础。1864年，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clark Maxwell）将法拉第的发现编成一组著名的方程式，用以表示变化的电场是如何产生磁场及其相反的过程的。在真空中，这些方程式在存在电磁振荡的地方有解。这就是光的本质：它是一种电磁能的波，就像无线电波、X射线和其他被称为电磁波的东西一样。

这样就只剩下两种不同的力：电磁力（电力和磁力被视为一种力）和引力。法拉第自己也渴望将这两种力统一起来，尽管他意识到还为时过早。100年之后，爱因斯坦晚年一直在寻找这两种力之间的深层联系，但仍然毫无结果。我们现在知道，这种研究注定会失败，因为他当时还不知道那些控制原子核的短程力，即将质子和中子束缚在原子核内的强相互作用力或核力（它决定了 ε 的大小），以及对放射性衰变和中微子至关重要的弱相互作用力。在最杰出的传记作者兼物理学家亚伯拉罕·派斯（Abraham Pais）看来，爱因斯坦生前最后30年“还不如去钓鱼”。这种观点多少有些苛刻。

宇宙学界现在面临的挑战是统一这4种力：控制微观世界的3种力——电磁力、强相互作用力、弱相互作用力，以及在大尺度上占支配地位的引力。在当代，迈向这种统一的第一步与下面这些人物有关联：美国物理学家谢尔顿·格拉肖（Sheldon Glashow）和史蒂文·温伯格（Steven Weinberg），荷兰物理学家杰拉德·特霍夫特（Gerard t'Hooft）和巴基斯坦物理学家阿卜杜斯·萨拉姆（Abdus Salam）。他们的研究结果表明，由麦克斯韦统一的电磁力与一种非常不同的力存在联系，那就是对中微子和放射性衰变很重要的弱相互作用力。这些力在宇宙早期是相同的，只有当宇宙冷却到约10^{15}摄氏度的临界温度以下时（在宇宙诞生10^{-12}秒的时候），它们才彼此独立，并区别开

来。最大的加速器可以模拟这样的温度，当欧洲核子研究中心在实验中发现了萨拉姆和温伯格预测的新粒子时，二人的理论得到了支持。

20世纪50年代和60年代，人们发现了许多新粒子（作为我们所熟悉的电子、中子和质子的补充），以至于陷入了这样一种危险境地：粒子物理学变得像集邮一样。不过，不同类型的粒子被区分开了；亚原子粒子可以被归类为不同的“族”，就像元素周期表上的原子可以被归类为“周期”和“族”一样。1964年，两位美国理论物理学家默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）和乔治·茨威格（George Zweig）提出了“夸克模型”（quark model）。夸克的电荷是电子电荷的1/3或2/3。杰罗姆·弗里德曼（Jerome Friedman）、亨利·肯德尔（Henry Kendall）和理查德·泰勒（Richard Taylor）等人的实验支持了这一模型，他们使用新型的斯坦福直线加速器（Stanford Linear Accelerator）将电子撞向质子。结果发现，在撞击后，电子按照一定的方式破裂了，似乎每个质子由三个“点电荷”组成，其带电量分别为电子总电荷的2/3、2/3和1/3。然而，“夸克模型”有一个违反直觉的方面，即一个孤立的夸克永远不能被移动，尽管在质子内部，夸克表现得像是自由的（所有探测微小带电粒子的尝试都失败了）。到了20世纪70年代后期，“粒子大观园”中的大多数成员已经用9种类型的夸克得到了解释。

20世纪70年代出现的所谓“标准模型”（standard model）给微观世界带来了明显的秩序。电磁力与弱相互作用力已经被统一，而强相互作用力或核力可以用夸克来解释，而夸克是由另一种叫作“胶子”的粒子结合在一起的。不过，没有人认为这就是最终的结论，因为基本粒子的数量仍然多到令人困惑，方程式中涉及的数字必须由实验来确定，不能仅通过理论来推导，尤其重要的一点是，“胶子”的解释并没有确定强相互作用力的强度，这一点对数字 ε=0.007至关重要。

在统一电磁力和弱相互作用力之后，下一个目标是引入强相互作用力，形成所谓的“大统一理论”，从而将支配微观物理世界的所有力包括在内。不过，这种理论还没有大到足以包括引力，因为这意味着更大的挑战。这里存在一个障碍：力的统一被认为只有在10^{28}摄氏度的温度下才会发生，这比目前的实验所能达到的最高温度还要高出上万亿倍，而若想获得所需的能量，就需要一个比太阳系大得多的加速器。因此，我们很难在地球上验证这些理论。

与此同时，这些理论在我们这个低能量的世界里造成的影响微乎其微。例如，作为所有恒星和行星主要成分的质子会非常缓慢地衰变，这种影响在遥远的未来可能很重要，但当前无足轻重。然而，在最初的10^{-35}秒里，所有物质的温度都高于10^{28}摄氏度。也许对于力的统一来说，极早期宇宙是唯一能达到所需温度的地方。然而，这个“实验”早在100多亿年前就停止了。那么，它是否留下了化石，就如同宇宙中的大多数氦都是从最初的几分钟遗留下来的呢？答案似乎确实如此。事实上，宇宙对物质而非反物质的偏爱（在第6章中讨论过）可能就是在这个极早期阶段出现的。更为重要的是，宇宙的巨大规模及其正在膨胀的事实，可能是由在那些短暂的初始时刻里所发生的事情决定的。

“暴胀”的概念

关于宇宙的两个基本问题是：为什么它在膨胀？为什么它这么大？通过探测出宇宙在膨胀过程中发生了的事情，我们可以回推到宇宙最初的几秒钟，并用氦元素和氘元素的丰度来证实这一点。实际上，“大爆炸”理论是对“大爆炸”之后发生的事情的描述；而且是相当成功的描述，但它并未说明最初是什么导致了膨胀。另外一个谜题是：为什么宇宙既具有整体的一致性，使宇宙学研究容易进行，同

时又允许星系、星系团和超星系团形成？或者，我们还可以更进一步提出：是什么决定了物理定律本身？

一个基本的谜团是，为什么在100亿年后，宇宙还在膨胀，而其Ω的值与均衡值1仍然相差不大（我们在第6章中进行了讨论）。宇宙既没有在很久以前坍缩，也没有膨胀得过快，使它的动能以10的许多次方倍的力量压倒引力的作用。这要求在早期宇宙中，Ω的值被调制得惊人地接近均衡值1。是什么让万物开始以这种特殊的方式膨胀呢？为什么当我们从相反的方向观察偏远地区时，它们看起来如此相似呢？或者，为什么宇宙微波背景辐射的温度在太空各处几乎是一样的呢？

如果当前宇宙中的所有部分在极早期就是同步和协调的，然后加速分离（这就是“暴胀”理论的关键假设），那么这些谜团就会被解开。1981年，当时年轻的美国物理学家艾伦·古斯（Alan Guth）提出了“暴胀”理论。就像在科学领域经常发生的那样，这个理论还有几个先驱，特别是苏联的亚历克斯·斯塔罗宾斯基（Alex Starobinski）和安德烈·林德（Andrei Linde）以及日本的佐藤胜本的理论。古斯的论点非常清楚，使大多数人相信这确实是一个至关重要的洞见。古斯在其著作《暴胀宇宙》（*The Inflationary Universe*）中讲述了这个想法浮现在自己脑海中时的“尤里卡[(22)]时刻”，以及活跃的理论物理学家是如何辩论和进一步发展这个想法的。当时作为一名正在一个过度拥挤的职业领域里寻求合适职位的年轻研究者，针对美国学术界的现状，古斯还坦率地从社会学的角度提出了自己的见解。

根据暴胀宇宙理论，宇宙之所以如此之大，引力和膨胀如此接近平衡的原因在于，在当时的可见宇宙还处于微观尺度的早期，发生了一些不寻常的事件。在当时拥有极高密度的环境中，“宇宙斥力”发挥着主导作用，λ的值似乎非常巨大，压倒了普通的引力。膨胀由此挂上了“超速档”，导致加速失控，因此，胚胎宇宙开始暴胀变大，

并变得均匀，从而在引力和动能之间建立了一种“精密调谐”的平衡。

所有这一切被假定发生在“大爆炸”后10^{-35}秒之内！当时普遍存在的条件远远超出了我们可用实验来测试的范围，因此所有细节都是推测的。尽管如此，我们仍然可以作出与其他物理理论一致的推测，以及与对后期宇宙的了解一致的推测。

暴胀理论背后的想法极具吸引力，因为它似乎表明了整个宇宙是如何从一颗微小的“种子”演化而来的。它之所以被认为是真实的，是因为暴胀是以指数级的速度进行的，它会翻倍，翻倍，再翻倍。数学公式通常不会产生巨大的数字，除非它们很长且很复杂。一个“适中”的数字生成一个巨大的数字（比如10^{78}，即当前可见宇宙中原子的总数）的唯一自然方式是，使变化以“指数级”进行，它表示大小翻倍的次数。一个球体的半径每增加一倍，其体积就增加8倍（在普通的欧几里得空间中），而若想达到10^{78}这样的数字，只需要100次这样的翻倍。

这正是宇宙“暴胀”阶段发生的事情。当宇宙暴胀到足以容纳我们现在所看到的一切之后，导致暴胀的强烈排斥作用就消失了，转而开始了更加悠闲的膨胀。这一转变将原来“真空”中潜藏的巨大能量转化为普通能量，产生了原始火球的热量，并引发了我们更熟悉的膨胀过程，从而形成了现在的宇宙。

自从30多年前首次提出暴胀的概念以来，人们就一直对它进行着激烈的争论。根据对远远超出我们可直接研究范围的高压强、高密度等条件下物理现象的不同假设，暴胀经历了许多变体。但是，除非出现更好的理论，否则这个理论的总体构想肯定会保持其吸引力。目前，暴胀理论提供了唯一可信的解释：解释了为什么宇宙如此之大，如此均匀；还解释了为什么宇宙会以如此快的速度膨胀，以至于膨胀到100亿光年的尺度。

我们能检验暴胀理论吗

如果起皱的表面以巨大的倍数拉伸，曲率则会减小，直到察觉不到平滑的任何偏离时为止。我们用“平滑”来类比宇宙中（负）引力能和（正）膨胀能之间的精确平衡，这是对暴胀宇宙的最可靠的一般性预测。这个预测究竟是对的吗？最简单的平滑宇宙是Ω的值恰好等于均衡值1。第5章中提出的证据表明，原子和暗物质仅占构成临界密度物质的30%，这看上去让人有些沮丧。因此，理论家便热切地抓住了膨胀正在加速的主张，因为这样一来，与数字λ相关的能量就必须被加进来。当前的宇宙似乎确实是“平滑的”，尽管我们当中更为谨慎的人可能会认为，最终结论尚未得出，几年后才能出现定论。构成临界密度的“混合”物质中有4%是原子，约25%是暗物质，其余是“真空”本身。

“平滑”的这种证据是比较令人鼓舞的，因为它至少激励我们去寻求进一步的验证，尤其是那些可能揭示暴胀过程中的细节的“征候”。大多数关于极早期宇宙的详细想法持续的时间都很短暂。对于宇宙最初10^{-35}秒内发生的情况，我们非常不确定，就像伽莫夫和其他先驱第一次探索宇宙元素的起源时，对“大爆炸”后1秒时的物理过程不确定一样。在一些重要方面，他们最初的想法是错误的，但在一二十年后得到了纠正，并奠定了坚实的基础。也许，我们可以寄希望于未来10年中超高能物理学与宇宙学的协同发展。

在氦元素最初形成的几分钟内，涉及了核聚变反应和原子碰撞，其过程可以通过实验重现。一方面，相比之下，在暴胀阶段，决定宇宙基本数字（如Q）的过程太过极端，无法在地球上模拟，甚至在加速器中也无法模拟，这使挑战变得更加严峻。另一方面，这一事实为研究极早期宇宙提供了额外的动力，也可能为新的“大统一理论”提供了最有力的检验，因为极早期宇宙是唯一一个能量足够高的地方，可以使这些理论的独特效应显现出来。当天文学家试图理解宇宙现象

时，他们通常会借助物理学家在实验室里获得的发现，而现在，他们可以通过发现一些新的物理过程来回报物理学家。事实上，这种例子已经出现，例如，中子星拓展了我们对高密度物质和强引力的认识。不过，最极端的现象是“大爆炸”本身。20世纪50年代，宇宙学还处于物理学的主流之外，只有像伽莫夫这样的“怪人”才会关注。而现在，宇宙学问题引起了许多主流理论物理学家的兴趣。这无疑给了我们乐观的理由。

当宇宙的尺寸小于一个高尔夫球时，就会产生微观的“振动”，从而使它们膨胀得如此之大，以至于在整个宇宙中伸展开来，形成涟漪，最终会演变成星系和星系团。理论物理学家仍然没有证明暴胀模型能否“自然地”解释Q等于10^{-5}的原因，这个数值描述了这些涟漪的幅度特征。这说明，暴胀模型能否解释Q的值，取决于一些仍处于“实战检测”阶段的物理过程。不过，我们可以从中了解到一些细节，并排除一些选项，因为不同类型的暴胀理论会作出不同的预测。利用微波各向异性探测器和普朗克探测器的测量，以及对星系聚集方式的探测，我们将会获得有关暴胀阶段的线索，并揭示有关大统一理论中的物理过程的一些知识，这些知识无法直接从“普通”能级的实验中推断得出。

依据最终发展为星系和星系团的波动，人们认为暴胀会产生“引力波”，即空间结构本身的振动，并以光速交错传播于宇宙中。这种波碰到的物体会受到引力的作用，首先将其拉向一个方向，然后又拉向另一个方向。因此，它们会发生轻微的“摆动”。这种效应微乎其微，为引力波的探测带来了巨大的技术挑战。欧洲航天局的LISA项目（Last Interferomenric Space Array，即激光干涉空间阵列）计划在太阳周围的轨道上部署一组彼此相隔数百万千米的飞行器，它们之间的距离将由激光束监控，精确度达到百万分之一米。

LISA的灵敏度可能也不足以察觉出这些原始时代的振动。不过，其他信号应该更容易被探测到，这对其设计者来说是一种安慰。例如，当两个黑洞相撞并合并时，就会产生强烈的引力波。我们希望此类事件不时发生。大多数星系的中心都有一个黑洞，其质量相当于数百万颗恒星的质量。经常有成对的星系发生碰撞和合并（我们看到许多这样的事件正在发生），每当此时，两个星系中心的黑洞就会一起螺旋上升并结合在一起。

因此，我们期望很快对暴胀时期进行经验性的探测。即使我们不知道适当的物理学，也可以计算出特定理论假设的定量结果（Q的值和引力波等），然后将这些结果与观测结果进行比较，这样至少可以缩小可能性的范围。

“大爆炸”的其他遗迹

宇宙极早期的任何“化石”都至关重要，因为它们是弥补宇宙和微观世界之间的纽带。部分理论物理学家提出了一种有趣的可能性，磁单极子可能是从早期宇宙中遗留下来的，古斯的理论明显地表达了这个观点。法拉第和麦克斯韦证明了电和磁之间的密切关系。但是，正如他们清楚地认识到的那样，这两种力之间有一个关键区别：正电荷和负电荷可以单独存在，但磁的“北极”和“南极”似乎是不可分开的。磁体是偶极子（有两个磁极），而不是单极子（只有一个磁极）。如果我们切开一个偶极子，就永远不会得到两个单极子，而只是更小的两个偶极子。尽管进行了许多巧妙的搜索，但从来没有人捕获到过磁单极子。

现代理论认为，磁单极子可能存在，但其质量可能非常大（比质子重1 000万亿倍）。由于它们拥有巨大的质量，就需要大量的能量来制造它们——这种能量在早期宇宙中普遍存在，但在之后就不存在了。在现在的宇宙中，磁单极子非常少，因为磁场遍布星际空间，如

果存在大量磁单极子，磁场就会“减少”。古斯对磁单极子的消失感到困惑，因为它们似乎不可避免地产生于宇宙早期。实际上，他的最佳猜测是，它们的总质量将比实际存在的暗物质的总质量大数百万倍。暴胀的一个重要结果（如果它发生在磁单极子形成之后）是，它将会稀释磁单极子，这便解释了它们当前缺失的原因。

磁单极子是空间中的一种“结”，用该领域的专业术语来说，它们是“拓扑缺陷”（topological defect）。实际上，更有趣的是线状缺陷，而非点状缺陷，也就是结成细管的空间区域，其厚度小于一个原子。它们要么像松紧带一样形成闭合的环，以接近光速的速度原地旋转，要么直接穿过宇宙。一些宇宙学家推测，这些空间上的缺陷可能是宇宙结构的种子，至少，它们促成了数字Q的产生。这一想法在20世纪90年代早期引起了人们的兴趣，但后来被证明与之后绘制出来的星系聚集的细节不相符。但这些环可能仍然存在，而且它们的性质非常特殊，比如，虽然它们比原子还小，但质量却比原子的大，1 000米长的质量相当于地球的质量。因此，天文学家应该尽一切努力发现它们。

微型黑洞是另一种源自“大爆炸”之后的可能遗留物。一个原子大小的黑洞的质量相当于一座山的质量。正如我们在第3章介绍的那样，这是数字N取较大值的一个直接结果：在原子尺度上，引力非常弱，无法战胜其他力，除非将N个原子的质量压缩到一个原子的体积中去。可以想象，极早期宇宙产生了促使它们出现的必要压力。尽管目前还没有什么办法产生这么大的内压力，但将来的某些高科技文明也许可以做到这一点。如果再结合下面这个推论，前景将特别迷人：一个黑洞内部可能会萌发出一个新的宇宙，然后暴胀成一个与我们的时空毫无关联的新时空（可能是无限的）。

宇宙是生于“无”吗

一个横跨100亿光年的宇宙（甚至可能比我们的视野还远）居然是从一个无限小的点中产生的，这似乎有违直觉。这一切之所以能够发生是因为，无论发生了多少次膨胀，宇宙的净能量始终为零。根据爱因斯坦著名的质能方程，一切物质都具有mc^2的能量。但由于引力，所有物质也都有负能量。我们需要能量来摆脱地球的引力——必须燃烧足够的火箭燃料，以达到11.2千米每秒的速度。因此，与太空中的宇航员相比，地球的人都存在能量不足的问题。然而，宇宙中所有物质加在一起所造成的能量“赤字”（专业名称为“引力势能”）在数值上可能等于负的mc^2。换句话说，宇宙本身就是一个“引力陷阱”，它是如此之深，以至于其中的所有物质都具有一个负的引力势能，正好抵消了它的静止质能。所以，宇宙暴胀的能量成本实际上为零。

宇宙学家有时声称，宇宙可以“生于无”。但他们应该注意自己的言辞，尤其是在同哲学家讲话时。自从爱因斯坦开始，我们已经认识到，即使空的空间也具有某种结构，可以被扭曲和变形，哪怕将空间缩小成一个“点”，它也蕴含着粒子和力，这仍然是一个比哲学家眼中的“无”丰富得多的结构。也许有一天，理论物理学家能够写出支配物理实体的基本方程。然而，物理学永远无法解释是什么“将火注入方程”，并在真实的宇宙中让它们变成实体。最根本的问题是：为什么存在有而非无呢？这仍然属于哲学家的思考范畴。即使是他们，也会像路德维希·维特根斯坦（Ludwig Wittgenstein）那样明智地回答：“对于不能说的，我们必须保持沉默。”

从视界之外到多元宇宙

第7章中所描绘的长期预测实际上是基于一个无法验证的假设，即我们视界之外的宇宙区域与我们所看到的区域是相似的。如果你身在海洋中心，就不能指望陆地正好处于自己的视界以内，但你知道海洋并非没有尽头，终会有一块大陆出现在其边界。同样，我们可能会错

误地认为，宇宙是无限地均匀延伸的，是无边无际的。实际上，我们可能生活在一个低密度的气泡中，它大到远远超出了我们的视野，但被一个更大的区域包围，不过该区域最终会在我们头顶上空坍缩。如果真是这样，当我们遥远的后代发现高密度物质出现在他们的视线中时，就会修正永久膨胀的“预测”。一方面，在刚刚超出我们视界的地方是不大可能发生剧烈变化的；另一方面，我们也没有外推到无穷远的可靠保证。

暴胀理论最重要的意义是，它极大地扩展了我们对宇宙的了解。若想解释我们所看到的宇宙，必须有足够的暴胀，才能解释清楚出现在望远镜观测范围内的10^{78}个原子。但这只是一个最小量。一旦暴胀开始，可能要花很长时间才能停止（理论物理学家将其称为暴胀的“优雅退出”问题）。事实上，暴胀理论的大多数版本都表明，“翻倍”的次数应该远远超过我们解释可见宇宙时所需的次数。在第1章，我们设想了一系列关于宇宙的景象，每一个景象的观测点都比前一个远10倍。从日常的人类尺度开始，第25个镜头将我们带到了当前视野的极限。从本质上来说，这个极限是由光在第一个星系形成后的约100亿年的时间里能够传播多远决定的。然而，暴胀理论者设想的宇宙要大得多，达到任何“边缘”都需要数百万个镜头，而且每次观测距离都要增加10倍。如此浩瀚的空间（至少对我来说）是我们无法把握的。相比于从视界到宇宙边界这种飞跃，从微观尺度向视界尺度的跳跃简直不值一提。虽然时空不是无限的，但它远远超出了我们的视界。光从“边缘”到达我们之前的时间就是以年为单位的数字，其之后有不少于100个零，甚至有数百万个零。

然而，这还不是全部。即使这个巨大的宇宙的范围需要一个百万级别的数字来表达，但它可能也不是宇宙的全部，而仅仅是一次暴胀的结果，或者只是一个暴胀插曲，但这个插曲（“大爆炸”中的一个插曲）本身可能只是无穷尽的“合奏曲”中的一个片段。事实上，这是“永恒暴胀”理论的自然结果，俄罗斯宇宙学家安德烈·林德尤其

支持该理论。根据这种情况，我们需要对极端密度下的物理过程作出特定的假设，即宇宙可能有一个无限的过去。那些暴胀永不结束的区域总是增大得更快，足以为其他“大爆炸”提供种子。这些推测还有不同的版本，比如，其中一段暴胀可能会在黑洞内被触发，创造出与我们的时空分离的新领域。

在此，请让我对“宇宙”一词作一个语义说明。“宇宙”的正确定义是“万物皆有”。我在本章论证的是，传统上被称为“宇宙”的实体，也就是天文学家所研究的东西，或者“大爆炸”的后果，可能只是整体中的一个部分，即整个合奏曲中的一个部分，每个部分都有可能源自各自的“大爆炸”。学究们可能更愿意将这个整体重新定义为“宇宙”，但我认为，保留“宇宙”的传统定义有助于减少混淆。因此，我们需要一个新词来代表整个“宇宙”，那就是“多元宇宙”。我将在第11章回到“多元宇宙”这个概念上来。

JUST
SIX
NUMBERS

10
数字 *D*：三维及更多维

地球轨道是衡量一切的尺度，而三维的空间和一维的时间是我们衡量地球世界的尺度。

地球轨道是衡量一切的尺度；与它外切的是一个十二面体，而与十二面体内接的圆周是火星轨道；与火星轨道外切的是一个四面体，而与这个四面体内接的圆周就是木星的轨道；与木星外切的是一个立方体，而与这个立方体内接的圆周是土星的轨道。与地球轨道内切的是一个二十面体，而与这个二十面体内接的圆周是金星的轨道；与金星轨道内切的是一个八面体，而与这个八面体内接的圆周是水星的轨道。这就是行星的数目为六[(23)]的原因。

——约翰尼斯·开普勒

为什么D=3是特殊的

我们的空间是三维的，其中有点（零维）、线（一维）、面（二维）和体（三维）。不过，就只有这么多维度了，即使我们可以从数学上想象出一个维度更多的空间。数字“3”有什么特别之处呢？从古典时期起，几何学家就注意到了不同维度的有趣特征。例如，在二维空间中，我们可以画一个等边数任意的正多边形（如等边三角形、正方形、正五边形、正六边形等），但在三维空间中，只有5种柏拉图式的“正多面体”，所有的边和角度都是相等的。四维空间中有6种这样的立体，而在更高的维度空间中则只有3种。

在三维世界中，诸如引力和电力等力皆遵循平方反比定律，即如果你走2倍远，来自物质或电荷产生的力就减弱至1/4。迈克尔·法拉第在其开创性的电学研究中，用一种图形化的方式解释了这一点。他设想“力线”产生自每个电荷或物质中，力的强度取决于这些线的集中程度。在距离r处，这些力线分布在一个与r^2成正比的面积上；在更大的距离上，力被稀释了，其强度与r^2成反比。然而，一个四维“球体”的面积将与r^3成正比，即如果r增加一倍，其面积将增加8倍，而不是4倍。如此，法拉第的论证得出的是一个立方反比定律。

正如牛顿认识到的那样，行星的轨迹是由引力效应和行星运动的离心效应之间的平衡控制的。太阳系的轨道是稳定的，从这个意义上来说，行星速度的微小变化只会略微扰动自身的轨道。但是，如果引力遵循的是立方反比定律而不是平方反比定律，那么这种稳定性就会丧失。如果行星的运行速度减慢，哪怕只是稍微减慢一点点儿，它就会以更快的速度坠入太阳，而不仅仅是进入一个稍微小一点儿的轨道上运行，因为立方反比的力在靠近太阳系中心的过程中会急剧增强；相反，如果行星轨道的运动稍微加速，它就会迅速地向太阳系外旋转而陷入黑暗。

18世纪的英国神学家威廉·佩利（William Paley）有一个著名的论点：宇宙的外观设计意味着存在一名设计师，正如手表意味着存在一名钟表匠。佩利在剑桥大学受过良好的数学训练，能够理解平方反比定律的这一神秘特性，并将其作为一个有力的论据纳入他为一位仁慈的创造者进行的辩论中。他的其他“设计者”的证据大多来自生物学领域，但在后达尔文时代，这些证据受到了质疑，甚至连神学家都不相信。因为，眼睛、手等人体器官令人印象深刻的适应性是自然选择的结果，是活器官与其环境共生的结果。现在看来，佩利关于平方反比定律的温和观点是他最有力的观点之一：自然界没有机会选择一条受人喜爱的力的定律，也没有任何东西可以反作用于宇宙，使它作出任何改变。20世纪初，人们认识到，原子是由带正电的原子核和核外轨道上运动的电子组成的。可惜佩利的文章写于此前的一个多世纪，否则，他本可以指出，出于类似的原因，原子不可能存在于受立方反比定律统治的宇宙中，因为那里没有稳定的电子轨道。

因此，空间维度超过三确实会产生一些问题。那么，我们能生活在一个少于三个维度的世界吗？最好的论证也非常简单：在“扁平地带”或者任何二维平面中，复杂结构都有其固有的局限性。一个复杂的网络不可能没有交叉的导线，也不可能没有任何一个体内有管道

（例如消化道）穿过而不被一分为二的物体。在一维的“线性区域”中，范围更为狭窄。

当我们发现自己生活在三维空间中时，之所以不应该感到惊讶，这些仅仅是最显而易见的原因，数学家还发现了其他原因。

时间与时间箭头

时间是我们所感受到的第四个维度。当我们确定一个事件时，需要四个数字：三个空间坐标来描述事件发生的地点，第四个坐标说明事件发生的时间。正如一位荒诞派的作家所言：“时间是自然界阻止事件同时发生的方式。”换句话说，事件是沿着以时钟的滴答声为里程碑的路线展开的。时间与其他三个维度是不同的，因为我们似乎只被拖着往一个方向移动或前进，而在其他三个维度中，我们可以朝任何一个方向移动（东或西、北或南、上或下）。因此，我们最好称宇宙为“3+1”维的空间。爱因斯坦告诉我们，空间和时间之间存在联系，时间流逝的速度是有“弹性的”，它取决于时钟是如何移动的，以及时钟是否在一个大质量物体附近。不过，爱因斯坦的思想保留了时间和空间之间的区别，也就是对空间中的东西与处于过去和未来的东西进行了区分。

“时间的箭头”从过去一直指向未来。如果将一部记录日常事件的电影倒转过来看，就会显得荒诞和异常：因果颠倒，这就好比破碎的玻璃碎片和一滴滴的液体会自动聚合在一起组成一杯酒；或者，汇集在水壶上的蒸汽会凝结成水。在马丁·阿米斯（Martin Amis）颇具讽刺意味的关于倒转时间的小说《时间之箭》（*Time's Arrow*）中，有过这么一个场景：纽约的出租车“先付给你足够的车费，什么也不问……也不说明我们为什么站在那里，在几个小时之后，最终挥手告别，或者致敬如此好的服务”。

过去和未来的不对称性在我们的经验中是如此根深蒂固，以至于除了一些关心哲学的物理学家外，很少有人会思考它带来的难题。令人困惑的是，微观世界的基本规律中并没有这种不对称性。尽管基本规律在过去和未来并没有不同，但世界的变化是不可逆转的。无论正放还是倒放，一段反映两个彩色球之间的一次碰撞的影片看起来或多或少都是一样的。不过，当放映开始之后，碰撞的整个形式会清楚地显示出时间的箭头。同样，我们的世界似乎也是按照一种特殊的方式建立起来的。

我们虽然被困在时间之中，但可以从“时间之外”的想象视角来获得更清晰的洞察力，就像库尔特·冯内古特（Kurt Vonnegut）所著的《太阳神的海妖们》（*Sirens of Titan*）中的生物，它们将人类视为“巨大的千足虫，一端长满婴儿的腿，另一端长满老人的腿”。按照这样的想象，宇宙将是一个静态的四维实体（块状宇宙），日常物体的“世界线”在一端（我们称之为未来）将会比在另一端（我们称之为过去）更加混乱。不过，更难以解释的是为何会出现“有序”的状态。如果一条长弦的一端被编织成一个不同寻常的图案，无论是在左边还是在右边，我们都会同样感到吃惊。同样，在一个“块状宇宙”中，未来似乎与过去存在于同样的基础之上，无论是在开端还是在终端找到秩序，都一样令人困惑。

当我们说宇宙正在膨胀时，实际上就是给时间预设了一个箭头，就是假定可以对一部电影的画面或者“块状宇宙”中的三维切片进行排序，使宇宙在被我们设定为“未来”的时间里更加分散。

时间的不对称性可能与宇宙的膨胀有关。事实上，我已经在第8章阐述过，在宇宙的膨胀过程中，引力是如何增强任何初始密度的反差，使结构从一个几乎毫无特征的火球中浮现出来。在宇宙的早期阶段，这种不对称性不会出现在任何局部测量中，因为那时密度非常高，以至于微观过程，也就是粒子之间的碰撞、光子的发射和吸收

等，会比膨胀速度发生得更快。每时每刻，一切都处于平衡状态。物质不会保留任何“记忆”，无论它以前是更密集还是更稀疏，也不会带有时间方向的印记。然而，当宇宙被稀释得更稀疏时，这些微观过程就会变慢，而膨胀就会产生至关重要的影响。

如果宇宙长期保持在10亿摄氏度的温度，或者核聚变反应发生得越来越快，那么所有的原子可能都会被加工成铁。幸运的是，膨胀的速度足够快，核聚变反应在将23%的氢转化为氦之前，就停了下来。这个例子恰恰说明，宇宙膨胀是如何导致了平衡的偏离，因此膨胀的宇宙中所发生的事情与坍缩的宇宙中所发生的事情是不同的。

正如安德烈·萨哈罗夫首先指出的那样，我们的存在依赖于一种不可逆的效应，这种效应在宇宙更早的阶段使物质多于反物质。如果不是这样，所有的物质都已被等量的反物质湮灭，宇宙中将不会有一个原子，这样就不会有恒星形成，更不会有化学过程来产生复杂的结构。

关于时间，仍然存在很多谜团，人们对此完全没有达成共识。物理学家朱利安·巴伯曾对专家进行了一项非正式的调查，调查的问题是：“你认为时间真的是一个基本概念吗？或者它能否从更基本的概念中推导出来（这与从一个物体组成原子的运动中推导出温度的高低非常相似）？”对此，各方的反应比例相当接近。对于时间最终会被更深层次的东西解释这一观点，持赞成态度的人略多于持反对态度的人。

大尺度上存在卷起的维度吗

空间和时间一定具有某种复杂的结构。我们知道，空间被黑洞刺穿（银河系中有数百万个黑洞，其他星系的中心甚至有更大的黑洞），而在黑洞中，时间和空间交织在一起。不过，这些复杂性仅限

于宇宙学视角下的“局部”区域。在比超星系团更大的尺度上，宇宙是近乎均匀的。这表明，在我们目前的视界尺度上，空间的几何结构是平滑而简单的。宇宙微波背景辐射在整个太空中几乎具有相同的温度，这一事实也显示了宇宙的平滑特性。

有数学倾向的宇宙学家想要知道这种简单性是不是一种错觉。他们认为，也许我们一次又一次地看到的空间景象可能是同一个区域的重复，就像在布满镜子的大厅或万花筒里看到的景象一样，空间也许是被“卷起”的或具有某种细胞结构。如果我们确实存在于这种奇怪的宇宙中，那么那些细胞结构至少必须是我们视界距离的百分之几，换句话说，细胞结构的大小超过几亿光年。我们之所以知道这一点，是因为如果这些细胞结构更小，那么像处女星系团那样独特的结构就会被重复地看到。此外，通过测量天空中宇宙微波背景辐射温度的微小不均匀性，我们得到了一个更有力的证据，因为这种不均匀性并不存在重复的特征。因此，我们现在可以排除任何比我们的视界小得多的细胞结构。

在有限的光速所形成的视界之外，我们很少获得观测结果。在远远超过100亿光年的尺度上，空间可能是以一种复杂的方式卷起来的，甚至维度数也发生了改变。然而，对于任何望远镜所能观测到的范围以外的情况，我们只能得到间接的暗示。

那么，超小尺度上的情况又当如何呢？在这种情况下，我们的简单理论肯定会崩溃。实际上，我们可能需要抱定一些非常复杂的观点，包括额外的维度，以便正确地理解粒子、力和宇宙常数。

时间和空间的微观结构：量子引力

我们已经花了一个世纪的时间来习惯：普通物质，即固体、液体和气体，具有离散的原子或分子结构。时间和空间本身会有粒子性

吗？空间似乎是一个平滑的连续体，但这只是因为我们的经验都太“粗糙”，即便最复杂的实验也无法探测到这种结构所具有的非常精细的尺度。

虽然我们不知道空间和时间的微观结构的具体细节，但常识告诉我们，它们不能被切割成任意小的碎片。精细尺度上的细节只能通过波长更小的辐射来探测。例如，建筑物不会挡住波长为几米的无线电波，但会在阳光中投射出清晰的影子。光由百万分之一米长的光波组成，比这更小的光波无法用普通光学显微镜观测到。若想探测更清晰的细节，我们需要更短的波长或者借助其他一些技术，比如电子显微镜等。然而，根据量子理论，越短的波长来自能量更高的量子或“能量包”。

能量的基本量子用普朗克常数来描述，普朗克常数是以伟大的物理学家马克斯·普朗克（Max Planck）的名字命名的，他在一个世纪前率先提出了“量子化”的概念。在一定程度上，我们可以通过使用能量越来越高的量子来探测更精细的结构，对应的波长也越来越短。不过，这里存在一个限度。因为当所需量子的能量达到一个极端时，它们就会坍缩成黑洞。在大小约为质子的$1/10^{19}$的“普朗克长度”上，就会出现这种情况；具有这种微小波长的量子所携带的能量相当于10^{19}个质子的静止质能。光通过这个距离大约需要10^{-43}秒，而这个“普朗克时间”是迄今为止可以测量到的最短的时间间隔。因此，即使是空间和时间也会受到量子效应的影响。然而，与电力起控制作用的普通原子的情形相比，由于引力非常弱，时间和空间里出现量子效应的尺度将小得多，这是宇宙常数Λ取巨大值的结果。

有些理论家比另一些更偏爱推测。不过，即使最大胆的物理学家也承认“普朗克尺度”是一个极限。我们无法测量小于普朗克长度的距离；当两个事件之间的时间间隔小于普朗克时间时，我们就无法区分这两个事件，或者判断出哪个先发生。这些尺度小于原子的程度就

像原子小于恒星的尺度。在这一领域，不能指望进行任何直接的测量：它需要的粒子能量比实验室中所能达到的能量要高出1000万亿倍。

20世纪，科学的两大支柱是：在微观世界起重要作用的量子力学和爱因斯坦的引力理论，后者不包含量子概念。目前为止，我们没有一个统一的框架来协调和统一它们。不过，这种缺失并不妨碍地球科学的进步，也不妨碍天文学的进展，因为大多数现象要么涉及量子效应，要么涉及引力，但不是两者都涉及。由于数字N的巨大取值，在原子或分子的微观世界里，引力是可以忽略不计的，而量子效应起着关键的作用；相反，在由行星、恒星和星系等天体领域中，引力起支配作用，量子的不确定性则可以忽略不计。然而，在宇宙的起始阶段，量子振动可以撼动整个宇宙；相反，引力只在单个量子尺度上显得重要，这些发生在10^{-43}秒内，也就是普朗克时间以内。若想理解“大爆炸”后的最早瞬间，或者了解黑洞内“奇点”附近的空间和时间，我们需要量子理论和引力的统一。

在黑洞附近，当速度接近光速时，我们的普通常识毫无用处。在宇宙早期的极端条件下，以及接近普朗克长度的微观尺度上，情况也是如此。因此，我们必须抛弃对空间和时间的常识性观念。在如此微小的尺度上，黑洞可能会出现也可能会消失；时空可能是一种混沌的泡沫状结构，没有明确的时间箭头；波动可能产生新的领域，最终演变成独立的宇宙；空间也可能具有一种晶格结构，或者像链条一样贯穿起来；时间可能会变得像空间一样，以至于在某种意义上来说也没有开端。

量子引力仅有的另一个舞台是黑洞内部中心的奇点，它隐蔽在视界以内。如果一种理论只能在如此奇异和难以接近的领域才能显示出其结果，那我们就很难检验它。若想这种理论被认真对待，要么严格

地将它纳入某种可以用许多其他方式加以检验的包罗万象的理论中，要么它必须具有独特的必然性。

目前科学家正在采取几种不同的方法进行探索，但对于哪种方法是正确的，他们还没有达成共识。史蒂芬·霍金曾“打赌”，一个统一的理论将在20年内出现，尽管他承认，他已经输掉了20年前所打的一个类似的赌，并还清了赌账！最雄心勃勃和鼓舞人心的方法似乎是超弦理论，它直接跳到了所有力的统一理论，而量子引力理论只是它的一个副产品。

超弦理论

超弦理论的支持者声称，该理论可以将支配微观世界的这三种力结合在一起，它们分别是电磁力、强相互作用力和弱相互作用力，同时还可以解释基本粒子，比如夸克、胶子等。引力实际上是这一理论的一个重要组成部分，而不仅是一个额外的复杂因素。超弦理论的关键思想是，宇宙中的基本实体不是点，而是一些非常微小的弦环，不同的亚核粒子是这些弦的不同振动状态，也就是不同的谐波（和弦）。这些弦的尺度为普朗克长度，换句话说，它们比我们实际能探测到的尺度小很多。此外，这些弦不是在我们通常的“3+1”维空间中振动，而是在十维空间中振动。

额外维度的观点并不新鲜。20世纪20年代，西奥多·卡鲁扎（Theodor Kaluza）和奥斯卡·克莱因（Oskar Klein）试图扩展爱因斯坦的时空理论，以便将电力包括在内。通过在普通空间的每个点上都加上额外的结构，他们试图想象电场和带电粒子的运动。这个额外的维度是在一个微小的尺度上“卷缩”起来的，它并没有向我们展示自己，而是像一张纸一样紧紧地卷成一条，看起来就像一条一维的线，即使它实际上是一个二维曲面。卡鲁扎-克莱因理论后来出现了种种问题，但额外维度的概念最近获得了戏剧性的复兴。在超弦理论

中，普通空间中的每一个“点”都是一个复杂的六维几何结构，但以普朗克长度的尺度卷缩在一起。

所有的物理理论都包含方程式和公式，非专业人士难以理解其中的技术细节，但幸运的是，其关键思想不会因此变得难以理解。不过，一般来说，数学类的问题总是率先得到解决，物理学家可以“从书架上”得到这些数学规律并加以应用。例如，爱因斯坦在其“弯曲的时空”理论中使用的几何概念都是在19世纪发展起来的，用来描述量子世界的数学语言也是如此。不过，超弦理论提出的问题仍然困扰着数学家。例如，为什么一个宇宙最终会有四个“膨胀”的维度（时间，加上三个空间维度），而不是某个不同数目的维度呢？宇宙的本质以及支配它的力量，将取决于额外维度卷缩起来的方式。这是如何发生的，是否存在许多不同的途径呢？

20世纪80年代，超弦理论第一次激发了人们的热情，尽管这些想法可以追溯到更早的几十年前。从那以后，这种理论耗费了大批杰出数学物理学家的努力。最初的过度盛行之后是一段令人沮丧的时期，因为该理论的复杂性令人困惑。不过，自1995年以来，超弦理论有了“第二春”。现在人们已经认识到，额外维度可以卷缩成5种不同的六维空间。在更深的数学层面上，这些维度空间可能是独立的，但其相关的结构可以被嵌入十一维空间。此外，弦（一维实体）的概念可以扩展应用到二维表面（薄膜）上。事实上，十维空间中可以存在更高维度的表面，换句话说，如果一个二维表面被称为二维膜，那么也可以有三维膜，等等。然而，十维弦理论错综复杂的性质和我们所能观察到或测量到的任何现象之间仍然存在着一条不可逾越的鸿沟。

曾经有先例表明，即使没有直接的经验支持，有些理论也会得到认真对待，尤其在那些理论表现出独特的“优雅性”或“正确性”的情况下，这种响亮的真理之声，迫使人信服。例如，20世纪20年代的许多物理学家都接受爱因斯坦的广义相对论，因为它在概念上极具吸

引力。这一理论已经通过精确的观测被证实了，但在早期，证据很少。爱因斯坦本人对自己理论的优雅印象比任何实验都要深刻。同样，在当今时代，公认的数学物理学知识领袖爱德华·威滕（Edward Witten）曾说过：“错误的好理论极其罕见，而能够与弦理论的庄严威仪相媲美的错误的好理论至今尚未出现。”

尽管如此，我们之所以对超弦理论持乐观态度，还存在非美学方面的特殊原因。首先，爱因斯坦的广义相对论将引力解释为四维时空中的曲率，这一理论不可避免地被纳入超弦理论中。因此，我们长期寻求的引力和量子原理之间的统一应该会自然而然地出现。

这个理论加深了我们对黑洞的理解。这里的故事可以追溯到20世纪70年代初，当时在普林斯顿大学工作的以色列物理学家雅各布·贝肯斯坦正在思考这样的问题：人们最近发现，黑洞是规范化的天体（如第3章所述），这一事实会产生什么后果。这意味着他们完全忘记了黑洞是如何形成的。致使黑洞形成的方式似乎有无数种。从理论上来说，岩石、行星、气体，甚至宇宙飞船都有可能落入黑洞，但这段历史的所有痕迹都已被抹平。贝肯斯坦指出，这就像两种气体混合时出现的“熵增”现象：许多不同的初始状态会导致完全相同的最终结果，难以区分。信息的丢失对应熵的增加，因此贝肯斯坦推测，黑洞可能具有一个熵，用它可以计算出黑洞形成方式的数目。如果贝肯斯坦是对的，那么黑洞也会有温度，当霍金计算出黑洞并非完全是黑暗的，而是会发出辐射时，他的想法就有了更坚实的基础。在天文学家发现的黑洞中，这种辐射太过微弱，无法被测量到，但如果原子大小的“微型黑洞”确实存在，这种辐射可能会很重要。

超弦理论，这种在普朗克尺度上描述空间结构的理论引出了一个新的观点。1996年，美国理论物理学家安德鲁·斯托明格（Andrew Strominger）展示了如何将黑洞（尽管是一种特殊类型的黑洞）想象成由弦尺度元素“构建”起来的天体。他认为，这些微小的“砖块”

可以用不同的“排列”方式构成同一个黑洞，并指出了计算这些“排列”方式的数目的方法，以构成相同的黑洞。他与贝肯斯坦和霍金计算出的熵值完全吻合。虽然这不是一个经验性的论据，但它增强了我们对该理论的信心，因为它证实了一个基于更传统物理学的计算，并加深了我们对黑洞神秘特征的了解。

另一种希望是，超弦理论可以为我们理解量子概念提供新的视角，尽管目前这一观点争议较大，基础也不太牢固。理查德·费曼说过：“没有人真正懂得量子力学。”它的有效性令人惊异，大多数科学家几乎都在不假思索地应用它。不过，它也有“怪异”的一面，从爱因斯坦开始的许多思想家都难以接受，直到现在，我们还不敢说对该理论有了透彻的理解。

我们虽然不能直接探测普朗克尺度，但确实观察到了物理世界的某些特征，例如，微观世界中存在三种基本力，并了解了粒子的特定类型等，这些特征可能会使超弦理论“突然获胜”，正如当初爱因斯坦的引力理论。如果真是这样，我们肯定会对该理论的整个数学结构更有信心。正如下一章我们将讨论的，超弦理论可能会提供一个关于多元宇宙的包罗万象的理论。

JUST
SIX
NUMBERS

11
巧合、天意，还是多元宇宙

在宇宙中，错综复杂的性质是由简单的定律发展而来的，但我们不能保证简单的定律就能产生复杂的结果。而当前的宇宙是六个数精密调谐呈现的结果。

在宗教上，我倾向于自然神论，但认为其证明主要是一个天体物理学问题。创造宇宙的宇宙之神的存在（正如自然神论所设想的那样）是可能的，并最终会被证明其存在，也许是通过现在尚未想到的某些形式的物质证据。

——爱德华·威尔逊（E. O. Wilson）

精密调谐意味着什么

在宇宙中，错综复杂的性质是由简单的定律发展而来的，但我们不能保证简单的定律就能产生复杂的结果。事实上，我们已经看到，对宇宙中六个数的不同选择将可能导致一个乏味或贫瘠的宇宙。类似地，数学公式本可以蕴涵非常丰富的含义，但通常它们没有。例如，曼德布罗特（Mandelbrot）阵的复杂结构虽然层出不穷，却可以用一个简短的算式概括（图11-1）。然而，其他表面上看起来相似的算式却会产生非常单调的图形。

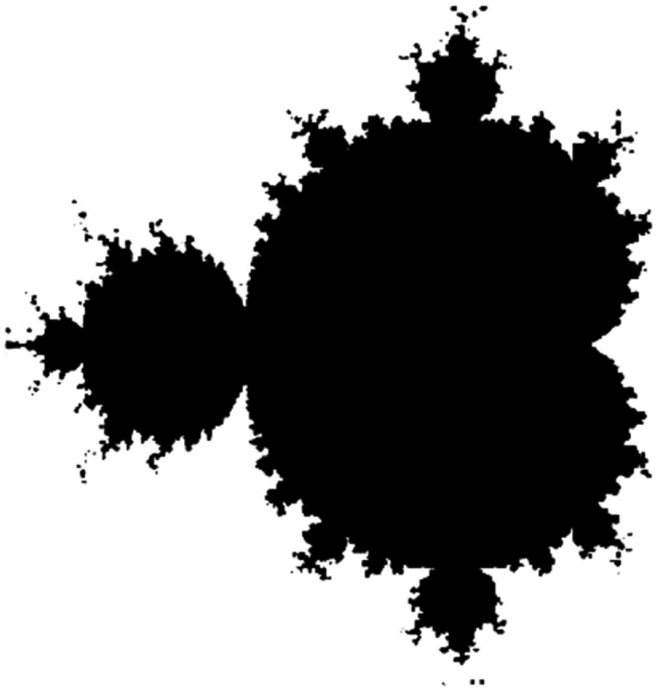


图11-1　曼德布罗特阵的复杂结构

这个无限复杂的图案虽然包含了一层又一层错综复杂的结构，但可以用一种简短的算式进行解释。许多其他看上去类似的算式只能描画出单调乏味和毫无特色的图形。宇宙受各种各样的定律支配，这些定律会产生各种各样的结果

对于六个数所显示出的精密调谐，科学界持多种不同的观点。一种冷静的观点是，如果这些数字没有以适当的“特殊”方式进行调谐，我们就不可能存在，但显然，我们就在这里，因此没有什么可惊讶的。许多科学家都持这种观点，但这不能让我满意。加拿大哲学家约翰·莱斯利（John Leslie）的一个比喻给我留下了深刻的印象。假设你面对的是一个行刑队，其中50名神枪手都瞄准了你，但都没有射中。如果不是他们都没有射中，你就不会幸存下来并思考发生的问题了。然而，你也不会就此罢休，你仍然会对此困惑不已，然后会进一步为自己的好运寻找更多的理由。

另一些人将这六个数的调谐作为仁慈的造物主存在的证据。造物主特意创造了一个宇宙，以创造人类，或者从不那么以人为中心的角度来说，允许错综的复杂性展开。这是威廉·佩利这一类人的传统观点，他们通过所谓“来自设计的论证”来宣扬上帝的存在。这种观点的变体现在正受到诸如约翰·珀金霍恩（John Polkinghorne）等著名科学家和神学家的拥护。珀金霍恩写道：“宇宙不仅仅是‘任意一个古老的世界’，而是为了生命的存在而精细调谐的结果，宇宙是造物主的创造，造物主希望它是这样的。”

如果你不接受“天意”这一论点，那么还有另一种观点，尽管仍是猜测性的，但我认为它极具吸引力。这种观点便是，宇宙“大爆炸”发生了可能不止一次。不同的宇宙可能以不同的方式冷却下来，最终由不同的定律支配，由不同的数字定义。这可能看起来不是一个“经济的”假说。实际上，没有什么比调谐多个宇宙更奢侈的了，但这却是一些理论的自然推论（尽管是推测性的），它为我们打开了一个新的视野，即宇宙只是一个从无限多的宇宙中挑选出来的“原子”。

多元宇宙

有些人可能倾向于将多元宇宙假说斥之为“形而上学”。从物理学家的观点来看，这完全是一种贬斥。我认为，多元宇宙确实属于科学的范畴，尽管它只是一个暂时的假说。这是因为，我们已经能够规划出必须解决哪些问题，以便使它具有更可靠的基础。更重要的是，因为任何好的科学理论都很容易遭到驳斥，我们可以提前设想出一些可能会排斥这个假说的趋势。

当然，最主要的障碍是，我们对“大爆炸”后最初时刻的极端物理过程仍然不甚了解。我们有充分的理由将暴胀当作膨胀宇宙的一种可信解释。这个理论最确定和最普遍的一个预测是，宇宙应该是“扁平的”。这一预测似乎已经得到了最新数据的证明，尽管这些数据的形式不是最简单的。决定“扁平性”的因素有三个——原子、暗物质和真空能量 λ。宇宙膨胀的实际细节取决于最初10^{-35}秒时起主导作用的物理定律，此时的条件非常极端，远远超出了我们可以直接测量的范围。不过，有两种方法可以确定这些极端条件究竟如何。首先，极早期宇宙可能在当前的宇宙中留下了明显的“化石”。例如，暴胀过程中出现的微观尺度上的波动为星系团和超星系团的形成播下了“种子”，天文学家现在就可以对它们的具体性质展开研究，掌握有关线索，以探索“播下”这些种子时起主导作用的奇异的物理过程。其次，一个统一的理论或许可以为我们理解微观世界那些还不确定的神秘之处提供新视角，例如，各种类型的亚原子粒子（夸克、胶子等）及其行为方式等，以赢得信赖。这样，我们就有信心将这一理论应用于暴胀时期。

上述两个方向的进展可能会带来一种对极早期宇宙物理学现象的可靠描述。这样，计算机就可以模拟宇宙是如何从微观尺度中形成的。我们在前文已经计算过，在膨胀开始后的最初几分钟，氦和氘是如何形成的（第5章），还计算过星系和星系团是如何从微小的波动中

产生的（第8章）。有了上述的进步之后，我们对宇宙形成方式的模拟将会变得同样可信。

安德烈·林德和其他一些研究者已经模拟了一些“多元宇宙”，但在写这本书的时候，他们输入的理论非常随意，许多推测性的选项似乎是开放性的，我们没有办法判别和做出选择。关于“永恒膨胀”的研究（第9章）引出了一系列假说，与我们所知道的其他一切相一致；同时，还引出了多元宇宙假说，这些宇宙各自从单独的“大爆炸”中诞生，并最终演变成彼此分离的时空区域。这些宇宙永远不会被直接观测到，即使从原则上来讲也是如此，我们甚至无法确定，它们究竟存在于宇宙之前、之后，还是同时。然而，如果输入的理论能够预测出多元宇宙，并能为我们观测到的现象提供令人信服的解释，并得到“实战检验”，那么我们就应该相信其他（不可观测的）宇宙的存在，就如同相信目前的理论所预测的：原子内部的夸克或黑洞内部存在卷缩区域。

如果确实存在多元宇宙，那么接下来的问题便是：它们究竟有多少种不同的类型？这个答案依然取决于比我们目前所了解的更深、更统一的物理定律的特性。也许某种“最终理论”会为宇宙的六个数提供独特的表达公式。如果是这样，即使存在许多宇宙，它们本质上只是当前宇宙的复制品，与单一宇宙作为全部现实世界的情况没有什么区别，而那种明显的调谐将仍然是一个谜。我们仍然感到困惑的是，为什么在“大爆炸”的极端条件下会确定这样一组数字，其取值恰好位于这样一个狭窄的范围内，为100亿年后的宇宙带来如此有趣的结果。

不过，还有另外一种可能性。适用于整个多元宇宙的基本定律可能很宽松。每个宇宙都可能以各自独特的方式演化，决定其特征的是一组不同于塑造当前宇宙的关键数字。我们习惯于将地球上的偶然事件都解释为“历史的偶然”，比如，为什么会有一座特定的山，甚至

对太空中的一些特征也作如是观，比如星云和星系的形状。尽管我们不怀疑它们是某些基本规律的结果，但无法更深入地解释这些事件。在很大程度上，力的强度和基本粒子的质量（包括 Ω、Q和 λ）可以成为支配整个多元宇宙的最终理论（可能是超弦理论的一个版本）的次要结果。

我们可以用“相变”做一个类比，诸如我们熟悉的水变成冰的现象等。当某一特定宇宙的暴胀阶段结束时，空间本身（真空）经历了剧烈的变化。随着温度的下降，基本力（引力、核力和电磁力）都“冻结成型”，并以一种可以被认为“偶然”的方式决定了数字N和 ε 的值，就像水结成冰时出现的结晶形状一样。当宇宙处于微观尺度时，由量子涨落决定的数字Q的取值也可能取决于这些相变是如何发生的。

有些宇宙可能表现出不同的维度，这取决于最初的九维空间收缩或者延展了多少。即使在三维空间中，也可能存在不同的微观物理现象，可能存在不同的 λ 值，这取决于六维空间的类型，而其他维度都蜷缩其中。有些宇宙可能有不同的 Ω 值（ Ω 决定了这些宇宙的密度，以及它们的“周期”会持续多久，如果它们重新崩溃的话）和Q值（它决定了宇宙的平滑程度，因此决定了宇宙中会出现什么样的结构）。在某些宇宙中，引力也许完全被“真空能量”（ λ ）的斥力压倒，以至于无法形成星系或恒星。或者核力可能会超出 ε 接近0.007[(24)]的范围，最终碳和氧无法在恒星中合成并保持稳定，这样就没有元素周期表中的元素，也没有化学物质。有些宇宙的寿命可能非常短暂，在它们的整个生命中，其密度非常大，以至于各处温度都相同的情况下，所有的一切都处于接近平衡的状态。

还有一些宇宙可能太小、太简单，根本容不下任何复杂的结构。宇宙中的巨大数字N后面有36个零，其大小反映了引力的强弱程度：在引力作用变得重要之前，大量的粒子必须聚集在一起，例如，在恒星

中就是如此（恒星可以被看成是受引力束缚的聚变反应堆）。数字N取超大值的一个直接结果是：恒星的寿命变得非常长，这使光合作用和演化过程有足够的时间在某颗合适的行星上展开。在第3章，我们设想了一种宇宙，其中N的取值没有10^{36}那么大，其他一切（包括其他5个数）都保持不变。恒星和行星仍然可以存在，但它们会变得更小，演化得更快。它们没有足够的演化时间，引力会粉碎任何大到足以进化成复杂有机体的物体。

任何“有趣”的宇宙都必须包含至少一个非常大的数字，因为在一个被压缩到几乎不包含粒子的宇宙中，不可能出现太多事物。每一个复杂的物体都必须包含大量的原子。若想以精细的方式进化，它还必须持续很长一段时间，这个时间要比单个原子事件所要的时间长很多倍。

不过，大量的粒子和较长的时间本身还不够。即使在一个大、长寿且稳定的宇宙中，我们可以控制的只是暗物质那样的惰性粒子，这要么是因为物理过程预先排除了普通原子的存在，要么是因为普通原子全部被数量刚好相同的反原子湮灭了。

λ之谜

这些推测性的想法提供了关于λ的一种新观点，这个关键数字描述了空的空间所包含的能量。据推测，推动膨胀的能量一直潜伏在真空中，这意味着λ在遥远的过去比今天可能大10^{120}倍。按照这个观点来看，λ几乎接近于零的状态令人吃惊。这个谜题有三种截然不同的解释。

一种观点认为，空间的微观结构（可能包括一个类似气泡状的相互连接的微小黑洞的集合）可以通过某种方式自我调整，使之达成这个结果。第二种观点认为，衰变是渐进的，并且以某种方式“跟踪”

了普通物质密度的变化。由此还可以得出一个并非巧合的推论，即在当前的宇宙中，真空的作用应该与普通物质同样重要。所以，虽然 Ω 大约只有0.3，但真空仍然储存有足够多的能量，可以将所需的0.7补上，使整体密度达到所需的临界值，以保证宇宙是扁平的。

第三种观点认为，当前宇宙中的 λ 值之所以如此微小，也许并不存在基本的解释。不过，它的调谐（就像其他几个数字那样）是我们存在的先决条件。我们可以将 λ 当作在一个特定的密度上对引力的中和，这就是爱因斯坦在提出这个概念时，认为在静态宇宙中应该发生的事情。因此，随着宇宙的膨胀，普通物质会变得更加分散，密度在某个阶段会下降到阈值以下，斥力开始“战胜”引力。当前的宇宙可能已经越过了这个极限阈值，所以星系在加速远离我们。我们可以设想这样一个宇宙，除了 λ 值大得多以外，其他的一切与当前的宇宙一模一样。那么，在这样一个宇宙中，斥力将更早地占据上风。如果这种转变发生在星系形成之前，那么星系将永远不会形成——这样的宇宙将是贫瘠的。

在多元宇宙中，λ 可能的取值范围很广。它们可能是一组离散的数字（由额外维度蜷起的方式决定），也可能是可能值的一个连续序列。在大多数宇宙中，λ 的值都将远远高于当前宇宙的取值。不过，当前的宇宙可能是某个宇宙子集中的典型，该子集中的宇宙都可以形成星系。

开普勒式的争论

即使以宇宙学的标准来看，关于多元宇宙的问题依然看起来晦涩难懂。对于当前有关 Ω 和 λ 的争论来说，这个问题会影响我们对那些观测证据的权衡。一些理论物理学家非常偏爱最简单的宇宙，因为星际空间中有足够的暗物质（与目前最好的证据相反）使 Ω 完全等于均衡值1，这就意味着，早期宇宙的某种程度的调谐不仅是显著的，而且

是绝对完美的。这些理论物理学家对 Ω取值为0.3感到不安，对 λ值非零这样额外的复杂性更加不满。正如我们所看到的，现在看来，对这种简单性的渴望似乎要落空了。

我们可以将这场争论与400年前的一场争论相提并论。开普勒发现，行星的运行轨道是椭圆形的，而非圆形。伽利略对此感到不安，他写道：“为了维持宇宙各部分之间的完美秩序，有必要指出，可运动的物体只能沿圆周运动。”

对伽利略来说，圆似乎更优美、更简单，它们仅凭一个数字（即半径）就可以确定，而椭圆需要一个额外的数字（即“离心率”）来定义其形状。然而，牛顿后来证明，所有的椭圆轨道都可以用一个统一的引力理论来解释。如果《自然哲学的数学原理》一书出版时伽利略还活着，牛顿的洞察力肯定会使他愉快地接受椭圆假说。

我们现在面临的情况明显如此。一个具有低 Ω值和非零 λ等特征的宇宙可能看起来不规则且复杂，但这也许只是因为我们受视界所限。地球在无穷无尽的可能性中描绘出了一个椭圆，它的轨道只受到一个条件的限制，即它要保持一个有利于进化发生的环境（离太阳不能太近，也不能太远）。同样，当前宇宙可能只是所有可能的宇宙大家庭中的一员，其约束条件也只有一个，即允许我们的出现。因此，我倾向于对奥康的剃刀持宽容态度：对“简单”宇宙学的偏爱也许像伽利略偏爱圆周一样短视。

如果真的存在一个由不同的“宇宙数字”决定的宇宙群体，那么我们就会发现自己处在一个小而非典型的子集里，其中六个数允许复杂进化的发生。当前宇宙似乎存在“预设好的”特征，这种特征不应该令我们感到惊讶，就像我们不应该对自己在当前宇宙中所处的特定位置感到惊讶一样。我们生活在一颗有大气层的行星上，该行星在一个特定的距离上围绕其母星运行，这确实是一个非常特殊和非典型的

地方。在太空中随机选择的位置往往会远离任何恒星，实际上，它很可能位于离最近的星系数百万光年的星际空间里。

在我写这本书的时候，已经出现了这样一种论调，即认为宇宙的六个数是宇宙历史的偶然结果。当时，这种观点只不过是一种“预感”。不过，随着我们对该论点的物理学基础的深入理解，这种观点也逐步会得到证实。更重要的是，作为一种真正的科学假设，它很容易遭到反驳：如果六个数比我们的存在所需要的更特殊，我们将需要为它们寻求一种不同的解释。例如，假设 λ 的值小于临界密度0.001，是保证宇宙膨胀不抑制星系形成所需的基本值的数千分之一，那我们就应该怀疑：出于某些根本原因，该值是否的确为零。同样，如果地球的轨道是一个精确的圆（即使我们可以同样舒适地生活在一个适度偏心的轨道上），那将有利于开普勒和伽利略更赞同的那种解释，即行星的轨道是严格按照精确的数学比例确定的。

一方面，如果那些基本定律决定了所有的关键数字是唯一的，以至于没有其他宇宙与这些定律相符，那么我们将不得不接受，调谐是一个残酷的事实，或者是天意。另一方面，终极理论可能允许出现多元宇宙，其演化过程中间歇地反复出现“大爆炸”。如此，适用于整个多元宇宙的基本物理定律可能会允许其中的单个宇宙呈现出多样性。

进展与前景

阐明极早期的宇宙，澄清多元宇宙的概念，这些是21世纪面临的挑战。回顾20世纪人们所取得的成就，这些挑战就不那么令人生畏了。在100年前，恒星为什么会发光还是一个谜；我们对银河系以外的一切都还没有概念，银河系被认为是一个静态系统。相比之下，当前宇宙已经延伸到了100亿光年以外，它的历史也已经被追溯到“起始”一秒钟以内的那些极短的瞬间。

当然，物理探测器目前仍然局限于太阳系内，但望远镜和传感器的改进却使我们能够对非常遥远的星系展开研究，光从这些星系到达地球的时间是自“大爆炸”以来所有时间的90%。至少在轮廓上，我们已经绘制了从原则上可以探测到的大部分区域，尽管我们怀疑，在我们的视界之外，宇宙还包含了一个更大的区域，从那里发出的光还没有足够的时间到达地球（也许永远也不会到达）。

我们正通过详细的观测，逐步探知宇宙结构是如何形成的，以及星系是如何演化的。这些观测不仅是针对附近的星系，也包括遥远星系的成员，它们呈现在我们面前的是其100亿年前的样貌。

这一进展之所以成为可能，也许只是因为偶然性，但从原则上来讲，意义重大，因为这告诉我们基本的物理定律是可以被理解的，而且这些定律不仅适用于地球，还适用于最遥远的星系，不仅适用于现在，甚至还适用于宇宙膨胀开始后的最初几秒钟。只有在宇宙膨胀开始后的最初几毫秒以及在黑洞深处，我们才会面对基本物理原理仍然未知的情况。

宇宙学家不再缺乏数据。目前的进步更多地归功于那些观测家和实验家，而不是空谈的理论家。不过，未来将会出现纸上谈兵的观测家。星系测量的结果和内容详细的“巡天图”等将可以以电子的方式提供给任何访问或下载它们的人。未来会有更大的群体参与探索宇宙栖息地，以验证他们自己的“预感”，寻找新的类型，等等。

观测正在稳步改善，但我们的理解只能曲折前进。随着理论的更替，进展将呈锯齿状前行，但总体趋势是向上的。进步需要倍数更高的望远镜，也需要功能更强大的计算机，以便进行更逼真的模拟。

科学有三大前沿：非常大的、非常小的和非常复杂的。宇宙学包括了它们的全部。在几年之内，我们就可以对宇宙常数 λ、Ω和Q进行测量，就像自18世纪以来我们开始测量地球的大小和形状一样。到那时，我们也许已经解决了“暗物质”的问题。

不过，理解宇宙的开端仍然是一个根本性的挑战，这也许必须等待一个“最终”理论，也许它就是某种超弦理论的变体。这一理论将标志着一个理性探索过程的结束：这个过程由牛顿开始，并通过麦克斯韦、爱因斯坦和其他继任者得到延续。该理论不仅将加深我们对空间、时间和基本力的理解，还将阐明极早期宇宙和黑洞中心的情况。

这个目标也可能无法实现。或许并不存在“最终”理论。或者，即使存在，它也可能超出了我们的理解能力，我们无法掌握它。然而，即使达到了这个目标，也不会是科学挑战的终点。作为一门基础科学，宇宙学也是环境科学中最庞大的一门。它的目标是了解一个简单的“火球”是如何演化成我们周围复杂的宇宙栖息地的——在地球上，或在其他星球的许多生物圈中，生物是如何进化到能够反思它们是如何出现的。

理查德·费曼用了一个很好的类比来说明这一点。假设你以前从未看过下棋，但通过看几场比赛，你就可以推断出其中的规则。同样，物理学家研究支配自然基本要素的定律和变化。在棋艺上，在新手向大师级别的进步中，学会下法只是一个微不足道的初级入门。以此类推，在宇宙学上，即使我们知道基本的规律，探讨其结果如何在宇宙历史中展开也是一项永无止境的探索。对量子引力、亚核物理过程等类似问题的无知阻碍了我们对“宇宙开端”的理解。不过，解释日常世界和天文学家观察到的现象的困难则源于它们的复杂性。一切都可能是亚原子水平上的某些过程所产生的结果，即使我们知道控制微观世界的相关方程，实践中也无法在任何比单个分子更复杂的水平上对它们求解。而且，即使我们可以对它们求解，由此产生的“简约性”解释也不会有什么启发性。为了给复杂的现象赋予意义，我们引入了新的“涌现”概念，例如，液体的湍流度和湿度，以及固体的结构，都是由原子的集体行为造成的，可以被“简约”为原子物理过程，这些概念本身十分重要。同样，“共生现象”“自然选择”和其他生物过程也都如此。

下棋的类比让我们想起了其他问题。即使有限的可见宇宙在我们周围延伸了100亿光年，也不可能展示出其所有的潜能。这是因为，若想估算出所有事件究竟会按多少种不同的系列发生，我们很快就会得到迄今所见的最大数字。即使每一个棋手只下了三步棋，不同棋局的下法可以有900万种。与我们视界中的10^{78}个原子相比，世界有着远远不止40步的棋局：即使宇宙中的所有物质都被摆在了棋盘上，大多数可能的棋局也永远不会进行。而且，与自然界允许的选择相比，棋局游戏的选择范围显然是微不足道的。

即使一些简单的无生命的系统也会因为太过“混乱”而难以预测：行星轨道运动是自然界中少数几个高度可预测的方面之一，牛顿很幸运地发现了它！任何生物过程都比下棋包含了多得多的多样性——随着复杂性的展现，每个阶段都会有更多的分支。如果每个星系中都存在数百万颗类似地球的行星，并且都孕育着生命，那么每颗行星都将是独一无二的。然而，在我们的视界之外，可能还有一个无限大的空间，在那里各种环境组合都有可能发生，而且可以无限次地重复。这一观点提醒我们，应该警惕科学上的必胜主义，不要夸大我们对自然界错综复杂之处的理解程度。

本书的一个主题揭示微观世界和宇宙之间的紧密联系，这种联系可以形象地表示为奥拉波鲁斯环（见图1-1）。我们的日常世界显然是由亚原子领域的力塑造的，它的存在也要归功于宇宙精密调谐过的膨胀率、星系形成的过程，以及古老恒星中碳和氧的锻造等。一些基本的物理定律制定了“规则”，我们从一次简单的“大爆炸”中诞生，这一切敏感地取决于六个宇宙常数。如果这些数字没有被很好地调谐，复杂性的逐层展开或许早就终止了。是否会存在无限多的、没有调谐好的，因此是贫瘠的宇宙呢？当前的宇宙是不是多元宇宙中的一片“绿洲”呢？或者，我们是否应该为六个数的幸运取值寻找其他方面的原因呢？

致谢

首先，我要感谢多年来一直与我一起研究和学习的同行，也同样感谢同我就宇宙学问题进行深入探讨的非专业人士：这些讨论要么帮我总结出“大画面”中的关键点，要么提醒我尚未解决的重要问题，从而给我带来全新的视角。因此，我要特别感谢戴维·哈特（David Hart）、格雷伊姆·米奇森（Graeme Mitchison）、汉斯·劳辛（Hans Rausing）和尼克·韦布（Nick Webb）。本书正是为这类对宇宙学感兴趣的非专业读者而写的。在避免技术性过强的同时，我尝试在相关背景下引入新发现，将有根据的主张与无凭据的推测区分开来，并突出它们背后仍然存在的奥秘。

感谢约翰·布罗克曼（John Brockman）[(25)]邀请我为《科学大师佳作系列》丛书撰稿，也感谢他在这本书缓慢酝酿期间的耐心。感谢韦登菲尔德和尼科尔森出版公司（Weidenfeld & Nicolson）的托比·芒迪（Toby Mundy）和埃玛·巴克斯特（Emma Baxter）在整个编辑和制作过程中的鼎力支持，我对他们深表感激。还要感谢理查德·斯沃德（Richard Sword）和乔普·沙伊（Joop Schaye）为本书制作的插图；感谢布赖恩·阿莫斯（Brian Amos）和朱迪思·莫斯（Judith Moss）为本书提供的其他帮助。

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的 “湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：

安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

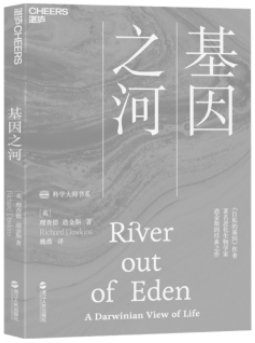
使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！



延伸阅读

《基因之河》

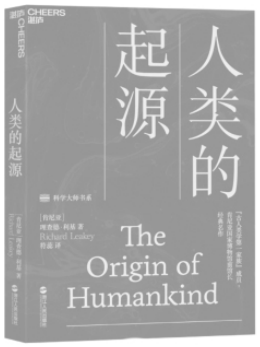
◎ 关于基因，没有人能比理查德·道金斯写得更好！《基因之河》是继《自私的基因》之后，理查德·道金斯的又一经典名作！生命的“复制炸弹”——基因从何而来？它又将走向何方？阅读本书，我们将通过一位热情、睿智、理性的科学家的视角直面基因的亘古谜题，获得对于生命的全新看法！



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09485-9
9 787213 094859 >

《人类的起源》

◎ 理查德·利基以直立人骨架“图尔卡纳男孩”这一20世纪古人类学最重要的发现为起点，清晰明了地勾画了人类进化的四大阶段：700万年前人科的起源；两足行走的猿类的“适应性辐射”；250万年前人属的起源；现代人的起源。除此之外，《人类的起源》还将带领我们利用有限的证据，提出种种出人意料的假说，推断人类的艺术、语言和心智起源之谜。



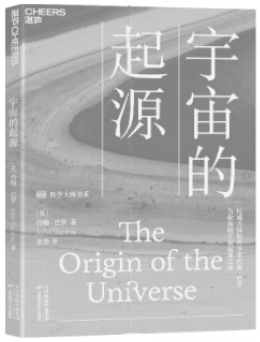
使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09300-5

《宇宙的起源》

◎ 回答现代宇宙学家必须面对的终极问题，用简明扼要的文字详述宇宙诞生的奥秘，一本人人读得懂的宇宙学科普著作。

◎ “科学大师书系”经典再现。中国科学院院士、复旦大学教授金力，科技创新研究者、清华大学教授陈劲，世界著名哲学家、《直觉泵和其他思考工具》作者丹尼尔·丹尼特重磅推荐！



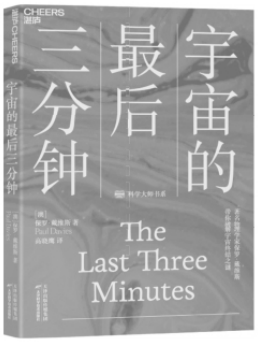
使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-5576-7864-7

《宇宙的最后三分钟》

◎ 保罗·戴维斯将为你介绍关于宇宙未来的最新理论，带你破解宇宙终结之谜。一本人人读得懂的宇宙学科普著作。

◎ “科学大师书系”经典再现。中国科学院院士、复旦大学教授金力，科技创新研究者、清华大学教授陈劲，世界著名哲学家、《直觉泵和其他思考工具》作者丹尼尔·丹尼特重磅推荐！



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-5576-8009-1
9 787557 680091

---

(1)据推测存在于原子中的最小子结构。

(2)17世纪的物理学家经常用机械钟（当时最复杂的自动机械装置）来比拟宇宙。他们认为，宇宙像时钟一样遵从力学定律。——编者注

(3)《哥斯拉》系列电影中的巨型怪兽，现在为日本流行文化及全球最知名的代表符号之一。——编者注

(4)组成它们的原子对彼此而不是对整个地球施加的引力。

(5)在具有超强引力的环境中，牛顿的理论就不再适用，这之中最著名的一个例子是水星轨道上的一个微小异常，爱因斯坦的理论解决了这个问题。

(6)受到基本物理定律的约束，但不受当前技术的约束。

(7)根据爱因斯坦著名的质能方程$E=mc^2$，第4章会详述。

(8)相对于地球的整个生命周期，这只是短短一瞬而已。

(9)中子增加了原子核的“黏性”，但不会产生额外的电斥力，因为它们不带电荷。

(10)分形（Fractal）是指具有以非整数维形式充填空间的形态特征。通常被定义为“一个粗糙或零碎的几何形状，可以分成数个部分，且每一部分都（至少近似地）是整体缩小后的形状”，即具有自相似的性质。——译者注

(11)我们的可观测范围大约100亿光年远，与此相比，这个边长仍然很小。

(12)事实上，陆地风景也可以是类分形的。在计算机图形学中，分形数学被用来刻画电影中虚构的风景。

(13)在物理学和天文学领域，红移是指由于某种原因，物体的电磁辐射波长变长的现象，在可见光波段，表现为光谱的谱线朝红端移动了一段距离，即波长变长、频率降低。——编者注

(14)绝对零度是热力学的最低温度，单位是开尔文。绝对零度，也就是0开尔文，约等于零下273.15摄氏度。——编者注

(15)之所以被称为“微透镜”效应，是为了跟之前提到的整个星系群的引力透镜效应进行区分。

(16)在这种情况下，Ω完全等于1，并保持如此。

(17)自温度达到3 000摄氏度以来，这种辐射就没有消散过。

(18)如果暗物质的含量不会超过我们所知道的比例，情况就会如此。

(19)在这种情况下，空间就会在10～20千米内自我封闭。

(20)对于一颗地球大小的星球来说，这只不过是60米的范围。

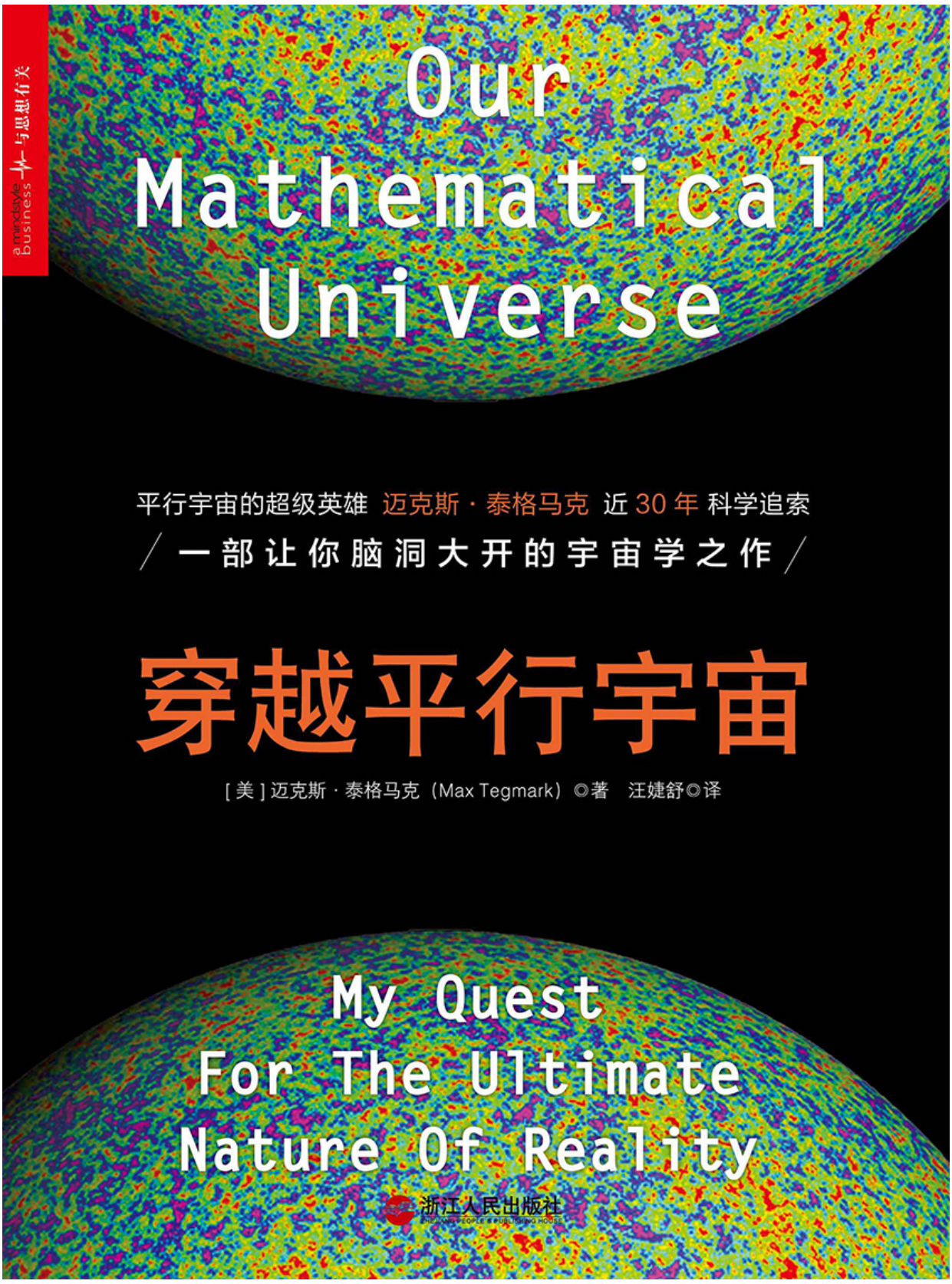
(21)它们最初是稀薄气体。

(22)“尤里卡”来自希腊文“Eureka”，意思是“我找到了”。传说阿基米德在洗澡的时候想出了判断皇冠含金量的方法，他激动地从浴室里奔出来，嘴里喊着：“Eurek！Eurek！”——编者注

(23)太阳系中有八大行星，但在开普勒所在的17世纪，人们只发现了六颗行星。——编者注

(24)ε接近0.007的范围使碳和氧等元素保持稳定，并在恒星中合成。

(25)美国著名文化推动者、“第三种文化”领军人，他还是“世界上最聪明的网站”Edge创始人，该网站每年一次，让100位全球最伟大的头脑坐在同一张桌子旁，共同解答关乎人类命运的同一个大问题，开启一场智识的探险，一次思想的旅行！湛庐集结策划出版的“对话最伟大的头脑系列”就是布罗克曼主编的Edge系列书籍，它们会带你认识当今世界上著名的科学家和思想家，洞悉那些复杂、聪明的头脑正在思考的问题，从而开启你的脑力激荡。——编者注


mindstyle business 与思想有关
Our Mathematical Universe
平行宇宙的超级英雄 迈克斯·泰格马克 近30年科学追索
一部让你脑洞大开的宇宙学之作
穿越平行宇宙
[美]迈克斯·泰格马克（Max Tegmark）◎著 汪婕舒◎译
My Quest For The Ultimate Nature Of Reality
浙江人民出版社

版权信息

本书纸版由浙江人民出版社于2017年6月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：穿越平行宇宙

著者：[美]迈克斯·泰格马克（Max Tegmark）

译者：汪婕舒

电子书定价：65.99美元

Our Mathematical Universe—My Quest for the Ultimate Nature of Reality by Max Tegmark. Copyright©2014 by Max Tegmark.All rights reserved.

目　录

版权信息
湛庐文化“科学素养”专家委员会寄语
湛庐文化“科学素养”书系专家委员会
全球顶尖科学家集体盛赞
跨界推荐
　　宇宙中不能承受之轻
引言　穿越平行世界，找寻宇宙的终极本质
第一部分　星际空间之旅
　　01　我们在空间中的位置：从地球到宇宙
　　02　我们在时间中的位置：溯流至时间源头
　　03　数字中的宇宙
　　04　宇宙的起源：是谁制造了宇宙大爆炸
　　05　欢迎来到平行宇宙
第二部分　穿越粒子世界
　　06　神奇的宇宙乐高
　　07　第三层多重宇宙，狂野不羁的现实
第三部分　探秘数学宇宙
　　08　万物理论的追索之旅
　　09　宇宙是由数学写就的伟大之书
　　10　重新认识自我：时间是幻觉吗
　　11　第四层多重宇宙，万物的终极答案
结语　生命，宇宙以及万物的未来
推荐阅读
致谢
译者后记



你不是一个人在读书！

扫码进入湛庐“趋势与科技”读者群，

与小伙伴“同读共进”！

湛庐文化“科学素养”专家委员会

寄语

科学伴光与电前行，引领你我展翅翱翔

欧阳自远

天体化学与地球化学家，中国月球探测工程首任首席科学家，中国科学院院士，发展中国家科学院院士，国际宇航科学院院士

当雷电第一次掠过富兰克林的风筝到达他的指尖；

当电流第一次流入爱迪生的钨丝电灯照亮整个房间；

当我们第一次从显微镜下观察到美丽的生命；

当我们第一次将望远镜指向苍茫闪耀的星空；

当我们第一次登上月球回望自己的蓝色星球；

当我们第一次用史上最大型的实验装置LHC对撞出“上帝粒子”；

……

回溯科学的整个历程，今时今日的我们，仍旧激情澎湃。

对科学家来说，几个世纪的求索，注定是一条充斥着寂寥、抗争、坚持与荣耀的道路：

我们走过迷茫与谬误，才踟蹰地进入欢呼雀跃的人群；

我们历经挑战与质疑，才渐渐寻获万物的部分答案；

我们失败过、落魄过，才在偶然的一瞬体会到峰回路转的惊喜。

在这泰山般的宇宙中，我们注定如愚公般地“挖山不止”。所以，

不是每一刻，我们都在获得新发现。

但是，我们继续。

不是每一秒，我们都能洞悉万物的本质。

但是，我们继续。

我们日日夜夜地战斗在科学的第一线，在你们日常所不熟悉的粒子世界与茫茫大宇宙中上下求索。但是我们越来越发现，虽这一切与你们相距甚远，但却息息相关。所以，今时今日，我们愿把自己的所知、所感、所想、所为，传递给你们。

我们必须这样做。

所以，我们成立了这个“科学素养”专家委员会。我们有的来自中国科学院国家天文台，有的来自中国科学院高能物理研究所，有的来自国内物理学界知名学府清华大学、北京师范大学与中山大学，有的来自大洋彼岸的顶尖名校加州理工学院。我们汇集到一起，只愿把最前沿的科学成果传递给你们，将科学家真实的科研世界展现在你们面前。

不是每个人都能成为大人物，但是每个人都可以因为科学而成为圈子中最有趣的人。

不是每个人都能够成就恢弘伟业，但是每个人都可以成为孩子眼中最博学的父亲、母亲。

不是每个人都能身兼历史的重任，但是每个人都可以去了解自身被赋予的最伟大的天赋与奇迹。

科学是我们探求真理的向导，也是你们与下一代进步的天梯。

科学，将给予你们无限的未来。这是科学沉淀几个世纪以来，对人类最伟大的回馈。也是我们，这些科学共同体里的成员，今时今日想要告诉你们的故事。

我们期待，

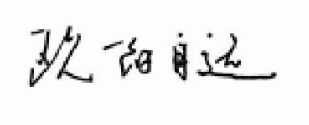
每一个人都因这套书系，成为有趣而博学的人，成为明灯般指引着孩子前行的父母，成为了解自己、了解物质、生命和宇宙的智者。

同时，我们也期待，

更多的科学家加入我们的队伍，为中国的科普事业共同贡献力量。

同时，我们真诚地祝愿，

科技创新与科学普及双翼齐飞！中华必将腾飞！



湛庐文化“科学素养”书系

专家委员会

主席

欧阳自远

天体化学与地球化学家，中国月球探测工程首任首席科学家，中国科学院院士，发展中国家科学院院士，国际宇航科学院院士

委员（按拼音排序）

陈学雷

国家杰出青年科学基金获得者，国家天文台研究员及宇宙暗物质与暗能量研究团组首席科学家

陈雁北

加州理工学院物理学教授

苟利军

中国科学院国家天文台研究员，中国科学院大学教授

李淼

著名理论物理学家，中山大学教授，中山大学天文与空间科学研究院院长、物理与天文学院行政负责人

王青

清华大学物理系高能物理核物理研究所所长，中国物理学会高能物理分会常务理事

张双南

中国科学院高能物理研究所研究员和粒子天体物理中心主任，中国科学院粒子天体物理重点实验室主任，中国科学院国家天文台兼职研究员和空间科学研究部首席科学家

朱进

北京天文馆馆长，《天文爱好者》杂志主编

朱宗宏

北京师范大学天文系教授、博士生导师，教育部“长江学者”特聘教授，北京天文学会理事长

献给梅亚（Meia）

她是本书灵感的源泉

OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE

全球顶尖科学家集体盛赞

21世纪初，人类对宇宙的探索进入了精密宇宙学时代：通过对大量天文数据的分析，对大爆炸以来的宇宙演化，人们不仅勾勒出了一幅完整图景，而且理论预言与观测高度一致，某些模型参数的测量精度甚至高达1%。《穿越平行宇宙》一书的作者是精密宇宙学时代的主将之一，提出和发展了许多宇宙学数据分析方法，也因此赢得了在学术界的地位和同行们的尊敬。但不为人知的是，他的内心却和普通孩子一样，一直渴望着去探寻那些人们通常只在科幻小说里看到的、对宇宙最疯狂的奇思妙想。本书将带你走进MIT教授迈克斯·泰格马克的内心世界，让你知道一个普通男孩是怎样从厌恶到喜欢上物理，如何成长为世界一流的宇宙学家，之后又是怎样想象和思索平行宇宙的。

陈学雷

国家杰出青年科学基金获得者

国家天文台研究员及暗物质与暗能量研究团组首席科学家

这是一本有关多重宇宙的有趣的科普书籍。作者泰格马克教授作为世界知名的理论物理学家，在一开始就以引人入胜的故事，讲述了《别闹了，费曼先生》这本书如何激发了他对物理的学习兴趣，以至

于让他偷偷选了前女友学校的物理课程，并最终从经济学专业转到了物理学专业。而从人类的认识史来看，自从人类诞生在地球上，就一直在思考着宇宙从何而来、往哪里去的终极问题。作者对这个终极问题提出了一个近似疯狂的想法：我们的宇宙实在就是数学理论的体现，宇宙存在着众多的多重宇宙。100年前，爱因斯坦也认为相对论中的黑洞仅仅存在于数学之上，而如今，黑洞已被认为普遍存在。多重宇宙，无论未来能否被验证真的存在，《穿越平行宇宙》这本书都是一本非常好的入门读物。

苟利军

中国科学院国家天文台研究员，中国科学院大学教授

“第十一届文津奖”获奖图书《星际穿越》译者

当代年轻科学家力作精选，敲开中国科幻新世界的金砖！

吴岩

科幻作家，北京师范大学教授

《穿越平行宇宙》这本书的前半部分讲的是现代物理学科普书里的热门话题：时空、平行宇宙、量子力学、暗物质和暗能量……但泰格马克写得特别流畅易懂，而且用了一个有个人特色的、有温度的写法。等到了后半部分，连职业物理学家都会屏住呼吸：泰格马克回答了一个看似应该留给哲学家的问题：所谓“实在”，到底是什么东西？答案是数学！宇宙和人，都是数学的一部分——如果你能真正理解这个还有争议的观点，你的世界观将会有一个跃迁。

万维钢（同人于野）

科学作家，畅销书《万万没想到》作者

“得到”App《万维钢·精英日课》专栏作家

“科学的尽头是哲学，哲学的尽头是宗教”，网络上曾流行过这样一种错误的说法。然而，每一个科学理论都有它的边界。在这个边界之外，科学家以现有的手段暂时还没有办法触及。例如，可见宇宙之外有什么？量子力学的波函数“坍缩”的时候到底发生了什么？

当我们的问题触及这个边界时，有的科学家会站在边界之内摊摊手，表示无能为力；有的科学家则会像泰格马克教授这样，带上科学的武器，大胆地向前迈出一步、两步，甚至很多步。也许他已经误入歧途，也许他正在同风车搏斗，也许他的某个不经意的想法超越了这个时代。但无论如何，这都是一个动人心魄的科学故事。我们有幸看到一位正统的科学家在践行哈姆雷特的那句名言：“即便我身处果壳之中，仍自以为是无限宇宙之王。”

李剑龙

理论物理学博士，科学松鼠会成员

科学漫画微信公众号“Sheldon42”创始人

《穿越平行宇宙》勇敢地面对了物理学与哲学交界处最深邃的问题之一：为什么数学在描述宇宙的任务上表现得如此出类拔萃？通过生动的语言和通俗易懂的解释，迈克斯·泰格马克这位世界顶级的理论物理学家为读者带来了一个可能的答案。同时，他向读者展示了，假如这个答案是正确的，将会如何改变我们对真实世界的看法。

布赖恩·格林（Brian Greene）

著名理论物理学家、弦理论家，《优雅的宇宙》《隐藏的现实》作者

大胆、激进、创新。一个改变游戏规则的人。如果泰格马克博士是正确的，这将在物理学与数学的关系上掀起一场范式转变，迫使我们修正教科书。所有对我们的宇宙怀揣深深忧思的人，都应该读读这本书。

加来道雄（Michio Kaku）

著名理论物理学家，《超越时空》《平行宇宙》作者

对于如何看待物理实在和生命，泰格马克提供了一个崭新且迷人的视角。他帮助我们从整个宇宙的语境来看待我们自身，强调了生命的未来在宇宙中的大好机遇。

雷·库兹韦尔（Ray Kurzweil）

未来学家，奇点大学校长，《人工智能的未来》作者

无论读者拥有什么背景，都会喜欢这本书。几乎每个人都能在这本书中学到新东西、找到值得思索的话题，或许也会找到一些不甚同意之处。

爱德华·威滕（Edward Witten）

著名物理学家，菲尔茨奖获得者&基础物理学突破奖获得者

科学家和业余爱好者都会觉得泰格马克这本书的信息量非常大，并且发人深思。你或许对他的理论退避三舍，但每一页都会让你期待能与他面对面地辩论这些话题。

朱利安·巴伯（Julian Barbour）

物理学家，《时间尽头》作者

这本鼓舞人心的书由一位真正的专家写就。本书展示了一个由物理学、数学和哲学组成的爆炸混合物，可能改变你对物理实在的看法。

安德烈·林德（Andrei Linde）

著名物理学家，因其在暴胀宇宙学的成就而获得格鲁伯奖和基础物理学突破奖

伽利略曾有句名言，说宇宙是由数学的语言写成的。如今，迈克斯·泰格马克则说，宇宙就是数学。你不必非要同意他的观点，就可以享受这段深入实在本质的迷人旅程。

马里奥·利维奥（Mario Livio）

天体物理学家，《杰出的失误》《上帝是数学家吗？》作者

在《穿越平行宇宙》一书中，泰格马克带领我们踏上了一段旋风般穿越宇宙、穿越过去与现在的旅行。通过透彻的语言，他向我们提供了一个关于宇宙的宏观认识——这个宇宙不仅包括我们自己所在的宇宙，还包括所有可能的宇宙。我们的宇宙或许很寂寞，却从不形单影只。

赛斯·劳埃德（Seth Lloyd）

MIT量子力学工程教授，《设计宇宙的程序》作者

OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE

跨界推荐

宇宙中不能承受之轻

余晨
易宝支付联合创始人，《看见未来》作者

米兰·昆德拉在其最负盛名的哲理小说《生命中不能承受之轻》中，以尼采的“永恒轮回”作为开篇：曾经一次性转瞬即逝的生活，会像影子一样没有分量，而不断重演的历史，或许才能摆脱存在的虚无而获得沉重的意义。

你是否有过深深的悔恨，叹息生活中错过的机会，失去的爱人，难以挽回的挫败，无可奈何的衰老……你是否经历过无法言喻的欣喜，那种突如其来的顿悟，两颗心灵热烈的碰撞，夏日里菩提树下的宁静，海边微风中落日余晖的绚烂……你是否有曾想过：如果我能够再活一次……其实，你曾经活过，正在活着，并且必将重活同样的人生，一切都会永恒轮回。

对于尼采来说，永恒轮回或许至多是一种哲思的推断和诗意的遐想；而在《穿越平行宇宙》中，泰格马克却告诉我们，永恒轮回是数

学的确证和逻辑的必然。在遥远的时空之外，另一个你，不，无穷多个你，正在同时读着这本书。

《穿越平行宇宙》是一场关于现代宇宙学的盛大巡礼，作者为我们展现了物理学前沿和哲学边界上那些令人叹为观止的奇景。这本著作的英文原名为《*Our Mathematical Universe*》（可直译为《我们的数学宇宙》），长久以来，科学家们一直惊叹于为何数学能够如此有效地描述我们的世界。伽利略曾说：数学是上帝用来书写自然的语言；而泰格马克却激进地认为：“宇宙不只是被数学所描述，宇宙本身就是数学。并且，宇宙不仅某些方面是数学，它的全部都是纯粹的数学，包括你我在内。”这个疯狂的想法被他称为数学宇宙假说，看似违背直觉和常识，却并不违背逻辑和理性。某种意义上，这是毕达哥拉斯学派和柏拉图主义的轮回再生：万物皆数，只有理念和形式才是绝对和永恒的存在。当我们剥开一层层的表象而看到存在的终极结构时，便会发现并没有什么像颜色、质地这样实实在在的“内禀性质”，留下的只是数字、集合、信息、模式等一组组抽象的数学关系。宇宙的本源不是沉甸甸的物理实在，而是没有“人造包袱”的轻飘飘的数学结构。宇宙、生命、意识、自我……万物的存在都被交织在一幅宏大而自洽的图景之中。你不见得能接受泰格马克教授大胆、创新且极具争议的假说，但这一切仍会让你感受到令人晕眩的理性之美，进而产生宗教般的敬畏。

当你读完这本书而仰望星空时，或许会意识到：你的所有欢乐与痛苦，所有成就与失败，所有荣耀与屈辱，所有美丽与丑陋，所有爱恨与情仇，都会在平行宇宙中一遍遍地重演，一切都似乎毫无意义，却又不可避免。在浩渺的空间和漫长的时间中，人类的存在是如此微不足道，然而，我们或许承受了这个轻虚的数学宇宙中最沉重的使命：“并不是宇宙赋予生命以意义，相反，生命将意义赋予了宇宙。”

OUR MATHEMATICAL UNIVERSE



引言

穿越平行世界，找寻宇宙的终极本质

……树木的主要成分是气体，所以当它们燃烧时，这些气体又回到空气中。燃烧的火焰所释放出来的热量原本来自太阳，它们被深锁起来，并将空气变成树的一部分。而燃烧殆尽的灰烬，则是树另一部分的残骸，这一部分并不源于空气，而是来自我们脚下结结实实的地球。

理查德·费曼（Richard Feynman）

天地之间有许多事情，是你的睿智所无法想象的。

莎士比亚，《哈姆雷特》
第1幕，第5场

眼见不一定为实

一秒钟之后，我即将死去。我的脚离开自行车脚蹬，手猛捏刹车闸，但是一切都太迟了。我只看见不断闪烁的车灯和逼近的卡车。40吨钢铁，像一条喘息的巨龙，挟着沉重的呼啸向我袭来。我看见卡车司机满眼的惊恐。我感到时间仿佛变慢了，我的过往人生一幕幕闪现在眼前。那一刹那，我脑中唯有一个念头：“多么希望这只是一场噩梦！”呜呼哀哉，直觉告诉我，这一切都是真实的。

然而，我如何才能百分之百地确定这不是梦境呢？假如在被撞之前，我曾无意中瞥见一些只有在梦里才会出现的场景，会不会有转机呢？比如，我已过世的老师英格丽竟然活了过来，好端端地坐在自行车后面；再比如，5秒钟之前，我视野的左上角突然蹦出一个对话框，

上面写着：“你确定不看看右边，就贸然冲出地下通道吗？”下面还有两个可以点击的按钮，分别标着“确定”和“取消”，那一切又会怎么样呢？如果我看了太多类如《黑客帝国》和《异次元骇客》的电影，也许会开始怀疑我的人生是否只是一个计算机模拟程序，甚至开始质疑我从前深信不疑的那些关于真实世界的基本假定。但是，上面所说的这些怪事，我一个也没有经历过。死亡，是唯一的证明。毕竟，还有什么会比40吨重的大卡车压过来的感觉更真实呢？

可是，很多事情并不是表面上看起来的那样，卡车，甚至“实在”本身，都是如此。这种说法不仅来自哲学家和科幻作家，还源于物理实验。一个多世纪之前，物理学家们了解到一个奇妙的事实——在坚硬钢铁的内部结构中，其实大部分都是空荡荡的空间。这是因为，占原子质量99.95%的原子核，其实只占据了原子0.000 000 000 000 1%的体积。为何近乎空无一物的钢铁摸起来却实实在在、固若金汤呢？这是因为，让原子核各就其位的力量非常强大。另外，通过仔细测量，人们发现亚原子粒子甚至能在同一时间出现在不同的位置，这是一个著名的量子力学谜题（我们将在第6章进行探讨）。

既然粒子可以同时出现在两个地方，而我又是由这些粒子构成的，那我是否也能拥有分身术呢？实际上，在车祸发生的3秒钟前，我的潜意识已经决定了是只往左看，还是为以防万一也看看右边——左边是我每天都要转向的路，通往我在瑞典时所上的文理中学，这个路口通常没什么车。1985年那个清晨的瞬间，我草率作出的决定差点儿让我丢掉小命。这一切都源自一个小小的钙原子是否要进入我前额叶皮层某个特定的神经突触，它将决定这个神经元是否发射出电信号，从而激活其他神经元，并触发一阵瀑布般奔流的神经活动，最终在我的脑中编码出一句话：“不用看右边。”此刻，假如这个钙原子同时出现在两个相去不远的地方，一个在突触外，一个在突触内，那么半秒钟后，我的瞳孔将同时瞥向两个不同的方向；两秒钟后，我将同时

骑向两个相反的方向。那么，不久之后，我将同时处于“活着”和“死去”两种状态。这究竟有没有发生的可能？我们的世界是否将走向拥有不同历史的平行宇宙呢？主流的量子力学家们正在热烈地辩论着这个话题。换句话说，量子力学中最重要的薛定谔方程，是否需要一些修正呢？现在问题来了，我究竟有没有死？在这个平行宇宙中，我差点儿死掉，但最终捡回了一条命。那在其他平行宇宙中，我是否有可能已经死了？（在那里，这本书也就不可能写出来。）既然我同时处于活着和死去的两种状态，那么我们是否应该修改一下我们对“实在”的看法，让它更加名正言顺？

如果你认为我刚才所说的这些听起来荒谬可笑，只是用物理学来搅浑水，那么，当你听到我接下来要讲的个人看法时，你会更加头昏脑涨。如果每时每刻，我在不同的平行宇宙中都可能出现在不同的位置，那么不管遇到什么意外，总有一个宇宙中的我能死里逃生。下面请你想象一下，如果未来每次都会这样，那么，至少存在一个平行宇宙，其中的我会永远活下去。由于我的意识只会存在于我活着的宇宙中，那是否意味着，在主观上我会觉得自己长生不死？如果真是这样，你也能找到一个你永远不会死的宇宙，最终，你将成为这个宇宙上活得最久的人。我们将在第7章讨论这些问题。

很惊讶吧？物理学竟然揭开了“实在”的面纱，让我们看到它怪异的面目，简直超出所有人的想象。其实，这还不算太惊奇，接下来，让我们看看达尔文的进化论吧，它会让你更惊讶。对某些物理现象，我们拥有着毋庸置疑的直觉。比如，当你扔出一块石头，直觉告诉你，它一定会以抛物线的轨迹落地。这是进化的馈赠，因为这些现象对我们远古祖先的生存具有价值（这也许正是人类对棒球感兴趣的原因）。一个山顶洞人如果总在思考“物质最终由什么组成”这种问题，可能就会忽略掉潜藏在身后的老虎，而被一口吃掉，最终被清除出大自然的基因库。于是，达尔文的理论作出了一个可检验的预言：

每次，当我们使用科技去窥探人类尺度之外的实在时，进化带来的直觉都会被打破。这个预言被检验了一次又一次，每一次达尔文都以压倒性的优势取胜。

比如，爱因斯坦认为，物体做高速运动时，时间会变慢。瑞典诺贝尔奖委员会那些坏脾气的委员们觉得这个想法实在太疯狂，拒绝向爱因斯坦的相对论颁发诺贝尔奖。再比如，在极低的温度下，液氦会向上飘。而在高温时，粒子相撞后会变身为其他东西，比如电子与正电子相撞会变成Z玻色子。如果仅凭直觉，我会认为这听起来就像“两辆车相撞变成了一艘游轮”一样怪异。还有，在微观尺度下，粒子就像得了人格分裂症，会同时出现在两个地方，产生我们之前提到过的量子力学谜题。而在天文学的大尺度下，咄咄怪事依然存在，比如，仅凭直觉，人类根本无法理解黑洞的性质。如果你能从直觉上理解黑洞的方方面面，那你绝对是凤毛麟角！赶紧扔掉这本书，快去出版你的理论吧，免得有人在量子引力的诺贝尔奖上抢在你前面。

让我们把尺度继续放大，还有更多怪事在等着你，那里的现实比最高级的望远镜看到的所有东西都大得多。我们将在第4章中探索宇宙的早期，关于此，主流理论叫作“宇宙暴胀”（cosmological inflation）。这个理论暗示着，空间可不仅仅只是宏大而已，它实际上是无限的，包含着无穷多个你。这些“你”，在两种不同类型的平行宇宙中，经历着所有可能出现的人生道路。如果这个理论被证实，那么，即使我前面提及的量子力学观点（“另一个我被撞死在上学路上”）存在一些谬误，在太空中极遥远之处，也可能存在着无数个太阳系，其中生活着无数个我，他们过着完全相同的日子，直到那个千钧一发的时刻到来——决定不向右看。

也就是说，不管从极小的尺度还是极大的尺度看，物理学的发现都挑战着我们对实在最基本的看法。在本书第10章，你会看到，当我

们利用神经科学来钻研大脑运作的方式时，即使在人类这个不大不小的尺度下，有关实在的观点也会受到严峻的挑战。

另外，正如图0-1所显示的那样，数学方程为我们提供了一扇窥探大自然运行规律的窗口。然而，为何我们的物理世界会展现出如此极端的数学规律呢？这种数学规律非常重要，著名天文学家伽利略宣称大自然是“一本用数学语言写就的书”；而诺贝尔奖获得者尤金·维格纳（Eugene Wigner）则强调说，“数学在物理学中不可思议的有效性”简直就是一个亟待解释的神秘事件。我写作本书的主要目的正是回答这个问题。在第9章和第10章，我们将探索计算、数学、物理学和意识之间的迷人关系，并探索我的一个听起来很疯狂的信念——**我们的物理学世界不仅是被数学所描述，它正是数学本身，而人类正是这个巨大的数学体中具有自我意识的一部分。**我们将看到，这个信念将开启一扇门，门后暗藏着崭新的、终极的平行宇宙。这些平行宇宙是如此庞大和奇异，以至于我之前提到的所有稀奇古怪之事都将黯然失色，迫使我们放弃关于实在的那些最根深蒂固的观念。

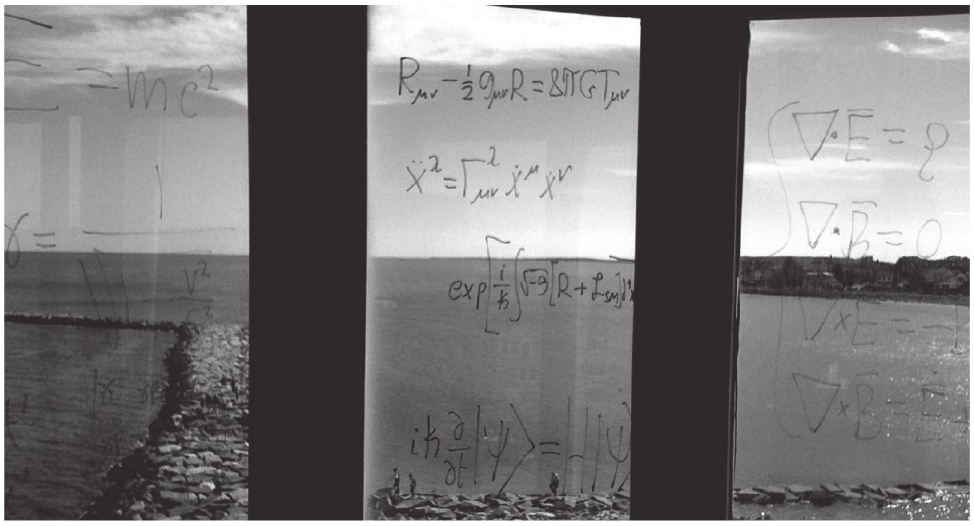


图0-1　当通过物理公式来看待世界时会发现，公式描述的是模式和规律。但对我来说，数学更像是通往外部世界的一扇窗口。在

这本书里，我将告诉你，我们的物理世界不仅仅是被数学所描述，它正是数学本身；更确切地讲，它是一个数学模型。

生命、宇宙、万物，终极答案究竟是什么

在遥远的远古时代，人类祖先就已经开始追问什么才是实在，冥思苦想着这些关于实在的深邃问题。一切从何而来，又向何处去？宇宙究竟有多大？这些问题是如此迷人，全世界几乎所有的人类文明都为其倾心。为此，人们创造出了各种创世神话、传说和宗教信条。这些问题太难回答，并未形成一个全球统一的答案（见图0-2）。如果所有文化都趋向一个统一的世界观，那这说不定可以成为“终极的实在”。然而事情没有那么简单，每种文化给出的答案都大相径庭，有一些则反映出人们不同的生活方式。比如，古埃及的创世神话认为尼罗河让土地变得肥沃，而我们的世界正是从水中诞生；而在我的祖国瑞典，冰与火对生存非常重要，所以古挪威神话认为，生命起源于冰与火。很神奇吧！



图0-2　在漫长的人类历史上，许多思想家都曾为本书将讨论的许多关于宇宙的问题弄得神魂颠倒，然而全球并没有形成一个统一的答案。本图由MIT的研究生大卫·赫尔南德斯（David Hernandez）为我在2011年的宇宙学课程所制作。当然，这种简单的分类

法并不严格，所以你可以持保留态度。因为许多宗教都有多个分支和不同的解释，还有一些可被分到多个种类中。比如，印度教在创世神话的三个分类中，都可以占有一席之地，因为根据传说，创世神梵天（图中的大神）和我们的宇宙都从一个蛋中而来，而这个蛋又是来自水。

这些终极问题，古人给出的答案都多少有点儿激进。那什么才是真实与实在呢？除去眼睛能看到的世界之外的世界，是真实存在的吗？是的！这是柏拉图在2 000多年前给出的答案。在他经典的洞穴之喻中，人就像被囚禁在一个山洞中，面朝空白的洞壁，身后的篝火将一切的影子投射在洞壁上，让人误以为婆娑摇曳的影子就是真实的世界。**柏拉图认为，被我们人类认为是“实在”的一切日常事物，都只是真实世界扭曲且局限的幻影。要想真正理解真实世界，必须打破思想的枷锁。**

我的物理学生涯告诉我，柏拉图是正确的：现代物理学用不胜枚举的例子证明，真实世界的终极本质并不是表面上看起来的那样。但如果物理实在不是我们认为的那样，那又应该是什么样的？我们脑中构建的内部实在与外部实在有什么关系呢？万物究竟由什么组成？世界是如何运转的？为什么呢？一切的一切，是否有一个终极意义？如果有的话，又是什么？正如著名科幻小说家道格拉斯·亚当斯（Douglas Adams）在他的科幻作品《银河系漫游指南》（*The Hitchhiker’s Guide to the Galaxy*）中所追问的那样：“生命、宇宙和万物的终极问题的答案究竟是什么？”

纵观人类历史，各个时代的思想家对“什么是实在”这个问题作出的回应可谓五花八门——不管是试图回答它，还是忽略它。在此，我举出了一些例子（见表0-1，这个表并不完全，也并不是所有例子都互斥）。

表0-1　对“什么是实在”的一些回答

不同答案	涉及内容
这个问题有着有意义的答案	· 运动着的基本粒子 · 地、风、火、气和第五元素精质 · 运动着的原子 · 运动着的基本粒子 · 运动着的弦 · 弯曲时空中的量子场 · M 理论 · 神的创造 · 社会构建出来的产物 · 神经生理构建出来的产物 · 一个梦 · 信息 · 一个模拟程序（就像《黑客帝国》那样） · 一个数学结构 · 第四层多重宇宙
这个问题缺乏有意义的答案	· 确实有“实在”这回事儿，但我们人类不能完全明白它：我们没有办法理解哲学家康德所说的“自在之物” · 从根本上来说，实在是不可知的 · 我们不懂它，更别说描述它了 · 科学只是一个故事（哲学家雅克·德里达和其他人给出的后现代回答） · 实在只存在于我们脑中（构建主义者的回答） · 实在根本不存在（唯我主义的回答）

这本书（包括我的科学职业生涯）是我个人对这些问题的追寻过程。这些思想家之所以有如此花样繁多的答案，一部分原因是他们选择从不同的角度来回答。所以，关于我个人如何解释它，以及采用什么方法，在此我需要向读者们说明一下。“实在”这个词可以有很多不同的内涵。在我眼中，它指的是包含我们自身的这个外部物理世界的终极本质。为了更好地理解它，我几乎被迷住了。那么，我采用了什么方法呢？

还在上高中时的一天夜里，我读了英国女侦探小说家阿加莎·克里斯蒂（Agatha Christie）的侦探小说《尼罗河惨案》（*Death on the Nile*）。尽管我知道第二天早上7点就得起床，但还是无法放下这本书。一直看到凌晨4点，谜题终于被解开了。我从小就对侦探小说神魂颠倒。12岁时，我和同班同学安德里亚斯·贝蒂（Andreas Bette）、马提亚斯·博特纳（Matthias Bothner）以及奥拉·汉松（Ola Hansson）成立了一个侦探俱乐部。我们从来没有抓到过罪犯，但破解谜题却让我放飞了想象力。

对于我来说，“什么是实在”就像是一个终极的侦探故事，作为一个物理学家，我能花这么多时间来探索这个问题，实在是太幸运了。在下一章，我会告诉你，还有很多夜晚，我都被好奇心所驱使，通宵达旦地看书，直到谜题被破解。当然，还有很多夜晚，我不是在读，而是在写。我所写下的，乃是一系列数学方程，但我知道，这些方程也像侦探小说一样，能把我引领到终极答案面前。

我是一个物理学家，因此对“实在”的谜题，我采用物理学的解决方法。对我来说，我将从“宇宙有多大”和“万物由什么组成”这种问题开始，并像对待侦探谜题一样对待它们：**对细致的观察结果进行梳理，坚持追踪每个线索，不管它将通向何方。**

破解“实在”谜题，一场智识上的终极冒险

什么？物理学的解决方法？这简直是浇灭人兴奋之火的一盆冷水嘛。我很理解这一点。每当我坐在飞机上，邻座的乘客问我做什么工作时，我都有两个备选答案。如果我当时想聊聊天，我就会回答“天文学”，这将开启一段有趣的对话[1]；如果我当时不想聊天，我就会回答“物理学”，十有八九他们就会说“哦，这是我高中时学得最差的学科”，然后就不再搭理我，我的旅程便会清静万分。

实际上，物理学也是我高中时最不喜欢的学科。我现在还对第一堂物理课记忆犹新——物理老师用单调而平淡的声音宣布：“本节课将学习有关密度的知识。密度，就是用质量除以体积。如果质量是这样，体积是这样，那么密度就是那样……”从那之后，我脑子里一片糊涂。并且，每当物理老师的实验失败，他就会将问题归咎于湿度，并说“今早还行的呢”。我的一些朋友并不知道为什么他的实验总是失败，直到有一天他发现，我淘气地在他的示波器[2]下面贴了一块磁铁……

申请大学时，我决定抵制物理学和其他科技领域，去了斯德哥尔摩经济学院，主要研究环境问题。我想为地球尽一份力，让它成为一个更美丽的星球。我发现，最主要的问题并不在于缺乏有效的技术方案，而在于没有很好地利用它们。我还发现，影响人类行为的最好方法是触动他们的钱包。创造经济刺激，让个人利己主义与公共利益结盟——这个想法把我给迷住了。然而，呜呼哀哉，我的美梦破灭了。我得出一个结论：经济学大体上是在兜售智力。说出权贵想听的话，就会得到奖赏。不管政客想做什么，都能找到某个经济学家来支持其做法。美国的罗斯福总统想要扩大政府开支，于是听从于宏观经济学大师约翰·凯恩斯（Johan M.Keynes）；而里根总统想要减少政府开支，于是转向反对政府过多干预经济的经济学大师米尔顿·弗里德曼（Milton Friedman）。

> 某一天，我的同学约翰·奥德霍夫（Johan Oldhoff）给了我一本书，改变了我的人生。这本书叫《别闹了，费曼先生！》（*Surely You’re Joking, Mr.Feynman！*）k。我从来没见过理查德·费曼，但正是他改变了我的人生道路，从经济学转向了物理学。当然，那本书的主要内容并不是讲物理学，而更像是教你如何撬开门锁和挑选女朋友，但我在字里行间感受到，这个家伙真是爱死物理学了。我被迷住了。如果你在路上看见一个长相平平的男生挽着一个倾国倾城的女孩，你一定会认为背后有什么不可言说的秘密，你可能会假设，她一定看到了他身上隐藏的闪光

点。这也是我对物理学的感觉。我十分好奇，费曼到底看到了物理学的什么闪光点，是我在高中时所忽略的？

我很想解开这个谜题，所以我坐下来，开始读从老爸书柜里找到的《费曼物理学讲义》（*The Feynman Lectures on Physics*）第一卷。书上写道：“假如，因为某次大灾难，所有的科学知识都丢失了，只有一句话能传给下一代，那么怎样才能用最少的词汇来表达最多的信息？”

哇哦！这个家伙和我的高中物理老师真的太不一样了！费曼继续写道：“我相信这句话应该是：万物都是由原子组成的——这种永恒运动着的小微粒，当它们分开时会相互吸引，而挤在一起时又相互排斥。”

我瞬间被点亮了。就像中了魔咒一样，我废寝忘食地读啊，读啊，读啊。我觉得自己简直像经历了一场宗教式的洗礼。终于，犹如醍醐灌顶，坐地顿悟，我明白了自己一直以来忽略了什么，而这却是费曼早就意识到的：物理学是终极的智力冒险，是为理解宇宙最深层次的谜题而进行的探索。**物理学并不是给有趣的事情泼冷水，相反，它让我们把周遭美丽且神秘的世界看得更加清楚。**

秋天，在骑车上班的路上，我看见树叶被染成了红色、橙色和金色，它们是如此美丽。然而，用物理学的眼睛来看这些树，还能揭示出更多的美！正如费曼所说的那样，“我越看得深，就越能瞥见更多的优雅”：在第2章，我们将看到，恒星才是树木的终极来源；而在第7章，我们将看到，研究树木的组成部分，将暗示着它们也存在于平行宇宙中。

那时，我有一个女朋友，在瑞典皇家理工学院学物理，她的课本看起来比我的有趣多了。可惜我们的关系没能长久，但我对物理学的

爱却延续了下来。在瑞典，大学都是免费的，所以我在没有告知斯德哥尔摩经济学院的情况下，同时也注册了她所在的大学。于是，我有了一个神秘的双重身份。我的“侦探”生涯终于正式开始了。而这本书，正是我迟到了25年的“侦探报告”。

所以，究竟什么是实在？我在此设置了一个如此大胆的主题，并不是要自负地向你推销一个终极答案（在本书后面的章节，我们会一起探索那些迷人的可能性），而是要邀请你来参加一场探险之旅，并和你分享我对这些脑洞大开的神秘问题的兴奋和思考。我想，你会和我一样，得出结论：不管实在到底是什么，它绝对和我们从前所认为的大不一样，它是一个令人陶醉的谜题，深藏在我们的日常生活中。我相信，你会和我一样，用一个全新的视角来看待所有的日常问题，比如罚单和胃痛，更容易不被它们影响，并尽情地享受生活。

当我第一次和我现在的编辑约翰·布罗克曼（John Brockman）讨论写作本书的想法时，他给我下了几道“军令”：“我不想要一本教材——我要你用心写的书。”所以，我就写出了一本有点儿像科学自传的书，不过它的主要内容是关于物理学，而不是我。当然，这本书肯定也不像你通常所读的那些科普书，那些书的作者一般都是从客观的角度来讲解物理学，主要反映科学共同体的主流观点，并为反对意见留出同样的空间。而我的这本书更像是我对实在的终极本质的个人探索。我非常希望你会喜欢我眼中的世界。在这本书里，我们将一起探索我认为最不可思议的事情，并尝试找到它们的意义。

一开始，让我们一起来看看，最新的科学进展对讨论“什么是实在”的整个大环境有何改变。从极大的尺度（第1章～第5章）到极小的尺度（第6章和第7章），科学研究如何揭开了“实在”的面纱。在本书的第一部分，我们将追问“宇宙有多大”，为此，我们将在前所未有的大尺度上，探索宇宙的起源以及第一和第二层平行宇宙。在这

里，你会发现一些暗藏的线索，暗示着宇宙从某种意义上来说是数学的。

在第二部分，我们将进入亚原子的微观世界，马不停蹄地探索“万物由什么组成”。其间，你会发现新的线索，暗示着组成万物的原材料从某种意义来说也是数学的。

在第三部分，我们将回头来看看这一切对真实世界的终极本质来说意味着什么。我们会讨论，不能理解人类意识并不代表不能完全理解外部物理实在。接下来，我们将踏上神秘的旅程——也就是我最激进和颇受争议的想法：**实在的终极本质就是数学**。这不仅会瓦解我们熟悉的概念，比如随机性和复杂性，甚至会让它们变成幻觉。于是，最终极的第四层平行宇宙应运而生。最后，在结语部分，我们将回到一切开始的地方，也就是我们栖身的宇宙。此时，我们将讨论，对宇宙中的生命、对人类以及对你我来说，这一切意味着什么？我们对未来有什么展望呢？一段迷人的旅程正在前方等着我们，让我们开始吧！



扫码关注“湛庐教育”，回复“穿越平行宇宙”，观看泰格马克教授的演讲视频，与他一起穿越平行宇宙！同时，还可获取泰格马克教授为读者制作的阅读指南，快速厘清本书脉络。



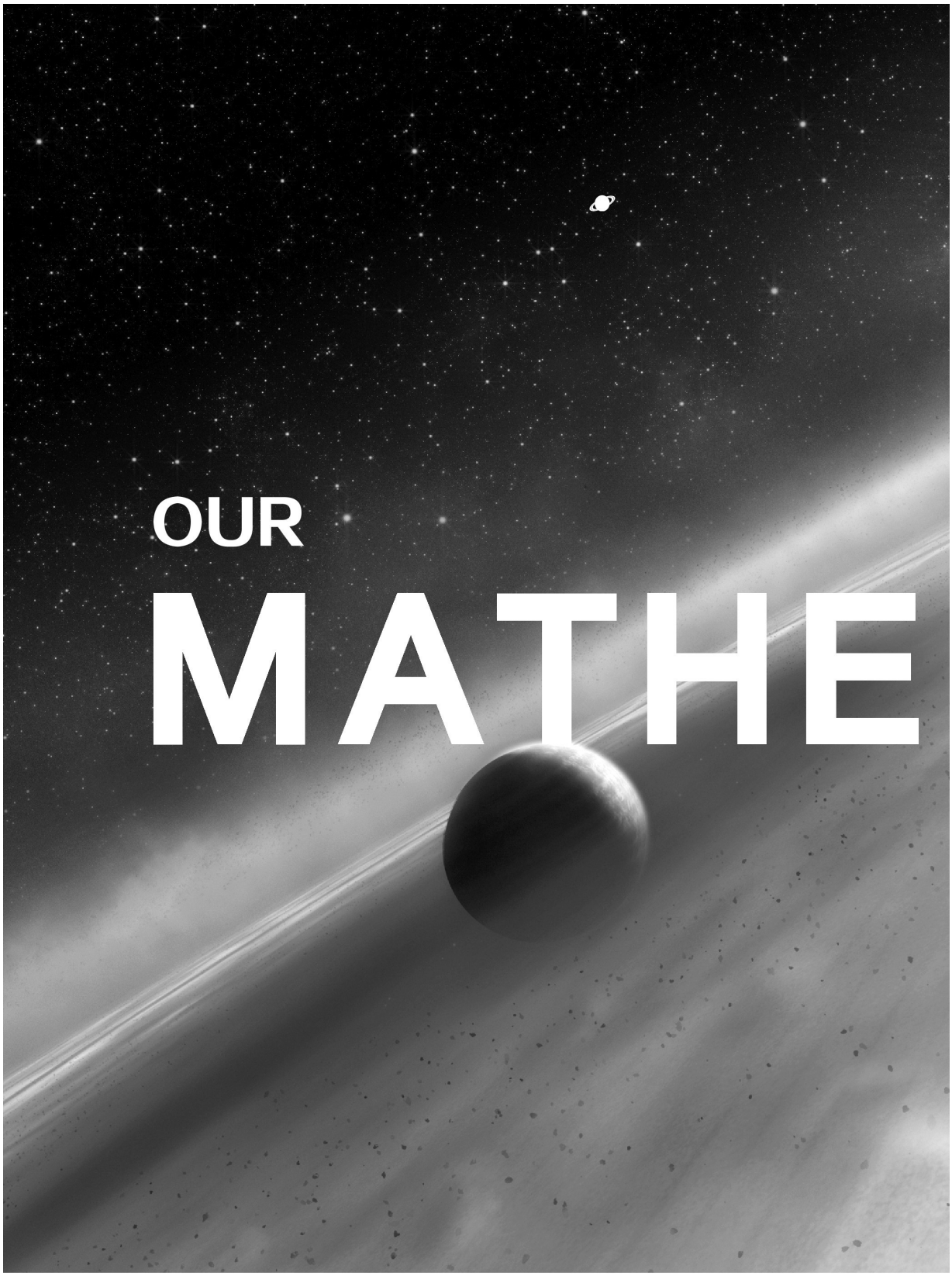
◆我认为，关于真实世界的终极本质，物理学告诉我们的最重要的事情就是：不管它到底是什么，它都绝不是表面上看起来的那样。

◆在第一部分，我们将把镜头拉远，探索极大尺度下的物理实在，从行星到恒星，再到星系和超星系团，以及我们的宇宙和两类可能的平行宇宙。

◆在第二部分，我们将把镜头拉近，追寻极小尺度下的物理实在，从原子到更小更本的粒子，并讨论第三层平行宇宙。

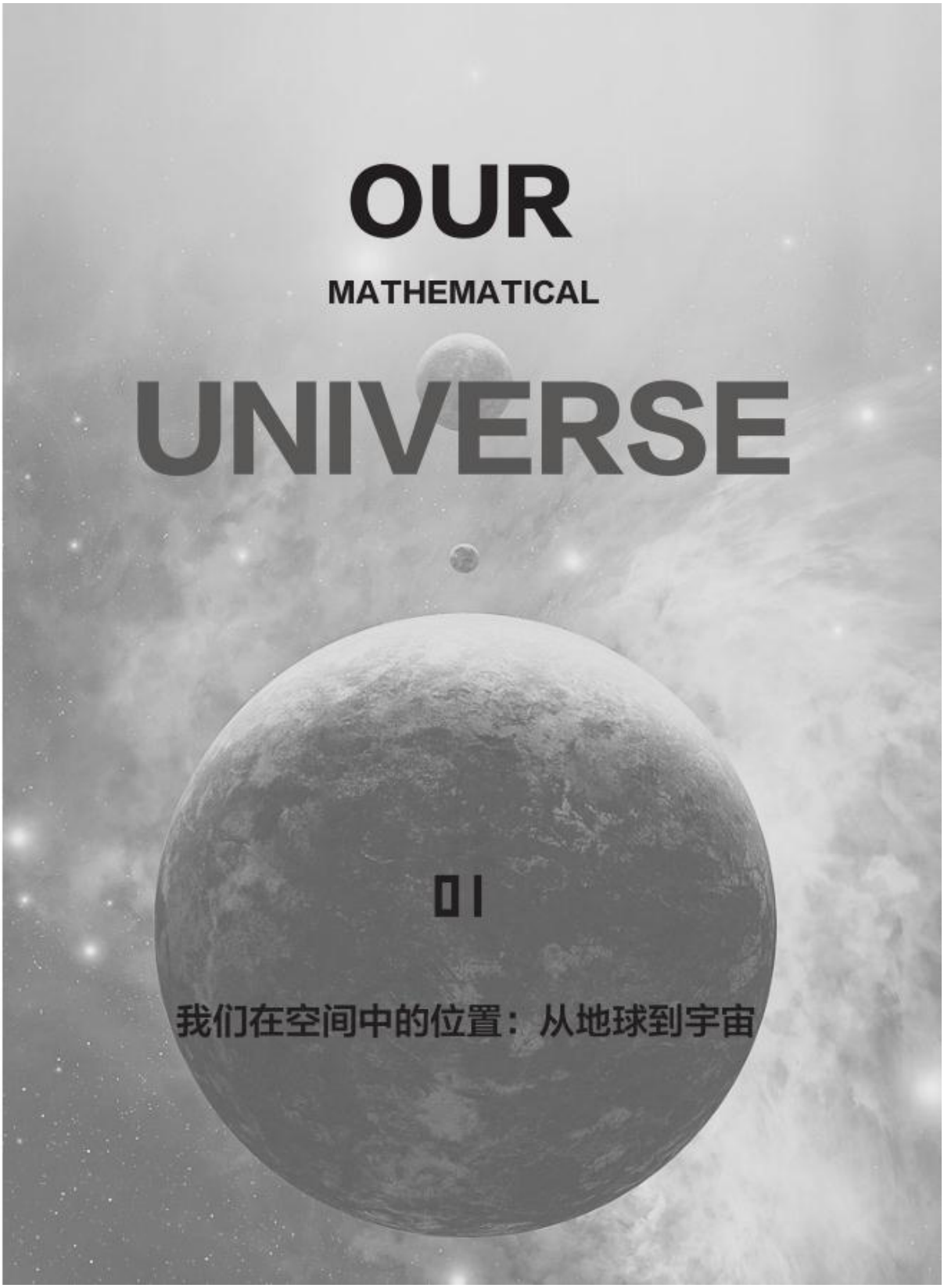
◆在第三部分，我们将研究奇异物理实在的终极本质，考察宇宙终极纯粹的数学性，尤其是第四层，也即最终极的一层平行宇宙中的数学结构。

◆对不同的人来说，“实在”的内涵是不同的。我所说的“实在”是指我们所存在的这个外部物理世界具有的终极本质。我从小就对这个问题很着迷。这本书是一场追寻“实在”之本质的个人冒险。跟我一起来吧！


OUR
MATHE



▶ 第一部分 星际空间之旅


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
01
我们在空间中的位置：从地球到宇宙

空间……很大，真的很大。你简直不会相信它有多么广袤无垠，这超乎你的想象。

道格拉斯·亚当斯，《银河系漫游指南》

空间是无边无际的吗

他举起手，我示意他可以问问题。“空间是无边无际的吗？”他问道。

我惊讶得下巴快掉到地上了。哇哦！我刚刚在儿童乐园做了一场小小的天文学讲座，这是我孩子在温彻斯特幼儿园的课外活动。一群超级可爱的小朋友坐在地上，用水汪汪的大眼睛望着我，期待着我的回答。可是，这个5岁男孩刚刚问出的问题，我也不知道怎么回答啊！实际上，地球上根本没有人能准确回答这个问题。尽管这并不是一个令人绝望的形而上学问题，但却是一个严肃的科学问题，我接下来将为你作出一些明确的预测，与之有关的理论也正在被物理实验所探索。实际上，我认为这对物理实在的基本性质来说，是一个非常棒的问题。我们将在第4章讨论，这个问题将引领我们走向两种不同类型的平行宇宙。

这些年以来，我看多了世界各地的负面新闻，对人类的未来变得越来越悲观，然而几秒钟前，这个幼儿园小朋友却让我对人类的潜力重拾信心。连一个5岁的小孩子都能说出如此深奥的话，想象一下，在

合适的条件下，把所有成年人团结起来，将会完成多么伟大的壮举！这个孩子也提醒了我教育的重要性。我们的好奇心与生俱来，但有时，学校教育却将其摒弃在外。我认为，作为一位教师，最主要的责任不只是传道授业，还包括重燃孩子们问问题的热情。

我热爱各种问题，尤其是那些重要的大问题。我在追寻有趣的问题上花了很多时间，这对我来说是一种幸运。更幸运的是，我还能把这种事情当成工作，赚钱养家，这简直超出了我对人生最疯狂的期待。下面我列出了16个我经常思考的问题。

问题1：宇宙空间怎么可能不是无限的呢？
问题2：在有限的时间中，如何能创造出无限的空间？
问题3：我们的宇宙会膨胀成什么样？
问题4：大爆炸是从空间中的什么地方开始的？
问题5：大爆炸是从某个单独的点开始发生的吗？
问题6：如果宇宙的年龄只有140亿年，那么我们如何能看到300亿光年远的东西？
问题7：星系退行的速度比光速还快，这不违背相对论吗？
问题8：星系是真的在远离我们，还是仅仅只是空间在膨胀？
问题9：银河系在膨胀吗？
问题10：大爆炸奇点的存在有证据吗？
问题11：通过暴胀，宇宙从虚无中生出我们周遭的万物，这难道不违背能量守恒定律吗？
问题12：是什么导致了大爆炸？
问题13：大爆炸之前有什么？
问题14：我们宇宙最终的命运是什么？
问题15：暗物质和暗能量是什么？
问题16：我们人类是微不足道的吗？

让我们一起来探索这些问题吧！在接下来的4章里，我们将回答其中11个问题。你会发现剩下的5个问题令人极其纠结。但是，首先让我们回到那个幼儿园小朋友的问题上，这将是本书第一部分的中心主题：空间是无边无际的吗？

被低估的空间

我父亲曾给过我一个建议：“如果你遇到一个无法回答的难题，那么在所有你不能回答的问题里，先选择一个简单一些的问题来处理。”怀着同样的精神，让我们先问一个更简单的问题：在不与我们的观测结果相违背的前提下，空间最小能有多小？图1-1描绘了人们对这个问题的回答随着时间发展而变化的情况。从图中可以看出，几个世纪以来，这个问题的答案发生了翻天覆地的改变：今天我们已知的宇宙比狩猎的祖先们所知道的最远距离——他们一生所行走的距离，大了10亿兆（10^{21}）倍。并且，这种视野的扩张不是一锤定音，而是屡次上演。每次，当我们有能力把窥探宇宙的镜头拉得更远一些时，就会发现，之前所发现的一切只是一个更庞大物体的一小部分。而从图1-2中可以看到，一个国家也只是一颗行星上的一小片土地，而这颗行星只是太阳系的一小部分，而太阳系只是银河系的小小一隅，银河系只是一个星系团的一个小角落，这个星系团也仅仅只是可观测宇宙的一小部分，甚至连可观测宇宙，在我看来都只是一层或几层平行宇宙中小小的一个。

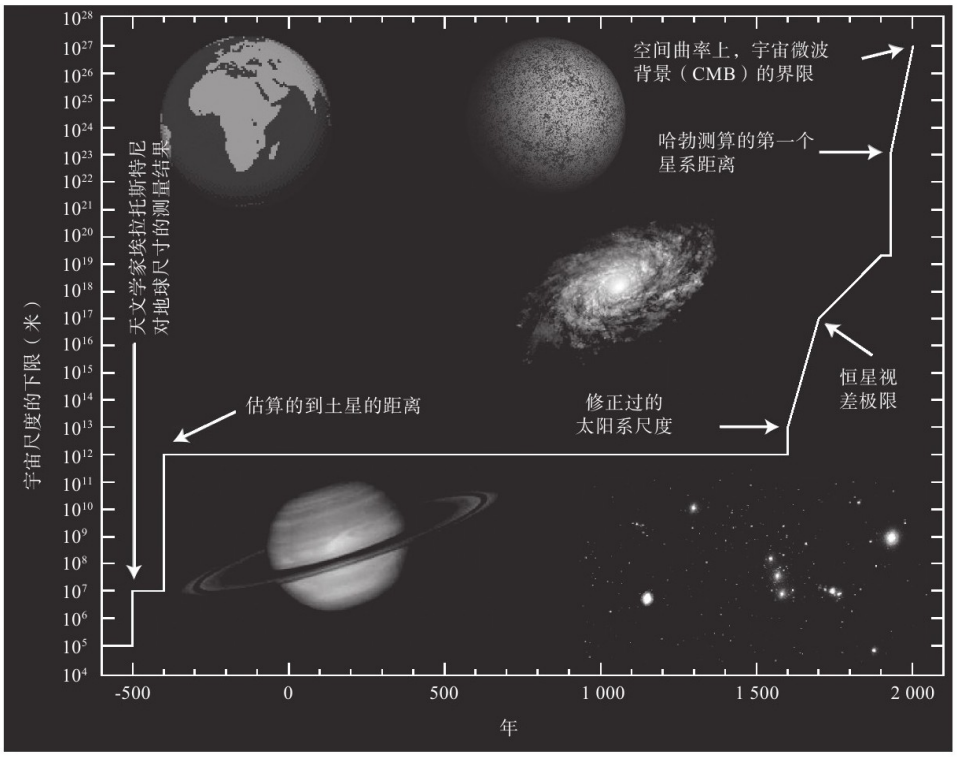


图1-1　从这张图中可以看到，我们认为的宇宙下限，随着时间的推移在逐渐扩大。而在纵坐标上，相邻刻度之间的差距竟有10倍之多！

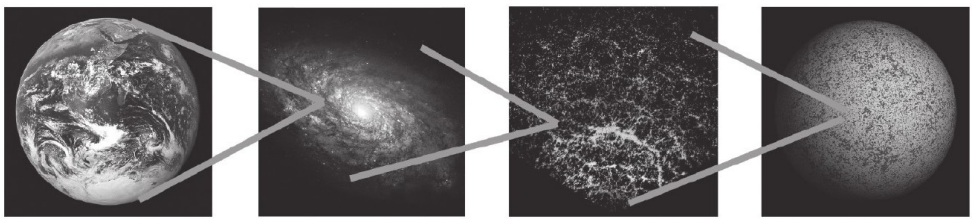


图1-2　每次，当我们有能力把窥探宇宙的镜头拉得更远一些，就会发现，之前所发现的一切只是一个更庞大物体的一小部分：一个国家也只是一颗行星上的一小片土地（左图1），这颗行星只是太阳系的一小部分，太阳系只是银河系的小小一隅（左图2），银河系只是一个星系团的小角落（右图2），这个星系团也仅仅只是可观测宇宙的一小部分（右图1），甚至连可观测宇宙，在我看来都只是一层或几层平行宇宙中小小的一个。

就像把头埋在沙子里的鸵鸟一样，人类总是一次又一次地假定，我们能看见的范围就是宇宙的全部了，并总是错误地认为我们人类位于宇宙的中心。在探索宇宙的漫长道路上，宇宙的大小总是一次又一次地被低估，这几乎成了一个永恒的主题。然而，图1-2却反映出第二个主题，**也是我认为非常有启发性的一个主题：我们不但一次又一次地低估了宇宙的尺度，还一次又一次地低估了人类智慧理解宇宙的能力。**山顶洞人的大脑与我们现代人的大脑差不多大小，当夜幕来临，既然他们不会坐在家里看电视，那么一定会仰望星空，并提出诸如“天上那些玩意儿是什么”“它们从哪里来”这样的问题。他们传颂着优美的神话故事，却没有意识到自己具有解答这些问题的潜能。秘诀不在于飞向群星深处去亲自勘察这些天体，而在于放飞你的想象。

如果你确信一件事不可能成功，于是就不去尝试，那这件事注定会失败。从事后诸葛亮的角度来看，物理学上所有重大的突破，本来都应该发生得更早一些，因为促使它发生的工具早就存在了。如果一个冰球运动员错误地认为自己的球棍坏掉了，那即使他面对一个无人防守的空门，也无法进球。在接下来的几章里，我将和你分享一些故事，你将看到，牛顿、亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann，宇宙学家、数学家）、乔治·伽莫夫（George Gamow，物理学家、天文学家）和休·埃弗雷特（Hugh Everett，物理学家）是如何克服这种“确信的失败”的。诺贝尔物理学奖得主史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）正是怀着这样的心情对我说：“在物理学的世界里，这是常发生的事情——我们并不是错在太把自己的理论当回事，而是错在太不把自己的理论当回事了。”

首先，让我们来看看如何测量地球的大小，以及地球和月球、太阳、其他恒星和其他星系之间的距离。我个人认为这是有史以来最饶有趣味的侦探故事之一，说不定正是它促成了现代科学的诞生，所以

我非常急切地想要和你分享，把它作为开胃菜，放在正餐前——别忘了，正餐是宇宙学领域最新的突破性进展。正如你所看到的那样，前4个例子并不复杂，只需要测量一些角度就可以了。但它们也无不证明：**对熟视无睹的日常事物提出疑问是一件多么重要的事情，因为最关键的线索可能就隐藏在其中。**

哥伦布的好运气

在人类最初驶向大海时，就注意到了一个事实：当船只驶向地平线时，船体总是比船帆消失得更早。这让他们开始产生一个观点：大海的表面是弯曲的，所以地球是球形的，就像太阳和月亮看起来的那样。古希腊人更是找到了直接的证据。他们发现，月食时，地球投影在月亮上的阴影是圆形的（见图1-3）。从航海中估算地球的尺度，其实很容易。[3]

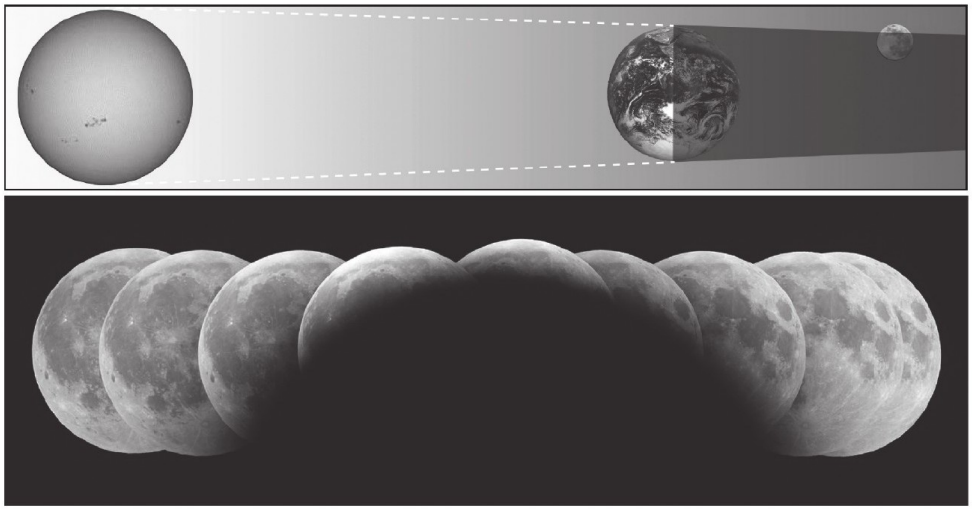


图1-3　在月食的过程中，月亮会穿越地球造成的阴影地带（如图中所示）。2 000多年前，古希腊天文学家、萨莫斯的阿里斯塔克斯（Aristarchus of Samos）将月食时地球投影在月亮上的阴影大小与月亮本身进行了比较，精确地推导出了月亮的大小约是地球的1/4。（延时摄影由安东尼·艾因梅米缇斯[Anthony Ayiomamitis]拍摄）

但2 200年前，古希腊天文学家埃拉托斯特尼（Eratosthenes）只巧妙地利用了一下角度，就计算出了一个更加精确的结果。他知道，夏至那天，在古埃及城市赛伊尼（Syene），正午的太阳会恰好出现在头顶；但在794公里以北的亚历山大港，此时的太阳会略偏南7.2°。这样，他计算出，走794公里的路程，相当于在地球周长的360°里绕了7.2°，那么地球的周长应该大致等于39 700公里（794×360°÷7.2°），这与现代测量的40 000公里相当接近。

令人惊讶的是，意大利航海家哥伦布却完全弄错了。他在计算里程时，错误地把阿拉伯的英里和意大利的英里搞混了，以为自己只用航行3 700公里就能到达东方。实际上，这个数字应该是19 600公里。如果他当时计算正确，可能就没人肯为他的航行埋单了。而假如美洲不存在，那他估计也早已葬身大海了。所以，有时候运气反而比正确更重要。

误打误撞地解开日地距离的谜题

月食和日食，在历史上曾激发了人类无数的恐惧、敬畏和神秘的传说。实际上，当哥伦布搁浅在牙买加时，他还设法预测1504年2月29日的月食，从而恐吓当地原住民。但是，月食也曾提供了优美的线索，让人类能对宇宙的大小猜测一二。2 000多年以前，古希腊天文学家阿里斯塔克斯注意到了图1-3中的现象：当地球运行到太阳和月亮之间时，就会出现月食，此时地球投影在月亮上的影子拥有一道圆滑的曲线边缘——而地球的这个圆形影子比月亮大上了好几倍。阿里斯塔克斯还意识到，这个阴影应该比地球本身要小一点点，因为地球比太阳小。他把这个复杂性考虑进去以后，计算出地球应该比月球大3.7倍。由于埃拉托斯特尼已经计算出了地球的周长，于是阿里斯塔克斯就这样简单地用其除以3.7，就得到了月球的周长！我认为，正是这一刻，人类开始放飞自己的想象力，并开启了征服宇宙的征程。在阿里斯塔克斯之前，无数人仰望夜空，疑惑月亮到底有多大，但他是第一

个真正算出结果的人。而他只用脑力就完成了这件事，并没有用火箭。

一个科学突破常常伴随着更多的发现。这一次，当人们知道了月球的大小，便明白了它与地球之间的距离。请抬起你的手，伸直手臂，看看周围有什么东西能被你的小拇指挡住。你的小拇指在视野中所覆盖的角度约为1°，大概是月亮覆盖范围的2倍——下次月亮出来时，记得验证一下哦。对一个覆盖0.5°范围的物体来说，它与你之间的距离大约等于它大小的115倍。所以，如果你坐飞机时，从窗户往外看，发现你用半个小指头就能覆盖住地面上一个50米大小的游泳池（奥林匹克运动会游泳比赛的泳池也这么大），那你就能算出飞机的航行高度大约为6 000米（115×50米）。用同样的方法，阿里斯塔克斯计算出月球与地球的距离为月球大小的115倍，差不多等于地球直径的30倍。

地球和太阳之间有多远

那么，太阳距离地球有多远呢？请再次伸出你的小拇指，你会发现，太阳覆盖的角度与月亮差不多，约为0.5°。太阳肯定比月球远多了，因为日全食时，月亮几乎才刚刚能把太阳挡住。那么，太阳到底有多远呢？这取决于它有多大——假如它是月亮的3倍大，它也得是月亮的3倍远，才能覆盖同样大小的角度。

阿里斯塔克斯在他那个年代可谓顺风顺水，他聪明地解决了这个问题。他意识到，在弦月发生时，太阳、月亮和地球组成了一个直角三角形。此时，我们能看见月球正面正好有一半被太阳照亮（见图1-4）。他估算了一下，此时月亮和太阳之间的角度大约为87°。这样，他知道了这个三角形的形状，以及地球和月亮相连组成的边的长度，于是，他用三角法算出了太阳和地球相连组成的边的长度，这也正是

太阳和地球之间的距离。他的结论是：太阳与地球之间的距离，大约比月球到地球间的距离远20倍，所以，它一定比月亮大了20倍。换句话说，太阳可真大啊，直径比地球大了5倍多。洞悉了这一点，阿里斯塔克斯早在天文学家哥白尼之前许多年，就提出了日心说：他认为，太阳比地球大那么多，应该是地球绕着太阳转更合理，而不是太阳绕着地球转。

这个故事具有很强的启发性，也具有一定的警示性。它不仅告诉我们聪明很重要，还告诫我们，量化我们测量的不确定性有多么重要。在第二点上，古希腊人显然不是很熟练，阿里斯塔克斯也不例外。原来，太阳正好照亮一半月亮的那一刻，并不是那么容易确定的。而且，就算确定了那一刻，月亮和太阳的角度也并不是87°，而是89.85°，和直角相差无几。这样一来，图1-4中那个三角形会变得特别细长：实际上，太阳与地球之间的距离差不多是阿里斯塔克斯估算出来的20倍远，直径是地球直径的109倍——所以，你可以在太阳里装进100多万个地球。不过，这个错误直到2 000年后才被纠正。2 000年后，哥白尼更加聪慧地利用几何学知识，算出了太阳系的大小和形状。他甚至还算出了所有行星轨道的形状和相对大小。但是，他所计算出的太阳系大小仍然是实际大小的1/20——相当于娃娃屋和真实房子的差距。

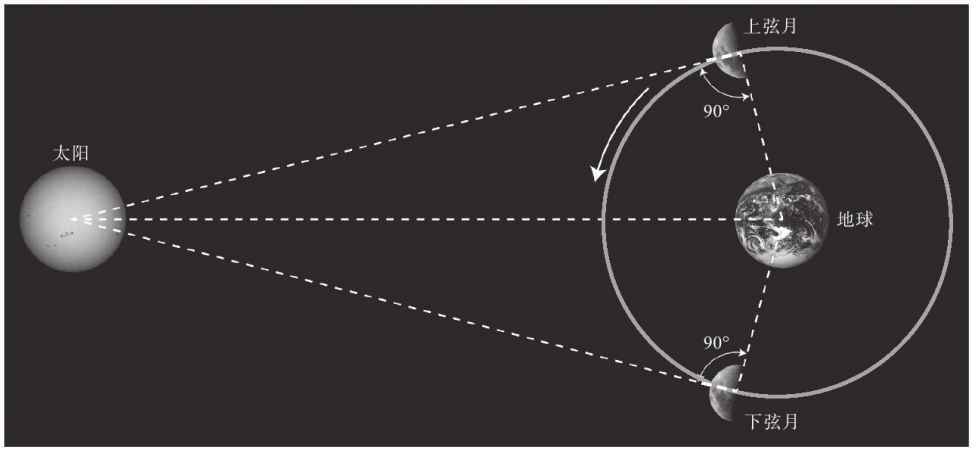


图1-4　通过测量弦月与太阳之间的角度，阿里斯塔克斯估算出了太阳与地球之间的距离。（这张图并不是按真实比例绘制的；实际上，太阳直径是地球直径的100多倍，日地距离是月地距离的400多倍。）

恒星离我们有多远

那么，天上的其他恒星呢？它们距离我们有多远呢？它们究竟是什么东西？我认为，这是史上最“悬疑”的侦探故事之一。算出月亮和太阳各自距地球的距离已经令人印象深刻了，但至少它们都有一些现成的线索可以用：月亮和太阳在空中会饶有趣味地来来去去，改变位置，而且它们还有形状和角度可以测量。而其他恒星，要测量它们有多远，听起来简直毫无希望！它们看起来只是夜空中暗淡的小白点，你要瞪大眼睛、仔细地看啊看，结果会发现……它们依然是暗淡的小白点，根本没有可辨认的形状和大小，只是远远的一个小光点。而且，这些恒星好像从来不会移动，除了随着整个星空一起旋转——我们也知道，这并不是星空在旋转，而是地球在旋转所造成的错觉。

一些古人猜测，那些恒星是漆黑巨球上的一个个小孔，遥远的光从孔里射进来。意大利天文学家、自然科学家布鲁诺则不认同这种观点，他认为其他恒星是和太阳一样的物体，只是太过遥远了，它们甚至可能也有自己的行星和文明——天主教会很不喜欢这个观点，于是，1600年，他们把布鲁诺烧死在了火刑柱上。

1608年，突然出现了一丝希望的光芒：人类发明了望远镜！伽利略很快对其进行了改进，并用自己设计的最先进的望远镜凝望那些遥远的星星。结果，他看见了……竟然还是暗淡的小白点！一切又回到了起点。我记得，很小的时候，我在祖母的钢琴上弹奏“一闪一闪亮晶晶”。在这首《小星星》首次发表的1806年，里面那句“How I wonder what you are”（究竟何物现奇景）回荡在许多人的脑海里，但却没人真正知道这个问题的答案。

如果真如布鲁诺所认为的那样，其他恒星只是遥远的太阳，那它们一定比太阳远多了，因为只有异乎寻常的遥远，才会让它们显得如

此暗淡。那么，它们距离我们究竟有多远呢？这取决于它们到底有多亮。这也是我们很想知道的问题。在《小星星》发表的32年后，德国数学家、天文学家费里德里希·贝塞尔（Friedrich Bessel）终于在这个“悬案”上有了突破。请你伸直手臂，竖起大拇指，交替闭上左眼和右眼几次。看到了吗？你的大拇指在背景画面中以固定的角度跳来跳去，忽左忽右。接着，移动大拇指，让它离你的眼睛越来越近，你会发现，它跳跃的角度在变大。天文学家把这个跳跃的角度叫作“视差”（parallax）。利用这个视差，你能清楚地算出你的大拇指有多远。你不用担心计算的问题，因为在你不经意间，你的大脑已经帮你算出来了——大脑能根据物体在两只眼睛中的不同角度来判断它的距离，这对深度知觉的形成至关重要，也正是这样的能力让我们能看到三维立体的东西。

两只眼睛之间的距离越大，我们对遥远物体的深度知觉就越好。在天文学上，我们同样可以利用这种视差的小把戏，假装我们拥有两只距离3 000亿米的眼睛，这正是地球绕太阳旋转的轨道直径。我们能做到这一点，是因为我们能将相隔6个月时间拍摄的望远镜照片进行对比，在这两个时间点，地球位于太阳的两端。贝塞尔就这么做了。结果，他发现，在这两张照片中，尽管大部分恒星的位置几乎都没变化，却有一颗特立独行的恒星：它有一个晦涩的名字叫“天鹅座61”（61Cygni）。这颗恒星移动了一个很小的角度，可以算出从它的距离约是太阳距离的100万倍——这个距离非常之远，它的星光到达地球需要11年，而太阳光到达地球却只需要8分钟。

不久以后，又有一些恒星的视差被测量出来，这样，我们终于知道了这些暗淡小白点的距离！这是如何计算出来的呢？在夜晚，当一辆车离你远去时，你会发现尾灯的亮度与距离的平方成反比（也就是说，离你2倍远时，亮度下降4倍）。关于天鹅座61，由于贝塞尔知道了它的距离，利用这个平方反比的关系，他计算出了它的亮度。他的

结果是，天鹅座61的亮度与太阳相差无几，也就是说，布鲁诺的观点一直都是正确的！

差不多在同一时间，采用另一个完全不同的方法，人们又取得了另一个重大突破。1814年，德国眼镜商约瑟夫·冯·弗劳恩霍夫（Joseph von Fraunhofer）发明了一个名为“光谱仪”的装置，它可以根据光的组成，将其分解成彩虹般的色谱，并观察它们精致的细节。他发现，在彩虹般的色带里，有一些神秘的暗条（见图1-5），而这些暗条在光谱中的位置取决于光源的材料，就像光的指纹一样。接下来的几十年里，人们仔细研究和测量了这些光谱，并根据常见的物质对它们进行了分类。用同样的知识，在夜店里，你可以给朋友们玩一个小把戏，通过灯光的颜色来猜测物质的成分，而不用靠过去仔细查看。



图1-5　我儿子亚历山大拍到的这个彩虹，并不会给我们带来黄金，而更像是一个知识的金矿，告诉我们原子和恒星的运转方式。在第6章，我们将会一起探索，不同颜色的相对强度是因为光是由微小的粒子（光子）组成的。那些暗条的位置和强度也可以用量子力学中的薛定谔方程计算出来。

令人们始料不及的是，对太阳光谱的分析证明，太阳这个挂在天边的神秘的炙热圆球，竟然是由地球上常见的元素组成的，比如氢元素。并且，用光谱仪分析望远镜看到的星光后，人们发现其他所有恒星的成分和太阳几乎完全一样，都是由一些气体元素混合而成！这再一次证明了布鲁诺是正确的：**其他恒星的确就像是遥远的太阳，不管**

从释放的能量还是从组成的成分来看，都是如此。因此，短短几十年里，恒星们从神秘莫测的小白点，变成了燃烧着炽热气体的巨球，我们甚至可以测量出它们的化学成分。

光谱，就是天文学家的金矿。每次你认为自己已经了解了它的所有秘密时，它都还会用更多神秘的线索来证明你的肤浅。比如，光谱能让你测量出一个物体的温度，而不用温度计去接触它。不用摸，你就知道一块烧白的铁比烧红的铁更烫。同样，白色的恒星比红色的恒星更加炙热。通过光谱仪，你能精确地测量出它的温度。然而，这并不是光谱能告诉我们的全部：通过光谱信息，你还能知道一颗恒星的大小。这很像做填字游戏，填出一个词就能暗示出下一个词。那么，通过温度如何能得知恒星的大小呢？秘诀在于，**温度可以告诉我们恒星表面每平方米释放出多少光。**如果算出恒星总共发出了多少光（通过它的距离和视亮度），你就能算出恒星的表面积，也就能算出它的大小了。

这还不够。恒星光谱中还暗藏着关于它运动的线索。随着恒星的运动，光线的频率（也就是光的颜色）会发生轻微的偏移，这被称为“多普勒效应”。想感受一下多普勒效应，就去听听马路上的汽车吧：当汽车靠近你时，声音的频率会变高；当它们飞驰而去时，声音又会变低。和我们的太阳不同，许多恒星都有一颗伴星，它们处于稳定的双边关系，组成一个双星系统，绕着对方规律地旋转，就像在跳圆舞曲。这种恒星圆舞曲也会表现出多普勒效应，使得它们的光谱周而复始地移来移去，每转一圈就循环一次。光谱移动的大小，暗示着它们运动的速度。通过观测，我们有时还能测量出双星之间的距离。将这些信息汇集在一起，我们就能使出大招了：不通过天秤就能称出恒星的重量。我们的秘诀就是牛顿运动定律和万有引力定律，根据观测到的轨道，计算出质量。有时，多普勒效应甚至能告诉我们，某些恒星周围竟然也有行星在绕着它们旋转。当一颗行星运行到恒星前方

时，恒星的亮度会轻微地降低，这能让我们算出行星的大小；而光谱中的细微变化则能告诉我们这颗行星是否有大气层，甚至能告诉我们大气层的成分。光谱线就像是一个神奇的礼品盒，可以不停地从中掏出神奇的礼物。比如，如果我们知道一颗恒星的温度，那测量光谱线的宽度就能算出它的气压；测量光谱线分裂成多少邻近的支线，我们就能算出它表面的磁场有多强。

总之，恒星发出的暗淡光线中，隐藏着数不尽的秘密。通过精密的测量和分析，我们能解码出它们的距离、大小、质量、成分、温度、压力和磁场，还能知道那里是否也有一个星系类似我们的太阳系。人类竟然能从神秘莫测的小白点中，推导出如此丰富的知识，这实在是一个壮举。我想，史上最厉害的神探夏洛克·福尔摩斯和赫尔克里·波洛（Hercule Poirot），也一定会为我们感到骄傲！

从百万到十亿再到万亿，不断刷新尺度的星系

我的祖母西格纳去世时，已有102岁高龄。她离开时，我花了很多时间回忆她的人生。令我惊讶的是，她竟然生长在一个完全不同的宇宙观中。当她上大学时，我们对宇宙的认识仅仅只是太阳系加上它周围的一堆星星。我的祖母和她的朋友或许也曾想过星星有多么遥远、它们的光线到达我们需要很长时间（少则几年，多则上千年）。而如今，我们已经知道，哪怕是距离我们上千光年的星星，也只是我们“宇宙后院”的邻居而已。

如果祖母的大学里有天文学家，那么他们一定曾辩论过“星云”是什么，这是一种云彩一般的天体，弥散在夜空中，有的还拥有美丽的旋涡，就像凡·高的名画《星夜》（*Starry Night*）描绘的那样。这究竟是什么东西呢？当时许多天文学家认为，它们只是无聊的宇宙气体云，飘浮在恒星之间。但有的天文学家却持有更激进的观点，认

为它们是“岛宇宙”，今天被称为“星系”。这是由恒星组成的庞大集合，由于太过遥远，用望远镜也无法看清每一颗星星，所以呈现出一抹朦胧的光霾。为了解决这个争端，天文学家们需要测量这些星云的距离。那么，用什么方法来测量呢？

视差测距的方法，对较近的恒星很有效，但在星云上却无计可施：它们太过遥远，视差太小了，根本无法观测。还有什么方法能测量遥远的距离呢？想象一下，如果你用望远镜观察一个遥远的灯泡，发现上面竟然印着“100瓦”的字样，这就好办多了：你只需要利用前面说过的平方反比关系，根据它的视亮度，就能计算出这个灯泡的距离。天文学家把这种拥有固定亮度的物体叫作“标准烛光”（standard candles）。然而，天文学家们沮丧地发现，恒星根本和“标准”二字无缘，它们的亮度千差万别，有的比太阳亮百万倍，有的只是太阳亮度的几千分之一。但是，如果你观察到一颗恒星上标着“4×10^{26}瓦”（这正是太阳的瓦数），你就得到了一个标准烛光，并能算出它的距离，就像那颗灯泡一样。不幸中的万幸，大自然赐予了我们这种标准烛光，它是一种特别的恒星，叫作“造父变星”（Cepheid variables）。造父变星的亮度会随时间来回变化，与此同时，其大小也在发生着周期性的变化。1912年，哈佛大学天文学家汉丽埃塔·勒维特（Henrietta Swan Leavitt）发现，造父变星的脉动频率正像一个瓦特计量器：两次脉动之间间隔的时间越长，它们释放出的光的瓦数就越大。

造父变星还有一个优势是，它们很亮，在很远的地方也能看得见（有一些甚至比太阳亮10万倍）。美国天文学家埃德温·哈勃（Edwin Hubble）发现，在“仙女座星云”中——这是夜空中一团月亮大小的光雾，在远离城市光照的地方肉眼可见，有一些造父变星。当时美国加州刚建好了一座胡克（Hooker）望远镜，拥有当时全世界最大的2.5米反射镜。用这座望远镜，哈勃测量了仙女座内造父变星的脉动频

率，利用勒维特的方程，算出它们的实际亮度，并与它们看起来的亮度进行对比，从而计算出了它们的距离。1925年，当哈勃在一个会议上宣布自己的结论时，在场所有人无不十分惊讶：他声称，仙女座是一个远在100万光年以外的星系。这比我祖母在夜空中见到的最远星星还要远上1 000倍！其实，今天我们知道，仙女座的距离比哈勃估算的还要更远一些，大约在300万光年以外。所以，哈勃不经意间延续了阿里斯塔克斯和哥白尼的传统，再一次低估了宇宙的尺度。

接下来的几年，哈勃和其他天文学家陆续发现了许多遥远的星系，把人类的视野从“百万光年”扩展到了“十亿光年”。在第4章，我们将更进一步，把这个数量级扩大到“万亿光年”的级别。

空间的本质皆数学

最后，让我们再回到那个幼儿园小朋友问的问题：“空间是无边无际的吗？”此刻，我们可以从两个角度来回答这个问题：观测角度和理论角度。到此为止，我们已基本完成了前者，回顾了一下测量技术如何一步步揭开越发遥远、永无止境的宇宙秘密。同样，从理论角度看，人类也取得了许多进展。首先，空间为什么不是无限的呢？正如我和幼儿园小朋友所讨论的那样，如果在空间中走着走着竟然遇到一个图1-6里的标识，警告我们已经到达空间的尽头，那可真是太诡异了！当我还是个小孩子时，我就曾思考过这个问题：如果真有这么个标识，那它后面又是什么呢？在当时的我看来，担心走到空间的尽头，就像古代的水手担心船会从大地的边缘掉下去一样可笑。于是，我用纯粹的逻辑分析总结道，在空间中，你能永远走下去，碰不到边界，所以空间是无边无际的。实际上，古希腊的欧几里得就用纯粹的逻辑推理得出，几何实际上也是数学，它可以精确地描述无限的三维空间，与其他数学结构（比如数字）无异。他发展了这个描述三维空

间的优美数学理论及其几何性质，并被人们广泛接受，成为人们心中唯一符合逻辑的物理空间世界观。



图1-6　我们很难想象宇宙会有一个边界。如果它真的有一个终点，那终点后面又是什么呢？

然而，在19世纪初，数学家卡尔·高斯（Carl F.Gauss）、雅诺什·鲍耶（János Bolyai）和尼古拉·罗巴切夫斯基（Nikolai Lobachevsky）都发现，统一的三维空间中可能还存在其他某些合理的逻辑解释。鲍耶在给父亲的信中兴奋地写道：“从虚无中，我创造出了一个奇异的新宇宙。”这些新空间遵循着不同的规则，比如，它们并不像欧几里得所说的那样，必须是无限的；甚至三角形内角和都不一定非得是欧几里得规定的180°。来看看图1-7，想象一下，在图中三个立体物体的二维曲面上分别画一个三角形。对左边的球面来说，三个角加起来大于180°；对中间的圆柱面来说，内角和等于180°；而右边的双曲面上，三个内角和小于180°。并且，尽管球面的二维表面是有限的，却没有任何边界。

这个例子说明，只要一个面不是平的，就能打破欧几里得的几何规则。不过，高斯和其他数学家的想法比这个更激进。他们认为，空间也可以弯曲，即使它并不是任何物体的表面。

想象一下，假设你是一只盲眼的蚂蚁，你想确定你处在图1-7中的哪个曲面上，于是你开始爬来爬去。你感到你生活在一个二维的空间里，因为你没法接触到第三个维度（也就是说，你没法离开你所在的曲面），但这并不阻碍你的“侦探”工作：你还是可以确定一条直线（两点之间最短的线），所以你只需要简单地加一下三角形的内角和就可以了。如果你加起来的角度是270°，你就可以宣布：“啊哈！比180°多耶，我一定是在一个球体上！”为了给你的蚂蚁同伴们更多惊喜，你甚至可以计算出走多远才能回到出发点。我们日常所说的所有几何特征，比如点、线、角、曲率等，都可以在一个二维曲面上定义出来，根本不需要用到第三个维度。这意味着，即使不存在第三个维度，数学家们也可以定义出一个弯曲的二维面——这是一个弯曲的二维空间，只有它本身，而不是某个物体的表面。

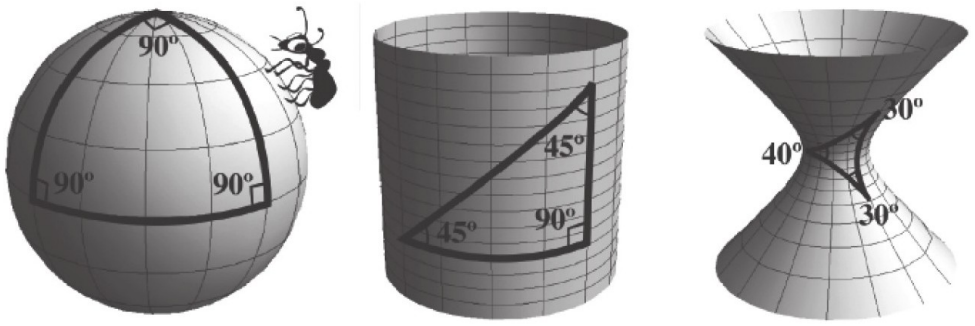


图1-7　如果你在这些曲面上画三角形，它们的内角和可能大于180°（左图），也可能等于180°（中图），也可能小于180°（右图）。爱因斯坦告诉我们，在三维空间里，也存在这三种可能性。

对于大多数人来说，这些非欧几里得几何的空间，完全是神秘的抽象概念，对我们的物理世界来说毫无用处。然而，爱因斯坦带着他的广义相对论，登上了历史舞台。他仿佛在告诉人类：“我们真的是蚂蚁！”在爱因斯坦的理论中，三维空间可以弯曲，即使缺乏让它可以弯向的隐蔽第四维。所以，关于我们的空间究竟是什么样的，不能像欧几里得的粉丝们所希望的那样，只依靠纯粹的逻辑推理。它只能

通过测量来解决，比如在空间中画一个巨大的三角形（可以用光线画出边缘），并把它的内角加起来，看看是不是等于180°。在第3章，我将告诉你，我和同行们玩这个游戏玩得多开心。那么，结果如何呢？如果你画的三角形有整个宇宙那么大，那它的内角和应该差不多等于180°；但是如果这个三角形里满满当当地塞着一个中子星或黑洞，那内角和就会大于180°。所以，物理空间的形状比图1-7里的三个例子复杂多了。

再次回到幼儿园小朋友的问题上。我们知道，爱因斯坦的理论允许空间是有限的，但并不是以图1-6中那种傻乎乎的方式，而是以弯曲的形式。举个例子，如果我们的三维空间弯曲了，就像一个四维超球面的表面，那么如果我们沿着直线一直往前走，走啊走啊，最后会从相反的方向回到起点。我们并不会从三维空间的边缘掉下去，因为它根本没有边界。就像图1-7里的蚂蚁一样，它在球面上爬行时，永远不会遇到边界。

实际上，爱因斯坦的理论哪怕在空间不是弯曲的情况下仍然允许空间是有限的！看看图1-7中的圆柱体，从数学上来说，与其说它是弯曲的，不如说它是平的：因为在一张卷成圆柱形的纸上画一个三角形，它的内角和等于180°。让我们用剪刀把这个三角形剪下来，你会发现它能平摊在桌面上。而对球面和双曲面上的三角形来说，却做不到这一点，除非你把纸弄皱或撕破。然而，尽管图1-7中的圆柱面在蚂蚁看来是平的，也就是说，如果蚂蚁沿着一条水平直线前进，最终依然会回到它的出发点。数学家把这种空间的连接性称为“拓扑性”（topology），将所有维度上都连接着自身的平滑空间称为“环面”（torus）。一个二维环面的拓扑性与面包圈（就是中间有一个洞那种）很相似。**爱因斯坦的理论允许我们栖息的物理空间是一个三维曲面，这样，它既是平滑的，又是有限的。或者，它也可能是无限的。**

总而言之，我们居住的空间可能是无限的，也可能是有限的——根据我们对空间性质的最佳理论，也就是爱因斯坦的广义相对论，这两种可能性都完全说得通。那么，空间到底是无限还是有限？我们将在第3章和第4章继续讨论这个迷人的话题，在这两章，我们将找到空间无限的证据。然而，幼儿园小朋友的问题引发了另一个有趣的问题：“空间究竟是什么？”直观看来，我们都认为空间是一种物理实体，编织出了整个物质世界。然而现在，我们已经窥探到，数学家眼中的空间只是一种数学的东西。对他们来说，研究空间就像研究几何学，从这个意义上看，它所有的固有性质都是数学性质，比如维度、曲率和拓扑性。在第9章，我们将进一步讨论这个话题，你将看到，从定义良好的角度看，我们的整个物理实在只是一个纯粹的数学物体。

在本章，我们探索了我们在空间中的位置，呈现出了一个极其庞大的宇宙——比我们祖先所认为的大多了。要理解宇宙最深处发生了什么，我们可以用望远镜来观察。然而，只探索我们在空间中的位置是不够的，我们还需要了解我们在时间中的位置。这正是下一章的主题。

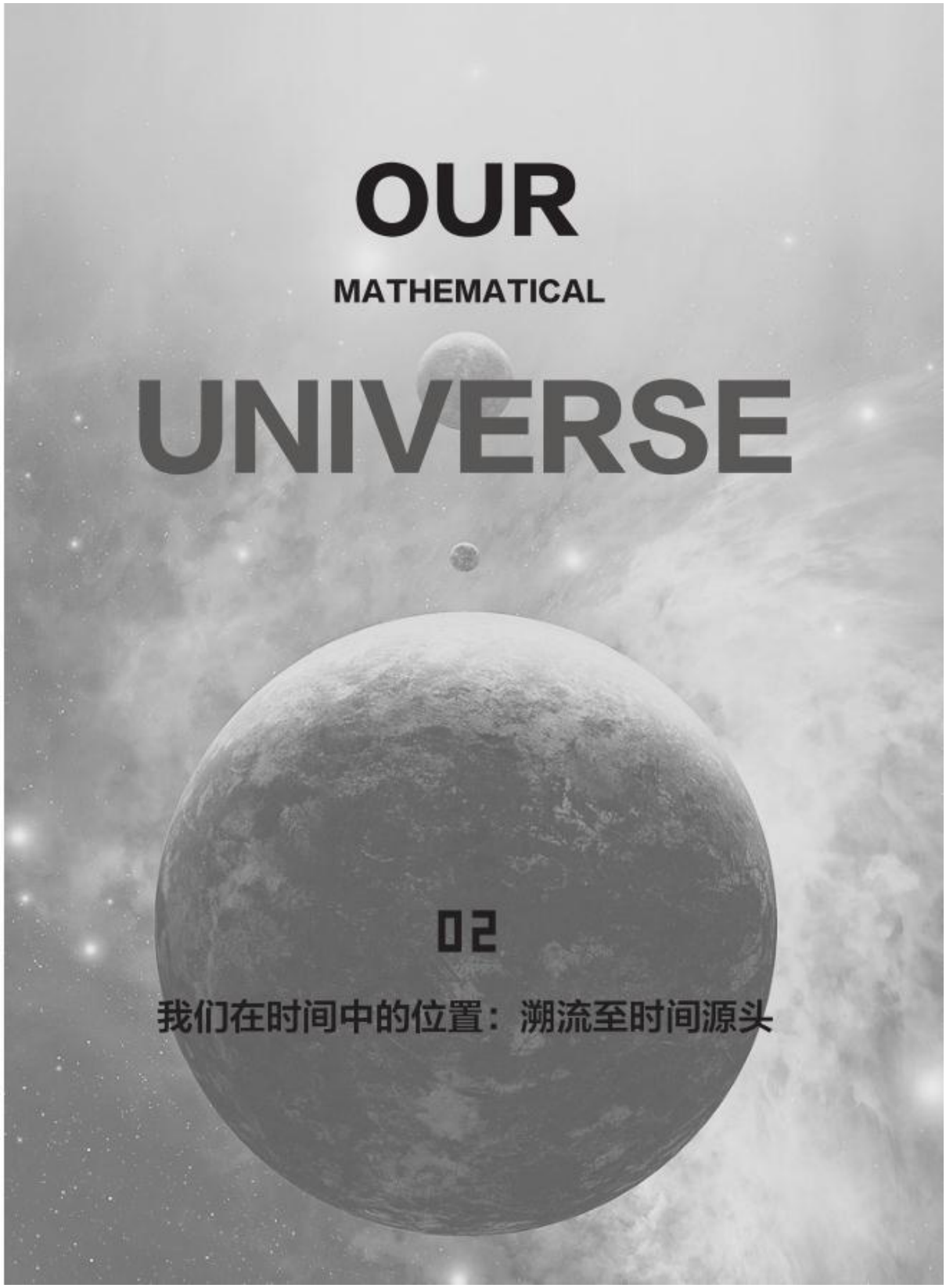


◆人类一次又一次地意识到，我们周围的物理世界比想象的大多了。我们所知的一切，都只是一个更庞大结构的一小部分：地球、太阳系、星系、超星系团，等等。

◆爱因斯坦的广义相对论允许空间是无限的。

◆广义相对论也允许空间是有限的，但却没有边界。所以，如果你往前不停地走啊走，你可能会从相反的方向回到出发点。

◆空间编织出了我们的物理世界，它本身可能只是一个纯粹的数学物体，因为从某种意义上讲，它所有的固有性质都是数学性质——代表维度、曲率和拓扑性的数字。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
02
我们在时间中的位置：溯流至时间源头

知之为知之，不知为不知，是知也。

孔子

最可怕的无知，就是拒绝接受你所不知道的东西。

韦恩·戴尔（Wayne Dyer）

我们的太阳系从何而来？我儿子菲利普上二年级时，卷入了一场热烈的讨论。

“我认为太阳系是上帝造出来的。”他班上一位女生说道。

“但我爸爸说太阳系是一团巨大的分子云造出来的。”菲利普插嘴说。

“那这团巨大的分子云又是从哪里来的呢？”另一位男孩问。

“也许是上帝造出了这团分子云，然后这团分子云再造出了我们的太阳系。”第一个女孩说。

我相信，自从人类直立行走以来，就开始仰望夜空，好奇那些星星从何而来。从古至今，人们都知道，有些事情是可以被理解的，而有些则如秘密般深藏不露、不为人知。比如，我们知道此时此刻正在发生什么，也知道那些与我们密切相关的事情，诸如周遭有何物、早餐吃什么。但是，望向更遥远的地方和更久远的过去，我们仿佛遇到

了一块知识的巨石，横亘在路上。巨石之外是无知的世界。在上一章中，我们目睹了人类如何用智慧推着这块巨石往前，将我们对空间的认知逐步扩大——从地球到太阳系，再到星系，最后到达数十亿光年外的宇宙深处。那么现在，让我们开始第二段智慧的探险，一起来看看人类如何推着这块无知的巨石溯流而上，到达时间的源头。

“月亮为什么不会掉下来呢？”我们用这个问题，来开始这段冒险。

太阳系制造机：45亿年的引力与压力之战

直到约400年前，“月亮为什么不会掉下来呢”这个问题看起来还毫无解决的希望。那时候，人们刚通过巧妙的观测，用肉眼可见的线索确定了太阳、月亮、水星、金星、火星、土星和木星的位置。哥白尼、第谷·布拉赫（Tycho Brahe）、约翰尼斯·开普勒（Johannes Kepler）等科学家甚至计算出了这些天体的运动规律——太阳系就像钟表，每个部分都循着完美的圆形轨道，周而复始地运动着，仿佛永无止境。没有迹象表明它有一天会停下来，更不知道它是否始于过去的某一天。那么，太阳系是永续永存的吗？如果不是，它是从哪里来的呢？

当时市场上卖的钟表，对齿轮、弹簧等部件的工作原理，人们都了如指掌。对一只特定的钟表，人们不仅能预测它的未来，还能推知它的过去。比如，你能准确预测一只手表会按稳定的速度运行下去，但由于摩擦力的存在，如果你不上发条，它就会慢慢停下来。通过分析，你能知道它上个月什么时候上过发条。那么，天体也遵循这样的规律吗？是否也存在某种类似摩擦力的力，影响着它们的运动，最终改变它们的轨迹呢？如果事实果真如此，那我们就能像对待钟表一样，算出它形成的时间和方式。

答案却似一记响亮的耳光：“不是！”我们已经很了解地球上的物体在空间中的运动，不管是随手扔一个石子，还是古罗马的投石机和发射铁球的大炮，它们的运动轨迹都很容易预测，并且无一例外都会掉落到地面上。然而，天体们却仿佛遵循着与地球上的物体完全不同的定律。比如，如果月亮是天上的一块大石头，为何它不会像其他石块一样掉到地面上呢？经典的回答是：月亮是天堂之物，而天堂之物必然遵循着不同的规律，不受万有引力的影响，所以它不会掉下来。还有一些人进一步解释道：天堂之物之所以与众不同，是因为它们是完美的。不信你看，它们有着完美的球形外表，它们运行的轨迹是完美的圆形——完美的东西才不会掉到不完美的地面上来呢。而地球上处处充斥着不完美：摩擦力会让物体减速，火焰会熄灭，人会死去。而在天堂，物体之间没有摩擦力，太阳不会熄灭，时间一望无垠，没有尽头。

然而，这种对天堂的美好幻想禁不起推敲。对第谷的观测结果进行分析后，开普勒总结道，行星的轨道并不是圆形，而是被拉长的椭圆形，这可一点也不完美。伽利略用望远镜发现，太阳也并不完美，上面像锈蚀的铁片一样散布着丑陋的黑色斑点；月球就更不用说了，它并不是一个浑圆光滑的完美球体，而是布满了起伏的丘壑和巨大的凹坑。那么，既然月亮并不完美，为什么它不会掉下来呢？

最后，牛顿终于解决了这个问题，他的想法很简单，但也很激进，那就是：天堂之物遵循着与地球之物完全相同的规律。既然月亮不会像石头一样掉下来，那我们能不能扔出一块石头，也像月亮一样永远不掉下来呢？太阳比地球重多了，扔出的石头为何不会掉到太阳上去呢？牛顿猜想，一定是因为太阳太遥远，万有引力随距离增大而减小。那么，是否能以极快的速度向上抛出一块石头，在引力把它拉回地面之前，就逃脱地球呢？靠牛顿自己的力气肯定不行，但他意识到，如果有一架假想的超级大炮，只要它能给予石头足够的速度，那

石头就能逃离地球。正如图2-1所示，水平射出一枚炮弹，它的命运将取决于它的速度——如果它的速度低于某个神奇的值，那它最终将会撞毁在地面上。如果你以越来越快的速度发射炮弹，那它们在坠毁之前所飞行的距离会越来越长。直到你终于到达那个神奇速度，炮弹就不再掉下来，而是保持在固定的高度，以接近正圆的轨道，绕着地球转圈——和月亮一样！在地面上，牛顿用很多东西做过实验，比如石头、苹果等，最终计算出了这个神奇的速度——呼啸而过的每秒7.9公里！

牛顿认为，如果月球也遵循同样的运动规律，他也能算出它保持圆形轨道所需要的速度。可是有个关键的线索缺失了，即在月球那样遥远的距离，地球的引力会下降到什么程度呢？由于月球以圆形轨道绕地球旋转，每个月转一圈，而这个圆形轨道的半径早已被阿里斯塔克斯算出来了，所以牛顿据此算出了月球的速度——大约每秒1公里，与M16步枪子弹的速度差不多。接下来，牛顿总结出了一个影响深远的结论：**假如地球和月球之间的引力与距离的平方成反比，那么，使月球正好绕圆形轨道运行的那个“神奇速度”恰好等于观测到的月球速度！**这样，牛顿终于发现了万有引力定律，它放诸四海而皆准，不论在地球上还是天上，都一样。

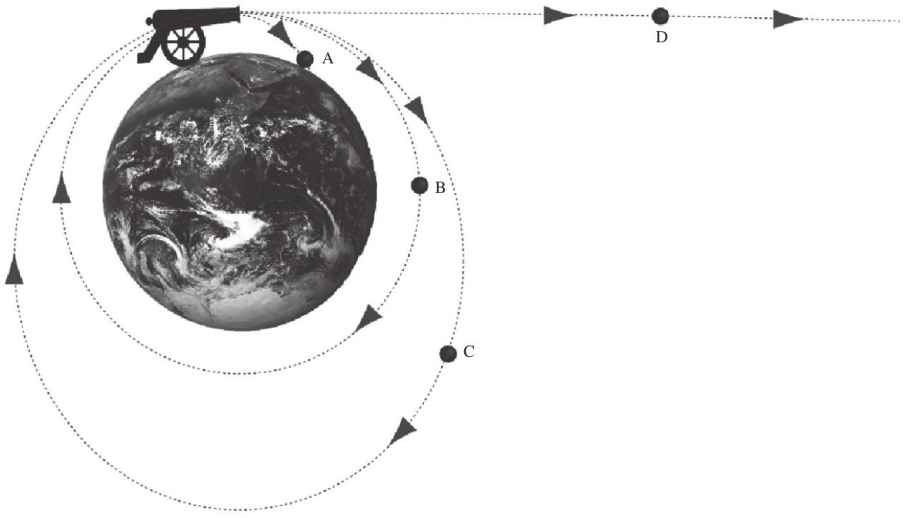


图2-1　如果炮弹发射的速度大于每秒11.2公里（D），它就能一飞冲天，逃离地球的引力（忽略空气阻力）。如果速度稍慢一些（C），它将进入椭圆轨道，绕地球旋转。如果发射的速度是每秒7.9公里（B），它的轨道将是一个完美的正圆形。如果速度再低一些（A），炮弹最终将落回地面上。

一时间，所有谜题都像拼图游戏的碎片一样各自归位。牛顿将万有引力定律与他制定的运动定律结合起来，不仅能解释月亮的运动，还能解释行星绕太阳旋转的运动。他还通过数学推导出，最常见的轨道形状是椭圆形，而不是正圆形，这正是开普勒百思不得其解的问题。

与所有重大的科学突破一样，牛顿的发现能回答的问题远远超过了那些促使他开始思考的难题。比如，这一定律还能解释潮汐现象——太阳和月亮的万有引力吸引着地球上的海水，但对更近那一面的海水吸引力更大一些，使得海水随地球的自转而被搅动起来。牛顿定律还表明能量是守恒的（在物理学上，守恒的意思是指一成不变），所以如果能量出现在某处，它一定不是从虚无中凭空出现的，一定是从别处而来。潮汐消耗了大量的能量（其中一些被潮力发电站利用），那这些能量来自何处呢？大部分来自地球的自转，所以潮汐的摩擦力使得地球自转变得越来越慢——如果你总觉得一天24小时不够用，没关系，等到两亿年后，地球上的一天将延长到25个小时！

这说明，摩擦力也会影响天体的运动，摧毁了“太阳系永续永存”的思想——在过去，地球的自转一定比现在快。你还能计算出，今天的地球-月球系统的年龄不会超过40亿～50亿年，否则那时的地球自转速度会超级快，巨大的离心力会将地球撕得粉碎。我们终于对太阳系的起源有了第一个线索！“案发时间”总算出现了一线曙光。

牛顿的发现为人类思想插上了翅膀，走出了征服空间的第一步。他证明，通过地面上的实验，我们也可以发现物理定律，并能将其推

而广之，解释天上发生的事情。尽管牛顿的专长只是万有引力和运动，但他的这种思想实验却像燎原野火一样，逐渐蔓延到了其他领域，比如光、气体、固体、电现象和磁现象。人们展开了大胆的猜测，不仅对肉眼可见的宏观现象，还针对微观现象，将牛顿的运动定律运用于原子，来解释气体等许多物质的性质。一场科学革命拉开了序幕，开启了工业革命和信息时代的大门。反过来，这些进步帮助我们创造出强大的计算机，又帮助我们进一步推动了科学的发展，解开物理方程，回答人们曾百思不得其解的许多有趣问题。

物理定律可以被运用在很多方面。一般情况下，我们希望能用现状预测未来，比如预报天气；也可以把这些公式反过来，用现状去推演过去，比如重建哥伦布在牙买加看见的月食的具体细节。还有第三种方式是，想象一种假设的条件，运用物理公式推算它随时间的变化趋势，比如，模拟一次目的地为火星的火箭发射，计算它是否能如期到达。运用第三种方法，我们找到了太阳系起源的新线索。

想象一下，外太空有一团极大的气体云，随着时间的流逝，它会发生什么呢？物理定律认为，它的命运取决于两股力量之间无休止的战役——万有引力和压力，前者想压缩它，而后者则想把它撑大。

如果引力占了上风，气体云开始压缩，它就会变得越来越热（这就是为什么用气筒给自行车打气时会发热），这个过程反过来又增大了压力，遏制了引力导致的进一步压缩。如果引力和压力势均力敌，相互平衡，这团气体会长时间保持稳定状态。但休战总是短暂的，最终都会被打破。由于温度很高，气体云开始闪耀出光芒，把保持压力的热能辐射出去。于是压力变小，引力又会进一步压缩气体，长此以往地进行下去。

如果我们将引力和压力的物理定律输入计算机，就能模拟出这场战役的各种细节。最后，密度最大的区域变得无比炙热和致密，变成

了一个核聚变反应堆——在那里，氢原子聚变生成氦，同时巨大的引力保护它们不会炸开。此时，一颗恒星诞生了。这颗新生恒星最外层的气体非常炎热，闪耀着令人目眩的光芒。光芒吹散气体云剩下的部分，让它显现在我们望远镜的视野中。

让我们倒带，重播一下，再从另外一个角度看看刚才的过程。在气体云逐渐压缩时，气体轻微的旋转将会被放大，就像冰上舞者收拢手臂时会转得更快一样，产生巨大的离心力。由于离心力的存在，引力无法将所有气体压缩成一个点。取而代之的是，引力把气体压成了像比萨一样的形状——很像我小时候学校附近的比萨店厨师用手旋转比萨面饼，让它变扁平一样。这个“宇宙比萨”的主要成分是氢气和氦气。但是，如果配料表中还包括一些更重的元素，比如碳、氧和硅，那么，在中心生成炙热恒星的同时，外层物质将会形成一种较冷的物体——行星。当新生恒星将剩下的“比萨面团”吹跑之后，行星就会显露出它们的面孔。由于所有的旋转（物理学家称之为“角动量”）都来自最初那团气体云的旋转，所以，不出所料，太阳系的所有行星都往相同的方向公转（如果你从北极的方向往下看，为逆时针方向），与太阳每月自转一周的方向正好相同。

这种太阳系起源的理论不仅被理论计算所支持，还与望远镜对其他恒星系的观测相符。通过观测，我们将许多处在诞生各个阶段的恒星系“抓个现行”。银河系里包含着许多巨大的分子云。这些气体云中包含着大量分子，能帮助它们辐射出热量，从而逐渐冷却和收缩。我们在许多气体云中都亲眼目睹了恒星的诞生。在一些云里，我们甚至能看到初生的恒星和周围比萨状的原行星盘，形状完整，充盈着气体。近年来，天文学家发现了许多恒星系，藏着大量关于太阳系起源的奥秘。

如果太阳系真是这样形成的，那它发生在何时呢？大约100年前，人们普遍相信太阳系形成于2 000万年前，这是因为，如果它在这个时间点之前就存在了，燃烧就会辐射掉大量能量，引力将会把太阳压缩得更小，小于我们观测的结果。同样，通过计算发现，如果太阳系形成于这个时间以前，地球内部的大部分热量（比如火山和热液喷口）也将早已消散完毕，冷却殆尽。

直到20世纪30年代，核聚变的秘密被揭开，人们才恍然明白了太阳保持炙热的原因。但早在1896年，放射性的发现已经摧毁了旧的地球年龄理论，提供了一个更好的解释。铀元素最常见的同位素会自发衰变成钍等更轻的元素。其中，一半铀元素发生衰变（也就是半衰期）大约需要44.7亿年。正是这些放射性元素的衰变产生了足够的热量，在数十亿年的时间里保持着地球核心的炙热，这也解释了为何地球年龄老了2 000万年还能继续保持温暖。此外，通过测量岩石中铀元素衰变的比例，我们还能得知岩石的年龄。用这种方法，人们发现，澳大利亚西部杰克山（Jack Hills）的一些岩石竟然有44.04亿年的历史，而最古老的陨石甚至有45.6亿年历史。这意味着，不止是地球，太阳系的一切都形成于45亿年以前——正符合对潮汐的粗略估计。

总而言之，物理定律的新发现为我们提供了定性和定量的方法来回答祖先最困惑的问题之一：太阳系是何时、以何种方式形成的？

星系，宇宙里的“超级大比萨”

研究了太阳系的形成，我们已经把时间的开端往前推进到45亿年前。那时，太阳系诞生于一团因万有引力而坍缩的分子云中。但正如菲利普的同学所问：这团分子云又是从哪里来的呢？

星系的形成

有了望远镜、铅笔和计算机的武装，天文学家提供了令人信服的答案，尽管一些重要的细节还需要进一步探讨。我们知道，引力和压力之战让太阳系形成了像比萨一样的圆盘形状。其实，这种战役在更巨大的尺度上依然在上演——比太阳重数百万倍甚至数万亿倍的分子云被压缩成了“超级大比萨”。这种坍缩极其不稳定，所以它的中心并不会像打了鸡血一般诞生“超级巨星”，周围也不会形成“超级行星”。与之不同，它会碎成无数片小一些的气体云，这些小气体云各自孕育出各自的太阳系——于是，星系诞生了。我们的太阳系，只是银河系中数千亿个比萨形状的恒星系之一。太阳系大约在银河系距中心一半的位置，几亿年才绕着银河系旋转一圈（见图1-2）。

有时候，星系之间会发生碰撞，就像宇宙版的大撞车。这听起来很恐怖，但实际上并不可怕，因为几乎所有恒星都会从空隙里穿越过去，而不会迎面撞在一起。相撞后，万有引力会将大部分恒星聚在一起，形成一个更大的崭新星系。银河系和我们最近的邻居——仙女座星系都呈比萨形，伸展着美丽的悬臂，如水中的旋涡一般，所以被称为旋涡星系（spiral galaxies，见图1-2）。当两个旋涡星系相撞时，一开始会混乱不堪，后来会逐渐形成一团圆形的恒星群，被称为椭圆星系。这正是我们最终的命运，因为我们的银河系正在向仙女座星系迎头撞上去，大约几十亿年后会相撞——不知道我们的后代会不会把这个新星系称为“银女座”。我们唯一能确定的是，它一定是一个椭圆星系。望远镜拍下了许多星系的相撞，展现了这个过程的不同阶段，都基本符合我们的理论预测。

如果今天的星系都是由小星系融合而成，那么最初的小星系究竟有多小呢？这个问题将把我们对时间的追溯往前再推进一大步。说实话，这也正是我亲自参与的第一个研究项目。项目中，我负责弄清楚气体云中的化学反应，它生成了辐射热能的分子，从而降低了压力。

但是，每次我以为自己算完了，都会发现分子式存在严重的问题，导致后面的所有计算都失效，必须从头再来。

我跟着我的研究生导师乔·西尔克（Joe Silk）在这个问题上纠结了整整4年，我实在沮丧透了。我甚至去定制了一件T恤，上面印着“我讨厌分子”以及我的大敌——氢分子，上面有一个大大的红叉，就像禁烟标志一样。但接下来，幸运女神降临了——我去慕尼黑做博士后时，遇到了一个友好的大学生叫汤姆·艾贝尔（Tom Abel），他刚刚完成了一段史诗般的计算，包含了我所需要的所有分子。他作为共同作者加入了我们的团队。24小时后，大功告成！据我们预测，最早期的星系“只”比太阳重100万倍。我们的运气真是太好了，因为当年的这些发现与汤姆如今用更精密的计算机模拟出来的结果仍然基本相符——他现在正在斯坦福大学当教授呢。

永恒的运动，宇宙的自然状态

地球就像一个舞台，上演着一幕伟大的戏剧——斗转星移，生命一代又一代降生到人间，它们相互影响，度过一生，然后走向死亡。这幕地球戏剧始于45亿年前。然而，我们却发现，地球只是一幕更宏大的宇宙戏剧中的一小部分。那里就像一个宇宙级别的生态系统，一代又一代的星系诞生、相互影响、最终走向死亡。那么，在此之上，是否存在更高级别的戏剧，一代代宇宙在其中诞生和死亡呢？更具体地说，我们的宇宙是否存在一个开端呢？如果有，是什么时候呢？

星系为什么不会坍缩？这个问题将再次把我们对时间的认知往前推进一步。我们知道，月亮不会掉下来是因为它旋转得极快。宇宙中充满了星系，星系的运动方向各不相同，而且并不都是绕着我们旋转，很显然，月球的理由不适用于它们。如果宇宙是永续永存的，并且本质上是静止的，那遥远的星系相对我们来说就不会运动得太快。

那它们为什么不会最终坠向我们，就像你突然让月球停止在轨道上，它一定会落向地球一样呢？

在牛顿的时代，人们当然不知道星系的存在。布鲁诺通过冥思苦想，得出宇宙是永恒静止的，里面均匀地布满了恒星这一结论。如果你认同布鲁诺，那你至少有一个半生不熟的理由，不用担心宇宙会塌到头上，那就是，根据牛顿定律，每颗恒星在每个方向都会受到同样强大的万有引力（实际上是无穷大），因为每个方向上都有无数颗恒星，这些引力相互抵消，所以恒星可以保持静止。

1915年，这个理由被爱因斯坦的新引力理论推翻了，这就是广义相对论。爱因斯坦发现，永恒静止、均匀布满恒星的宇宙模型与他的新引力方程不相符。那么，他做了什么呢？毫无疑问，爱因斯坦继承了牛顿大胆推测的精神，一边探索符合自己方程的宇宙形态，一边在观测中寻找证据。然而颇具讽刺意味的是，爱因斯坦作为人类历史上最具有创造精神、最敢问别人之不敢问、最敢挑战权威的科学家，却不敢质疑最大的权威——他自己，以及他对永恒不变的宇宙的痴迷。结果，他修改了自己的广义相对论方程，在其中加入了一个额外的常数，使宇宙变得永恒且稳定。他后来把这个举动称为自己一生中最大的错误。更加具有讽刺意味的是，现在看来，这个宇宙常数竟可能真的存在，只不过是以暗能量的形式存在（我们在后面会讨论到），并且取值也不同，因此不能以此来保持宇宙的恒常稳定。

后来，终于出现了一个人，有信心聆听爱因斯坦方程中的低吟。这个人就是俄罗斯物理学家、数学家亚历山大·弗里德曼。他计算出了最一般情况下的均质宇宙解，发现了一个令人震惊的事实——绝大部分解都不是静止的，而是随着时间而变化！爱因斯坦的静止宇宙不但只是一个特例，而且本身也不稳定，不能保持很长时间。正如牛顿证明太阳系的自然状态就是永恒运动一样（比如地球和月球不可能

永远保持静止），弗里德曼的研究揭露出，宇宙的自然状态也是永恒运动的。

然而，究竟是怎样的运动呢？弗里德曼发现，在所有的可能性中，宇宙最自然的状态有两种——不是在膨胀，就是在收缩。如果宇宙在膨胀，这意味着所有分开的物体都在相互远离，就像正在膨胀的麦芬蛋糕顶上的巧克力片一样（见图2-2）。如果这是真的，它们过去的距离一定比现在更近。实际上，**在弗里德曼关于膨胀宇宙的最简解中，过去确实存在一个时间点，那时，我们今天所看到的万物都位于同一个地方，因此拥有无限大的密度。换句话说，我们的宇宙有一个开端，在无限的密度中发生了一场灾难式的爆炸——宇宙大爆炸。**

弗里德曼的大爆炸理论是一记振聋发聩却沉默无语的惊雷。虽然他的论文发表在了德国最有威望的物理学期刊上，连爱因斯坦等人都对其进行了讨论，但却被大多数人忽略了，并最终被埋没，对当时的主流物理世界观没有产生任何影响。忽视伟大的见解，是宇宙学的传统（其实在整个科学界都这样）——正如我们前面说到的阿里斯塔克斯日心说、布鲁诺的遥远太阳系一样。在后面的章节中，我们还将遇到很多这样的例子。

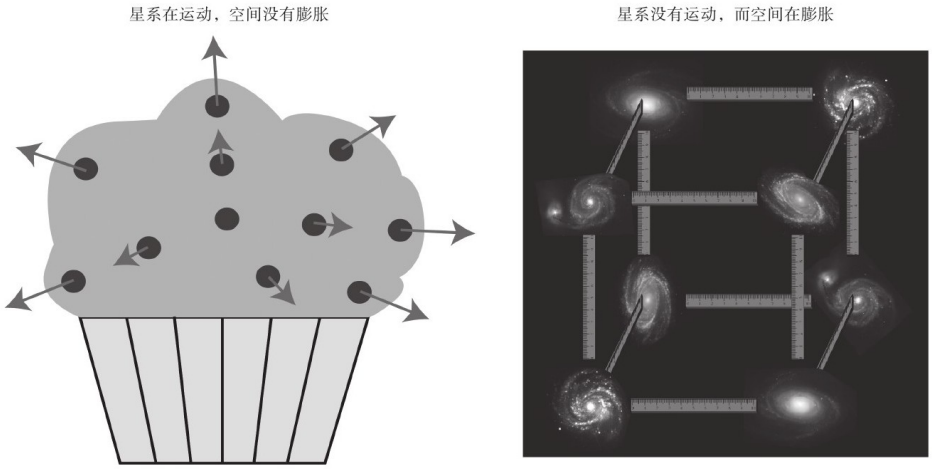


图2-2　遥远的星系相互远离，就像正在膨胀的麦芬蛋糕顶上的巧克力片（左图）——在它们中的每一颗看来，其他巧克力都在后退，速度与距离成正比。但是，如果只有空间在膨胀，像蛋糕的面饼一样，那么星系和空间之间就没有相对运动，空间把所有的距离都均匀地拉大（右图），就像把尺子上的刻度单位从毫米改成了厘米一样。

我认为弗里德曼被学术界忽视的一大原因是，他超越了他所处的时代——1922年的宇宙观仅限于银河系（实际上，也只是银河系中能被我们看到的有限部分），而银河系并没有膨胀，数以千亿的恒星被万有引力束缚在轨道上，那宇宙膨胀也无从说起。这正好能回答第1章开头提出的问题9：“银河系在膨胀吗”。弗里德曼的膨胀理论只适用在极大的尺度。在这个尺度上，可以完全忽略物质碰撞形成星系和星系团的过程。在前文图1-2中可以看到，在极大的尺度上（比如1亿光年的尺度），星系的分布变得相当均匀，暗示着弗里德曼的均质宇宙是适用的，并且所有距离遥远的星系都在相互远离。但正如我们之前所讨论的，那时候哈勃还没有发现其他星系呢，他到1925年才建立起有关星系的理论，而那是在弗里德曼发表膨胀宇宙理论的3年之后！真正到了3年之后，弗里德曼的机会终于来了。然而不幸的是，正是在这一年，伤寒夺去了他年仅37岁的生命。

我认为，弗里德曼是宇宙学历史上最伟大的无名英雄。写到这里，我忍不住把他1922年的论文翻出来读了一遍。论文最后，他举了一个例子，例子中的宇宙质量为太阳的5亿兆倍。据此，他计算出这个宇宙的寿命约为100亿年——竟和我们宇宙的年龄差不多！此时，距离人们发现其他星系还有好几年，不知弗里德曼从哪里得到的这些数字。但对一篇伟大的论文来说，这个结尾再合适不过了。

我们的宇宙正在疯狂膨胀

5年后，历史再次重演。一位MIT的研究生，同时也是比利时神父的天体物理学家乔治·勒梅特（Georges Lema tre），再一次发表了大爆炸理论。但是他并不知道弗里德曼已经发表过这个理论，于是“重新”发表了一次。结果，它再一次被学术界忽视了。

最终让大爆炸理论引起人们注意的不是一个新研究，而是一次新观测。埃德温·哈勃发现系外星系后，人们很自然地想测出它们在空间中的分布和运动情况。我在前面章节里提到过，物体朝我们而来或离我们而去的速度通常很容易测量，因为这种运动会导致它的光谱线发生移动。**彩虹中，频率最低的是红光，所以，如果星系正在离我们远去，它的所有光谱线将发生红移，也就是向红色的一端移动。远去的速度越快，红移的程度越高。如果星系正在朝我们而来，它将发生蓝移，光谱线移向蓝色的一端。**

假如漫天的星系只是在随机地乱动，我们会发现，一半星系在红移，另一半在蓝移。但令人吃惊的是，**哈勃发现，几乎所有的星系都在红移。**为什么它们全都离我们而去呢？难道它们不喜欢我们吗？是我们说了什么不好的话吗？不仅如此，哈勃还发现，星系与我们的距离（d）越远，远离我们的速度（v）就越快，并遵循下面这个公式：

$$v=Hd$$

这个公式被我们称为“哈勃定律”，其中的H是一个常数，被称为“哈勃常数”。在哈勃1929年发表的学术论文中，这个常数用一个谦逊的字母“K”表示。有趣的是，乔治·勒梅特在那篇被忽视的论文中，也预测过膨胀宇宙会出现类似的现象——**如果一切都在膨胀，一切都在相互远离，那越远的星系就远离得越快。**

如果一个星系正在远离我们，它过去一定与我们十分靠近。但那又是多久以前呢？如果银行抢劫犯跳上一辆车，逃离犯罪现场，你只

需要用距离除以车的速度，就能判断出抢劫发生的时间。如果我们用同样的方法计算后退的星系，根据哈勃定律，每个星系的“案发时间”都是$d/v=1/H$！用现代观测方法，我们知道$1/H\approx$140亿年。所以，哈勃的发现意味着在140亿年前的某一刻，发生了一件相当不同凡响的事——大量物质挤成一堆，密度高得不得了。但是，正如车速不是一成不变的一样，宇宙的膨胀也可能有快有慢。考虑到这个，我们需要对结论进行修正。今天，我们用弗里德曼方程和现代观测方法发现，需要修正的幅度非常小，只占一点点比例——原来，大爆炸之后，我们的宇宙用了一半的时间来减速膨胀，又用了一半的时间来加速膨胀，所以误差就被抵消了。

想要扩张，就得从别处抢

哈勃的观测结果公布以后，连爱因斯坦都心服口服。现在，宇宙膨胀已是被广泛接受的事实。可是，宇宙膨胀意味着什么呢？现在，我们准备回答第1章开头时提出的其中4个问题。

首先看问题8：星系是真的在远离我们，还是仅仅只是空间在膨胀？为方便起见，爱因斯坦的广义相对论认为这两个观点是等价的，因为它们描述宇宙时同样有效（见图2-2），所以你可以自由选择更加符合你直觉的那一个[4]。第一种观点（见图2-2左图）认为，空间并没有变化，只是星系相对于空间在运动，就像烤麦芬蛋糕时，由于你在黄油中加入了发酵粉，所以麦芬蛋糕会膨胀，导致上面的巧克力片相互远离。和巧克力片一样，所有的星系也都在相互远离，并且距离越远的星系，相互远离的速度就越快。尤其是，如果你站在其中一颗巧克力片（或星系）上，你就能感受到其他巧克力片（或星系）与你之间的相对运动符合哈勃定律——它们后退着，两倍远的星系的退行速度也翻一倍。值得注意的是，不管你站在哪颗巧克力片（或星系）

上，结果都是一样的。所以，如果星系在空间中的分布无穷无尽，那宇宙膨胀就没有一个中心点——因为无论从哪里看，它都是一样的。

而从第二种观点来看，空间很像麦芬蛋糕的面团——面团会膨胀，但巧克力片与面团之间没有发生相对运动。同样，第二种观点认为星系与空间之间也没有发生相对运动。星系在空间中的位置是稳定的（见图2-2右图），但它们之间的距离却被改写了。这就好像星系间存在一把假想的尺子，空间膨胀后，尺子上的刻度单位必须擦掉重写，如果把刻度由毫米改成厘米，那所有星系之间的距离都是以前的10倍。

这又回答了第1章开头的问题7：星系的退行速度比光速还快，这不违背相对论吗？哈勃定律$v=Hd$告诉我们，当星系远在$c/H\approx$140亿光年外时，它的退行速度将超过光速c，而我们没有理由怀疑这些星系的存在。这与爱因斯坦在相对论中所说的“没有物体的速度能超过光速”相违背吗？答案是肯定的，但同时也是否定的——它确实违背了爱因斯坦发表于1905年的狭义相对论，但并不违背他发表于1915年的广义相对论，而后者才是爱因斯坦对这个问题的最后结论。所以，不用太担心。广义相对论解放了速度的上限；狭义相对论认为，无论在什么情况下，两个物体之间的相对速度都不可能超过光速。但在广义相对论中，只有两个物体位于同一地方时，相对速度才不可能超过光速——与之不同的是，那些相对我们做超光速运动的星系都位于非常遥远的地方。所以，如果考虑到空间的膨胀，那我们就需要重新表述一下——**任何物体都不能相对空间做超光速运动，但空间本身可以被随意拉伸，不管多快都行。**

说到遥远的星系，我曾在报纸上读到过，有些星系距离我们有300亿光年远。第1章开头的问题6：如果宇宙的年龄只有140亿年，那我们如何能看到300亿光年远的东西？它们的光线是怎么到达我们的？此

外，我们刚刚知道它们正以超光速的速度后退，这样一来就更不可能看见它们了。答案是，我们看见的并不是它们现在的样子，而是它们发出这些光线的时候。正如我们看见的太阳是8分钟以前的太阳一样，我们看见的遥远星系也是它在130亿年前的样子，它的位置也是130亿年前的位置——那时它与地球的距离比现在近8倍！所以，这个星系发出的光线根本不需要在空间中旅行130多亿光年才到达地球，因为宇宙膨胀造成了这个差别——这就好像你在自动扶梯上只走了一步，但实际上已经移动了20米。

一切都是演化的造物

在星系都离我们远去的遥远地方，空间会不会因为膨胀而挤在一起，发生宇宙大撞车？不用担心。如果宇宙的膨胀遵循弗里德曼方程，就不会发生这样的事故。如图2-2所示，不管从哪个方向看过去，空间膨胀都是完全一样的，所以不会出现这种碰撞点。如果你赞同“遥远星系相对一个静止的空间在后退”的观点，那它们就不会和更遥远的星系相撞，因为那些星系比它们后退得更快——福特T型车永远无法追尾飞驰的保时捷。如果你赞同“空间在膨胀”的观点，那答案很简单——体积是不守恒的。读一读中东局势，你就会习惯这样的观点：想要扩张自己的地盘，就得从别人那里抢。然而，广义相对论的结论却与之不同——在星系间的区域中，可以创生出更多的空间，而不用挤占其他空间。新的空间会乖乖地待在原来这些星系之间（见图2-2右图）。

宇宙大讲堂

尽管宇宙暴胀理论听起来很疯狂，并且违背直觉，但它不仅符合逻辑，而且与天文观测相吻合。实际上，自埃德温·哈勃的时代以

来，我们已经累积了相当多的观测证据，这要感谢现代观测技术和我们接下来要讨论的新发现。最基本的结论是，宇宙本身在不停地改变。当我们回望数十亿年前，你会发现一个膨胀得不是很厉害的宇宙，因此它也相当致密和拥挤。这表明，我们所栖身的空间并不是一成不变、像欧几里得的定理一样那般枯燥。相反，它是一个动态演进的空间，甚至曾经有过“童年时代”——它诞生在大约140亿年前。

如今，望远镜技术已经非常先进，让我们能直接看到宇宙的演化。

想象你在一个宽敞的大讲堂里演讲。突然，你注意到观众席上一件很有意思的事——离你最近的观众席上，坐的全是和你差不多岁数的人。但是，第10排以后，观众全变成了青少年。在青少年的后面，是一些年幼的小孩。再往后，是蹒跚学步的幼儿。倒数第二排，竟是一些嗷嗷待哺的婴儿。而礼堂的最后一排，在你看来空空如也，什么也没有。

当你用最先进的望远镜观察宇宙时，你也会看到类似的情境——附近是一些和银河系类似的大型成熟星系；但在极其遥远的地方，大部分星系都是很小的“婴儿”，看起来还没有完全发育好；再远处，则空空如也，完全没有星系，只是一片黑暗的深渊。由于遥远的光需要很长时间才能到达地球，所以，望向宇宙的远方也就等同于望向过去的时间。那片没有星系的黑暗深渊，就是第一代星系出现之前的纪元。那时候，空间中充满了氢气和氦气，万有引力还没来得及将它们压缩成星系。由于这些气体都是透明的，就像生日派对气球里充满的氦气一样，所以，在望远镜看来，它们是隐形的。

忽然，你又突然发现了一个秘密：在你演讲时，在空空如也的最后一排，竟然释放出能量。原来，最后的黑墙并不是完全的黑暗，而是在隐隐闪着黯淡的微波！这是为什么？听起来很诡异，但这正是我们凝视宇宙最深处时所能看到的情景！为了理解这件事，我们需要把时间继续往回推进。

宇宙最深处，一窥微波的神秘

从牛顿和爱因斯坦身上，我学到了一个非常关键的准则：“要敢于推演！”具体地说，就是把你已知的物理定律，运用在无人涉足过的全新领域，看看是否能推断出什么有趣的结果，并可用观测来验证。牛顿把伽利略在地球上建立的运动定律运用在了月球及更远的物体上；弗里德曼则将爱因斯坦关于太阳系的引力和运动定律推演到了整个宇宙。这个准则是如此成功，你可能会认为它一定是科学界的“模因”（meme），像基因一样代代相传。你也可能会认为，1929年，当弗里德曼的宇宙膨胀理论终于被人们接受后，全世界的科学家一定争先恐后地展开系统性的研究，推演时间的开端。如果你真这么认为，那就大错特错了……不管我们科学家如何强调自己是真相的理性追随者，我们都难以克服人类的小缺点，比如偏见、同侪压力和从众心理。这些缺陷，远不是仅靠数学天赋就可以战胜的。

我认为，继弗里德曼之后的第二个宇宙学大师，依然是一个俄罗斯人——乔治·伽莫夫。他在列宁格勒时的博士生导师不是别人，正是亚历山大·弗里德曼。尽管弗里德曼只指导了伽莫夫两年就仙逝了，但他的勇气和智慧却被伽莫夫继承了下去。

宇宙“等离子屏幕”

由于宇宙正在膨胀，在过去它一定比现在更拥挤和稠密。然而，它一直以来都是在膨胀吗？也许并不是。弗里德曼的研究中包含一种可能性——宇宙可能曾经处在收缩的状态，收缩的速度越来越慢，朝我们飞来的物质缓缓地慢下来，停在那里，然后开始反弹，并加速远离我们。然而，这样的宇宙大反弹只会发生在物质密度远比今天小的情况下。于是，伽莫夫决定对另一种可能性进行系统探索。这种可能性更一般，也更彻底：**宇宙从一开始就在膨胀，从来没有收缩过。**

伽莫夫在他1946年写的书中解释说，如果我们把宇宙想象成一部电影，当我们把它逆着时间往回放，会发现密度越来越大，大到简直没有极限。由于星系间的空间充满了氢气，随着我们逆着时间往回放，这些气体会被压缩得越来越厉害，也越来越热。这就好像，如果你加热一块冰块，它会融化。继续加热融化后的冰水，它会蒸发变成气体——水蒸气。与之类似，如果你不停地加热氢气，它会变成第四种状态——等离子体。为什么会这样呢？这是因为，氢原子的结构很简单，只是一个电子围绕着一个质子旋转，氢气就是这样一堆原子相互撞来撞去的结果。如果温度足够高，撞击会变得极其猛烈，以至于原子都被撞碎了，电子和质子分道扬镳、各走各路——氢等离子体就是一锅由自由电子和质子熬成的粥。

也就是说，伽莫夫认为，我们的宇宙起源于一场极热的大爆炸，那时，等离子体曾充满了宇宙空间。更有趣的是，这个理论可以被检验——虽然冷氢气是透明无形的，但热氢等离子体却并不透明，而且能像太阳表面一样发出耀眼的光芒。这意味着，如果我们从空间的近处望向远处（见图2-3），我们首先会看到附近的成熟星系，接下来是越来越年轻的星系，然后是透明的氢气，再然后会遇到一堵看不穿的墙，由发光的氢等离子体构成。我们无法看透这堵墙，因为它是不透明的，就像一个宇宙检查员，阻挡我们窥伺之前发生的所有事情。此外，不管我们往哪个方向看，结果都一样，因为不管往哪个方向看，我们都是在望向过去的时间（见图2-4）。于是，我们看起来就像被一个巨大的等离子体球所包围着。

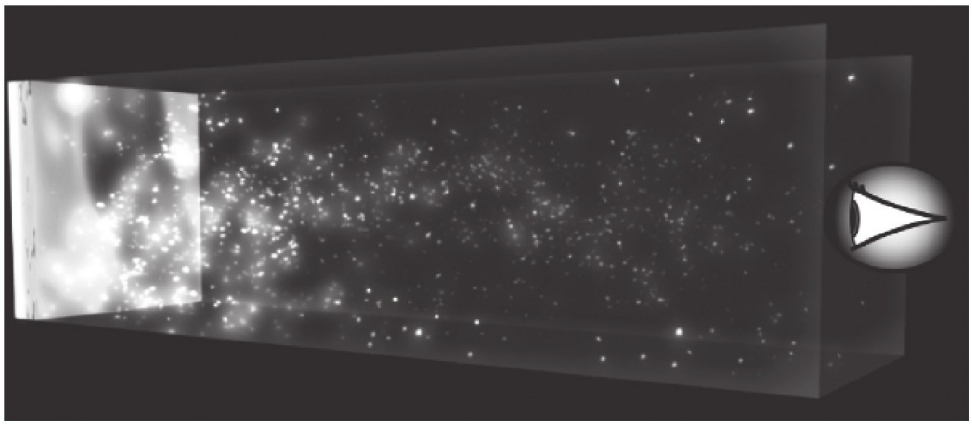


图2-3　由于光线需要一定的时间才能到达我们的眼睛，所以望向远方其实相当于望向过去的时间。在遥远的星系以外，我们会看见一堵不透明的墙，由发光的氢等离子体组成，这些光花了140亿年才到达我们。这是因为，140亿年前，空间中充满了炙热的氢等离子体。而那时，宇宙的年龄只有40万年。（本图改编自NASA[美国国家航空航天局]和WMAP[威尔金森微波各向异性探测器]研究小组的图片）

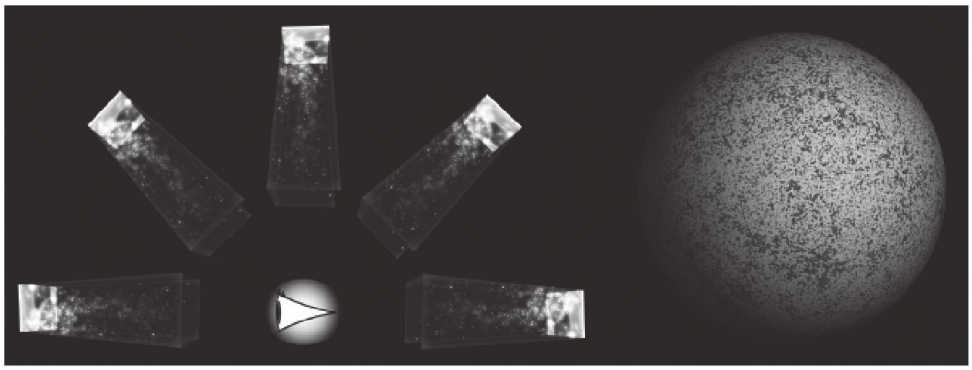


图2-4　看起来，我们就像位于一个巨大的等离子体球的中心，因为不管我们往哪个方向看，都会遇到一堵同样的等离子体墙。

在1946年的书里，伽莫夫的大爆炸理论认为我们能够观察到这个等离子体球。他让他的学生拉尔夫·阿尔菲（Ralph Alpher）和罗伯特·赫尔曼（Robert Herman）进行更详细的计算。几年后，两人发表了一篇论文，认为这个等离子体球会闪耀着只比绝对零度高5度的温度。也就是说，它发出的不是可见光，而主要是微波。然而，没有一

个天文学家愿意帮两人在天空中搜寻这个宇宙微波背景辐射，结果，他们的成果也逐渐被人遗忘，就像弗里德曼的膨胀宇宙理论一样。

看见大爆炸的余晖

1964年，普林斯顿大学的一个研究团队发现，这种可观测的微波信号可能真的存在，于是计划对其展开观测和搜寻，但他们被别人抢先了一步。同年早些时候，阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）在位于美国新泽西州的贝尔实验室测试一个最先进的微波望远镜时，发现了一件奇怪的事——他们的望远镜探测到了一个无法解释的信号，并且，不管往哪个方向看，这个信号都几乎保持不变。怪哉！他们本来以为，只有当望远镜指向天空里某个特定的物体时，才会接收到信号，比如太阳或者发射着微波的卫星。结果，整个天空仿佛都在发光，闪耀的温度比绝对零度高3度——很接近伽莫夫的团队预测的5度。他们仔细检查了附近可能造成噪声的东西，甚至一度怀疑是几只在望远镜上做窝的鸽子拉的鸟屎在作怪。

> 不久前，我曾和彭齐亚斯一起吃午饭，他告诉我，他们把那几只可怜的鸽子装在木头盒子中，把它们远远地送到贝尔实验室的其他园区里，才放它们出来。不过，这些鸽子是信鸽……虽然他在书里只说，当信鸽飞回望远镜时，他们“清除”了它们，然而，在喝了点酒之后，彭齐亚斯向我坦承了一个悲伤的事实——他们使用了猎枪……鸽子是走了，神秘的信号却依然还在——原来，他们发现的是宇宙微波背景辐射，也就是宇宙大爆炸的余晖。

彭齐亚斯和威尔逊的发现引起了轰动，并因此共同获得了1978年的诺贝尔物理学奖。从伽莫夫和他学生的计算中，可以得出，图2-4中那个等离子体球应该如太阳表面的一半那么热。由于它的热辐射在空间中穿行了140亿年才到达我们，随着空间膨胀了几千倍，它也被冷却了几千倍，只剩下了比绝对零度高3度的余晖。也就是说，我们的整个

宇宙曾经和恒星一样炙热。伽莫夫的热大爆炸理论经受住了检验，被证明是正确的。

珍贵的宇宙“婴儿照”

现在，等离子体球已经被探测到了，科学家们开始你追我赶，看谁先拍下它的照片。由于各个方向的辐射温度相差无几，彭齐亚斯和威尔逊拍下的照片很像网上的搞笑图片“雾霾中的北京”——其实整张图片都是白色的。为了得到一张清晰的宇宙“婴儿照”，你需要把对比度调得非常大，以显示出处处细微的差别。这些差别必定会存在，因为如果在过去每个地方都完全相同，那物理定律会让这种相同保持到现在，绝不可能出现今天这个不均匀的、成块成簇的宇宙——有些地方有星系，有些地方空无一物。相反，宇宙会变成一片荒漠。

然而，事实证明，要拍摄宇宙的“婴儿照”实在太困难了，人们花了将近30年的时间才发展出足够的技术。为了抑制环境噪声，彭齐亚斯和威尔逊不得不使用液氦，将他们的探测器冷却到接近宇宙微波背景辐射的温度。然而，天空中不同地方的温度起伏非常细微，差别大约只有几十万分之一，因此，需要比彭齐亚斯和威尔逊当年的探测器灵敏10万倍，才能拍下宇宙的婴儿照。全球的实验室都在挑战这个领域，但都失败了。

有人说，这个任务根本毫无希望，但有些人却不肯放弃。1992年5月1日，在我的研究生读到一半时，初具规模的互联网上开始对一个传言议论纷纷——天体物理学家乔治·斯穆特（George Smoot）准备要公布一个迄今为止最野心勃勃的微波背景实验结果。他采用的是NASA的宇宙背景探测器——COBE卫星（Cosmic Background Explorer），从冰冷黑暗的太空中发回的数据。我的博士生导师乔·西尔克正好被安排去华盛顿主持斯穆特的演讲。在他飞去华盛顿之前，我问他这个

发现有多大胜算。西尔克说，他认为他们并没有发现宇宙中的起伏，只是发现了来自银河系的射电噪声。

然而，斯穆特的演讲并不像许多人想象的那样虎头蛇尾。相反，他在科学界扔下了一颗炸弹，不仅改变了我的职业生涯，还改变了整个宇宙学领域——他的团队真的发现了那些起伏！霍金将其誉为：“如果算不上人类历史上最伟大的发现，那至少也是本世纪内最伟大的发现。”我们接下来将会看到，这些“婴儿照”拍下的是宇宙“只有”40万年历史时的样子。它包含着许多关键线索，让我们得以窥探宇宙的起源。

淘金热

现在，COBE卫星找到了金矿，立刻涌现了一个热潮——人们想从里面挖出更多金子。从图2-5中可以看到，COBE卫星拍下的天图十分模糊，因为低分辨率将小于7°的差别都抹掉了——你能很自然地想到，下一步工作应该是把镜头拉近，聚焦在天空中的一小块区域，用高分辨率和低噪声进行拍摄。下面我将解释，这样的高分辨率天图中暗藏着一些关键的宇宙学问题。

> 12岁时，我在斯德哥尔摩递送信件，赚到了人生第一部照相机。从那以后，我就很喜欢摄影。所以，给宇宙拍照这个想法，本能地吸引着我。我也很享受用计算机制图的过程，不管是为了我的高中校报《箭毒》（*Curare*），还是为我自己开发的计算机游戏FRAC——这是一个三维的俄罗斯方块游戏，从中我赚到了1991年环球旅行的旅费。所以，当许多实验物理学家邀请我和他们组成团队，帮他们将数据转换成天图时，我感到由衷的幸运。

我交到的第一个好运，就是认识了普林斯顿大学的年轻教授——莱曼·佩奇（Lyman Page）。我喜欢他孩子气的顽皮微笑。在他的一次会议演讲后，我鼓起勇气去询问他是否有合作的机会。当他告诉

我，他在上研究生之前花了很多年在大西洋上航海之后，我更加欣赏他了。后来，佩奇委托我对一个微波望远镜得到的数据进行计算。这个望远镜位于加拿大小城萨斯卡通（Sasktoon）。在那里，他和他的团队花了三年时间，用这个望远镜扫描北极上空的一小片天域。

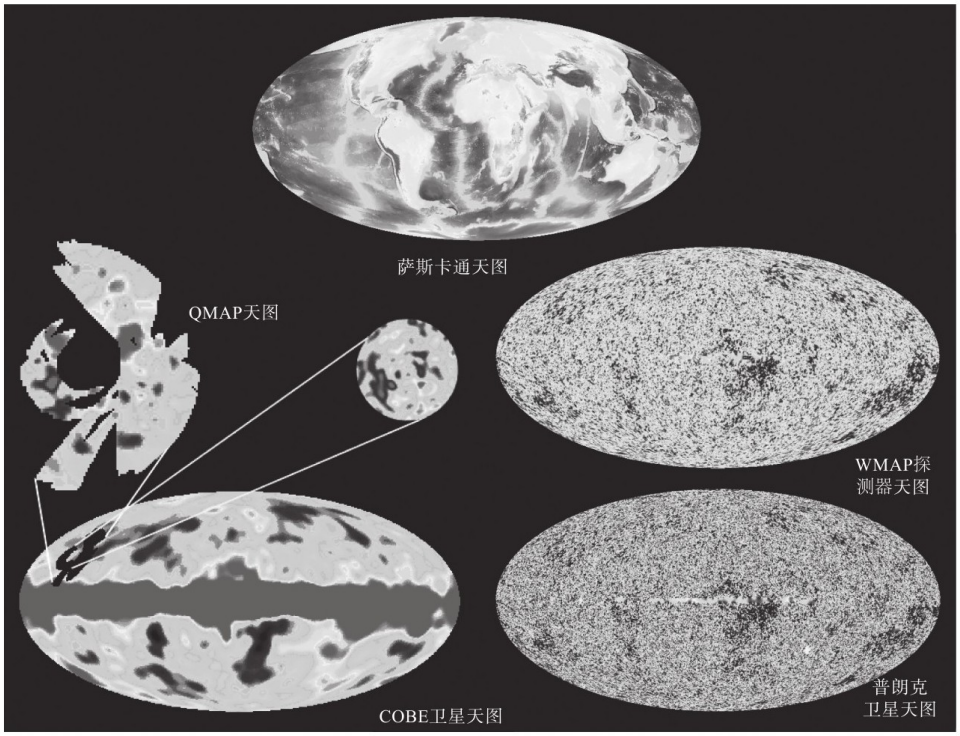


图2-5　在展示一张全天图时，为了方便起见，通常把它投影在一张平面上，就像地图（上）一样，看起来就像是在抬头看天，而非低头看地。COBE卫星拍摄的宇宙婴儿照（左下）十分模糊，于是，许多人希望把镜头拉近，采用较高的分辨率（中左）拍摄一小块天空。后来，WMAP探测器和普朗克卫星发回了分辨率更高的全天图片（右），它们的分辨率分别为300万像素和5　000万像素。这些全天图都相对地图旋转了一点，目的并不是让天图的中面与地球赤道面相对应，而是让其与银河的盘面对应（左下图中的灰条带）；地球北极指向萨斯卡通天图的中部。（图片来源：帕特里克·迪宁[Patrick Dineen]）

把这些数据转化为图像是相当困难的事情。因为单凭数据无法组成天空的图片，它们只是装满数字的表格，代表着用各种复杂的方法

对天区进行加减后测出的伏特数。同时，我也觉得非常兴奋，因为它需要我在信息论和数字计算上付出极大的努力。在慕尼黑的博士后办公室里，我度过了许多个用麦片来保持精力的夜晚。终于，我按时完成了图2-5中的那个萨斯卡通天图。于是，我被邀请到法国阿尔卑斯山参加一个大型宇宙学会议，并在会议上演讲。

到今天为止，我曾在几百个会议上演讲过，但只有少数几个会议的经历独立于记忆的流逝之外，就像被赋予了魔法一样历久弥新，每次想起来都会让我忍不住微笑。阿尔卑斯山的这次会议，就是其中之一。走上演讲台时，我的心简直跳到了嗓子眼儿。我环视了一周，发现礼堂里挤满了人，他们中许多人的研究，我都读过，但大多数人并不知道我是谁。他们来这里开会的主要目的是滑雪，而不是听我这样的新手演讲。但是，我不仅仅感到心跳得厉害，还感受到了房间里涟漪般涌动的能量。人们为宇宙微波背景辐射的新进展而兴奋，我也为自己能参与其中一小部分工作而感到荣幸。那是在1996年——现在想起来简直像寒武纪一样久远，那时候，人们演讲用的幻灯片都是透明的塑料片，而我手中正好握着一张塑料片王牌——萨斯卡通天图的幻灯片（和图2-5中的一样）。它相当于把COBE卫星的图片拉近了仔细观察。我感到房间里流动着一股兴奋的情绪。在茶歇时，一堆人挤在高射投影仪旁边，只为再看一眼那张图片和提问题。宇宙微波背景辐射学的奠基人之一迪克·邦德（Dick Bond）走过来，微笑着对我说：“我简直不敢相信，佩奇竟然把数据给你了！”

我意识到，宇宙学进入了一个黄金时代。新的发现吸引了无数新人和新资金进入这个领域，又再一次促成了新发现的涌现，构成了一个良性循环。会议结束后的一个月，也就是1996年4月，两颗新卫星的基金通过了批准，它们的分辨率和灵敏度都远远大于COBE卫星。其中一个是NASA的WMAP探测任务，是由莱曼·佩奇带头的严谨团队。还有一个是欧洲的项目——普朗克卫星，我为它的基金申请工作做了计算

和预测，这让我非常开心。由于空间任务通常需要花很多年来做计划，于是，为了抢在WMAP探测器和普朗克卫星之前出成果，全球各地的小团队都在你追我赶，企图在它们发射之前摘些酸果子。结果，萨斯卡通项目抢到了第一个风头，由此开启了我参与的一系列好玩项目。

接下来，我和许多实验物理学家一起工作。这些实验的名字都稀奇古怪，比如HACME、QMAP、特纳里夫岛（Tenerife）、POLAR、PIQ和飞去来器（Boomerang）。我同他们合作，利用他们的数据来制作宇宙“婴儿照”，并探索其中关于宇宙的秘密。我最基本的游戏规则是担任理论与实验的中间人——我感到，宇宙学正从一个极度缺乏数据的领域，转变成一个拥有超多数据的领域，这些数据多到让人无所适从，所以我决定开发一个工具来充分处理这种数据“雪崩”。具体地说，我的战略是运用一种叫信息论的数学方法，在一个给定的数据集中搜寻与宇宙相关的信息。通常，几兆字节（MB）、几吉字节（GB），甚至几太字节（TB）的信息中，只有非常稀少的几个比特是关于宇宙的信息。它们以十分复杂的方式深深隐藏在纷繁杂乱、数据庞大的噪声中，这些噪声来自探测器的电子设备、大气辐射、银河辐射等各种各样的源头。当时，有一个完美的数学方法可以完成这项大海捞针的任务，但在实践中做起来太复杂，需要计算机进行几百万年的运算。而我发表的几个数据分析方法虽然并不完美，但提取信息的速度足够快，适用于实践。

我喜欢宇宙微波背景辐射的原因有很多。比如，它促成了我的第一段婚姻，让我拥有了两个可爱的儿子，菲利普和亚历山大。我和我的前妻安赫丽卡·科斯塔（Angélica de Oliveira Costa）走到一起，正是因为她从巴西来到加州大学伯克利分校读乔治·斯穆特的研究生。我们的合作亲密无间，不仅限于给孩子换尿布，还包括我前面提到过的许多数据分析项目。其中一个项目是QMAP，它是一个望远

镜，装在一个高空气球上，由莱曼·佩奇和马克·德夫林（Mark Devlin）等人放飞到高空，以避免受到地球大气层的微波噪声干扰。

不好了！1998年5月1日凌晨2点，一切看起来都糟透了。还有7个小时，我们的飞机就要飞往芝加哥，我将在那里的一场宇宙学会议上演讲，公布QMAP项目的最新结论。但此时此刻，我和安赫丽卡却在普林斯顿高等研究院的办公室里焦虑不已。宇宙微波背景辐射实验容不下一点错误，也不能忽视任何重要的东西。在科学界，可信度的关键要素是被另一个独立的实验所验证。但由于人们聚焦的天区不同，采用的分辨率也不同，所以根本不可能通过比较两个实验的结论来验证它们是否相符。然而，萨斯卡通和QMAP的天图在一处香蕉形状的天区正好产生了重叠（见图2-5）。我和安赫丽卡灰心丧气地盯着计算机屏幕，感到心沉到了谷底——萨斯卡通和QMAP重叠的那部分天图并排显示在屏幕上，而它们俩根本没有一点相似之处！我们眯着眼睛仔细看，企图把这些差异想象成设备的噪声。但这只是美好的幻想。我们所有的努力都表明，这两张天图中至少有一张是完全错误的。我怎能拿这个结论去演讲呢？这不仅是对我们自己，也是对所有建造和运行实验的科学家们的羞辱。

安赫丽卡全神贯注地凝视着我们的计算机程序，突然间，她发现了一个可疑的负号，大概会使QMAP天图呈颠倒状。我们修正了这个负号，重新运行代码。面对计算机屏幕上的结果，我俩面面相觑，大气都不敢喘——两幅天图几乎完全一样！成败在此一举！接下来，我们睡了短短的几个小时，就飞往了芝加哥。把租来的车停好后，我几乎全靠肾上腺素驱动，一路小跑到费米实验室礼堂。时间不早不晚，刚好轮到我演讲。我实在太兴奋了，根本没注意到自己已经违章停车。直到晚上，我发现我的车离奇地失踪了。

“你把车停哪儿了？”保安问。

“哦，就停在外面啊，在消防栓的正前方。”我回答道，突然脑袋里“咣”的一声，一天内第二次恍然大悟——车被交警拖走了。

宇宙的“沙滩球”

宇宙微波背景辐射引起的淘金热，持续了好几年。这期间，有20多个不同的实验室在你追我赶——我会告诉你一些相关故事。然后，终于轮到WMAP探测器粉墨登场了。2003年3月11日下午2点，房间里挤

满了人。我们都挤过来看NASA电视台，因为WMAP项目团队将要公布他们的结果。地面实验和气球实验都只能绘制一部分天区的图像，但WMAP探测器却能像COBE卫星一样，用它超高的分辨率和灵敏度描绘整个天空。我的感觉就像小时候过圣诞节，圣诞老人最后终于出现了——唯一不同的是，圣诞节只需等上几个月，而为这一天，我已经等了好几年。事实证明，等待是值得的——WMAP项目团队公布的图片令人震惊。他们废寝忘食地工作，从申请经费到建设、发射、数据分析和得出结论，只用了不到6年的时间，比COBE卫星快3倍。实际上，为了保持进度，WMAP项目的带头人查克·班尼特（Chuck Bennett）几乎害死了自己——该项目的重要贡献者大卫·斯伯格尔（David Spergel）告诉我，在卫星发射后，班尼特的身体崩溃了，不得不住了三个星期的医院。

此外，WMAP项目团队还在网上公开了所有数据，这样，全世界的宇宙学家都可以尝试自己分析。对我这样的宇宙学家来说，现在终于轮到我们来废寝忘食地疯狂工作了，而他们总算可以高枕无忧地睡大觉。他们的观测结果很出色，但受到了银河系射电噪声的污染。你可以从图2-5中的COBE天图里看到，天图中央有一条水平的条带。对于此，有一个坏消息和一个好消息。坏消息是，来自银河系和其他星系的微波污染遍布整个天空，几乎无处不在，尽管程度很低，而且不容易看到；好消息是，这些污染的颜色与我们想要的信号不同（颜色取决于频率），而WMAP探测器采用了5个不同的频率。用这些信息，WMAP项目团队可以清除污染，而我兴奋地发现了一个更好的方法可以完成此事。

我的方法基于信息论，由此得到了一张更清晰、分辨率更高的照片（见图2-5右下）。我和安赫丽卡以及我们的老朋友安德鲁·汉密尔顿（Andrew Hamilton）一起工作了一个月，终于提交了一篇论文，之后我的生活才慢慢重回正轨。图2-4里有一个球形的微波背景图像，类

似的图像也出现在本书的封面上。制作这种图的过程非常好玩，给我带来了很多快乐。WMAP项目的团队也很喜欢干这件事，他们甚至做了一个自己的版本，并把它印在一个塑料沙滩球上。这个球现在还在我的办公室里，让整个屋子蓬荜生辉。我把它称为“我的宇宙”，因为它是一个象征、一个符号，将我们目之所及的万事万物都被囊括在内。

邪恶轴心，天图的神秘队列

接下来，让我们来仔细看看宇宙微波背景中的那些星罗棋布的斑点。从这些斑点的大小，我们能解答许多关于宇宙的秘密。我们知道，声音和颜色都可以被分解成不同频率的组合。与之类似，我们也可以把二维的宇宙微波背景辐射图分解成若干个组分（见图2-6），它们有一个古怪的名字，叫多极矩（multipoles）。本质上来说，这些多极矩天图包含着大小不一的斑块。然而，从COBE卫星开始，人们就注意到了一件可疑的事情——第二个多极矩，也就是四极矩天图中，最大的几个斑块比预计的弱很多。然而当时没人能作出一张四极矩天图，来看看究竟发生了什么，因为这需要一张全天图，但银河系的微波干扰对一些天区造成了不可修复的污染。



图2-6　将图2-5中的WMAP探测器天图分解成一组多极矩的加总，可以看到，其中斑点变得越来越小。最前面的两个天图（左图和中图）中，亮斑排列成一个神秘的队列，被称为“邪恶轴心”。不同的颜色代表与平均温度相比的冷热程度。下方的色条代表单位是μK，也就是1开氏度的百万分之一。

现在，有了WMAP探测器的结果，我们终于获得了清晰的天图，看起来可以拿来一用。那是一个深夜，在我们提交天图论文之前不久，安赫丽卡和孩子们都已经睡了，我也正准备上床。但我实在太好奇了，很想看看那讨厌的四极矩会变成什么样，所以我决定写一个计算机程序，生成一张图片来看看。当图片从计算机屏幕上蹦出来时（见图2-6左图），我顿时被迷住了——它不仅比预想的更弱（较冷和较热区域之间的温度起伏几乎接近零），并且沿着一条有方向的一维条带分布，而不是理论预测的随机分布，所以看起来十分有趣。我当时已经困得要死，但为了奖励自己深夜还在工作，我决定再调试一张新图片，于是我把2改为3，得到了一张第三极矩，也就是八极矩的图片。天呢！这究竟是什么？屏幕上出现的图片中，斑块的分布同样遵循一个一维的条带，方向与四极矩基本相符（见图2-6中图）。这可不是宇宙应该有的样子啊！和我们平时拍的照片不同，宇宙的照片不应该存在一个特殊的方向，比如“上”——它应该看起来很随机，不管你怎么旋转照片，看起来应该都一样。然而，我屏幕上的这张宇宙“婴儿照”却拥有斑马一样的条纹，排列在一个特别的方向上。我怀疑我写的代码有问题，于是又把3改成4，出现了第三张图（见图2-6右图），这次和预测的完全一样——斑点随机分布，没有特殊的方向。

安赫丽卡再次检查了数据，确认一切无误之后，我们把这个惊奇的发现写进了天图论文。令我惊讶的是，《纽约时报》竟然提到了我的论文，还派了一个摄影师过来给我拍大头照。接下来，包括我们在内的许多团队都对数据的细节进行了更深入的研究。有些人把那个特殊的方向戏称为“邪恶轴心”；一些人则辩称这是统计学上的巧合，或者是来自银河的干扰。还有人认为，事实应该比我们想象的更神秘，并声称他们用不同的方法在第4和第5极矩中也找到了类似的异常现象。此外，还涌现了一些新奇的解释，比如，我们生活在一个小小的“面包圈宇宙”中，空间转一圈后与自身相连，但后续的分析认定

这是不可能的。直到今天，我对“邪恶轴心”的困惑与那天晚上相比，一点也没有减少。

从0到1，宇宙微波背景理论的历程

2006年，安赫丽卡和我被邀请到斯德哥尔摩，庆祝COBE卫星的研究成果获得诺贝尔物理学奖。不出所料，COBE团队内部开始争抢功劳。最后，奖项由乔治·斯穆特和约翰·马瑟（John Mather）二人分享。看到他俩和解，我十分欣慰。整个COBE团队都被邀请过去，沐浴在当之无愧的荣耀中。我感到，那些不愉快的嫌隙被无休止的高雅酒会用一个明显的事实所黏合了，那就是，他们完成了一项伟大的工作，不仅让两个人同时获得了诺贝尔奖，更重要的是，他们拍下的第一张宇宙“婴儿照”创造出了一个生机勃勃的新领域，把宇宙学的研究带进了一个崭新的时代。我多么希望，乔治·伽莫夫、拉尔夫·阿尔菲和罗伯特·赫尔曼也出现在这里。

2013年3月21日清晨，我5点就起床了，为了看一个巴黎的网络直播——普朗克卫星团队即将公布他们的第一张宇宙微波背景辐射图像。过去的10年里，ACBAR、ACT、南极望远镜等实验设备都曾拓宽我们对宇宙微波背景的知识，但普朗克卫星才是WMAP探测器以来最大的里程碑。我正在刮胡子时，乔治·艾夫斯塔休（George Efstathiou）正在向公众讲述他们的成果，突然一股怀旧和兴奋交织的感觉涌上了我的心头。我仿佛回到了1995年3月，当时艾夫斯塔休邀请我到牛津大学去和他合作，为还未发射的普朗克卫星开发一种新算法。这是我第一次被邀请参加学术合作，感到十分荣幸。我们一起开发出了一种去除干扰信号的新方法，帮助普朗克项目得到了欧洲空间局（ESA）的资金。时光荏苒，现在浴室镜里这个老了8岁、正在刮胡子的我，终于要看到这个项目的成果了。

当艾夫斯塔休展示普朗克卫星最新的天图时，我忍不住放下刮胡刀，找出我们之前清除了前景干扰的WMAP探测器天图放在笔记本电脑屏幕旁边。它们几乎严丝合缝！宇宙邪恶轴心依然存在！我把这两张图都放到了图2-5中，好让你进行对比。你可以看到，所有大尺度结构都能精致地吻合在一起，但普朗克天图中有更多的小斑点。这是由于它有出众的灵敏度和分辨率，能拍下WMAP探测器因无法辨认而模糊掉的小细节。普朗克卫星证明，我们多年的等待是值得的！由于它出色的质量，普朗克卫星总算为WMAP探测器之前的表现提供了一份可对照的答题卡。仔细消化普朗克卫星的结果后，我认为WMAP项目团队的工作完全能得A+。当然，普朗克卫星项目团队也是如此。然而我认为，普朗克卫星给人们最大的惊喜就是：没有惊喜——从本质上说，它再一次确认了我们已经相信的宇宙图景，只是更加精确。宇宙微波背景辐射，终于成熟了。

泰格马克教授将普朗克卫星天图投影到了一个球体上，读者可以仔细端详它丰富的色彩和细节。扫码关注“湛庐教育”，回复“穿越平行宇宙”获取该图。

到现在为止，我们已经将最早的时间由140亿年前拨回到大爆炸后40万年，看见周围的空间充满了炙热的等离子体。那时候，没有人，没有行星，没有恒星，也没有星系——只有原子在弹来蹦去，辐射出耀眼的光芒。然而，更加神秘的问题浮出水面：这些原子从何而来？

原子是大爆炸的产物吗

宇宙，一个熊熊燃烧的核聚变反应堆

之前我们讲到，伽莫夫对宇宙的过去进行了大胆的推演，成功预测了宇宙微波背景，为我们呈现了绝妙的宇宙“婴儿照”。然而对他来说，这个了不起的成就还远远不够，于是，他把时间往回推演到了更早的时候，并算出了结论。时间越早，温度越高。我们知道，大爆炸后40万年时，几千摄氏度的氢元素充满了宇宙空间，几乎有太阳表面一半那么热，所以那时氢元素发生的事，和太阳表面正在发生的一样——发光。所以产生了宇宙微波背景辐射。伽莫夫还意识到，大爆炸后仅1分钟时，氢的温度大约高达10亿℃，比太阳内核还炙热，所以它一定也会发生太阳内核正在发生的事——核聚变，将氢元素聚变成氦元素。然而不久之后，宇宙逐渐膨胀和冷却，冷到不足以发生核聚变时，就像一只无形的手关掉了这个宇宙核聚变反应堆的开关。那时，还没来得及把所有氢都转化为氦。受到伽莫夫的启发，他的学生阿尔菲和赫尔曼对此进行了进一步计算。那时还是20世纪40年代，由于没有现代计算机，他们的工作受到了极大的限制。

宇宙在最初的40万年里是不透明的，之前发生的事都被藏在宇宙微波背景的等离子屏幕后。那么，要如何检验伽莫夫的这个预测呢？伽莫夫意识到，这个情况和对恐龙的研究很相似——你根本不可能直接看到发生了什么事，但你能找到化石证据！用现代观测到的数据和计算机重新运行他们的计算过程，你能预测出，当宇宙还是一个核聚变反应堆时，有25%的质量生成了氦。当你用望远镜，通过遥远星系的光谱来测算它们的氦含量时，你会得到一个数字：25%！对我来说，这和发现霸王龙股骨化石一样令人印象深刻——这就是疯狂往事的直接证据。只不过这件事的疯狂之处在于，万事万物都热得疯狂，就像太阳的核心一样。此外，氦元素并不是唯一的“化石证据”。随着伽莫

夫的理论变得广为人知，太初核合成理论（也就是大爆炸核合成）预测，三十万分之一的原子是氘[5]，五十亿分之一的原子是锂。这两个比例都已被观测证实，并与理论值完美契合。

都错了！大爆炸有麻烦了！

没有人能随随便便成功——伽莫夫的热大爆炸理论遭到了冷遇。实际上，“大爆炸”这个名字还是得自一个批评者——弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle），他最初是想以此来嘲笑它的荒谬。根据20世纪50年代的评判标准，大爆炸理论的两个主要预测——宇宙的年龄和原子的丰度，都是错误的。根据哈勃最初对宇宙膨胀的测算预计，宇宙的年龄不会超过20亿年。地质学家们因此感到很困惑，因为地球上一些岩石的年龄都比这个老。此外，伽莫夫、阿尔菲和赫尔曼当时还希望能证明我们周遭的所有原子都以正确的比例诞生于太初核合成，但他们发现这是不可能的，太初核合成甚至不能产生足够的碳，更不用说氧和其他日常常见的元素了——它只能孕育出氦、氘和一点点的锂。

我们现在已经知道，哈勃极大地低估了星系之间的距离。正因如此，他得出了错误的结论。他所算出的宇宙膨胀速度比真实速度快了7倍，这意味着，宇宙的年龄应该比他所算出来的老7倍。20世纪50年代，人们对星系距离的观测越来越精确，这个错误逐渐被修正。那些不高兴的地质学家终于得到了安慰。

大爆炸预测的第二个“谬误”——原子丰度的错误，也在同一时代消融了。伽莫夫在恒星核聚变上做了很多开创性的研究。他和其他科学家的工作都表明，恒星能产生出氦和一点点其他元素，正如我们的太阳现在正在做的一样。那么，其他元素从何而来呢？伽莫夫希望太初核合成能完成这项任务。然而，20世纪50年代，另一个看起来令人吃惊的核物理发现将氦、铍、碳和氧连接起来了。霍伊尔第一个意

识到，恒星在生命末期会将氦变成碳、氧和大部分常见的元素，正是这些元素组成了你和我。此外，恒星结束自己生命的时候会发生爆炸，将它孕育的大部分原子都回馈到宇宙空间，形成气体云，将来又能从中诞生出新的恒星和行星，最终诞生你我。换句话说，我们与天堂之间的联系，比祖辈想象的要紧密得多——我们都是星尘。我们位于宇宙之中，宇宙也存在于我们之中。洞悉了这一点，伽莫夫的太初核合成理论经历了从失败到成功的腾飞。原来，宇宙在最初的几分钟内，确实只生成了氦以及一点点氘和锂，而之后的所有原子都是由恒星创造出来的[6]。原子从何而来的问题最终被解决了。不鸣则已，一鸣惊人。正如热大爆炸理论在“冷宫”里平步青云一样，1964年，伽莫夫的另一个预言也被观测证实，并震惊了宇宙学界，这就是牺牲几只鸽子才确认的大爆炸余晖——宇宙微波背景辐射。

到底什么是大爆炸

现在，我们已经把时间回溯到了140亿年前，那时候整个宇宙是一个熊熊燃烧的核聚变反应堆。当我说了“我相信大爆炸假说”时，只是指我被这个理论说服了，但仅此而已。

大爆炸假说

那时，我们现在所能看到的一切都比太阳的内核还热，它们膨胀得相当迅速，一秒钟内就能膨胀到两倍那么大。

这个爆炸真的很大，所以我们管它叫“大爆炸”。然而，你也许已经注意到，我给它下的定义十分保守，并没有提到它之前发生的任何事。比如，我并没有暗示宇宙当时的年龄为1秒钟，也没有暗示它的密度曾经无限大或者源自某种令数学规律崩溃掉的奇点。对第1章开头的问题10“大爆炸奇点的存在有证据吗”，答案很简单：“没有！”当然，如果我们把弗里德曼方程向时间的源头一步步推演，它们会在太初核合成1秒钟前一个无限致密的奇点崩溃，但在第6章中我们将会看到，量子力学会让这些方程在还

没到达奇点时就失效。我认为，区分一件事是“有确凿证据”还是“高度推测”，是非常重要的。在这件事上，对大爆炸之前的事，尽管我们有许多令人兴奋的理论和暗示（我们将在第4章继续讨论），但坦白讲，我们其实什么都不知道。目前，这就是我们知识的边界。实际上，我们甚至不能肯定宇宙是否真有一个开端，还是在太初核合成之前就已经经历了超出人类理解范围的永恒时间。

总的来说，人类对时间的认知已被推进到相当久远的过去，揭示出一条宇宙的故事线（我画在了图2-7中）。大爆炸后100万年，空间中充满了相当均匀的透明气体。如果把宇宙这幕戏剧倒着播放，我们会看到这些气体变得越来越炙热，因为其中的原子互相撞击的强度越来越大，直到碎裂成原子核和自由电子——等离子体。接下来，我们会看到氦原子被撞碎，分裂成质子和中子。然后，它们也被撞碎，变成更基本的粒子——夸克。再往后，我们会跨越人类知识的边界，进入一个全凭推测的疆域——在第4章，我们将探讨图2-7中标着“暴胀”和“量子谜题”的两个阶段。现在，让我们再跳到大爆炸后100万年，让时间往后流逝，我们会看到万有引力放大气体间轻微的不均匀，最终形成了我们今天所看到的星系、恒星和丰富多彩的宇宙结构。

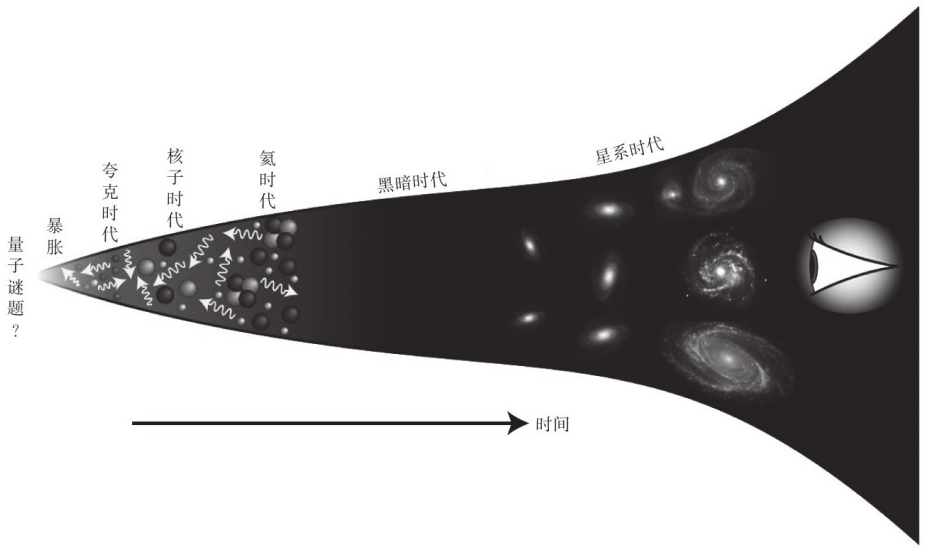


图2-7　尽管我们对宇宙的终极起源知之甚少，但我们对其后140亿年中发生的事却已经了解了很多。随着宇宙的膨胀和冷却，夸克组成了质子（也就是氢核）和中子，接着又聚变成氦核。然后，这些原子核捕获电子，形成原子。在万有引力的作用下，这些原子坍缩成我们今天所观测到的星系、恒星和行星。

不过，万有引力只能将宇宙间轻微的起伏放大，却无法从虚无中创造出起伏。如果宇宙过去是绝对均匀和统一的，万有引力也无计可施，它会永远保持均匀的状态，不可能创造出任何稠密的块簇，更别说星系了。这意味着，在很早的时候，宇宙中一定撒下了这些起伏的种子，得以让引力来放大，这就像一张宇宙的蓝图，决定了哪些地方会生成星系。那这些起伏的种子从何而来呢？换句话说，我们已经看到了宇宙中原子的起源，但是这些原子何以会排列成庞大的星际结构呢？宇宙大尺度结构从何而来呢？在我们所问的所有宇宙学问题中，我认为这是最硕果累累的。为什么？我们将在接下来的两章探索这个问题。



◆由于遥远的光线到达我们需要很长的时间，所以望远镜向我们展开了宇宙的历史画卷。

◆大约140亿年前，我们今天所能看到的一切都比太阳核心还炙热，膨胀得相当快，一秒钟内就能膨胀到两倍大。这就是我所说的“大爆炸”。虽然我们对那之前发生了什么不甚明了，但我们知道许多那之后发生的事——膨胀和聚集。

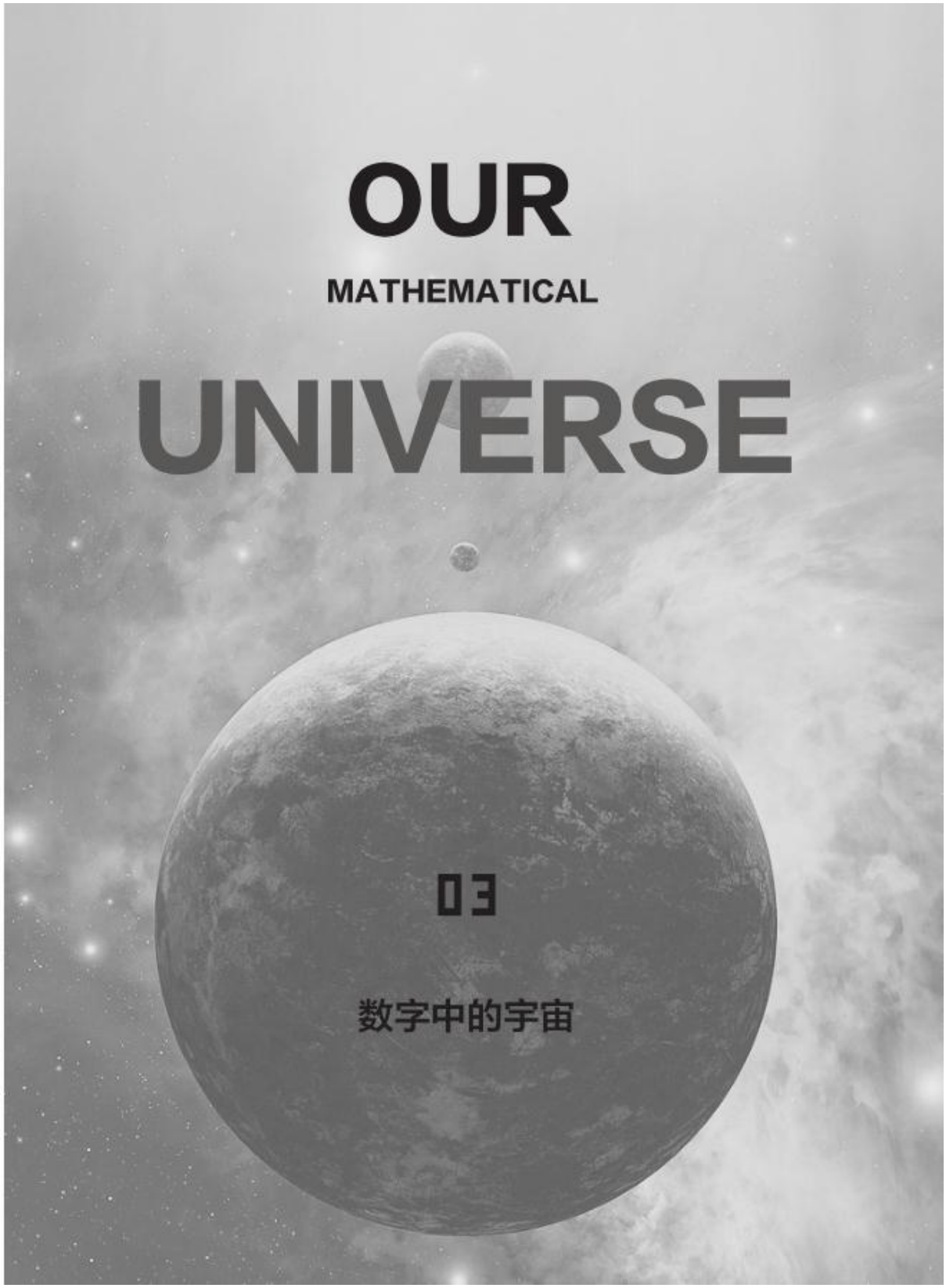
◆宇宙在核聚变反应堆的状态下仅保持了几分钟，那时就像太阳的内核一样，将氢转变成氦和其他较轻的元素，直到剧烈的膨胀稀释和冷却了宇宙，核聚变才停止了。根据计算，我们预测25%的氢元素变成了氦；观测结果不仅与这个预测完美吻合，还符合对其他轻元素的预测。

◆经历了40万年的膨胀和稀释，氢-氦等离子体冷却成了透明的气体。我们能看到这个转变，在遥远的宇宙深处，有一堵等离子体组成的墙，发出暗淡的光芒，这就是宇宙微波背景，此项研究获得了两枚诺贝尔奖章。

◆在接下来的几十年中，万有引力改变了宇宙的图景，从无聊的均匀一致到有趣的成块成簇，放大了我们在宇宙微波背景上所看到的细微密度差别，最终形成了我们今天看见的行星、恒星、星系和宇宙大尺度结构。

◆宇宙暴胀理论预测，遥远的星系会遵循一个简单的方程，离我们远去，这和我们的观测十分相符。

◆简单的物理定律就能准确地描述宇宙的整个历史，也让我们能从过去预测未来，并从未来推断过去。这些支配着宇宙历史的物理定律，都是以数学公式的形式呈现，所以，我们对宇宙历史最精确的描述，都是数学描述。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
03
数字中的宇宙

宇宙学家经常会犯错，但他们从不优柔寡断。

列夫·朗道（Lev Landau）

从理论上说，理论和实践是一样的，但从实践的角度来说，它们却截然不同。

爱因斯坦

“哇！”我惊讶得下巴几乎掉到了地上。我站在路边，一句话也说不出来。眼前的这番景象，我每天都会看到，但却从没好好地端详过它。此时，正是凌晨5点钟，我把车停在一条横穿亚利桑那州沙漠地带的高速公路边，正在查看地图。突然间，我被深深触动了——看，天空！这不再是我从小看到的那片被光污染得糟透了的斯德哥尔摩的天空，因为那里只能看到北斗七星和几颗稀疏又暗淡的星星。而此时此刻，我正凝视着的是一片蔚为壮观、摄人心魂的浩瀚苍穹，成千上万颗明亮的光点，汇成了美不胜收的各种形态。银河闪耀其上，就像一条壮丽的星系高速公路，横跨整个苍穹。

身处海拔2000多米的干燥的沙漠中，我的视野被放大。但我相信，你也曾在远离城市灯光的地方见过这样的美景，你一定和我一样，心中充满了敬畏。那么，这一敬畏又源于何处？毫无疑问，一部分是因为星星和这辽阔的一切。但是，还有一些其他的东西令我们惊讶万分，那就是星星组成的形态。我们的祖先对这些形态十分好奇，为了解释它们而创造出了许多神话故事。一些文明把星星分组，想象

成一个个星座，并用神话中的人物来描绘它们。很显然，恒星在夜空中并不是像波点图案一样均匀分布，而是成团成簇的。那天凌晨，我所看见的最大的星际形态，不是别的，正是我们的银河。利用望远镜，我们会发现，星系与星系一起也能聚集成团簇状的结构，拥有着迷人的形态，组成了星系群和星系团以及硕大无朋的丝状结构，盘踞着亿万光年的宇宙空间。那么，这些形态是怎么形成的呢？这些巨大的宇宙结构究竟源于何处呢？

在上一章的结尾，我们了解到万有引力会带来不稳定性，这同样使我们开始疑惑宇宙大尺度结构的起源。换句话说，我们的理性探讨和对星空的敬畏之情，两者殊途同归，都提出了同样的一个问题：这些宇宙结构源自何方？这就是本章将要探索的关键问题。

通缉令：寻找精确宇宙学

正如我们在上一章所看到的那样，人类依然不理解宇宙的终极起源，尤其不知道在宇宙成为核聚变反应堆、一秒钟能膨胀两倍之前发生了什么事。不过，那之后的140亿年发生的事情，我们已经了解得很多了，那就是膨胀和聚集成团。这两个过程都受到万有引力的控制，将炙热、平滑的“夸克粥”转变成今天这个点缀着灿烂星辰的宇宙。在上一章里，我们把宇宙的历史快放了一遍，其中，宇宙膨胀逐渐稀释和冷却了基本粒子，让它们能够聚集成较大的结构，比如原子核、原子、分子、恒星和星系。自然界存在4种基本作用力，其中3种力轮流驱动着聚集成团的过程：首先是强相互作用力将原子核黏合在一起，接着是电磁力造就了原子和分子，最后是万有引力编织出了让夜空熠熠生辉的大尺度结构。

万有引力是如何做到这一点的？如果你骑自行车时遇到红灯，你会捏紧刹车闸，此时你就会立刻感受到引力导致的不稳定——因为你

会开始不由自主地左右摇晃。为了保持平衡，你只好把其中一只脚放在地上，才不至于摔倒。这些不稳定性的本质是由于细微的波动被放大了。在自行车的例子中，你离平衡状态越远，引力就越容易将你拉倒。而对宇宙来说，宇宙离完美的均质越远，聚集的程度就越容易被引力放大。如果一个区域的密度比周围稍稍大一些，引力就会把邻近的物质也拉过来，让它的密度变得更大，这样它的引力也就变得更大，使得它累积质量的速度也越快。这就好像当你本身就很有钱时，赚钱就变得更容易一样，当质量很大时，累积更多质量的过程就变得很容易。140亿年的光阴，万有引力带来的不稳定性已经足够将哪怕一丁点儿的密度起伏放大为巨大致密的团簇，比如星系，从而将曾经无聊透顶的宇宙涂抹得多姿多彩。

过去几十年里，宇宙膨胀和聚集成团的大格局已被人们所知，但直到我开始上研究生并最初接触宇宙学的1990年，人们对它细节的认知还是雾里看花、水中望月。那时，人们尚在辩论宇宙的年龄究竟是100亿年还是200亿年，反映出长期以来人们对宇宙膨胀速度的不同理解。宇宙现在和过去分别膨胀得多快呢？人们对这个问题已经争论了很长时间。而关于宇宙聚集的讨论则建立在更加摇摇欲坠的基础上，因为人们发现，观测值和理论值大相径庭，反映出一个令人震惊的事实：**宇宙中有95%的组成部分，我们竟全然不知它们为何物！**COBE实验测量数据显示，在宇宙大爆炸40万年后，宇宙只有0.002%的聚集度，这显然说明了，仅靠万有引力，根本不足以把这些微弱的聚集放大到今天我们看到的宇宙大尺度结构，除非存在一种隐藏的物质形式，来贡献额外的引力。

这种神秘的物质被称为“暗物质”，这个名字正好反映了我们对它的无知。其实，“不可见物质”这个名字会更适合一点，因为它看起来是透明的，而不是黑暗的。如果它穿越你的手掌，你将完全察觉不到。确实是这样，来自太空的暗物质穿透地球时，对地球没有任何

影响，而当它穿过整个地球后，会毫发无伤地出现在另一边。如果你觉得暗物质还不够疯狂，下面我将向你介绍另一种神秘物质。有它的存在，宇宙膨胀和聚集的理论预测才能与观测结果相符，它就是暗能量（见图3-1）。人们假定，暗能量只会促使宇宙膨胀，但对聚集成团没有一点贡献，并且暗能量永远都是均匀分布在宇宙中的。

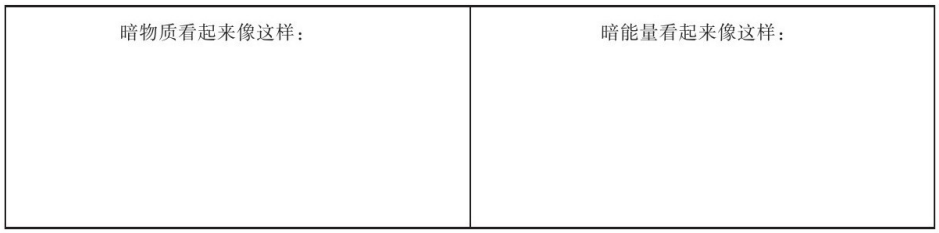


图3-1　暗物质和暗能量都是不可见的，这意味着，它们之间的相互作用不会产生光线和其他电磁现象。我们只能通过万有引力的作用来判断它们的存在。

暗物质和暗能量饱受争议已经许多年。对暗能量来说，最简单的候选者就是所谓的宇宙学常数。我们之前提到过，宇宙学常数是爱因斯坦为自己的引力理论所加上的荒唐数字，后来又自称为他一生最大的错误。1934年，为了解释将星系团聚拢在一起的额外引力，天文学家弗里茨·兹威基（Fritz Zwicky）提出了暗物质假说。到了20世纪60年代，薇拉·鲁宾（Vera Rubin）发现，旋涡星系的自转速度非常快，如果仅靠可见物质提供的万有引力，它们早就分崩离析了，所以它们一定包含着某种看不见的物质，以提供额外的万有引力，维系星系的完整。这些假说遭到了强烈的质疑——如果我们将这些无法解释的现象都归咎于某些可以穿墙而过的不可见物质，那我们是不是应该相信鬼魂的存在？

历史上也曾有过令人不安的荒谬先例。在古希腊，当托勒密意识到行星轨道并不是完美的正圆形时，他炮制出一个复杂的理论，声称行星先是绕着较小的圆圈旋转（称为“本轮”[epicycles]），再由这

些小圆圈绕着大圆圈旋转。正如我之前讲到的那样，更精确的万有引力理论扼杀了本轮理论，预测出行星的轨道是椭圆形，而不是正圆形。说不定在未来，我们还会发现一个更精确的万有引力理论，这样，暗物质和暗能量也能像本轮理论那样“退休”了。如果真发生了这种事，我们还能不能把今天的宇宙学当真呢？

这是我上研究生时所问的问题。要回答这些问题，需要更精确的观测，将宇宙学从一个极度缺乏数据、高度依赖推测的领域转变为一门精密的科学。幸运的是，这正是目前正在发生的事。

精确的微波背景起伏，让预测符合观测

我们在图2-6中看到了由宇宙微波背景实验所生成的宇宙“婴儿照”，它可以被分解成一组不同天图的组合，即“多极矩”。从本质上讲，每个多极矩中都包含着大小不一的斑点。图3-2中展现了每个多极矩中温度起伏的总量。这条曲线被称为宇宙微波背景的功率谱（power spectrum），展示了天图中隐藏的宇宙学信息。翻到图2-4，你会看见图中有许多斑点狗一样的斑块——这些斑块大小不一，有的占据天空中1°的范围，有的跨越2°，诸如此类。在功率谱中，你能看出每种大小斑块的数量有多少。

功率谱最大的好处在于，我们不仅可以测量它，还可以预测它——对于许多关于宇宙膨胀和聚集的数学模型来说，我们可以准确地计算出它们的功率谱长什么样，而且不同模型预测出的曲线相去甚远（见图3-2）。如今，图3-2中的曲线几乎都被观测结果否定了，只剩下唯一的一条。但在我上研究生时，这些被否定掉的曲线中的每一条，都至少有一位德高望重的同行全心全意地相信它是正确的。频谱的曲线形状取决于很多复杂的因素，包括影响宇宙聚集成团的所有因素（比如原子的密度、暗物质的密度、暗能量的密度和“种子”起伏

的性质），所以，如果我们能调整关于这些因素的前提假设，让预测符合观测，那我们就能找到一个完美的模型，不仅可以进行预测，还可以测算这些重要的物理量。

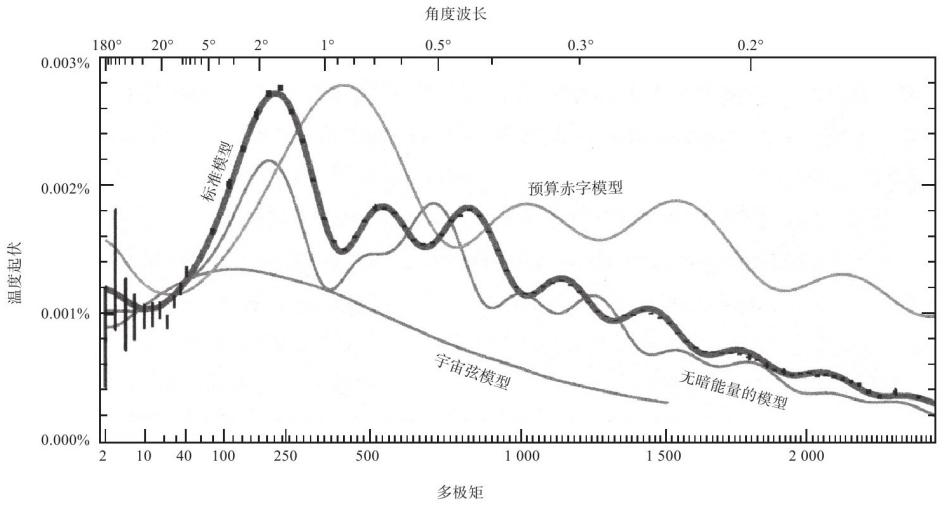


图3-2　对宇宙微波背景中各个起伏所占的角度进行精密地测量后，许多曾流行一时的理论模型都被排除了，但是标准模型却与之完美相符。在这张图里，你能欣赏到现代宇宙学最卓越的成就，而不用担心细节问题——现代高度精密的测量结果都与理论预测值相符。

望远镜和计算机，改变和颠覆

当我在研究生阶段首次知道宇宙微波背景时，根本没有功率谱这种东西。后来，COBE卫星给我们创造了机会，让我们第一次接触到这种歪歪扭扭、深奥难懂的曲线。这种曲线最左端的高度大约为0.001%，那里附近的倾斜度几乎为水平。COBE卫星的功率谱中隐藏着很多信息，但是当时没有人能够把这些信息挖出来，因为这需要处理一个占据31MB空间的沉闷数表，称为“矩阵”。在今天看来，31MB的数据量简直小得可笑，你手机上的一段短视频都有这么大。但是，在1992年，这是一个令人望而生畏的数字。所以，我和同班同学泰德·邦恩

（Ted Bunn）暗中打起了小算盘。我们系的马克·戴维斯（Marc Davis）教授有一台叫作“魔豆”（magicbean）的计算机，拥有32MB内存。在无人注意的凌晨，我常常偷偷摸摸地登录这台计算机，让它分析我们的数据。几个星期的秘密行动后，我们终于发表了一篇论文，里面包含着当时对功率谱曲线形状最精确的测算。

这段经历让我意识到，正如望远镜改变了天文学一样，计算机技术的飞速发展也将让天文学发生翻天覆地的变化，并跨上一个新台阶。现在，你使用的计算机性能已非常强大，可以在几分钟内完成我和泰德用戴维斯教授的计算机算了几个星期的程序。看到那么多实验物理学家为了收集宇宙的数据而鞠躬尽瘁，我感觉我们欠他们很多，于是决定帮助他们处理数据，就像挤牛奶一样，直到挤完数据中的最后一滴精华。接下来的10年中，这成了我的主要工作。

我最着迷的一件事是如何更好地绘制功率谱图。有的方法速度很快，但是不太精确，并且存在一些其他问题。后来，我的好友安德鲁·汉密尔顿找到了一种理想的方法，但却需要超大量的计算，运算量相当于天图像素数的6次幂。也就是说，用这种方法测算COBE卫星天图的功率谱，需要的时间比宇宙的年龄还长。

1996年11月21日，新泽西州的普林斯顿高等研究院里显得安静又黑暗。在这儿的办公室里，我在咖啡的陪伴下又度过了一个疯狂的夜晚。我为自己的一个新想法而感到兴奋，因为这将把汉密尔顿方法中的6次幂降低到3次幂，这样，我就可以在一小时内算出COBE卫星最精确的功率谱。当时，我正在手忙脚乱地完成次日会议的一篇论文。在物理学界，一旦我们完成一篇论文，就会立刻把它上传到一个免费网站http：//arXiv.org/上，这样我们的同行就能尽早地读到它们，以免在审稿和出版过程中陷入泥淖。对此，我有一个坏习惯——在我写完论文的前一天上传，时间点选在那天上传的最后期限刚刚结束之后。这样，我的论文就会成为第二天的论文列表中的第一个。但这有一个坏处，如果我没有在24小时内写完论文，我就会因上传一篇没有写完的草稿而在全世界的同行面前丢尽老脸，成为愚蠢的纪念碑。

这一次，我的策略终于“后院起火”。我打算在凌晨4点左右上传完整的论文，然而，欧洲那边“早起的鸟儿们已经开始吃虫子了”，他们看到的是尚未完成、一团乱麻的讨论。在第二天的会议上，我的好友劳埃德·诺克斯（Lloyd Knox）递交了一篇论文，描述了一种和我差不多的方法，这是他和安德鲁·杰菲（Andrew Jaffe）、迪克·邦德在多伦多得出来的成果，但还没有写完发表。当我宣布我的结果时，劳埃德微笑着对迪克说：“泰格马克真是小快手！”结果证明，我们的方法相当有用。从那时起，几乎所有的微波背景功率谱都采用这种方法来测算。有趣的是，我和诺克斯循着两条几乎完全相同的平行线在生活——我们在同一时间想到了同一个点子（实际上，他比我更早想到一个很酷的方程，可以用来处理微波背景天图的噪声），我们同时有了两个儿子，我们甚至在同一时间离了婚。

山中宝藏

随着实验方法、计算机和研究方法的进步，图3-2中功率谱的测算方法逐步优化。正如图中所示，这些曲线的形状看起来有点像起伏的群山，有着一系列明显的波峰。如果你测量了许多大丹犬、狮子狗和吉娃娃的大小，并在坐标系中标出它们大小的分布情况，那你会得到三个峰值。同样的道理，如果你测量图2-4中的宇宙微波背景斑点，并标出它们大小的分布情况，你会发现，其中有几种特别的尺寸十分常见。图3-2中最突出的峰值对应着角距离约为1°的斑点。这是为什么呢？原来，这些斑点是由声波所引起的。这些声波在宇宙等离子体中以接近光速的速度横冲直撞。由于宇宙等离子体存在于大爆炸后40万年，这些斑点的大小也扩大到大约40万光年。40万光年的斑点在140亿年后将在天空中覆盖多大的角距离呢？如果你计算一下，得到的结果就是大约1°。除非，空间是弯曲的……

正如我们在第1章中讨论的那样，均匀的三维空间并不只有一种。除了我们在中学所学的平滑的欧几里得几何学之外，还有一些弯曲的空间，其中的角度遵循着截然不同的公理。

- 中学时，老师告诉我们，在一张平坦的纸面上，三角形的内角和等于180°。
- 如果你把三角形画在橙子弯曲的表面上，它的内角和加起来将超过180°。
- 如果你把它画在一个马鞍上，它的内角和会小于180°（见图1-7）。

同样地，如果我们的物理空间弯曲得像一个球面，那么微波背景斑点所覆盖的角距离就会超过1°，使得功率谱曲线的峰值向左移动全角；如果空间像马鞍一样弯曲，那这些斑点的角距离就会小于1°，使得功率谱曲线的峰值向右移动。

在我看来，爱因斯坦的引力理论中最令人倾心的理念就是，几何并不只是数学的，也是物理的。尤其是，爱因斯坦的方程告诉我们，空间中包含的物质越多，弯曲得就越厉害。在这种弯曲的空间中，物体并不是沿直线运动，而是弯向有质量的物体——以一种几何的方式解释了万有引力。这开启了一种测量我们宇宙的全新方式——只需要测量一下宇宙微波背景功率谱曲线中的第一个峰值！如果峰值的位置表明宇宙是平的，那根据爱因斯坦的方程，宇宙的平均密度就是10^{-26} kg/m^3，相当于每个地球大小的体积内包含10毫克物质，或者每立方米包含6个氢原子。如果第一个峰值非常靠左，密度就会变大，反之亦然。面对暗物质和暗能量所带来的困惑，测算宇宙的密度变得异常重要，所以，全世界各地的实验团队都在争先恐后地测算第一个峰值的位置。它也被认为是最容易测算的一个峰值，因为测量大斑点肯定比测量小斑点容易。

1996年，莱曼·佩奇的学生巴斯·尼特菲尔德（Barth Netterfield）利用萨斯卡通的数据率先发表了一篇论文，让我第一次得以窥见这个饱受关注的峰值。看到这篇论文，我在心里欢呼了一声，忍不住放下满勺子的麦片，开始认真读起来。我的大脑告诉我，这个功率谱峰值背后的理论非常优雅，但我内心却感到，人类的推演不可能做好

这件事。3年后，莱曼·佩奇的另一位学生安伯·米勒（Amber Miller）又带头发表了一篇论文，对第一个峰值进行了更精确的测算，发现它的位置大概对应一个平坦的宇宙。但我依然不太敢相信这是真的。到了2000年4月，我终于接受了这一点。一个名为“飞去来器”的微波望远镜，悬挂于一个足球场那么大的高空气球下面，在南极上空环航了11天，终于得到了当时最精确的功率谱数据。其中的第一个峰值堪称完美，刚好处于平坦宇宙的位置。于是，我们终于知道了宇宙的空间平均密度。

“远浮于世烟云外”的暗能量

如果把宇宙中的物质纳入考虑，这个测量结果就显得十分有趣了。根据图3-3中第一个峰值的位置，我们知道了宇宙的总量，它就好像一个“总预算”。我们也知道普通物质的密度，并通过测量宇宙聚集成团的引力效应了解了暗物质的密度。然而，普通物质和暗物质的总量加起来却只有“总预算”的32%，那剩下的68%是什么呢？一定是某种特殊的、不会聚集成团的东西，我们把它称为“暗能量”。

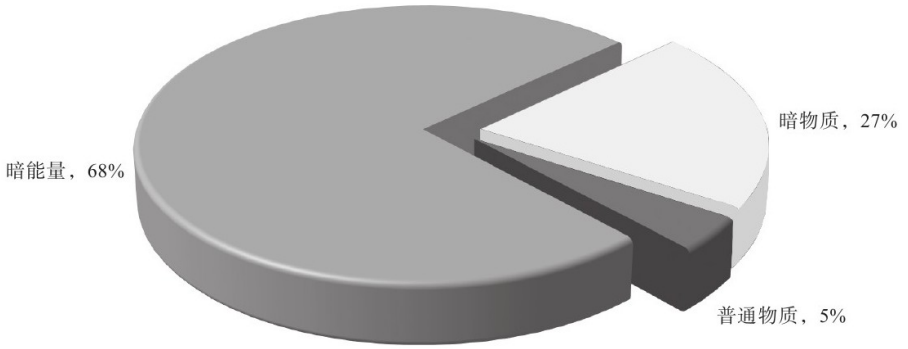


图3-3　宇宙的“总预算”。宇宙微波背景功率谱峰值的水平位置告诉我们，宇宙空间是平坦的，宇宙的平均密度大约是水的密度的$1/10^{30}$。峰值的高度告诉我们，宇宙有32%是由普通物质和暗物质组成，所以剩下的68%一定由其他东西组成，这就是暗能量。

下面我来请出一位重磅嘉宾——超新星。关于宇宙膨胀（而非聚集）的众多独立证据向我们证明，暗能量所占的比例不多不少，正好是68%。之前我们曾谈到，科学家用造父变星作为“标准烛光”来测量宇宙中的距离，现在，我们宇宙学家的工具箱中多了一个更加明亮的标准烛光，它在几百万光年，甚至数十亿光年外也清晰可见。这就是宇宙中的超级大爆发——Ia型超新星，它们在几秒内释放出的能量甚至超过了10亿亿个太阳。

还记得《小星星》这首歌吗？当简·泰勒（Jane Taylor）写下歌词“远浮于世烟云外，似若钻石夜空明”（Up above the world so high, Like a diamond in the sky）时，她并不知道自己是多么有预见性——再过50亿年，当我们的太阳走到生命的尽头，它会变成一颗白矮星，那是一个主要由碳元素组成的巨球，就像钻石一样。今天，我们的宇宙中充满了白矮星，它们都是古老恒星的遗物。其中许多白矮星的重量都还在持续增加，因为它们正狼吞虎咽地从伴星那里吸取气体。当超重时（达到1.4倍太阳质量），它们就会突发恒星版的“心脏病”——变得极其不稳定，并发生超大规模的热核爆炸，这就是Ia型超新星。由于这些宇宙炸弹都拥有相同的质量，所以，它们的能量也几乎一样强大。

此外，人们还发现，每颗Ia型超新星爆炸的能量有着轻微的差别，这些差别与爆炸的光谱以及明暗变化的速度相关，而这些因素都可以被测量。这样，Ia型超新星就变成了天文学家手中精密的标准烛光。

索尔·佩尔穆特（Saul Perlmutter）、亚当·里斯（Adan Riess）、布莱恩·施密特（Brain Schmidt）、罗伯特·科什纳（Robert Kirshner）等人运用这种技术，精确地测量出了大量Ia型超新星之间的距离，并根据红移计算出了它们的退行速度。根据这些计算结果，

他们重构出当时最精密的宇宙膨胀模型，揭示出宇宙在过去不同的时间段里不同的膨胀速度。1998年，他们宣布了一个令人惊讶的结论，并最终获得了2011年诺贝尔物理学奖，即宇宙在最初的70亿年里都在减速膨胀，但是从那之后，宇宙竟然开始加速膨胀！如果你向空中抛出一块石头，地球的万有引力会降低它远离地球的速度，然而宇宙加速膨胀却揭示出一种奇怪的“引力”，它并非吸引，而是相斥。下一章我将进一步探讨，爱因斯坦的引力理论预测到暗能量正好拥有这种反引力的作用。超新星的研究团队们发现，68%这个比例正好能和他们的观测结果完美地吻合。

喜忧参半

对我来说，当科学家最好玩的事情就是可以和很酷的人合作。与我合作论文最多的是一个友善的阿根廷人，名叫马蒂亚斯·扎尔达瑞亚（Matias Zaldarriaga）。我和前妻私下里给他起了个昵称叫“伟大的扎尔达”（Great Zalda），并一致认同，他的幽默感甚至超越了他的科学天赋。如果要预测图3-2中的功率谱曲线，就必须用到他参与编写的计算机程序。有一次，马蒂亚斯还跟人赌一张去阿根廷的机票，只因有人说他的预测是错误的、根本没有什么峰值。

为了给“飞去来器”团队的结果做准备，我们加快了计算速度，并构建了一个庞大的数据库，装满了用来同观测进行对比的模型。当“飞去来器”团队公开数据时，我再一次向http：//arXiv.org/网站上传了一篇没写完的论文，接着，我们兴高采烈、夜以继日地工作，争取能在星期日晚上之前完成它。普通物质（也就是原子）聚集形成的物体能被暗物质毫发无伤地穿过去，所以二者在宇宙空间中的运动方式是不一样的。这意味着，普通物质和暗物质影响宇宙聚集成团和宇宙微波背景功率谱曲线（见图3-2）的方式也截然不同。具体地说，在宇宙“总预算”中增加原子的数量，会降低功率谱中的第二个峰

值。“飞去来器”团队的功率谱曲线中，第二个峰值非常微弱，我和马蒂亚斯发现，这需要宇宙中包含至少6%的普通物质才会有这样的结果。但是，第2章中提到的宇宙核聚变反应堆——也就是太初核合成只有在原子只占5%的情况下才起效果，所以，一定有哪里出错了！

当时，我将要在阿尔伯克基市（Albuquerque）进行演讲，我在那里度过了难忘的几天。我很振奋，因为我将把宇宙泄露给我们的全新线索告诉听众。手忙脚乱中，我和马蒂亚斯差点错过上传论文的截止时间，但我们还是比“飞去来器”团队的分析论文早了一步。他们很不幸地被一台老旧的计算机给拖累了，只因为论文中一个图名长出了一个单词。

交叉球棍在冰球比赛中可不是什么好事，但交叉检验对科学却大有裨益，因为它可以让隐藏的错误无处遁形。“飞去来器”让宇宙学家们得以有机会对宇宙“总预算”进行两次交叉检验：

- 我们用两种不同的方法测算了暗能量的比率（分别是Ia型超新星和宇宙微波背景功率谱峰值），结果都是一样的。
- 我们用两种不同的方法测算了普通物质的比率（分别是太初核合成和宇宙微波背景功率谱峰值），结果却不一样。所以，这两种方法中，至少有一个是错误的。

三位圣诞老人的礼物

一年后，在华盛顿特区的一场富丽堂皇的新闻发布会现场，我的屁股简直像粘在了椅子上，感觉就像圣诞老人来临了三次。第一个“圣诞老人”是天文学家约翰·卡尔斯特姆（John Carlstrom），他宣布了自己用南极的DASI微波望远镜发现的结果。他先讲了一段冗长的技术细节，这些我都已经知道了。接着，他公布了一张功率谱曲线图，这是我当时见过的最惊艳的一张！

接下来，“圣诞老人二号”出现了，他是来自“飞去来器”团队的约翰·鲁尔（John Ruhl）。他和卡尔斯特姆一样，也先讲了一段冗长的话。接着，又是一张令人吃惊的功率谱图，包含三个峰值，和DASI的图像完美地吻合。这一次，曾经羸弱的第二峰值变大了，因为他们改进了望远镜的建模系统。

最后，“圣诞老人三号”保罗·理查兹（Paul Richards）公布了气球实验MAXIMA的结果，与前两个结果相当一致。我简直惊呆了。这么多年里，我一直梦想着能够从微波背景中得到那些神出鬼没的线索，现在它们就近在眼前！宇宙只有几十万年历史时发生的事，像画卷一般徐徐展开在人们面前——人类想破解这个秘密，曾经听起来是多么傲慢，但现在它真的发生了！

那天晚上，我赶紧用这些新数据重新运行了我的模型拟合软件，第二个峰值真的变高了，我的代码预测出原子的比率为5%，与太初核合成完美吻合。原子的交叉检验终于从失败的深渊爬上了胜利的顶峰，宇宙终于重新恢复了秩序，并一直保持着——到现在，WMAP探测器、普朗克卫星等对功率谱曲线又进行了更精确的测量（见图3-2），我们能从中看到，原来那些早期的实验一直都是正确的。

幸运降临

到2003年，宇宙微波背景辐射大概是宇宙学领域最成功的故事。它成了一剂灵丹妙药，仿佛可以解决所有问题，让我们能测量出宇宙学模型中的所有关键数据。但这种看法是错误的。假设我的体重是90公斤，光靠这个信息显然不足以让你得知我的身高和胖瘦，因为这两者都是体重的决定因素——我可能又高又瘦，或者又矮又胖。我们在测算宇宙其他的重要数据时，也会遇到类似的问题。比如，那些特殊的宇宙微波背景斑点的大小与图3-2中功率谱峰值的位置相对应，这些

斑点的大小取决于两个因素——空间曲率和暗能量密度，前者会放大或缩小斑点，后者会影响宇宙膨胀的速度，从而影响斑点所在的等离子体与我们之间的距离，也就能影响它们看起来的大小。

所以，尽管许多记者声称“飞去来器”团队和WMAP项目团队的实验都表明我们的宇宙空间是平坦的，但事实可能并非如此——如果暗能量的占比约为70%，宇宙就是平坦的；但如果暗能量的占比不是70%，空间就是弯曲的。除此之外，还有一些参数对无法从微波背景的数据中提取出来，比如早期宇宙中的聚团程度和第一批恒星形成的时间，这两个数据都会以相似的方式影响图3-2中的功率谱曲线（都会改变峰值高度）。我们在中学课堂上就已经学到，要算出两个未知数，至少要有两个方程。在宇宙学中，我们希望确定7个未知数，但仅靠微波背景，不足以提供那么多信息。所以，我们还需要更多的宇宙测量数据，比如一个三维的星系图。

星系红移巡天

在绘制三维的星系图之前，我们首先需要分析二维的天图，从中发现星系的影踪，接下来再测量它们各自的距离。迄今为止最雄心勃勃的三维星系图计划是“斯隆数字化巡天”（Sloan Digital Sky Survey, SDSS）。我在普林斯顿大学做博士后时，有幸参与到了这个项目中。在此之前，已有一小拨人为筹划这个项目而工作了将近10年的时间。他们搭建了望远镜的硬件设施，让一切走上正轨。这个定制的2.5米望远镜位于新墨西哥州，它花了十几年的时间扫描了超过1/3的天空，绘制了一幅二维的天图（见图3-4）。吉姆·冈恩（Jim Gunn）是普林斯顿大学的一名教授，他总让我想起长着大胡子的友善巫师。他施展自己的魔力，为这个望远镜造了一台神奇的数码相机，这是当时天文学领域最大的照相机。

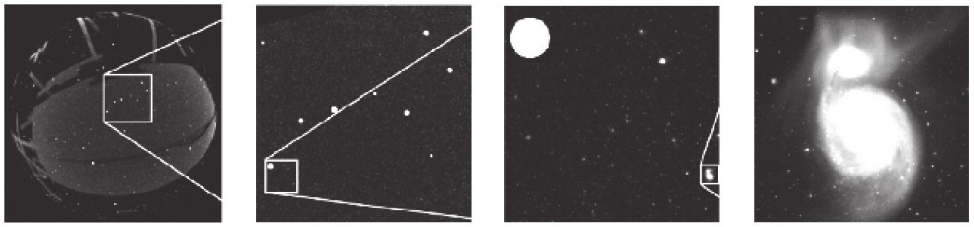


图3-4　SDSS计划中包含着超巨量的信息。左图中的球体代表整个天空，其中包含大约1万亿像素，是100万像素的100万倍。你可以把镜头拉近，就像第二张图片一样，聚焦在北斗七星之后的一个旋涡星系。在SDSS的天图中，每个地方都可以这样拉近，让你仔细查看。（图片来源：麦克·布尔顿[Mike Blanton]、大卫·霍格[David Hogg]/SDSS）

如果仔细观察SDSS的天图（见图3-5），你将会发现数不清的恒星和星系等物体——实际上，大约超过5亿个。这个数字非常庞大，如果你让一个研究生把这些物体一个个找出来，假设他的速度为每秒一个，每天不休息地工作8小时，一周工作7天，没有周末和节假日，那也得等上50年。即便对计算机来说，这个任务也陷阱重重——它需要区分出星系（看起来真的很模糊）、恒星（如果没有大气层干扰，看起来就是一个针尖似的亮点）、彗星、卫星和各种人造物体。更糟糕的是，这些物体经常相互重叠在一起，比如，一颗较近的恒星挡在了一个遥远星系的前面。很多人为这个问题伤透了脑筋，花费了很多年的时间。最终，这个问题被一个英雄般的程序解决了。写这个程序的人叫罗伯特·卢普顿（Robert Lupton），是一个活泼可爱的英国人，他在电子邮件里用“好人罗伯特·卢普顿”作为自己的签名，并且不爱穿鞋，总喜欢光着脚走来走去。



图3-5　普林斯顿大学天文学系里，有一整面墙都用SDSS的一小块天图来装饰。第二张照片里，卢普顿正在和我的儿子们一起仔细观察这张天图。卢普顿的软件辨识出天图中所有物体之后，我们已经测出了大部分有趣的星系与地球之间的距离，创建了一个三维的天图（左图）。这个天图中，地球位于中心，每个点都代表一个星系。“斯隆长城”（Sloan Great Wall）位于图中从上往下约1/3的地方。

下一步工作，就是测出每个星系的距离了。在第2章，我们介绍了埃德温·哈勃的定律$v=Hd$，这意味着宇宙在膨胀，并且星系的距离d越大，它远离我们的速度v就越快。如今，哈勃定律已经打下了坚实的基础，我们可以把它反着算，先用星系光谱线呈现出的红移测出它的退行速度v，再用v来计算星系的距离d。从根本上说，在天文学里，测量红移和速度比测量距离要简单得多，所以哈勃定律可以为我们节省大量的工作——我们只需要先用较近的星系测出哈勃常数H，然后测出遥远星系的红移谱线，得出速度v，再除以H，就可以得到一个八九不离十的距离d了。

卢普顿的软件解决了物体分类的问题，接下来我们测量了100万个星系的光谱。在哈勃的年代，他发现宇宙膨胀用了24个星系的光谱，而这24个光谱花了好几个星期的时间才获得。相比之下，SDSS简直可以实现量产——每小时能生成640个光谱，并同时进行测算。它的诀窍就是将640根光纤排布于望远镜的焦面上，置于卢普顿的软件认定有星

系的地方，用这些光纤将星系的光线导入光谱仪，光谱仪会将这些光线分解成640个光谱，从而被照相机拍摄下来。大卫·施莱格尔（David Schlegel）等人开发了另一个软件包，用来分析这些彩虹，并根据光谱的红移程度计算出它们的距离以及星系的其他性质。

在图3-5左图中，我切下了一片宇宙的三维天图，其中的每个亮点代表一个星系。每当我想远离尘世时，就会用一个三维的宇宙飞行模拟器在其中飞来飞去，穿行在星系间。这种经历展示了一个壮美的事实：我们是某种更庞大的造物的一部分——这不仅仅是在说地球是太阳系的一部分、太阳系是银河系的一部分。事实上，**我们的银河系也只是一张巨网的一小部分，而这张巨网由星系群、星系团、超星系团以及庞大的丝状结构编织而成。**当我凝视着SDSS天图时，我注意到了一个明显的结构，它的尺度是如此震慑人心，简直让我目瞪口呆，怀疑自己的程序出错了。这个结构后来被称为“斯隆长城”（见图3-5左图）。它的出现绝对不是错误，而是真实的存在。我的一些同事也注意到了它的存在。它的长度有140亿光年，是我们的宇宙中目前已知的最大结构。这些大尺度团簇结构，是宇宙学的宝藏，包含着许多价值连城的信息，而这正是宇宙微波背景所缺少的。

从被嘲笑的宇宙学到精确宇宙学

这些星系分布的模式，对应着宇宙微波背景天图中所呈现的模式——只不过晚了亿万年，同时被引力所放大了。假如一个区域的气体密度比周围大0.001%，那它可能在WMAP探测器天图（见图2-4）中形成一个斑点，而到了今天，此处可能就聚集着几百个星系。从这个意义上说，我们可以把宇宙微波背景起伏看作宇宙的DNA，它是一个蓝图，决定着宇宙将变成什么样。将宇宙微波背景中过去的微弱聚集与三维星系图中现在的明显团簇进行对比，我们就能测量出那些用引力促成这些聚集的物质具有什么性质。

我们之前提到，宇宙微波背景中的聚集可以用功率谱曲线（见图3-2）来表示，星系的聚集也同样可以。然而，要精确地绘出这条曲线却十分困难——我花了整整6年的时间来完成SDSS的星系功率谱曲线（见图3-6），这还没有算上其他同行给予我的大量帮助。这是我这一生最筋疲力尽的项目。一次又一次，我对自己说：“感谢上帝，我就要做完了，因为我再也受不了了！”然而，一次又一次，我又会在分析中发现一个新的大问题。

为什么这个任务如此之难，竟难于上青天？其实，如果我们知道每个星系的准确位置，同时拥有一台无限强大的计算机来分析它们，那这件事其实相当容易。但是在实践中，因为各种各样的原因，许多星系都不为我们所见，即使是我们能看见的星系，有一些距离和亮度也与我们认为的不一样。如果我们忽略这些事实，就无法绘制出准确的功率谱曲线，从中得出的结论也将错漏百出。

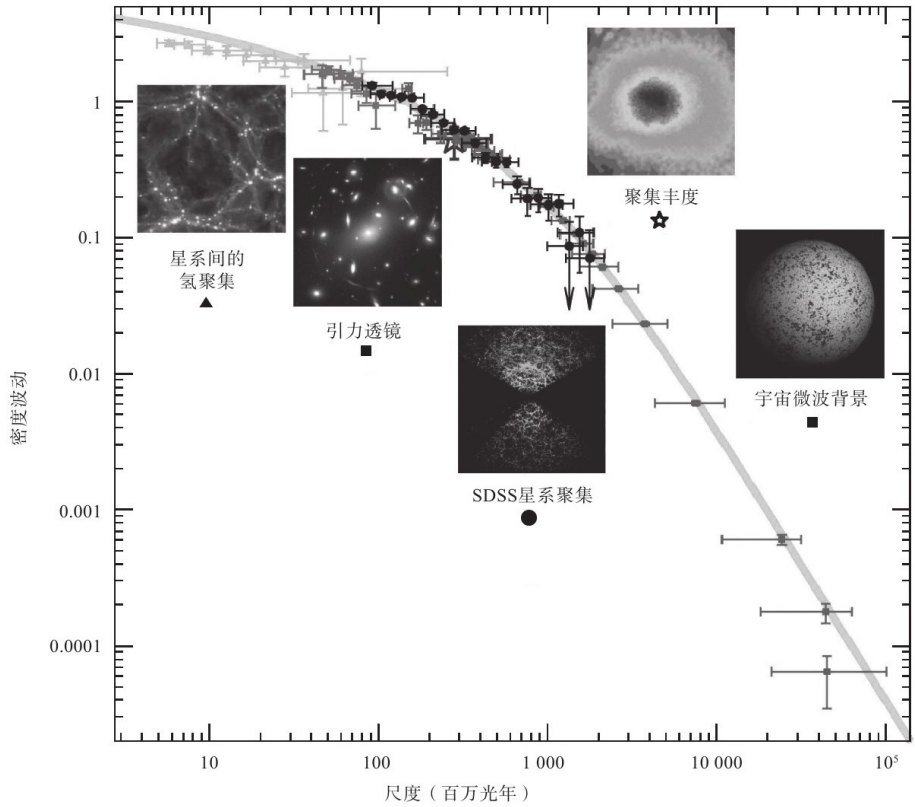


图3-6　宇宙中物质的聚集情况可以用这个功率谱曲线来表示。横坐标10亿光年处对应的曲线值大致等于10%，意思是说，当你测量宇宙中半径为10亿光年的球形空间内的质量时，你测得的结果会根据这个球形空间在宇宙中的不同位置而变化，变动区间为10%。和我刚开始工作时不同，现在有了高度精确的测量结果，并且它们都符合理论预测。上图中，你可以看到，5个不同实验的测量结果都相互吻合，尽管它们的数据、团队和方法大相径庭。在我看来，这是一件非常了不起的事情。

最早的三维星系图实在太小了，没办法进行分析。我的同事迈克尔·福格勒（Michael Vogeley）曾经给了我一张图，其中汇集了到1996年为止最全面的测量结果。我问他为什么不在其中加上误差棒来标注测量的不确定度，他说：“因为我不相信它们。”他的怀疑态度事出有因：有些团队声称自己比其他团队强大10倍，所以，他们不可能都是对的。

全世界各地的研究团队逐渐绘制出更大的三维星系图，并把它们共享到互联网上。我觉得，既然这么多人花了这么多心思在绘制天图上，那必须有人来好好分析这些数据，才对得起他们。所以，我和朋友安德鲁·汉密尔顿组建了一个团队，采用我们在分析宇宙微波时所用的信息论方法来测算星系功率谱图，帮他们添砖加瓦。

> 安德鲁是英国人，他是个不可救药的开心果，脸上总挂着淘气的微笑，他也是我最喜欢的合作者之一。有一次，我、安德鲁、韦恩·胡（Wayne Hu）和新剃了光头的大卫·霍格（David Hogg）约在一个餐厅见面。我迟到了，于是询问女服务员有没有看见三个人，分别长得像演员罗伯特·雷德福（Robert Redford）、李小龙和侦探科杰克（Kojak），她想了想，笑着说：“罗伯特·雷德福在那边……”

我和安德鲁分析了各种各样的三维天图，它们的尺度日渐增大，并且都有着令人费解的名字，比如IRAS、PSCz、UZC和2dF，分别包含有5 000、1.5万、2万和10万个星系。安德鲁住在科罗拉多州，我们通过电子邮件和电话讨论了无数次关于功率谱测算中的艰难之处。我们还在阿尔卑斯山和落基山脉一起远足，期间探讨的话题也都离不开这个。

SDSS以全数字化成像和细致的质量控制为基础，绘制出了最大、最清晰的天图，所以我认为它完全值得用最小心翼翼的态度来分析。由于担心成为薄弱环节，我花了很多年的时间来处理许多被不少人认为是最无聊的事情。这个项目的推动者之一吉尔·克纳普教授（Jill Knapp），是吉姆·冈恩的妻子，她每周都会在普林斯顿大学召开例会。每到那时，她就会用很多好吃的食物来招待我们，与此同时，我们在分析室里努力辨认所有构架，试图找出处理它们的方法。比如，某一个特定的方向上能绘制出多少星系取决于很多因素，例如，拍摄那天的天气如何，有多少星际尘埃挡在中间，光纤挡住的可见星系所占的比例等。老实说，这些事真的很枯燥，但我从许多人那里获得了极大的帮助，尤其是迈克尔·斯特劳斯教授（Michael Strauss）和他

当时的研究生麦克·布兰顿（Mike Blanton）。与此同时，我还常需要让计算机花几星期时间，无穷无尽地循环计算多达几个太字节的矩阵数表，还要时刻盯着算出来的混乱图形，调试代码，并一遍又一遍地重试。

就这样过了6年，2003年，我终于提交了两篇论文，每一篇的共同作者都超过了60人。我的一生中，从未有过这样如释重负的感觉——也许写这本书除外。第一篇论文考量了图3-6中的星系功率谱图，第二篇则将其与微波背景功率谱图结合起来，从中得出一些宇宙参数的度量值。我将一些重点列在了表3-1中；在此我更新了数据，采用了其他人的最新成果，然而，尽管不确定性在下降，但数值并没有太大变化。（表3-1显示，将宇宙微波背景天图与三维星系天图结合起来，我们能测算出一些关键的宇宙参数，误差率仅在几个百分点。）在我上研究生时，人们为宇宙年龄是100亿年还是200亿年而争论得不可开交，对此我到现在还记忆犹新。而现在，我们争论的焦点已经变成了宇宙年龄究竟是137亿年还是138亿年！精确宇宙学的时代终于来临了，我因自己能参与其中小小的一部分而感到兴奋和荣幸。

表3-1　对一些关键宇宙参数的测算值及误差率

参数名	参数符号	测算值	不确定度
原子的比例	Ω_b	0.049	2%
暗物质的比例	Ω_d	0.27	4%
暗能量的比例	Ω_Λ	0.68	1%
中微子的比例	Ω_ν	0.003	100%
总预算	Ω_{tot}	1.001	0.7%
宇宙年龄（10亿年）	t_0	13.80	0.2%
种子聚集的幅度	Q	0.000 019 5	3%
种子聚集的“倾斜度”	n	0.96	0.5%

对我个人来说，幸运女神也随之降临——2004年秋天，我因MIT的终身教职而接受了评估。我被告知，要想获得这个职位，我需要“一

个全垒打或者几个二垒安打”。正如音乐家们需要有一张作品的销售前十排行榜一样，我们科学家也需要类似的东西——引用列表。每次有人引用你的论文，就好像在你的帽子上添了一根羽毛。引用这档子事儿有时候很随机，也很愚蠢，人都有从众的倾向，因为一些懒惰的作者会直接抄袭别人的引文，根本连读都不读一下原文。但是晋升委员会还是会把引用率纳入考量，就像棒球教练会考虑击球率一样。就在我祈祷好运时，这两篇论文突然间一跃成为我有史以来引用率最高的论文，其中一篇甚至一度飙升为2004年物理学界引用最多的论文——尽管占据榜首的时间并不长，但对终身教职来说已经足够了。我的好运悄无声息地持续着。《科学》杂志决定将“2003年科学突破”之首颁发给宇宙学，因为宇宙学终于变成了一门可以信赖的科学，并提到WMAP项目和SDSS的分析结果功不可没。

平心而论，这些数据根本算不上什么突破，只是近年来全球宇宙学家共同推进的一个缓慢而坚定的进步过程。我们的工作算不上具有革命性，也并没有什么令人惊讶的发现。相反，我们只是简单地让宇宙学变得更加可信，让它成长为一种更成熟的科学。对我而言，最大的惊喜就是没有惊喜。

苏联著名物理学家列夫·朗道曾说过：“宇宙学家经常会犯错，但他们从不优柔寡断。”有太多例子可以证明这句话了——阿里斯塔克斯所声称的太阳距离比实际近8倍，哈勃声称的宇宙膨胀速度比实际快7倍。好在这种野蛮生长的状态已经结束了——我们看到了太初核合成和宇宙聚集对原子密度的各自预测完美吻合，Ia型超新星和宇宙聚集对暗能量密度的分别测算也相互印证。在这些交叉检验中，我最喜欢的是图3-6中展现的那个——图中，我画出了5个不同的测量结果所对应的功率谱曲线，尽管它们各自使用的数据、测量团队、所使用的方法有着天壤之别，但你可以从图中看到它们彼此是多么吻合。

我们宇宙的终极地图

还有很多未知区域

现在，我正坐在我的床上，手上敲着这些字，心里想着宇宙学的变迁史。当我还在做博士后时，我们常常谈论，如果能获得准确的数据并最终精确地算出宇宙参数的值，那将是一件多酷的事情。而现在，我们终于可以说：“我们做到了。”答案就在表3-1中。那么，下一步要做什么呢？宇宙学是否已走到尽头？我们宇宙学家是不是该换工作了？

我的答案是：“不！”为了说明宇宙学里还有很多有趣的领域尚未被探索，让我们擦亮眼睛看一看宇宙学家的成就有多么微不足道吧——我们只是将自己的无知参数化了而已，因为在表3-1中的每一个参数背后，都隐藏着无人知晓的奥秘。比如：

- 我们已经测出了暗物质的密度，可是暗物质到底是什么？
- 我们已经测出了暗能量的密度，可是暗能量到底是什么？
- 我们已经测出了原子的密度（1个原子对应20亿个光子），但是这个数量是怎么产生的？
- 我们已经测量了种子起伏的水平大约为0.002%，但是它们从何而来呢？

随着数据越来越精确，我们将能越来越精确地测算表3-1中的数值，小数点后的位数也会越来越多。但是，比起把旧参数变得更精确，我更想用它们来测量新的参数。比如，我们可以尝试着测量暗物质和暗能量除密度之外的其他性质。暗物质有压力吗？有速度吗？有温度吗？这将阐明它的本质。暗能量的密度真如目前看起来的那样绝对恒定吗？如果我们能测量出暗能量随时间发生着轻微的改变，或者在宇宙中不是绝对均匀分布的，这将是一个关键的线索，让我们更能

理解它的本质，以及它将如何影响我们宇宙的未来。种子起伏除0.002%的振幅外，还有其他性质和模式吗？这将让我们得以窥见宇宙的起源。

要如何解决这些问题，我真的想了很多很多，但有趣的是，它们的解决方案都一样——绘制宇宙的地图！特别是，我们应该尽可能地用三维方法来绘制。目前，我们能绘制的最大范围是光线能有足够的时间到达地球的宇宙区域。从本质上说，这个区域就是等离子体球（见图3-7左图）的内部。我们已经探索了等离子体球，但正如你在图3-7中所看到的那样，这个球内部超过99.9%的区域都没有被我们研究过。你还能看到，迄今为止最雄心勃勃的三维星系图计划——SDSS只覆盖了一小块地方，只能算宇宙的“后院”，我们的宇宙实在是太庞大了！如果我把天文学家发现的最远星系加到这张图中，它们距离边界还有一半的距离。所以，这张图里的内容还太少，距离一张有用的三维天图，我们还有很长的路要走。



图3-7　在我们的可观测宇宙中（左图），绘制了天图的部分是如此之小（中图），所占的比例还不到0.1%。正如1838年的澳大利亚（右图），那时我们只沿着澳大利亚的轮廓描绘了一条细细的边界，而内部的绝大部分地区都是无人涉足过的处女地。在中图里，圆圈附近的区域是等离子体（我们今天看到的宇宙微波背景辐射只是来自它暗淡的内边缘），而圆心部分那个娇小玲珑的小结构，则是迄今为止最庞大的三维星系图——SDSS天图。

假如我们能用某种方法绘出那片处女地的地图，这对宇宙学来说简直太棒了。这不仅将让我们掌握的宇宙学信息量翻上1 000倍，还会因为远方等价于过去，而向我们揭开宇宙前半生的神秘面纱，窥见它年轻时发生的事。但是，用何种方法才能实现呢？我们讨论过的所有技术都正在令人欣喜地飞速发展，但不幸的是，看起来没有一个能在近期描绘出那99.9%的未知空间。宇宙微波背景实验呈现的主要是这个区域的边界，因为其内部对微波来说几乎是完全透明的。在这样极远的距离，大多数星系都非常暗淡，即使用我们最先进的望远镜也难以望其项背。更不幸的是，如此遥远的区域包含的星系数量极其稀少——我们在那里看见的是如此久远的过去，那时候绝大部分星系都压根儿还没出现。

用氢元素来画地图

万幸的是，还有一种绘图的方法，甚至可能表现更佳。正如我们之前所讲的，看起来空无一物的宇宙空间其实并不是空荡荡的——它充满了氢气。物理学家们早就知道，氢气会发出波长为21厘米的射电波，可以被射电望远镜所探测到。（曾经，我的同学泰德·邦恩在加州大学伯克利分校教书时，一个学生问了他一个时下的经典问题：“21厘米线的波长是什么呢？”）这意味着，从原则上讲，我们能用射电望远镜真的“看到”早在恒星和星系形成之前就遍及宇宙的氢元素，那时的它们对普通望远镜都是隐形的。更棒的是，我们能用前文提到的红移方法来绘制一张氢气的三维天图——由于这些射电波被宇宙膨胀拉长了，根据它们到达地球时的波长，我们就能得知它们来自多远的地方（也能知道它们来自多早之前的过去）。比如，我们测到一段射电波的波长为210厘米，那么它在路途中一定被拉伸了10倍，所以在它发射时，宇宙应该是现在的1/10。这种技术被称为“21厘米层析”（21-centimeter tomography）。由于它可能成为下一个宇宙学中的

大赢家，所以它吸引了大量的关注。全世界很多科研团队正在你追我赶，希望能第一个成功探测到氢元素的信号，这些信号神出鬼没，穿越半个宇宙才来到地球。然而，到现在为止，没有人成功。

老实说，到底什么是望远镜

为什么探测氢元素的信号如此之难？因为这些信号非常微弱。那么，要探测微弱的信号，需要什么东西呢？答案是，一个非常巨大的望远镜。如果能占地一平方公里就好了。那么，要修建如此巨大的望远镜，又需要什么东西呢？当然是一笔巨额的预算。究竟需要多少预算？这个问题真的很有趣！对图3-8背景里的那种传统射电望远镜来说，规模扩大两倍，则需要远超过两倍的钱，所以超过一定尺寸后，这个预算就会变成天文数字。如果你叫一个做结构工程师的朋友帮你建造一个口径为一平方公里的望远镜，还要配备上马达，可以任意指向天空中的每个方向，那他一定再也不想和你做朋友了。



图3-8　射电天文望远镜的预算可以很大（背景的那种），也可以很小（前景的那种）。图中，我的研究生安迪·鲁托米尔斯基（Andy Lutomirski）正在调试我们的电子元件。我们去西弗吉尼亚州的绿岸镇（Green Bank）考察时，它们被放置在一个帐篷里以防雨。

正因如此，21厘米层析领域中的实验物理学家都采用一种更加先进的射电望远镜——干涉仪（interferometer）。由于光和射电波实际上都是电磁现象，它们穿行于空间中时，在不同地方之间会产生电压。当然，这些电压非常微弱，大部分都小于手电筒电池两极间的1.5伏特，但是用很好的天线和放大器，它们还是足以被探测到。干涉仪的基本原理是用射电天线阵列来测量许多的上述电压，然后让计算机据此建模，重构出天空的模样。如果所有天线都像图3-8前景中那样，排列在一个水平面上，那么，一段竖直下落的波就会同时到达这些天线。其他方向的波则会按顺序先后到达不同的天线，利用这个差别，计算机就能计算出它们来自哪个方向。

实际上，你的大脑也是用同样的方法来判断声音来自何方——如果你的左耳比右耳先听到一段声音，那声音肯定就是来自左边，并且，大脑还能通过双耳接收声音的时间差，来评估声音是直直地来自左方，还是有一个角度。由于你只有两只耳朵，所以你不能非常准确地指出这个角度，但是如果你周身长出100个耳朵，就像一个射电干涉仪，那你就能做得更好（尽管看起来不怎么好看），准确地指出声音的方向。自天文学家马丁·赖尔（Martin Ryle）1946年开拓了干涉仪这个新领域以来，已经取得了巨大的成功，并为他赢得了1974年的诺贝尔奖。

不过，最拖后腿的，莫过于计算这些时间差了。要计算时间差，你需要计算每一对天线（或耳朵）之间的数据，所以，随着天线数量的增加，天线对数量增加的比例几乎等于天线数量的平方。这意味

着，如果你把天线数量增加1 000倍，需要的计算量就会增加100万倍——我的天！你需要的只是一个天文望远镜，可不是天文数字的预算！因为这个原因，干涉仪的规模被局限在几十或几百个天线阵列，而无法达到几百万个，而后者才是21厘米层析最需要的。

当我搬到MIT时，美国和澳大利亚合作的21厘米层析实验团队大方地接纳了我。这个实验由我的同事杰基·休伊特（Jackie Hewitt）推动。在项目会议上，我常常幻想着，是否有某种方法能让修建大型望远镜变得便宜一些。一天下午，我们正在哈佛大学开会，我的脑子里突然冒出一个想法——我想到了一个便宜的方法！

“万远镜”

在我看来，望远镜就是光波的分选器。如果你想测出你的长相，光看着你的手、测出穿过它的光线强度是不够的，因为在你手部皮肤的每一点上，都混杂着来自你脸上各个部位的光波。但是，如果你能按照来源方向对这些光波进行分选，让方向相同的光线落在你手上的同一区域，这样，你就能得到一张脸部图像。这正是相机镜头、望远镜镜头和眼睛里的晶状体所起的作用，也是图3-8中那种曲面镜的功能。在数学里，这种光波分选过程有一个玄妙又吓人的名字——傅里叶变换（Fourier transforming）。所以，**望远镜本质上就是一个傅里叶变换器。**传统的望远镜用模拟的方法进行傅里叶变换，采用的是透镜或曲面镜。干涉仪则与之不同，采用的是数字的方法，工具则是计算机。这样，光波不仅能按照来源方向进行分选，还能根据波长进行分选——对可见光来说，不同波长意味着不同的颜色。

在哈佛大学的那个下午，我脑子里冒出来的想法是设计一个巨大的射电干涉仪，其中的天线并不是像我们之前计划的那样随机分布，而是遵循一个简单而规律的模式。对一个拥有100万个天线的望远镜阵

列来说，可以使用一些聪明的数学技巧来穷举这些模式，将使傅里叶变换的速度提高为原来的25 000倍——基本上也可以把望远镜的预算降低为原来的1/25 000。

我说服了我的好友马蒂亚斯·扎尔达瑞亚，他也认同这个想法是可行的。然后，我俩开始详细地研究这种方法，并发表了两篇与之有关的论文，证明了那种基本数学技巧可适用于多种多样的天线阵列模式。我们把我们提出的这种望远镜称为“万远镜”（Omniscope），因为它既是全方位的（本质上能同时拍下整个天空的图像），又是全彩色的（能同时拍下大范围的波长，也就是不同颜色的图像）。

据说，爱因斯坦曾说过：“从理论上说，理论和实践是一样的。但从实践的角度来说，它们却截然不同。”于是，我们决定建造出一个小型样品，看看它是否真的有用。我发现，万远镜的基本思想在20年前就已经有一个日本团队尝试过，只不过是为了其他目的，而且由于当时电子设备的能力有限，他们的天线数量被限制在了64个。得益于后来的手机技术革命，如今，我们建造样品所需要的关键元件的价格已经暴跌，所以我们只用拿一点小钱就能作出整个阵列。同时，我也很幸运地得到了MIT一组出色的学生的帮助，其中一些来自电气工程系，他们对电路板设计和数字信号处理的魔法了如指掌。其中有一位名叫内瓦达·桑切斯（Nevada Sanchez），他教会了我电子学“魔法烟雾理论”，后来在我们的实验室里得到了证实——电子零件能正常工作是因为它们包含着带魔法的烟雾。所以，如果你不小心让魔法烟雾溜走了，它们就罢工了……

过去，我的整个学术生涯都是在搞理论研究和数据分析，突然间，我进入了建造实验的新领域，这和我过去的经历可完全不同，我非常喜欢做这件事。它把我带回了十几岁时在地下室里捣鼓小玩意儿的快乐时光，唯一不同的是，我们现在建造的东西更加激动人心，整

个团队在这个过程中都非常愉快。到现在，我们羽翼初丰的万远镜做得还不错，但现在断言说我们或其他人已有能力让21厘米层析发挥出最大潜能，还为时过早。

万远镜还教会了我一些其他事情——与我个人有关的事。对我来说，最有趣的事就是团队探险，我们把所有的设备都装进一辆面包车，把它开到人迹罕至的郊外，远离无线电台、手机等人类产生的射电波。在这些妙不可言的日子里，我那充斥着电子邮件、教书上课、文山会海和家务事的碎片生活，被一种充满喜悦、目标明确、禅宗般的状态所取代。远郊没有手机信号、没有互联网、没有外界的打扰，团队的每一个人都能把全部精力集中在实验工作的共同目标上。有时候我会问自己，在这个年代，我们总是会同时处理几种不同的任务，我是不是应该经常像这样消失一段时间，比如去写一本书……

大爆炸从何而来

本章，我们介绍了精确的数据像雪崩一样改变了宇宙学，让它从一门以推测为主、略带哲学意味的领域转变为今天我们所看到的精密科学。其中，**我们测量宇宙年龄的误差已经下降到1%**。在科学中，回答老问题常会衍生出新问题，所以，我预计，宇宙学正面临着激动人心的10年，因为全世界都在建立新理论、建造新实验，尝试揭开暗物质、暗能量等未解之谜的神秘面纱。在结语里，我们将重新回到这个问题，探寻它对宇宙终极命运的预示。

我认为，精确宇宙学最让我诧异的一件事就是，整个宇宙的运转被简单的数学规律控制着，甚至可以一直追溯到它炽烈暴躁的开端。比如，爱因斯坦广义相对论中的方程精确地控制着宇宙中的万有引力，其空间范围可以从毫米一直延伸到10^{26}米；而原子核物理学的方程精确控制宇宙的时间范围从大爆炸后第一秒一直到140亿年后的今

天。与经济学中模棱两可的公式不同，这些方程的精确度令人瞠目结舌，正如图3-2中所展现的那样。所以，**精确宇宙学凸显出了数学在理解世界过程中的神秘作用。**我们将在第9章回到这个问题，并探讨一个激进的解释。

从精确宇宙学身上，我还学到一件令人惊异的事情，那就是，它并不完备。我们知道，我们今天观测的万事万物都起源于一场炽烈的大爆炸。那时候，宇宙中分布着几近均匀的炙热气体，和太阳内核一样热，并迅速膨胀，一秒钟内就胀到了两倍大。然而，是谁安排了这一切？我喜欢把这个问题称为“爆炸问题”。到底是谁把这个爆炸变成了宇宙大爆炸？那些膨胀的炙热气体从何而来？它们为什么会均匀分布？为何其中藏有0.002%的种子起伏，最终成长为今天我们所看到的星系和宇宙大尺度结构？简而言之就是，这一切是如何开始的？我们将会看到，把弗里德曼的膨胀宇宙方程推演到更加遥远的过去，将遇到难以解决的问题。这意味着，我们需要一个彻底的新理论，才能理解宇宙的终极起源。这正是下一章要探讨的问题。



◆近年来，关于宇宙微波背景和星系聚集等的数据，像雪崩一样改变了宇宙学，将它变成了一门精确的科学。比如，它把我们对宇宙年龄是100亿年还是200亿年的争论，精确到了137亿年还是138亿年。

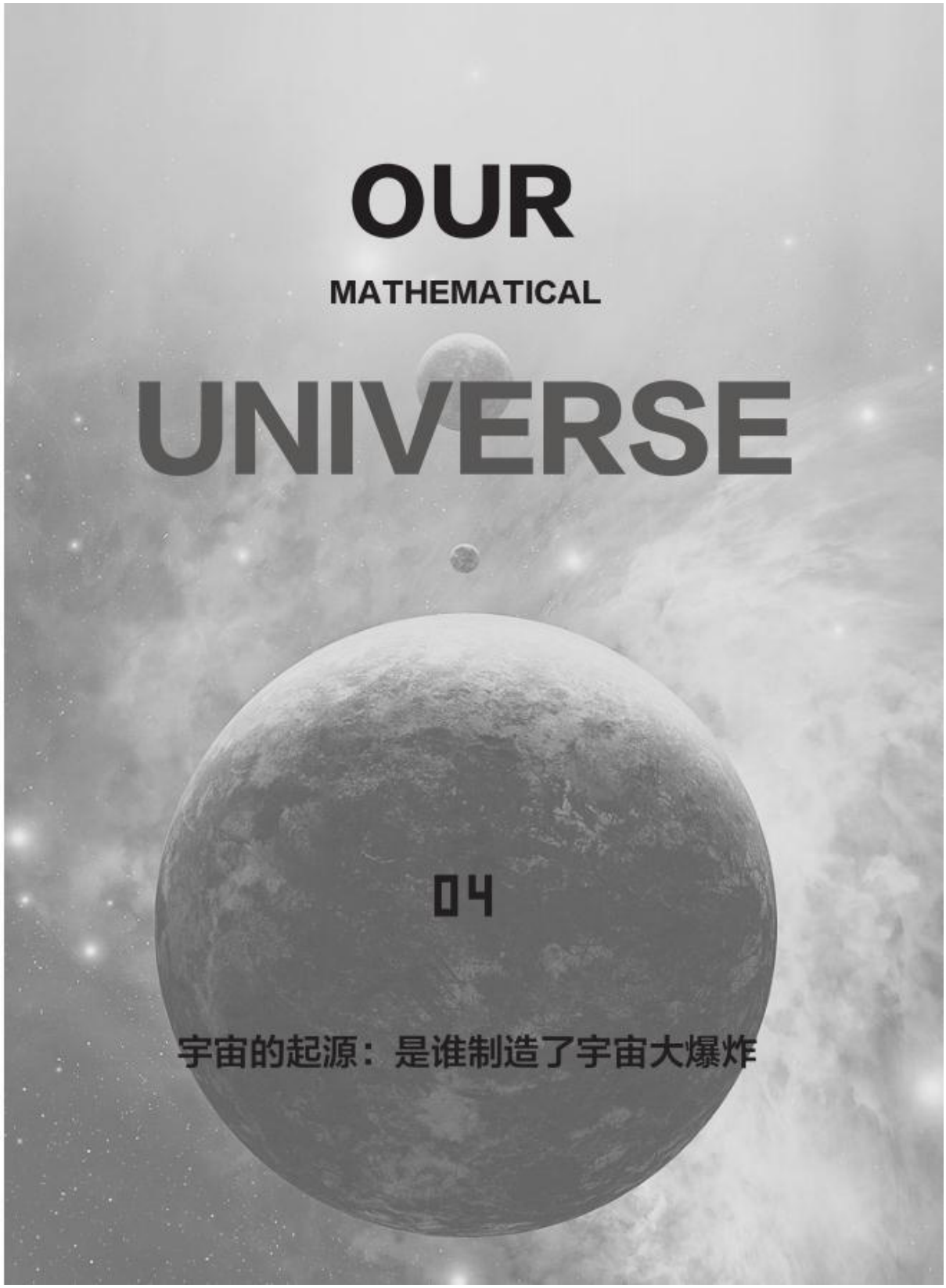
◆尽管有争议，爱因斯坦的引力理论还是打破了纪录，成了最具有数学美感的理论，用几何的方式展现了万有引力。它认为，空间中所包含的质量越大，空间的弯曲度就越大。这种空间弯曲使得其中的物体不会沿直线运动，而是弯向较重的物体。

◆通过测量宇宙大小的三角形的几何性质，爱因斯坦的理论让我们估算出了整个宇宙的质量。令人惊讶的是，组成日常物体的物质在宇宙中只占4%，剩下的96%是什么呢？无人知晓。

◆这部分失落的质量就像幽灵一般，不仅不可见，还能从普通物质中毫发无伤地穿过去，而你却丝毫注意不到。根据它们表现出来的引力特性，可以分为两种不同的东西，暗物质和暗能量：暗物质会聚集成团，暗能量则相反；暗物质膨胀时会被稀释，暗能量则不会；暗物质相互吸引，暗能量相互排斥；暗物质促进星系的形成，暗能量则暗中搞破坏。

◆精确宇宙学告诉我们，宇宙受到简单数学规律的支配，这个过程甚至可以一直追溯到宇宙炽烈的诞生之时。

◆尽管看起来很优雅，但经典的大爆炸理论却无法解释很多问题，这意味着，要理解宇宙的终极起源，我们需要在这个谜语里加上其他关键的环节。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
04
宇宙的起源：是谁制造了宇宙大爆炸

起初，宇宙创生。这让许多人分外恼火，普遍视之为一步臭棋。

道格拉斯·亚当斯
《宇宙尽头的餐馆》（*The Restaurant at the End of the Universe*）

噢，大事不好——他昏昏欲睡了！

那是1997年，我正在塔夫茨大学（Tufts University）做一场演讲，没想到传说中的科学家阿兰·古斯（Alan Guth）从MIT过来听我的演讲。我以前从来没有见过他。听众席上坐着这么一位重量级的嘉宾，让我感到既荣幸又紧张。其中紧张尤甚——尤其是当他的脑袋渐渐垂下去，目光变得呆滞，眼看就要睡着了之时。绝望之中，我试着演讲得更加热情奔放，并抬高声调。他猛地回过了几次神，但我最终还是失败了——他渐渐进入了甜蜜的梦乡，直到我讲完了，他才醒过来。我觉得自己像个泄了气的气球。

直到很久以后，我和他成了MIT的同事，我才意识到，阿兰几乎会在所有演讲过程中睡着（除了他自己的）。实际上，我的研究生阿德里安·刘（Adrian Liu）指出，我自己也渐渐开始做同样的事。其实，阿德里安也同样如此，但我并没有注意到这一点，因为我们总是按照固定的顺序去见周公。如果阿兰、我和阿德里安坐成一排，毫无

疑问，过一会儿，我们三个就会开始有顺序、有节奏地点头，简直就是足球观众“人浪”的昏睡版。

我真的非常欣赏阿兰，他不仅聪明，还很和蔼（见图4-1）。但整洁不是他的强项——我第一次去办公室拜访他时，发现他的地板上铺满了厚厚一层没有打开过的信件。我像考古学家一样，随意捡了一个信封，发现它的邮戳竟是十几年前的。2005年，他铸就了一个不可动摇的辉煌地位——赢得了波士顿最邋遢办公室奖！



图4-1　安德烈·林德和阿兰·古斯（右）在瑞典一个小龙虾派对上开心地大吃大喝，根本没有注意到我在偷拍他们。后来，他俩作为暴胀理论的主要设计师而获得了格鲁伯奖（Gruber Prize）和米尔纳奖（Milner Prize），领奖时，他们俩可得换身衣服。

我们的大爆炸哪儿错了

“最邋遢办公室奖”可远不能概括阿兰的成就。早在1980年，他从物理学家鲍勃·迪克（Bob Dicke）那里了解到亚历山大·弗里德曼的大爆炸模型在宇宙最早期阶段出现了严重的问题，于是提出了一个激进的解决方案，他称之为“暴胀”（inflation）[7]。正如我们在

前两章中所看到的那样，弗里德曼的膨胀宇宙方程可以相当成功地推演出宇宙的历史，并精确地解释遥远星系正在离我们远去的原因、宇宙微波背景辐射存在的理由、最轻原子的形成方式，以及其他许多观测现象。

让我们回到我们知识疆域的边界，那时宇宙膨胀得相当迅速，在下一秒，它即将膨胀到两倍大。弗里德曼方程告诉我们，在这件事发生之前，我们的宇宙更加致密和炽热，几乎没有上限。大约就在1/3秒前，仿佛是某种开端，那时宇宙的密度无限大，万物都在以无限快的速度相互远离。

跟随着迪克的脚步，阿兰仔细分析了这个宇宙的终极开端，发现它看起来非常不自然。比如，针对第1章开头提出的4个问题，它作出的回答如下。

问题12：是什么导致了大爆炸？

答：没有解释——这个方程简单地假定它发生了。

问题5：大爆炸是从某个单独的点开始发生的吗？

答：不是。

问题4：大爆炸是从空间中的什么地方开始的？

答：每个地方都在发生，在无限多个点上，同时发生。

问题2：在有限的时间中，如何能创造出无限的空间？

答：没有解释——这个方程只是简单地假定，只要空间一出现，它的尺度就是无限大的。

你对这些回答满意吗？它们是否很好地解决了你对大爆炸的所有问题？如果没有，那你并不是一个人在战斗！实际上，我们即将讲到，除此之外，还有很多问题都是弗里德曼的大爆炸模型所无法解释的。

视界问题：难道同时发生了无数个大爆炸？

让我们先来仔细分析一下上面提及的问题4。图4-2中展示了一个事实——宇宙微波背景辐射的温度在天空中的各个方向上都几乎相同（精确到小数点后5位）。如果宇宙大爆炸在某些地方发生得比其他地方早，那么这些地方膨胀和冷却的时间就会更长一些，这样一来，我们现在所观测到的宇宙微波背景天图中的温度起伏就不止0.002%，而会增大到接近100%。



图4-2　热咖啡和冷牛奶中的分子有充足的时间可以相互作用，最终达到相同的温度。而与之不同的是，A区域和B区域中的等离子体永远没有足够的时间来相互作用，哪怕是以光速传输的信息，也无法从A到达B，因为到今天，来自A的光线才刚刚走了一半，来到我们这些喝咖啡的人面前。然而，为何A处和B处的等离子体拥有相近的温度？这对弗里德曼的大爆炸模型来说，是一个无法解释的问题。

那么，有没有可能在大爆炸发生的很久之后，某种物理过程让温度统一了呢？毕竟，如果你把冷牛奶倒入热咖啡（见图4-2），过一会儿它的温度就会变得温热，这没什么好惊讶的。关键在于，这个混合的过程需要时间——你需要等上足够长的时间，让牛奶和咖啡的分子

在液体中充分混合。然而与之不同的是，宇宙中相隔遥远的区域根本没有时间来相互混合（查尔斯·米斯纳[Charles Misner]等人在20世纪60年代第一次提出了这一点）。在图4-2中，我们看到A区域和B区域位于天空中相反的方向，它们根本没有足够的时间来相互作用——哪怕是以光速传输的信息也无法从A到达B，因为即使到了今天，来自A的光线也才刚走了一半（刚刚到达我们所在的地方）。这说明，弗里德曼的大爆炸模型无法解释A和B拥有相同温度的原因。所以，从大爆炸发生以来，A区域和B区域经历的冷却时间一定是相同的。这意味着，在几乎同一时间，在没有任何共同起因的情况下，它们各自独立地经历了一场大爆炸。

> 为了更好地理解阿兰在这方面的疑惑，想象一下，你收到一个朋友发来的电子邮件，他邀请你一起吃午餐。然而你却突然发现，你的每一个朋友都分别向你发来了共进午餐的电子邮件，发件时间几乎完全一样。这时，你可能会认为这是个阴谋，这些邮件一定有一个共同的起因，比如你所有的朋友暗地里串通好，要给你举行一场惊喜派对。不过，为了让这个例子与阿兰对大爆炸的疑虑更加相似（区域A、区域B等对应着你的朋友们），请你再继续想象一下，你明明知道你的朋友们从来没有见过彼此，也从来没有过交流，并且，在他们给你发邮件之前，也从来没有获得过任何共同信息。这样一来，唯一的解释就是，这是一场疯狂的巧合。

这实在太疯狂了，简直令人难以置信，一点儿也不合理，所以，你可能会开始疑惑自己作出了什么错误的前提假设，也许你的朋友之间不知怎的相互联系上了，有了交流。这正是阿兰得出的结论：**宇宙中这么多分隔的区域怎么可能同时独立地发生大爆炸呢，这不可能是一个疯狂的巧合，一定存在某种物理机制，既引发了大爆炸，又造成了同步。一个无法解释的大爆炸已经够我们头疼了，现在竟然有无数多个无法解释的大爆炸，还都完美地同步发生，简直不可思议。**

这就是所谓的“视界问题”（horizon problem），也叫地平线问题，因为它涉及我们在宇宙地平线上，也就是我们能观测到的最远区域所看到的情景。这还不算最糟。更糟糕的是，迪克还告诉了阿兰关于弗里德曼大爆炸模型的第二个问题，他称之为“平坦性问题”（flatness problem）。

平坦性问题：我们的宇宙为何如此平坦

我们在上一章中看到，我们以高精度测量出宇宙是平坦的。迪克说，如果弗里德曼的大爆炸模型是正确的，这将带来问题，因为这是一种高度不稳定的状态，并不会维持很长时间。举个例子，我们在第2章中提到，自行车停下来以后会变得很不稳定，因为只要有一点点偏离完美的平衡状态，就会被万有引力放大。所以，如果你看到一辆自行车停下来，在没有支撑的情况下竟能保持竖直状态，你一定会感到很奇怪。

图4-3展示了弗里德曼方程的三种解，形象地说明了宇宙的不稳定性。中间那条曲线代表平坦的宇宙，它将一直保持完美的平坦，并永远膨胀下去。另外两条曲线在最左端的开始状态基本上完全相同，那时的空间几乎没有任何弯曲。在10^{-9}秒后，它们的密度差异小到只在一个24位数的个位数上变动[8]，而这些微小的差异将被万有引力放大。再过5亿年，最低的曲线描述的那个宇宙将因此停止膨胀，反弹为一个灾难性的大挤压，就像把大爆炸反向进行。在这个面临坍缩命运的宇宙里，空间会弯曲，使得三角形的内角和远大于180°。相反，最高的那条曲线描述的宇宙中，空间也会弯曲，但三角形内角和将远小于180°。它的膨胀速度比位于临界点的平坦宇宙快多了，其中的气体被稀释得很厉害，无法形成星系，整个宇宙会被冰冷和黑暗的大冷寂所笼罩。

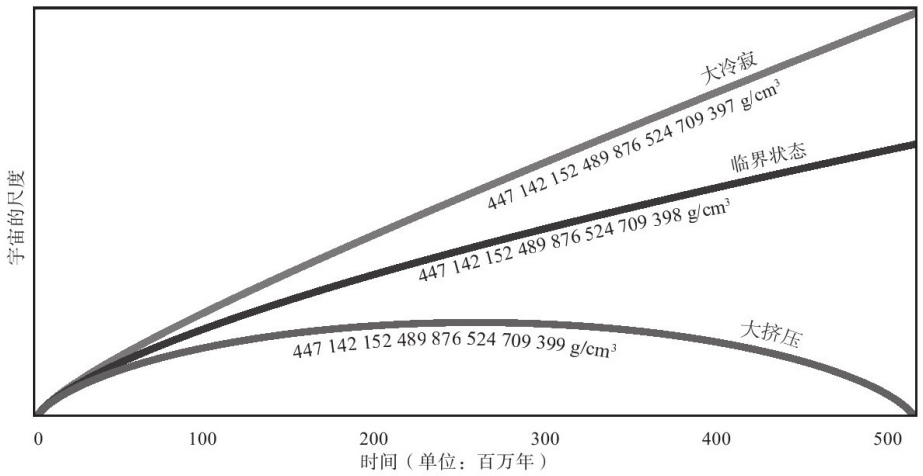


图4-3　另一个弗里德曼方程无法解释的问题是，为何我们宇宙空间的平坦状态能保持如此长的时间，而没有变弯曲，最终迎来大挤压（Big Crunch）或大冷寂（Big Chill）。每个弯曲都对应着宇宙年龄只有10^{-9}秒时的轻微密度差异。我们所栖身的这个临界状态非常不稳定——只需要微微改变24个数位中最后一位的数值，就会在宇宙年龄不到今天的4%时就触发大挤压或大冷寂。（本图基于天文学家内德·赖特[Ned Wright]的创意）

那么，我们的宇宙为何如此平坦呢？如果你把图4-3中的24位数改成随机数值，再用弗里德曼方程求解一遍，那么，在140亿年后，你还能得到一个平坦宇宙的概率比你在火星上扔飞镖正中地球上一个飞镖盘靶心的概率还小。弗里德曼方程无法解释这种巧合从何而来。[9]

无疑，阿兰声称，一定存在什么机制，导致我们的宇宙拥有一个正确的密度，不多不少，正好能保证宇宙早期保持绝对的平坦。

1秒的10^{35}分之1，暴胀在须臾之间

连续翻倍的力量

阿兰提出的激进想法是假定了一个听起来十分古怪的前提，有了它，你不仅能一下子解决视界问题和平坦性问题，还能解开很多其他疑惑。这个前提就是，在很久很久以前，有一团微小而均匀的物质，它的密度很难被稀释。也就是说，如果一克这种物质的体积膨胀到两倍，它的密度（质量除以体积）基本上没有变化，于是，你就得到了两克物质。对比我们日常所见的普通物质，这大不一样。比如，当气体膨胀到更大的体积（就像从轮胎里放出压缩空气），由于气体分子总数保持不变，所以总质量也保持不变，由于体积增大，那么密度就会降低。

根据爱因斯坦的引力理论，这样一团不可稀释的物质可能会经历最震撼人心的爆炸，也就是阿兰所说的暴胀，这样，大爆炸应运而生！爱因斯坦的方程有一个解，其中，**这团不可稀释的物质中的每个地方每次膨胀到两倍所花费的时间间隔都相同（见图4-4），这种类型的增长被数学家称为“指数级增长”。在这种情境中，我们的婴儿宇宙成长的方式与你在娘胎里的发育过程很相似（见图4-5）。**每天，你的每个细胞基本上都会生成两个细胞，导致细胞总数每天都在翻倍：1个、2个、4个、8个、16个……连续的翻倍是一个强大的过程。如果你每天的重量都翻倍的话，早在你出生前，你母亲就已经受不了了——经过怀胎9月（也就是274次翻倍），你的重量将超过可观测宇宙中的所有物质之和！听起来很疯狂，但这正是阿兰提出的暴胀过程所描述的故事：从一个比原子还轻小的微粒开始，不断翻倍，直到比整个可观测宇宙还重。

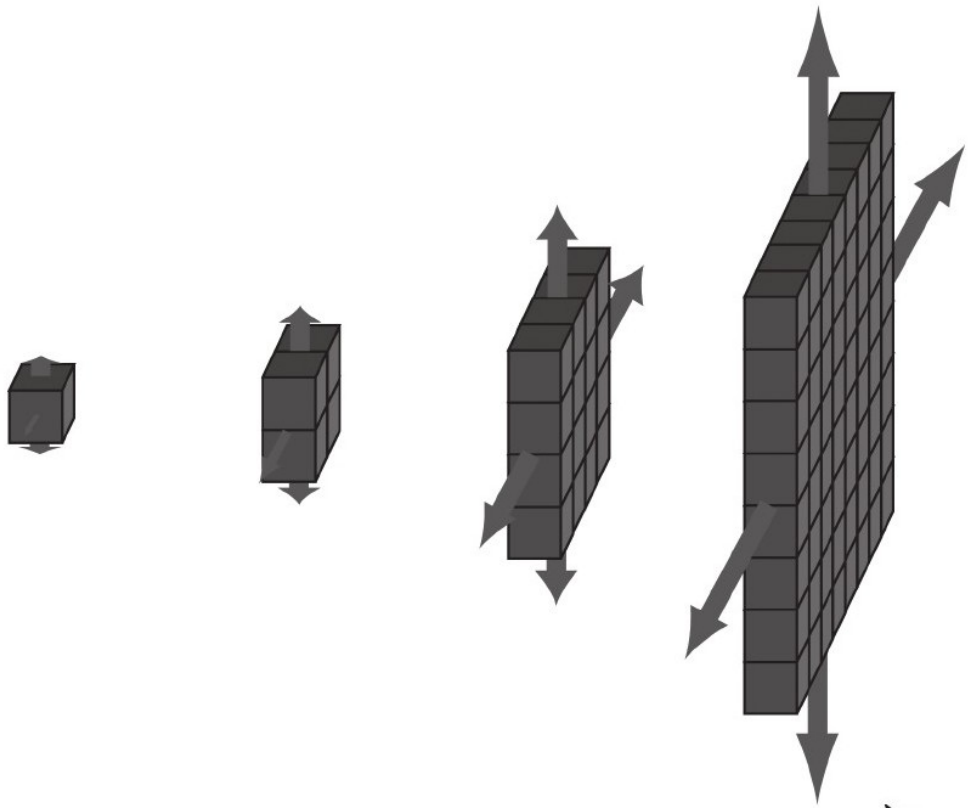


图4-4　根据爱因斯坦的引力理论，密度不可稀释的物质可能会发生“暴胀”，以相同的时间间隔不停地将体积翻倍，瞬间就从亚原子的尺度成长到比整个可观测宇宙还大的尺度，点燃了大爆炸的火种。这种连续的翻倍发生在所有的3个维度，所以，边长翻1倍意味着体积增加到8倍。这张图里，为了简化，我只画出了2个维度，其中边长翻1倍，体积增加到4倍。

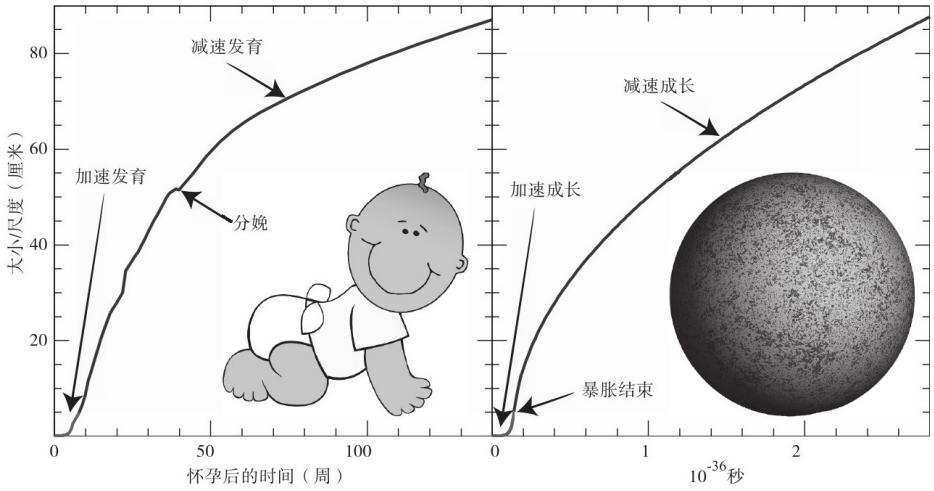


图4-5　暴胀理论认为，婴儿宇宙的成长过程与人类婴儿的发育过程很相似——在大小或尺度不断翻倍的加速增长阶段之后，紧接着一个比较从容不迫的减速增长阶段。有趣的是，上面两张图的纵坐标是相同的——在最简单的模型中，宇宙长到橙子那么大时将停止暴胀（但质量可比橙子大了不止10^{81}倍）。我们的婴儿宇宙的尺度翻倍速度比胎儿最早的细胞快了大约10^{43}倍。

问题解决了

你在图4-4中可以看到，尺度的不断翻倍会导致膨胀速度的翻倍，我用箭头标注出来了。也就是说，它引发了加速膨胀。如果你在出生前保持每天将质量翻倍，那一开始，你膨胀的速度是很慢的（每天只增加几个细胞）。但是，到你母亲怀孕的后期，当你已经膨胀到比整个可观测宇宙还重时，如果你还是每天都翻倍，你膨胀的速度将会大到令人难以置信，因为你每天将要膨胀几十亿光年。你翻倍的时间间隔是1天，然而暴胀婴儿宇宙质量翻倍的时间可比你短多了——在最流行的一些暴胀理论中，宇宙质量翻倍仅需要10^{-38}秒，仅需260次翻倍就能膨胀到今天可观测宇宙的尺度。也就是说，**整个暴胀过程，从开始到结束，用人类的标准来看只是短短的须臾之间，整个过程不到10-35秒，比光前进10-12个质子的距离所花的时间还短。换句话说，指数级膨胀在细微之物中产生了震天撼地、快速膨胀的爆炸。**这样，暴胀解决了我的“爆炸问题”，解释了是什么导致了大爆炸——正是这种连续翻倍的过程。它还解释了为什么爆炸是均匀发生的，就像埃德温·哈勃发现的那样，图4-4中，两倍远的区域相互远离的速度正好也是两倍快。

在图4-5中，你可以看到，婴儿宇宙的暴胀慢慢停止了，就像婴儿发育到后期，指数型增长就被更加缓慢的增长所代替。暴胀的物质衰变为普通物质，它们继承了爆炸式暴胀阶段所带来的初速度，以更加舒缓的节奏继续膨胀，并逐渐被万有引力所减速。

阿兰意识到，暴胀理论还能解决视界问题。在暴胀的早期，图4-2中相距甚远的区域A和区域B被挤压在极端靠近的地方，所以那时它们应该有足够的时间来相互作用。后来，爆炸式暴胀所带来的膨胀才让它们永远天各一方。对你来说，你鼻子上的细胞与脚趾上的细胞拥有相同的DNA，因为它们有一个共同的起源——它们都来自你的第一个细胞，也就是受精卵的不断翻倍。同样，**宇宙中相隔甚远的区域拥有相同的特征，因为它们也有一个共同的起源——它们都来自最初那一小团暴胀物质的不断翻倍。**

这还不够。阿兰发现，暴胀理论还能解决平坦性问题。假设你是一只小蚂蚁，居住在图1-7中的球面上。在你所栖身的这个曲面上，你的眼睛只能看见周遭的一小片区域。如果暴胀发生了，瞬间将这个球面膨胀得硕大无朋，那你目及之处的小片区域看起来就会变得更加平坦——乒乓球上的1平方厘米的区域非常明显地弯曲着，而地球表面的1平方厘米看起来却是完美地平坦。类似地，当暴胀过程猛烈膨胀了我们栖身的三维宇宙，其中的每立方厘米空间看起来都平坦得几近完美。阿兰证明，**只要暴胀持续的时间够长，足够造就今天的可观测宇宙，那么空间也将变得平坦无比，直到今天也依然如此，而不会发生大挤压或大冷寂。**

实际上，暴胀持续的时间比之更长，而且长多了。直到今天，空间依然保持着完美的平坦。也就是说，早在20世纪80年代，暴胀理论就提出了一个可检验的预测——宇宙应该是平坦的。正如我们在前两章看到的那样，我们对这个预测的检验误差已经减小到1%。暴胀理论通过了测试，胜利的旗帜在高高飘扬！

谁提供了终极的免费午餐

暴胀就像一场精彩的魔法表演。我的直觉反应是，这违反了物理定律！然而在明察秋毫之后，你会发现，它并没有违反物理定律。

首先，1克暴胀物质在膨胀时，怎么可能变成2克？毫无疑问，质量不可能凭空创生。有趣的是，爱因斯坦在狭义相对论中给我们留了一个后门。在狭义相对论中，能量E和质量m是相关联的，它们的关系可以用一个著名的方程来描述：$E=mc^2$，其中c代表光速，c=299 792 458米/秒。由于光速c的数值非常庞大，所以一点点质量就对应着极其大量的能量——1 000克质量就能释放出相当于广岛原子弹的能量。这意味着，**你可以通过增加能量来增加质量。**比如，当你拉伸一根橡皮筋时，它的质量会增加一点点——因为你需要能量来拉伸它，这些能量赋予了橡皮筋，增加了它的质量。

橡皮筋拥有负压，因为你需要使劲才能拉伸它。拥有正压的物质来说（比如空气）则正相反——你需要使劲才能压缩它。总的来说，为了遵循物理定律，暴胀物质必须拥有负压，而这个负压必须非常庞大，这样将它的体积膨胀到2倍所需要的能量正好也能使它的质量翻倍。

暴胀还有一个奇妙的特性：它引起了加速膨胀。高中物理课老师教导我们，万有引力是一种吸引力，那它为何不让宇宙的膨胀减速、最终把所有物质都拉到一起呢？对此，爱因斯坦又为我们提供了另一个后门，这次，是在他的广义相对论上。广义相对论认为，万有引力不仅仅是由质量引起的，还是由压力引起的。由于质量不可能是负的，所有质量所引起的引力永远是相互吸引。正压能带来相互吸引的万有引力，而我们刚刚才说到，暴胀物质拥有极大的负压。阿兰计算出，负压引起的互斥万有引力比质量引起的相吸万有引力强3倍，所以，暴胀物质的万有引力将把它自己炸得四分五裂！

总而言之，**暴胀物质产生的反引力把自身炸开了花，与此同时，膨胀所消耗的能量创造出了足够的新质量，使这些物质保持着恒定的密度。**这是一个自我维持的过程，暴胀物质持续地尺度翻倍。这样，几乎从完全的虚无中，暴胀创造出了我们用望远镜可以观测到的一切。这促使阿兰把我们的宇宙比作“终极的免费午餐”——暴胀理论预测的总能量几乎等于零！

不过，根据诺贝尔经济学奖获得者米尔顿·弗里德曼（Milton Friedman）的说法，“世上没有免费的午餐”，所以，到底是谁为宇宙中壮丽的星系埋单了呢？答案是，万有引力。**正是万有引力拉扯着暴胀物质，向其注入了能量。**但是，根据爱因斯坦的方程$E=mc^2$，有质量的物体具有正能量，如果万物的总能量不改变，这意味着引力必须拥有与前述正能量相等的负能量！事实正是这样。所有万有引力的来源都是引力场，而引力场正好具有负能量。每一次有物体被引力所加速，负能量就增加一点。

> 举个例子，一颗遥远的小行星。如果它运动得很缓慢，它的动能就很小。如果它远离地球的引力，它的引力能（也被称为“势能”）也很小。如果它缓缓地朝向地球而来，它的速度将越来越大，动能也将随之增大——也许能在地面上撞出一个大坑。由于引力场一开始几乎没有能量，随着后来释放出这些正能量，它只剩下了负能量。

现在，我们可以解决第1章开头提出的问题11了：通过暴胀，宇宙从虚无中生出我们周遭的万物，这难道不违背能量守恒定律吗？我们已经知道，这个问题的答案是“不违背”——所需的所有能量都是向引力场借来的。

我必须承认，虽然这个过程并不违反物理定律，但它令我很紧张。我无法摆脱一个不安的感觉，即我活在一个宇宙尺度的庞氏骗局中。如果你在2008年伯尼·麦道夫（Bernie Madoff）因欺诈650亿美元而被逮捕前拜访他，你可能会认为他真的坐拥实实在在的亿万美元

资产。但如果你仔细审查一番，就会发现，他的资产都是用借债买来的。通过狡猾的杠杆，他用之前借来的钱向天真的投资者举债，操纵的规模也翻了好几番。暴胀中的宇宙也做了同样的事——它用已有的能量，从引力场借来更多的能量，使自己的尺度不停翻倍。暴胀宇宙像麦道夫一样，利用了系统中固有的不稳定性，从一片虚无中创造出了壮美宏大的万物。我只希望我们的宇宙别像麦道夫那么不靠谱……

不断给予的礼物

暴胀，从失败到返场

与许多成功的科学理论一样，暴胀理论一开始很不顺利。它作出的第一个预测——宇宙空间是平坦的，似乎与日渐累积的观测证据不相符合。我们在上一章看到，爱因斯坦的引力理论认为，只有当宇宙密度等于一个特定的临界值时，空间才可能是平坦的。如果我们用符号Ω_{total}（也可缩写为Ω）来表示我们的宇宙与这个临界值相比的倍数，那么暴胀理论预测到Ω=1。然而，当我还在上研究生时，通过对星系的观测以及其他越来越精确的数据，人们测算出一个低得多的值Ω≈0.25。那段时间，阿兰的地位十分尴尬，因为他穿梭于各个会议之间，坚持不懈地声称Ω=1，全然不顾实验物理学家们的结论。幸好阿兰坚守住了自己的阵地，历史证明，他是正确的。正如我们在上一章所看到的那样，暗能量的发现表明之前算出的结果只占真实密度的25%。当我们把暗能量考虑进去时，便得到了Ω=1，误差小到低于1%（见表3-1）。

暗能量的发现瞬间提升了暴胀理论的可信度，再加上一些其他原因，人们已不能再对不可稀释物质的假定置之不理，也不再认为它疯狂至极、不切实际，因为这种物质不是别的，正是暗能量！这样，就像140亿年前的暴胀开启了大爆炸新纪元一样，一个属于暴胀理论的新

时代终于拉开了序幕！这个由暗物质驱动的暴胀与之前的理论很相似，只不过动作放慢了很多——它每次翻倍的时间并不像之前所认为的那样短于眨眼之间，而是长达80亿年。所以，**关于暴胀，最有趣的争论不再是它是否发生过，而是它发生了一次还是两次。**

播撒涨落的种子

成功的科学理论都有一个特点，那就是，它们对人们的滴水之恩总是涌泉相报。阿兰只用了一个假定（一小团难以稀释的物质）就解决了三个宇宙学难题——大爆炸、视界问题和平坦性问题。之前我们还看到，暴胀理论的裨益不止如此，它还预测了Ω=1，这个预言在大约20年后得到了观测的证实。然而，这并不是故事的全部。

上一章结束时，我们提出了一个疑问，星系和宇宙大尺度结构到底从何而来？出乎所有人的意料，暴胀理论竟然也能回答这个问题！它给出的答案简直令人震惊！这个想法最初是由两位俄罗斯物理学家提出的，他们是盖纳迪·西比索夫（Gennady Chibisov）和维亚切斯拉夫·穆哈诺夫（Viatcheslav Mukhanov）。当我第一次听到他俩的想法时，我认为十分荒谬。而现在，我把它看作科学史上最激进而美丽的思想综合体的最主要的候选者。

简而言之，这个答案就是，宇宙涨落的种子来自量子力学，这是关于微观世界的理论，我们将在第6章和第7章进行探索。但是，大学课堂教的知识告诉我，量子效应只对非常微小的事物能产生重要作用，比如原子，那它们如何能影响星系这样的极大之物呢？其实，**暴胀理论最华美之处就在于，它将极大和极小的尺度连接起来了——在暴胀的早期，今天银河系所占据的空间比一个原子还小许多，所以量子效应变得不可忽视。**事实正是如此。我们在第6章将看到，量子力学中所谓的“海森堡不确定性原理”（Heisenberg uncertaint

y）阻碍了所有物质（包括暴胀物质）变得绝对均匀。如果你想让它变均匀，量子效应将迫使它开始左摇右摆，四处扭动，破坏掉均匀性。当暴胀将这团亚原子区域拉扯今天的整个可观测宇宙时，量子力学印入其中的密度涨落也被拉伸到星系甚至更大的尺度。正如上一章所说，其他一切事情就交给万有引力的不稳定性了，它将量子力学赋予的0.002%的微小起伏放大到令人叹为观止的星系、星系团和超星系团，装点了我们今天璀璨的夜空。

最棒的是，这不只是定性的冗长描述，而是一个严格的定量理论，其中的一切都可以精确地计算出来。我在图3-2中画出的功率谱曲线是对最简单的暴胀模型的理论预测，我发现它与实际测算的结果非常吻合。暴胀模型还预测了三个我在表3-1中列出的宇宙学常数，其中一个常数Ω=1我已经提到过；另外两个常数涉及宇宙聚集模式的性质，我们在上一章曾讨论过这个话题。在最简单的暴胀模型中，种子聚集（表3-1中用Q表示）的幅度取决于暴胀区域尺度翻倍的速度。当翻倍的时间约等于10^{-38}秒时，预测值和观测值正好相吻合：Ω≈0.002%。

暴胀还对种子聚集的“倾斜度”常数（表3-1中用n表示）作出了有趣的预测。为了理解这点，我们需要看看图4-6中那锯齿状的边缘，数学家称之为自相似、分形或尺度不变性。这些词语的意思都是说，如果我放大这张图像的一部分，你将无法分辨出放大图和原图之间的差异。当我将这个放大的过程一直重复下去，你会发现，哪怕把曲线放大1万亿倍，也和原来的整条曲线一模一样。有趣的是，暴胀理论预测，我们的婴儿宇宙也可以被近似看成是尺度不变的。从这个意义上说，如果你随机挑选出1立方厘米空间，将其中一部分放大，你将无法分辨放大部分和原来的1立方厘米有什么区别。这是为什么呢？原来，在暴胀统治的时代，从本质上说，放大宇宙与宇宙尺度翻倍是等价的。所以，如果你坐时间机器回到暴胀的纪元，如果你看到涨落的统

计特征具有尺度不变性，就相当于这些特征不随时间而变化。但是，暴胀预言，这些特征之所以不随时间而变化，是因为一个很简单的原因：产生量子涨落的区域附近的物理条件也几乎不随时间变化，因为暴胀物质的密度等特征并不会发生显著的改变。

表3-1中的倾斜度n表示的是暴胀宇宙的尺度不变性。它表征了大尺度和小尺度上聚集程度的对比，我们将$n=1$定义为完美的尺度不变（即任何尺度上的聚集程度都完全一样），$n<1$代表大尺度下的聚集更多，$n>1$则表示小尺度上拥有更多的聚集。穆哈诺夫等暴胀理论先驱预言n会相当接近1。第3章里我曾讲到，我和朋友泰德偷偷摸摸地使用了教授的“魔豆”计算机，那时，我们的目的正是为了计算当时最精确的n值。我们得出的结论是$n=1.15\pm0.29$，这个值与1很接近了。看起来，暴胀理论的这个预测似乎不赖。

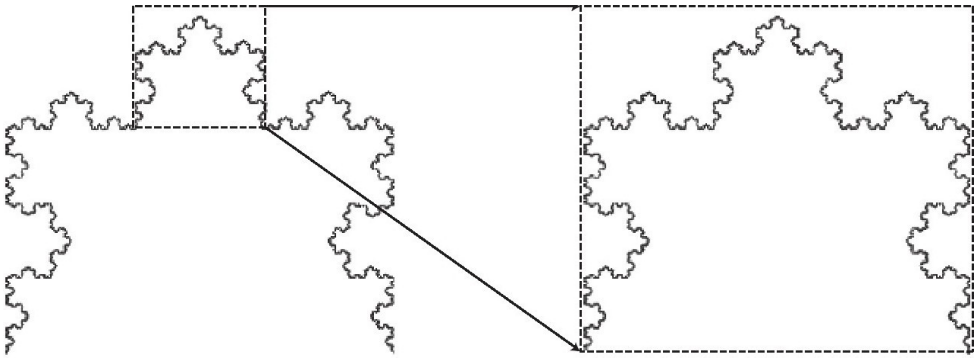


图4-6　这个所谓的“雪花分形”（snowflake fractal）由瑞典数学家海里格·冯科赫（Helge von Koch）所发明。它拥有不可思议的特征，它与自身放大后的一部分完全相同。与之类似，暴胀理论预言到，至少从近似的统计学意义上来说，我们的婴儿宇宙也与自身放大后的一部分别无二致。

对n的探索变得越来越有趣。由于暴胀终有完结的一天，所以暴胀物质还是会在暴胀过程中逐渐被稀释，否则，一切都将不会改变，暴胀将永远持续下去。在最简单的暴胀模型中，密度降低也会导致涨落幅度的下降。这意味着，越往后，涨落的幅度越小。但是，在暴胀结

束前，后期产生的涨落被拉伸的程度大不如前，所以它们对应着今天的较小尺度。这一切的结果是预测出$n<1$。为了作出更具体的预测，你需要知道暴胀物质是由什么组成的。在这样的模型中，最简单的一个是由安德烈·林德（见图4-1）最先提出的，行话称为“二次势标量场”（scalar field with quadratic potential，本质上看，可以把它看成电磁场的“兄弟假说”），它预测了n=0.96。现在，再看看表3-1，你会发现n的数值已经比我们的“魔豆”时代精确了60倍，最新的值是n=0.96±0.005，已经直逼预测值了！

安德烈·林德是暴胀理论的先驱之一，他给了我很多启发。我曾见过别人解释某件东西，听起来十分复杂。但是当我听到林德对同一个东西进行解释时，我才意识到它真的很简单，只要你用正确的方法——也就是林德的方法。林德有着温和的黑色幽默，不管是讨论个人问题，还是前沿科学，他的眼睛里总是闪烁着淘气的光芒。

不是热大爆炸，而是冷小旋风

在未来几年，我们对这些数值的测算会变得越来越精确。我们还有潜力测量暴胀模型预测的其他数值。比如，除了亮度和颜色以外，光还具有另一个性质叫“偏振”（polarization）——蜜蜂可以看见偏振光，并能用其来辨别方向。尽管人眼察觉不到这个性质，但偏光太阳镜却能透过某一种特定的偏振光。许多流行的暴胀模型都预测到，宇宙微波背景辐射中存在一个相当特别的偏振特征——暴胀过程中的量子涨落产生了一种被称为“引力波”（gravitational waves）的东西，这是时空结构的振动。它以一种独有的方式扭曲了宇宙微波背景的模式。

2014年的一天清晨，阿兰给我发送了一封标为“机密”的邮件，邀请我参加3月17日在哈佛大学举行的一场新闻发布会，届时将宣布引

力波的发现。房间里挤满了物理学家和新闻记者，阿兰和林德两人都面带微笑。来自BICEP2实验的约翰·科瓦奇（John Kovac）汇报说，经过在南极地区对微波长达3年的艰苦测量，他们探测到了长度接近10亿光年的巨大引力波。要形成如此强大的引力波，需要极端的暴虐。例如，两个黑洞发生灾难性的碰撞，将比太阳还重的质量挤入一个比城市还小的体积内。这样的事件才能创造出美国LIGO（激光干涉引力波天文台）实验希望探测到的引力波，但是这些引力波的大小仅仅只有创造出它们的那对黑洞那么大。

既然我们的宇宙中似乎没有什么东西如此庞大，大到能够产生BICEP2声称看到的巨大引力波，那么，究竟是什么东西创造了它们呢？在我看来，唯一合理的解释就是暴胀创造了它们，采用的方式是在10^{-38}秒的时间内将空间翻倍并重复至少80次。如果这些巨大的引力波真的存在，这就是唯一的解释。BICEP2新闻发布会后不到一年的时间里，它的结论就被普朗克卫星的新数据所推翻。普朗克卫星的数据显示，BICEP2的全部或部分信号并不是由暴胀引起的，而是由银河系内的尘埃所引起。搜寻仍在继续：BICEP2和其他竞争团队正在你追我赶，争取早日测量出更加灵敏的结果。接下来的几年里，人们终将揭示出来自暴胀的可探测引力波是否真的存在。

那么，我们到底应该多认真地看待暴胀理论呢？即使在引力波事件发生之前，它就已逐渐成为关于宇宙早期最成功和最流行的理论，因为各方实验逐渐确认了它的一个又一个预测，那就是：我们的宇宙应该非常庞大，它正在膨胀、近似均质、各向同性并且十分平坦，而宇宙“婴儿照”中则存在着细微的涨落，大体上具有尺度不变性、绝热性和高斯性。对我和我的许多宇宙学同行来说，如果能找到极大、极长的引力波，就相当于找到了触发成因的确凿证据，因为我们找不到其他合理的解释。所以，找到它们就意味着（尽管听起来很疯狂）

暴胀真的发生过——我们的整个可观测宇宙曾经比一颗原子还小得多。

如果要认真对待暴胀理论，那么我们就需要纠正那些声称暴胀发生在宇宙大爆炸之后不久的人，因为它其实发生在大爆炸之前，并创造了大爆炸。将宇宙的热大爆炸定义为时间的起点是不恰当的，因为我们并不知道时间是否真的有一个起点，还因为暴胀的早期阶段并没有多么“热”，也不“大”，更算不上什么“爆炸”。随着那一小团暴胀物质将直径翻上80倍，它各部分之间相互远离的速度也飞快地增加了2^{80}倍。它的体积增加的倍数是前述数字的立方，也就是2^{240}。质量也同样如此，因为它的密度几乎保持不变。暴胀之前所留下的所有粒子很快降至接近零的温度，只剩下一点点来自量子涨落的热量——正是这些量子涨落产生了引力波。综合来看，我认为，我们最好不要把暴胀的早期阶段看作一次热大爆炸，而应该看作一场“冷小旋风”（Cold Little Swoosh），因为那时候我们的宇宙并没有那么热（到暴胀终止时，温度升高了1 000倍），也没有那么大（还没有一个苹果重，尺度为质子的$1/10^9$），甚至也算不上一个爆炸（膨胀的速度比暴胀后慢了1万亿、万亿倍）。

大爆炸只是宇宙之树上的一个枝

到目前为止，我们对暴胀理论的讨论听起来很像一个成功的物理学理论必经的典型生命周期：新理论解决了老问题→更多预测→实验确认→广被接受→写入教科书。听起来，似乎到了暴胀理论该退休的时候了，我们会为它举办一场传统的科学理论退休仪式，主持人会说：“谢谢你，暴胀理论，谢谢你在探索宇宙终极起源方面的积极付出。现在，请退休吧，你将在教科书的某几章节里度过余生。所以，别来烦我们了，我们将探索其他令人兴奋、尚未解决的新问题。”但是，暴胀理论却很像一个顽强的老教授，它就是坚持不退休！除了在

早期宇宙学中不断给予之外，暴胀理论还给了我们一个从未想过的大惊喜——然而，我的一些同行并不欢迎它。

根本停不下来

第一个令人震惊的事情是，暴胀拒绝停下来，永远在创造出新空间。这是安德烈·林德和保罗·斯坦哈特在一个更具体的模型中发现的。亚历克斯·维兰金为这个效应的存在找到了一个优雅的证据。他是塔夫茨大学的教授，总是友善待人，语调温柔，正是他邀请我去做了那场让阿兰·古斯睡着的演讲。因为种种原因，维兰金曾遇到过很多政治磨难，因此，每当我为官僚主义而懊恼时，想一想亚历克斯的经历，我就会意识到自己的问题是多么微不足道，我的沮丧就会被感激所取代。也许，正是他对所信之物的坚定和不畏权势的精神，才使他坚持不懈地工作，并发现其他杰出科学家忽视的东西。

维兰金发现，暴胀在何时何地结束的问题十分微妙有趣。我们知道，至少在某些地方，暴胀确实结束了。因为140亿年前，在我们现在栖身的这片空间里，暴胀终止了。这意味着，一定有某种物理过程能摆脱暴胀物质，让它衰变成普通的非暴胀物质。而这些非暴胀物质持续膨胀和聚集，正如上一章所讲到的那样，最终形成了星系、恒星和行星。我们知道，具有放射性的不稳定物质会衰变为其他物质，所以，让我们假定暴胀物质拥有相似的不稳定性。这意味着，暴胀物质也有一个半衰期，在半衰期的时间内，一半的暴胀物质将会发生衰变。如图4-7所示，暴胀引起的尺度翻倍和暴胀物质衰变之间就像在进行一场拔河比赛。为了使暴胀能持续进行，前者必须获胜，这样整个暴胀体积才能随时间而不断增长下去。这意味着暴胀物质翻倍所需的时间必须短于半衰期。图4-7中就描绘了这样一个例子，当暴胀体积增长到3倍时，正好有1/3的暴胀物质发生衰变，一次又一次地进行下去。从图中你能看到，空间的总体积会永远翻倍下去。与此同时，暴

胀空间的衰变不断产生出非暴胀区域，所以，非暴胀的空间体积也在不断翻倍，暴胀在这些区域内已经停止，星系最终将在其中孕育。

暴胀这种永不停歇的性质，比我们之前认为的更加普遍。安德烈·林德创造出了“永恒暴胀”（eternal inflation）这个术语。他发现，在他提出的暴胀模型中，即使是最简单的那个，也将通过一种优雅的机制永恒暴胀下去，这种机制与撒下宇宙涨落种子的量子涨落有关。

到现在，全球各地的科学家已经对数量众多的暴胀模型进行了细致地分析，结果发现，几乎所有模型的最终命运都是永恒暴胀。这些计算过程都很复杂，但图4-7中的示意图抓住了本质，向你揭示出为什么暴胀普遍是永恒进行的：**为了让暴胀开始发生，暴胀物质的膨胀速度必须大于衰变的速度，这会让暴胀物质总量不停地增长，没有上限。**

永恒暴胀的发现，彻底改变了我们对宇宙大尺度图景的理解。我不禁觉得，过去的宇宙学理论听起来就像童话一样天真，它只有一个故事，遵循一条简单的情节线：“很久很久以前，暴胀开始了……暴胀创造了大爆炸……大爆炸创造了星系。”图4-7让这个故事显得很幼稚——它再一次昭示了人类的错误，因为我们总是傲慢地假设自己所知道的一切就是这个宇宙的全部。这一次，我们发现，连大爆炸都只是一个更加宏大之物的一小部分，就像一个不断生长的树形结构。**我们称之为“大爆炸”的事件，并不是宇宙的终极开端，而只是一个结束，它为我们这部分空间中的暴胀画上了句号。**

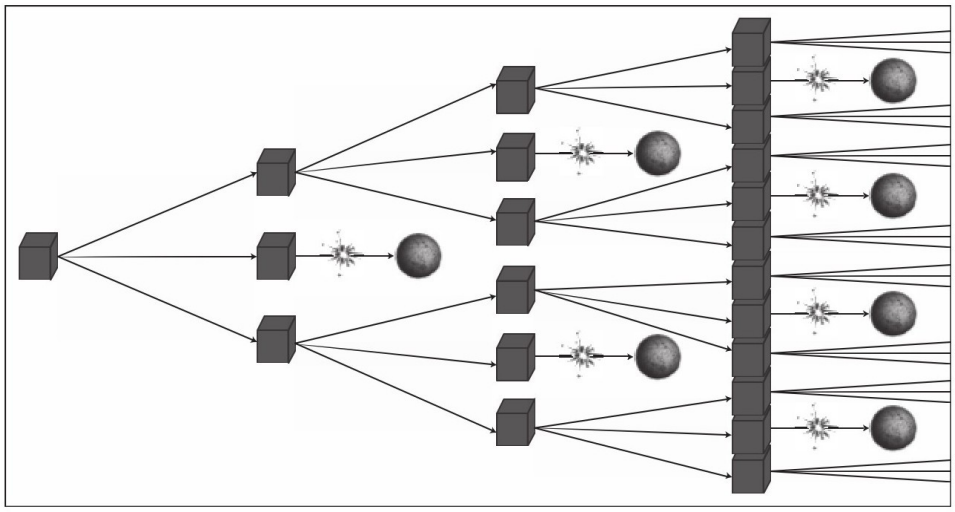


图4-7　永恒暴胀的示意图。每有一份体积的暴胀物质（用立方体表示）衰变成我们这样的非暴胀大爆炸宇宙，就有两份体积继续暴胀下去，体积增长到3倍。结果就是一个无止境的过程，大爆炸宇宙的数量按1、2、4等这样的规律增加，每次翻1倍。所以，我们的大爆炸（用火花表示）并不是万物的开端，而是我们这部分空间暴胀的结束。

魔法秀：如何从有限的体积内创造出无限的空间

第1章中那个幼儿园小朋友曾问：“空间是无边无际的吗？”永恒暴胀理论给出了一个清楚的答案——空间不仅非常庞大，它实际上是无限的，其中有着无限多的星系、恒星和行星。

让我们更仔细地探索一下这种观点。尽管图4-7中的示意图并没有表达得很清楚，但我们在这里只对一个单独的连通空间进行讨论。现在（下面我们将回到真正的“现在”），这个空间内的一些地方正在飞速地膨胀，因为它们包含着暴胀物质；一些地方则膨胀得非常缓慢，因为它们之中的暴胀已经结束；一些地方，比如银河系内的区域，则已经完全停止了膨胀。那么，暴胀结束了吗？根据上面提到的

那些研究，得到的答案是：是，又不是。暴胀已经结束了，同时它又没有结束。这到底是什么意思呢？来看看下面几个结论。

- 在空间中的几乎所有地方，暴胀最终将会以大爆炸的形式结束。
- 空间中，多多少少会有一些地方，暴胀永远不会结束。
- 暴胀体积的总量将永远增加，定期翻倍。
- 暴胀结束、包含星系的体积也将永远增加，定期翻倍。

这是否意味着空间现在已经是无限的了？这将第1章开头提出的问题2带到了我们面前：在有限的时间中，如何能创造出无限的空间？听起来不可能。然而，正如我提过的，暴胀就像一场魔法表演，通过创造性地使用物理定律，许多看起来不可能的节目都上演了。实际上，暴胀能做得更好，在我看来，这是它最令人惊异的花招：它能在有限的体积内创生出无限的体积！具体地说，它能在一团比原子还小的物质中创造出一个无垠的空间，其中包含着无限多的星系，而不用影响外界空间。

图4-8告诉我们暴胀是如何玩这个花招的。它展示了时空的一个切面，其中，左右边缘分别代表暴胀永不结束的两点，下边缘对应着一段时间，在这期间，两点间的整个空间都在暴胀。要画出一个正在膨胀的三维空间十分困难，所以在这张图中，我忽略了膨胀和两个空间维度，因为这两者并不影响基本论述。最终，除左右边缘之外，所有地方都停止了暴胀。弯曲的边界线表示暴胀在不同区域停止的精确时间。在一个给定的区域内，如果暴胀结束了，传统的大爆炸理论就开始在此处展开画卷，就像前两章所讨论的那样，先是变成一个炙热的核聚变反应堆，接着逐渐冷却下来，形成原子，再衍生出原子、星系，最终可能出现像我们这样的观察者。

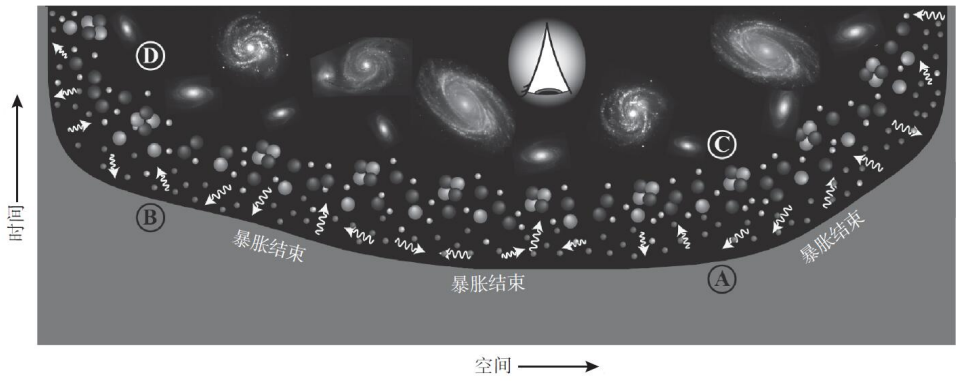


图4-8　如正文所说，在外界看起来比原子还小的区域内，暴胀能创造出一个无限的宇宙。在栖于此间的观察者看来，A和B是同步的，C和D也是同步的，无限的U形面上，暴胀结束于观察者的时间开端，原子形成于此后的40万年……为了简化，这张图忽略了空间的膨胀和两个维度。

这个花招的关键点在于：根据爱因斯坦的广义相对论，如果这些星系中居住着一名观察者，那他对时间和空间的感知将与我在图4-8中用坐标轴所定义的完全不同。我们的物理空间中并没有标明尺子一样的厘米刻度，宇宙中也没有一堆事先设定好的时钟。相反，每个观察者都需要定义自己的尺子和时钟，从而定义出自己对时间和空间的概念。这种想法与爱因斯坦不朽的核心理念不谋而合，那就是“一切都是相对的”——不同的观察者对时间和空间的感知都不同。具体点说，同步也可以是相对的。

现在假设你有一个好朋友是宇航员，他此时正在火星上执行任务，你向他发送了信息：

“嗨！你那边怎么样啊？”

这条消息通过无线电波以光速从地球传向火星。10分钟后，他收到了你的消息。你等待的过程中，收到了一封来自尼日利亚的垃圾邮件，向你推销便宜的劳力士手表。再过了10分钟，你收到了他的回信：

“我很好，但我很想念地球！”

那么，你收到垃圾邮件和火星宇航员发出邮件，这两件事哪一件发生得更早呢？令人惊讶的是，爱因斯坦发现，这个简单的问题并没

有简单的答案。正确的答案取决于问题回答者的速度！比如，我坐在一艘飞船中，正掠过地球，飞向火星。在这个过程中，我拦截到了这三封邮件，并进行了分析。根据飞船上搭载的时钟，我得出结论，你朋友发出邮件的时间早于你收到垃圾邮件的时间。但是，如果我往相反的方向运动，我可能会得出相反的结论，即你收到垃圾邮件的时间更早一些。你感到晕头转向了吗？这正是爱因斯坦发表相对论时，大多数物理学家的反应。但是，之后无数的实验证明，时间就是这样运行的。唯有地球事件在火星信息到达地球之后才发生时，才能让我们确定火星事件早于地球事件。

现在，让我们将其运用在图4-8所示的情况里。对处在这个区域之外的某人来说，可以用横轴和纵轴来分别代表空间和时间，就像我画在图中的那样，于是，A、B、C、D四件事情将按照字母顺序依次发生。此外，B一定发生得比D早，因为你可以想象出从B向D发送一条信息的情景。同样，A一定早于C。然而，鉴于A和B距离遥远，连光线都没有足够的时间到达，那我们是否还能确凿地说A早于B呢？爱因斯坦的答案是，不能。实际上，对一位栖居于图中星系里的观察者来说，将所有地方的暴胀结束都定在一个固定的时间会更有意义，因为暴胀的结束意味着大爆炸，所以对他来说，A和B实际上是同时发生的！正如图中所示，代表着“暴胀结束”的曲线并不是水平的。曲线的左右边缘弯曲得像一个U字形，代表着永不结束的暴胀，所以它实际上是无限的。这意味着，只要从这位观察者的角度考虑，他的大爆炸就开始于无限空间（也就是无限的U字形）中的一个点！这无限的空间从哪里悄然而来呢？——它来自未来无限的时间，来自U字形两端逐渐倾斜的无垠空间。

同样地，他还会认为宇宙在接下来的时间里也是无限的。比如，如果他进行宇宙微波背景实验，拍下了他的宇宙只有40万年历史时的“婴儿照”，他所拍下的等离子体表面对应着图中质子和电子结合变

成透明（不可见）氢原子的那个表面。你会发现，这也是一个无限的U字形，所以他将感觉到，40万年历史的宇宙也是无限的。他还会认为C和D是同时发生的，因为它们位于同一个U字形上，第一批星系正在其中孕育。每两条U字形之间，你都能塞下无数个U字形，所以，他感觉到有两个东西是无限的，一是宇宙的空间，二是未来的时间——尽管在外人看来，所有这一切都被灵巧地塞进了一个比原子还小的区域中。真相就是，内部的空间膨胀并不一定会增加它在外部世界所占据的空间——请记住，爱因斯坦允许空间拉伸，并从虚无中创生出更多的体积，而不用从其他地方抢夺而来。实际上，从外界看起来，这个无限的宇宙可能很像一个亚原子黑洞。阿兰·古斯和他的同事们甚至真的研究了这种可能性：在实验室里创造出一种东西，从外部看像个小黑洞，而从内部看则是一个无限的宇宙——至于是否真能做到这一点，人们尚没有定论。[10]

在本章开始时，我们由弗里德曼的经典大爆炸理论说起，因它无法解释一些基本问题而展开了对暴胀理论的探索。那么，现在让我们用暴胀理论来重新回答一下下面这几个问题。

问题12：是什么导致了大爆炸？

答：一团亚原子尺度的暴胀物质在尺度上的不断翻倍。

问题5：大爆炸是从某个单独的点开始发生的吗？

答：基本上算是。因为它发生于一个比原子还小的区域内。

问题4：大爆炸是从空间中的什么地方开始的？

答：在那个微小的区域内。但是，暴胀将它拉伸到一个葡萄柚般的大小，这个葡萄柚再飞速增长，直到比我们今天看到的整个可观测宇宙还大。

问题2：在有限的时间中，如何能创造出无限的空间？

答：永恒暴胀的过程中创造出了无限多的星系。根据广义相对论，栖身于这些星系中的观察者对时间和空间的区分有所不同。他们会觉得，早在暴胀刚结束的时候，空间就已经是无限的了。

简而言之，暴胀理论彻底改变了我们对宇宙起源的理解，用一个从虚无中创造出大爆炸的简单机制解释了弗里德曼大爆炸模型无法回答的艰深难题。除此之外，它还给予了我们更多馈赠：宇宙空间不仅是庞大的，它实际上是无限的，拥有无限多的星系、恒星和行星。然而，我们在下一章将看到，这仅仅只是冰山的一角。



- ◆弗里德曼大爆炸模型对宇宙最早期的解释上存在严重的问题。
- ◆暴胀理论解决了这些问题，还解释了大爆炸的起因。
- ◆暴胀理论解释了为什么空间是平坦的，这也是我们以1%的误差测量出来的结果。
- ◆暴胀理论还解释了为什么平均来看，遥远的宇宙在各个方向上都是相同的，不同区域之间的起伏只有0.002%。
- ◆暴胀理论解释了0.002%的起伏来源于被暴胀从微观尺度拉伸到宏观尺度的量子涨落，涨落再被万有引力放大，最终形成今天的星系和宇宙大尺度结构。
- ◆暴胀理论甚至还解释了获得2011年诺贝尔奖的宇宙加速膨胀理论，重启的暴胀就像慢动作，使得宇宙翻倍的时间并不是短于须臾之间，而是长达80亿年。
- ◆暴胀理论认为，宇宙增长的过程与人类婴儿发育的过程很相似：先是一个加速增长的阶段，在其中，尺度按固定周期翻倍，接下来是一个更舒缓的减速增长阶段。
- ◆大爆炸其实并不是宇宙的开端，而是一个结束，即我们这部分空间中的暴胀结束，而在其他地方，暴胀普遍会永远进行下去。
- ◆暴胀理论预言，我们的宇宙不仅是庞大的，实际上是无限的，其中有无限多的星系、恒星和行星，而孕育它们的初始条件都来自最初的随机量子涨落。

OUR MATHEMATICAL UNIVERSE



05

欢迎来到平行宇宙

如果感观之门能被完全洗净，一切事物将以原本的样貌呈现，不受任何限制。因为人们大多自我封闭，从他们洞穴的缝隙来看事情。

威廉·布莱克（William Blake）
《天堂与地狱的联姻》（*The Marriage of Heaven and Hell*）

有两样东西是无限的：宇宙和人类的愚蠢，而我不能确定前者。

被认为是爱因斯坦所说

准备好接受非议了吗？到目前为止，本书所探讨的大部分内容都是被广为接受的主流科学理论。而现在，我们即将进入一个充满争议的疆域，许多物理学家在这里唇枪舌剑、互不相让，有的支持，有的反对。

第一层多重宇宙，地球的孪生兄弟

是否存在另一个你，也在读这本书呢？当你决定继续读下去时，他却没有读完这句话就放弃了？他是否也住在一颗叫作地球的行星上，那里也有迷雾缭绕的山林、肥沃的土地、整齐排布的城市，并同其他7颗行星一起围绕着一颗恒星运转？这个人过去生活的方方面面都

和你一模一样——直到现在，你决定读下去，而他决定放弃，这个差异仿佛一个岔路口，让你俩的人生道路终于走向不同的方向。

你可能会觉得这种想法很奇怪，一点也不合理。我必须承认，这也是我的第一反应。但是，看来我们不得不接受它，因为这正是现今最简单也最流行的宇宙学模型作出的预测：另一个你真的存在，他就居住在$10^{10^{29}}$米之外的一个星系中。这个命题甚至不需要将现代物理学的推测作为前提，其前提仅仅是：空间是无限的，并且均匀地充满了物质。另一个你只是永恒暴胀理论的一个简单预测，这个理论与目前所有的观测证据都吻合，并不露声色地成了宇宙学领域诸多计算和模拟的基础。

宇宙的真正意义

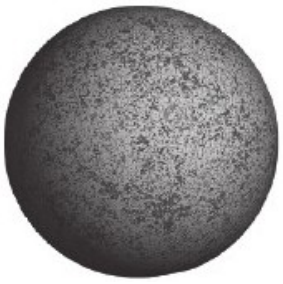
在我们热切讨论其他宇宙之前，有一件非常重要的事，那就是先弄清楚我们自己的宇宙代表着什么。以下是本书将涉及的术语。

- 物理实在：一切存在的事物。
- 我们的宇宙：在物理实在中，本质上能被我们观测到的部分。

我们的宇宙

如果我们忽略掉下一章将讲到的复杂的量子效应，那此处对宇宙的定义也是等价的。在过去的几章里，我们把这个区域称为“我们的可观测宇宙”。它还有一些听起来更极客范儿的古怪名字，像是“我们的视界体积”（horizon volume）或“我们的粒子视界内的区域”（the region within our particle horizon），这些名字在天文学家中很流行。天文学家还喜欢谈论“哈

是一个球形的空间区域，在它之中发出的光线经过大爆炸以来140亿年的时间后，能够到达我们。基本上像这样：



勃体积”（Hubble volume），它的尺度也差不多大，代表着星系退行速度小于光速的区域。

由于可能存在其他宇宙，我认为，只是简单地把我们的宇宙简称为“宇宙”有点傲慢自大，所以我会尽量避免这么称呼。但是，这显然只是个人喜好问题，比如纽约人就习惯把纽约城简称为“the city”，而美国人和加拿大人则把仅有两国参加的棒球比赛称为“世界大赛”。

你也许会觉得这些定义很合理，但是请小心，有些人在使用它们时的意思并不一样，这可能会带来困惑。尤其是，有些人会使用我尽量回避的“宇宙”一词来代表一切存在的事物，在这种情况下，根据他们下的定义，就根本不可能存在平行宇宙了。

现在，我们已经定义了我们的宇宙，那么，它究竟有多大呢？正如我们之前所讨论的，我们的宇宙是一个球形的区域，地球位于这个球形的中心。靠近我们宇宙边界的物体发出的光线经过140亿年的旅途，才刚刚到达我们身边。现在，这些物体与我们之间的距离大约为5×10^{26}米[11]。就目前所知，我们的宇宙包含着10^{11}个星系、10^{23}颗恒星、10^{80}个质子和10^{89}个光子（也就是光的粒子）。这些当然是相当大的数字，我们宇宙中的东西可真多呀。但是，在更遥远的空间里，是否还存在更多东西呢？正如我们之前提到的，暴胀理论的预言告诉我们，答案是肯定的。如果你的分身所栖居的宇宙真的存在，那也将是一个大小差不多的球形，球心正是他所在的“地球”。我们看不到那个宇宙，也不可能与之接触，因为光线和其他信息没有足够的时间到达我们。这就是最简单的（但绝不是唯一的）一种平行宇宙的例子。**我把这种身处遥远区域、与我们宇宙的尺度相仿的宇宙称作**

“第一层平行宇宙”（Level Ⅰ parallel universe），所有的第一层平行宇宙组成了“第一层多重宇宙”（Level Ⅰ multiverse）。后文表5-2中定义了本书提到的所有多重宇宙的类型，以及它们之间的相互关系。

看到我们对宇宙的定义，有人可能会认为，“我们的可观测宇宙只是一个更庞大的多重宇宙中的一小部分”这种观点只会永远存在于形而上学的领域中。然而，判断一个理论是属于真实的物理学还是形而上学，并不是看它有多古怪，也不是看它包含的实体是否可见，而应当考察它是否可用实验来验证。随着科技的进步，实验物理学取得了长足的进展和突破，不断拓展着我们对物理世界的认知边界，许多曾经被认为难以置信、抽象至极（并且有悖直觉）的概念都经受住了检验，比如地球是圆的、电磁场、高速运行下时间会变慢、量子态叠加、空间弯曲和黑洞等。下面我们将看到一个越来越清晰的事实，那就是，以现代物理学为基础的理论其实都是可检验、可预测和可证伪的。多重宇宙也不例外。实际上，在本书接下来的部分里，我们即将探讨的平行宇宙多达4个层次。所以，**对我来说，最有趣的问题不是多重宇宙是否真的存在（因为关于第一层多重宇宙的争议并不多），而是到底有几层。**

平行宇宙中，遇见众多个人生

假设暴胀真的发生了，并让我们的空间变得无边无界。那么这样一来，第一层平行宇宙的数量也会变得无穷无尽。此外，无限的空间中会充满物质，与我们的宇宙类似，将逐渐形成原子、星系、恒星和行星（见图4-8）。这意味着，大部分第一层平行宇宙的历史都与我们的宇宙大体相似。不过，绝大多数细节都与我们迥异，因为它们的初始状态稍有不同。原因正如我们在第4章中所看到的那样，孕育宇宙中

所有结构的起伏种子是由量子涨落所产生的，而从实际操作的角度出发，量子涨落是随机发生的。

我们对世界的物理描述通常分为两个部分：一切是如何开始的，以及它们是如何演变的。换句话说，就是初始状态和物理定律，后者决定了初始状态随时间的发展将如何演化。栖居于第一层平行宇宙中的观察者眼中的物理定律与我们是相同的，但是他们的初始条件与我们不同。比如，在初始状态中，粒子的位置可能会稍有不同，正是这一点差异最终决定了宇宙中将发生什么故事：哪些地方会变成星系，哪些地方会成为星系间的空虚之地，哪些恒星会拥有行星，哪些行星上会出现恐龙，哪些行星上的恐龙会因小行星撞击而灭绝，诸如此类。也就是说，平行宇宙之间由量子引发的差异随时间而放大，逐渐演化成了千差万别的宇宙历史。简而言之，第一层平行宇宙中的学生们在物理学课堂上学的东西是相同的，但历史课的内容却完全不同、百花齐放。

说了这么多，这些学生到底存不存在？感觉上，你们极不可能经历完全相同的人生，因为这需要太多太多巧合：地球必须形成，生命必须进化，恐龙必须灭绝，你的父母必须邂逅，你还必须读这本书，等等。然而，这些事情同时发生的可能性并不等于零，因为我们的宇宙中就发生了这样的事呀。如果你掷骰子的次数足够多，即使是最不可能发生的事，也一定会发生。由于暴胀创造出了无数个第一层平行宇宙，这就像让量子涨落掷了无数多次骰子，保证了你的分身存在于其中一个平行宇宙中的可能性为100%。实际上，你的分身并不止存在于一个平行宇宙中，而是无数多个平行宇宙，因为无穷大的一小部分还是无穷大。

更有甚者，无限的空间中不仅包含和你一模一样的人，它还包含许许多多和你大体相似但略有差别的版本。所以，如果你遇到最近的

那个分身，你们很可能无法交流，因为他可能只会说你听不懂的外星语言，也拥有着和你截然不同的人生经历。但是，在这些讲鸟语的分身中，总会有一个讲英语或中文的，居住在一颗和地球几乎完全一样的行星上，经历着和你在各方面都几乎完全相同的人生。这个人的主观感受和你非常相似。尽管可能存在一些细微的差异，比如大脑中粒子的运动方式不同，但这太过微妙，根本无法察觉到。然而，也许正是这点毫厘之差，让他决定放下这本书，而你决定继续读下去，使得你们俩的人生开始走向不同的方向。

这引出了一个有趣的哲学观点，如果真的存在无数个和你拥有相同过去和记忆的“你”，这将扼杀掉传统的决定论观点，也就是说，**即使你完全了解关于宇宙整个过去和未来的所有知识，你也不能预测自己的未来！你之所以无法预测，是因为你不知道在这么多分身中，哪一个才是“你”（他们都觉得自己是你）**。由于你们的人生最终将走向不同的轨迹，所以你最多只能预测从今往后你可能会经历哪些可能性。

总的来说，在一个由暴胀创造出来的无限空间中，只要是遵循物理定律的事，就一定会发生，并且发生的次数为无穷大。这意味着，在有的平行宇宙中，你一辈子都不会拿到停车罚单，或者你的名字不一样，或者你赢了100万美元的彩票；甚至在有的平行宇宙中，德国赢了第二次世界大战，或者恐龙依然横行于地球上，或者地球从一开始就压根儿没有形成过。尽管不同平行宇宙的数量都是无穷多，但有些所占的比例更大一些。要想明白这个问题，会引出一堆迷人的话题，我们将在第10章继续探讨。

永恒暴胀的“捆绑商品”

等一下！我刚才说的一切是不是疯了？我的意思是说，到目前为止我在这本书里所写的东西，希望你都能觉得很合理。当然，我写的一些科学发现在当初可能颇有争议，但现在至少它们都被科学界的主流思想接受了。但是，在这一章，一切开始变得有点疯狂。我们刚讨论过，可能存在无数个你，正在做着我们能想象出来的所有事情——这听起来像是胡扯，简直是胡说八道。所以，在更加深入探讨这个疯狂的想法之前，我们需要停下来，检查一下自己精神是否正常。首先，这些我们根本无法观测到的种种怪异真的是科学呢，还是我已经越出了科学的边界，踏进了纯粹的哲学思辨？

让我们更具体一些。著名哲学家卡尔·波普尔（Karl Popper）普及了一个如今被广为接受的格言：“如果不可证伪，那就不是科学。”在物理学中，人们所做的一切几乎都是用观察来验证数学形式的理论。如果一个理论本质上不能被验证，那从逻辑上说，它就不可能被证伪，这样一来，根据波普尔的定义，它就是不科学的。由此可以得出结论，理论是唯一有希望具备科学性的东西。所以我们得出了以下这个重要的观点：**平行宇宙并不是一个理论，而是特定理论作出的预测。**

此处所说的特定理论，指的就是暴胀这样的理论。平行宇宙（假设它们真实存在的话）是物体，而物体是不可能具有科学性的，所以平行宇宙并不比一根香蕉更科学。

所以，我们必须对关于理论的哲学思辨问题做一些改进，这将把我们引向下面这个关键的问题：**一个预测了不可观测实体的理论就是不可证伪和不科学的吗？我觉得这个问题很有趣，因为它有一个清楚明确的答案：要证明一个理论是可证伪的，我们并不需要检验它的所有预测，只需要至少检验其中一个就够了。**表5-1所示为一些类似的情况。

表5-1　一些理论及其预测举例

理论	预测
广义相对论	黑洞内部
暴胀理论（第4章）	第一层平行宇宙
暴胀理论、宇宙图景（第5章）	第二层平行宇宙
波函数不坍缩的量子力学（第7章）	第三层平行宇宙
外部实在假说（第9章）	第四层平行宇宙

由于爱因斯坦的广义相对论成功地预测了许多可被我们观测到的事物，比如水星绕太阳旋转的精确轨迹、被万有引力弯曲的光线、万有引力的钟慢效应等，所以我们把它看作一个成功的科学理论，并认真地相信它所作出的那些不可观测的事物。比如，黑洞视界内的空间是连续的[12]，并且在视界上也不会发生什么稀奇古怪的事，这与早期的错误观念是相悖的。与之相似，暴胀理论也作出了许多成功的预测，于是它也成了一个成功的科学理论，这使得我们也应该相信它作出的其他预测——不管是可检验的预测（比如，未来的宇宙微波背景实验结果将是什么样），还是看起来不可检验的预测（比如，平行宇宙的存在）。表5-1最后3项所涉及的理论将预测出其他类型的平行宇宙，我们将在本书后面的章节中进行讨论。

关于物理理论，还有一件重要的事就是，如果你喜欢某个理论，那你必须全盘接受它的一切。你不能说：“好吧，我喜欢广义相对论对水星轨道的解释，但是我不喜欢黑洞，所以我决定把后者从脑子里删除。”你不能这么做。如果你要选择广义相对论，就绝不能抛弃黑洞，这就像你不能买一杯咖啡后却不接受里面的咖啡因一样。广义相对论是一个严格的数学理论，没有修改的可能性；要么你就全盘接受它的所有预测，否则你就得从零开始，自己发明一个符合广义相对论所有成功的预测，但是却不存在黑洞的全新数学理论。这简直比登天还难。并且，到目前为止，所有这样的尝试都失败了。

同样，**平行宇宙也是永恒暴胀理论不可或缺的一个预测。**它们就像一包捆绑销售的商品，如果你不喜欢它们，你就得去寻找一个不同的数学理论，它不仅要能解释爆炸问题、视界问题和平坦性问题，还必须能创生出宇宙的种子涨落——同时预言平行宇宙不存在。事实证明，这也难于上青天。这正是为什么在我的同行们中，越来越多的人选择相信平行宇宙（尽管常常极不情愿）。

所有可能发生的事，都一定会发生

现在我们已经解决了一件事——我们不用为在本书里讨论平行宇宙而感到不好意思，即使这本来应该是一本科学书籍。但是，科学的东西也不一定完全正确，所以，让我们一起来更仔细地看看平行宇宙的证据。

在本章前文，我们已经看到，包含着你众多分身的第一层多重宇宙是永恒暴胀理论的一个逻辑结论。我们也看到，暴胀理论目前是科学界在早期宇宙演化领域最流行的理论，由于这个暴胀是永恒的，所以创造出了第一层多重宇宙。也就是说，第一层多重宇宙的最佳证据正是我们对暴胀所拥有的证据。这是否能证明你的分身们真的存在？当然不能！在这个时刻，我们并不能100%地确信暴胀是永恒的，甚至不能确定暴胀到底有没有发生过。幸运的是，目前对暴胀的研究是一个在理论和实验上都非常活跃的领域，所以，在今后的几年里，我们很可能将获得更多关于暴胀的证据，有的可能支持它的存在，也有的可能反对（同时也将成为支持或反对第一层多重宇宙的证据）。

到目前为止，本章的所有讨论都是基于暴胀理论进行的。然而，第一层多重宇宙理论的存亡是否完全取决于暴胀呢？不是的！假如根本不存在第一层平行宇宙，那么，在我们所能观测的宇宙空间之外，一定也空无一物，连空间都不存在。在我的同行中，没有一位认为空

间会如此之小。如果有人为这种理论辩护，他就像一只把头埋在沙子里的鸵鸟，同时还声称只有他能看见的东西才是真实存在的。我们都接受那些尽管现在不可见，但随着我们改变位置或继续等待就会变得可见的事物，比如海平面以外的船只。宇宙视界之外的事物也处在同样如此的位置，因为我们的可观测宇宙正在以每年大约1光年的速度增长，因为从那个边界发出的光终于旅行到了我们眼前[13]。

那么，对于那些与我们一个模子印出来的分身，有什么证据吗？如果我们梳理一下上面的讨论，就会发现，第一层多重宇宙所具有的“所有可能发生的事情，都一定会发生”的性质，遵循两个逻辑不同的前提假设。即使没有暴胀，人们也确信这两个假设是正确的。

- 无限的空间和物质：在早期，空间就是无限的，充满了炽热的、不断膨胀的等离子体。
- 随机的种子：在早期，某种机制播撒下了这样的种子，使得任何区域都能孕育出任意一种可能性的种子起伏，它们看起来是随机的。

让我们来依次讨论一下这两个假设。我认为第二个假设即使没有暴胀也十分合理。我们已经观测到这些看似随机的种子起伏的存在，所以我们知道，它们一定是某种机制创造出来的。我们也已经用宇宙微波背景和星系天图精确测算了它们的统计学性质，而它们的随机性质正好符合统计学家们所谓的“高斯随机场”（Gaussian random field），也满足第二个假设。此外，如果暴胀没有发生，遥远的区域就永远无法彼此沟通（见图4-2），这就保证了在每个区域内，这种机制都将独立地掷骰子。

那么，无限的空间和物质这一假设呢？其实，早在暴胀理论发明之前，主流宇宙学界就假设宇宙是一个相当均匀地充满着物质的无限空间。到现在，它是宇宙学标准模型中的一部分。尽管这个假设与它所暗示的第一层多重宇宙曾存有争议，但实际上，历史上曾有许多饱

受争议的理论，比如1600年梵蒂冈为了将布鲁诺烧死在火刑柱上而控诉的那些异端邪说。最近，有许多人都就该主题发表了论文，比如乔治·埃利斯（George Ellis）、杰夫·布伦德里特（Geoff Brundrit）、贾米·加里加（Jaume Garriga）和亚历克斯·维兰金，他们很幸运，并未受到火刑柱的惩罚。不过，还是让我们用批判的眼光来看看无限的空间和物质这个假设吧。

在第1章中，我们看到，尽管最简单的空间模型（可追溯到欧几里得）是无限的，但爱因斯坦的广义相对论允许有限空间以各种优雅的方式存在。如果空间向自身弯曲，像一个超球面（见图1-7），那么这个超球面的体积将比我们能观测的部分（也就是我们的宇宙）大了至少100倍，这就解释了为何我们可观测的空间是如此平坦，连宇宙微波背景实验迄今都没有检测到任何曲率。也就是说，就算我们生活在一个类似超球面的有限空间内，也应该存在至少100个第一层平行宇宙。

那么，一个环面形（面包圈形状）的有限空间呢？我们在第1章中介绍过，在环面上，尽管空间是平坦的，但如果你往一个方向走下去，还是有机会回到原点。这种空间有点儿像一些电子游戏，在其中，如果你飞出了屏幕的一边，立刻就能从另一边飞回来，所以，如果你往前看得足够远，就能看到自己的后脑勺——你还能看见，每个方向上都规律地分布着无数个你的分身，就好像站在一个装满了镜子的房间里。如果我们的空间具备这种性质，它最小的尺度应该是多大呢？它当然比我们的银河系大多了，因为望远镜并没有瞥见无数个相同的银河系整齐地在一个方向上排列成行。但是，如果这个尺度很大，比如有100亿光年，那这个实验就失败了——我们连最近的那个银河系分身都无法看见，因为100亿年前它还不存在呢。幸好还有一种更灵敏的检验方法。我们可以先确定一个50亿光年外的物体，比如一个明亮的星系，然后向相反方向的50亿光年外去寻找那个相同的星系。不过，这样的搜寻还是一无所获。

最灵敏的方法，莫过于使用我们能看到的最远极端，也就是宇宙微波背景，往其相反的方向去寻找相符的模式（见图5-1）。许多研究团队，包括我和安赫丽卡，都尝试了这种方法，依然无功而返。此外，如果空间的体积是有限的，那么，它将只允许一些特定频率的扰动存在，这就好比长笛内部的空气只能在几个固定的频率上振动一样。这将以一种特别的方式扭曲宇宙微波背景功率谱曲线，但安赫丽卡等人“众里寻他千百度”，最终却一无所获。总的来说，空间有限的可能性依然存在，但近年来的观测结果严重地限制了这种可能性，其中，唯一可能的有限空间的尺度应该大于我们的宇宙，或者与我们的宇宙尺度相当。所以，很难说平行宇宙完全不存在，至少应该存在一小撮。此外，如果当下真的只允许一个宇宙存在，这需要回答一个奇怪的巧合问题：“为什么是现在？”因为，既然刚好到达我们的光线来自空间中的一小部分，那就不能否认在其外还存在其他平行宇宙的可能性。

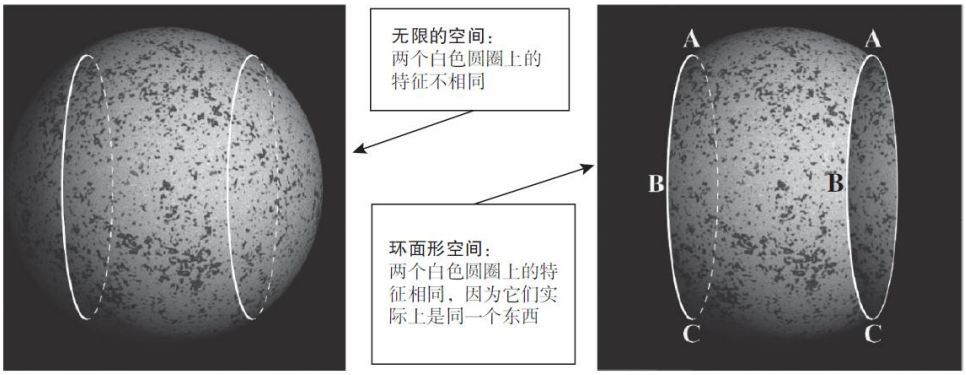


图5-1　如果你往右飞，穿过了位于环面形宇宙右边缘的圆圈，你会立刻从左边缘的圆圈再次进入宇宙，比如，从A离开，再从A进入，诸如此类。两个A其实是物理上的同一个点。这意味着，对我们来说，沿着两个圆圈的宇宙微波背景模式看起来应该是完全相同的，因为它们俩实际上是同一个东西。

我们对空间的无限已经谈得够多了。那么，前文假设中的“物质无限”部分呢？在暴胀理论之前，这部分常以“哥白尼原则”（Coper

nican principle）为依据，意思是说，人类在宇宙中并不占据什么特殊的位置，如果我们周围布满了星系，那整个宇宙也都应该如此，到处布满了星系。

对于这种说法，近期的观测结果如何呢？更具体一点说，在大尺度上，物质分布到底有多均匀呢？在“岛宇宙”（island universe）模型中，空间是无限的，但物质被限定在一个有限的区域内，几乎所有第一层多重宇宙都可能一片死寂，没有任何物质的影踪，只有空荡荡的空间。这种模型在历史上曾一度非常流行。起初，所谓的“岛宇宙”只包含地球和四周肉眼可见的星体；到了20世纪早期，“岛宇宙”扩展到银河系中的已知部分。但随着观测技术的进步，“岛宇宙”模型在近年来已被完全摒弃。上一章我们所谈论过的三维星系天图已向人类展示了叹为观止的宇宙大尺度结构（包括星系群、星系团、超星系团和“斯隆长城”等）。我们看到，在大于10亿光年的尺度上，并不存在任何连贯一致的结构。这种大尺度上枯燥无趣的均匀性取代了“岛宇宙”，登上了历史舞台。

我们观测的尺度越大，宇宙中的物质就看起来越均匀（见图3-6）。为了反对那些认为“我们的宇宙只是被设计来愚弄人类的阴谋论”，科学家们用观测结果大声疾呼：据目前所知，空间看来已延续到我们的宇宙的边界之外，但依然充满了星系、恒星和行星。

$10^{10^{91}}$米外，有个人与你一模一样

之前我们已经讲到，如果第一层平行宇宙真的存在，它们的尺度应该与我们的宇宙相仿，但栖身于相当遥远的空间，从那里发出的光线还没有足够的时间到达我们的眼睛。这样说起来，我们应该位于我们宇宙的中心位置。这是否说明我们在宇宙中拥有一点特殊的地位呢？并不是。

想象一下，假设你行走在一片铺天盖地的浓雾中，能见度小于50米，你会感觉到自己处在一个雾霾围成的球面中心，在这个球面的边界之外（与我们的宇宙边界很类似），什么都看不见。但是，这并不能说明你真的拥有特殊的地位、处在某个基本事物的中心，因为无论是谁，只要走进这片浓雾中，都会觉得自己位于雾霾球面的中心。同样，任何一个观察者，不管他位于空间中的什么地方，都会觉得自己位于宇宙的中心。并且，这些相邻宇宙相接的地方也并不存在什么物理边界，就像雾气中能见度边缘的50米远处并不存在一个特别的分界线一样——50米外的雾气和地面与你身边的并无什么差别。此外，这些平行宇宙之间还可以相互重叠，就像雾球可以相互重叠一样。比如，30米外有一个人，他能看见一部分你能看见的区域，同时也能看见一部分你看不见的区域，这样你们俩的雾球就有一部分区域相互重叠了。平行宇宙也是如此，假如50亿光年外的星系中居住着一位观察者，他能看见地球所在的区域，同时也能看见一部分超越我们视野之外的宇宙。

如果永恒暴胀或其他什么东西创造出了无限多的此类平行宇宙，那么，和我们相仿的那些分身里最近的那个，究竟位于多远之外呢？根据经典物理学，宇宙可以有无穷多种组织形式，所以，不能保证你一定能找到你的分身。从经典理论的角度来说，甚至两个粒子间的距离都有无限多种可能性，因为你在计算概率时会发现小数点后的位数将是无穷多。但是，**有一个很清楚的事实是，所有人类文明只能辨别出可能存在的有限多个平行宇宙，因为人类目前的测量精度是有限的——迄今为止，物理学测量误差的纪录是小数点后16位。**

更有甚者，量子力学甚至从最根本的层次上限制了平行宇宙的多样性。正如我们将在后两章探讨的那样，量子力学将模糊的本质赋予了大自然，因此，用超过特定值的精确度去讨论物体的位置是没有意义。这种局限的结果就是，宇宙组织形式的可能性是有限的。根据保

守估计，与我们的宇宙大小相仿的宇宙的组织方式共有$10^{10^{118}}$种[14]。还有一种更保守的理论，叫作“全息原理”（holographic principle），它预测一个与我们的宇宙大小相似的体积最多能有$10^{10^{124}}$种组织方式[15]。否则，你塞进去的东西就太多了，会让它形成一个比自身还大的黑洞。

这些都是巨大的数字，大得简直超乎想象，甚至比著名的“古戈尔普勒克斯”（googolplex）还大。小男孩都对大数字很着迷，我曾经偷听到我儿子和他的小伙伴抢着说出比对方更大的数字。在万亿、亿亿之后，我们不可避免要遇到这样一个炸弹——古戈尔普勒克斯。在它之后，是一片充满敬畏的沉默。你可能知道，1古戈尔普勒克斯是指1后面跟着1古戈尔个零，而1古戈尔是1后面跟着100个零，所以1古戈尔普勒克斯就是$10^{10^{100}}$。它后面可不只是跟着100个零，而是10 000 000 000

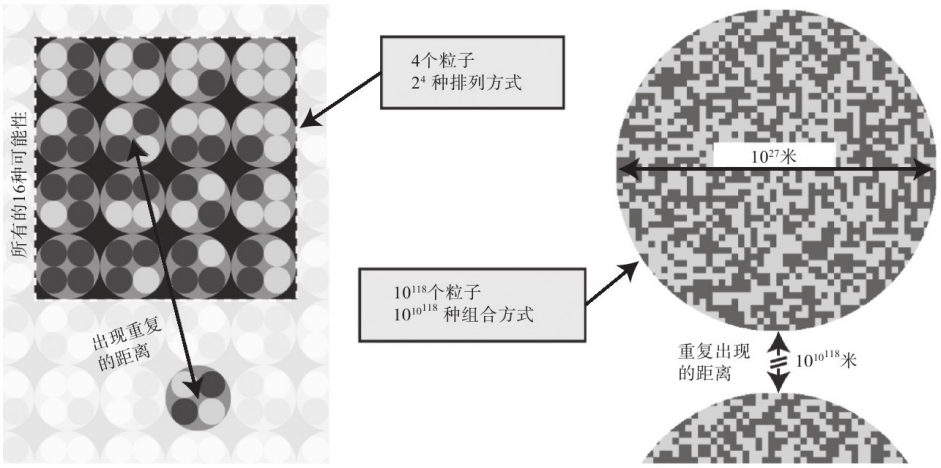


图5-2　在这个玩具宇宙中有4个不同的位置，占据每个位置的粒子有两种可能性，所以一共只有24种组合方式（左上）。这意味着，在这样的宇宙的第一层多重宇宙中，要找到一个相同的平行宇宙，你需要检查16个宇宙。同样，如果我们的宇宙包含10^{118}个粒子，可以组合成$10^{10^{118}}$种不同的排列方式，那么，你需要旅行$10^{10^{118}}$个平行宇宙，才能遇到一个相同的宇宙。

在稍微近一些的地方，大约$10^{10^{91}}$米以外的地方，应该存在一个半径为100光年的球形区域，与以地球为中心的同半径区域完全相同，所以我们在下一个世纪中的所有观念也将与那里的分身完全相同。大约$10^{10^{91}}$米以外的地方，应该存在一个与你一模一样的人。实际上，还有一些分身可能存在于更近的地方，因为最终孕育出你的整个过程在宇宙中处处都在发生，比如行星的形成和进化的历程。仅在我们的宇宙中，就可能存在着10^{20}颗处于宜居带的行星。

第二层多重宇宙，永远无法到达的地方

之前，我曾把暴胀称为“不断给予的礼物”，因为每一次你认为它不会再给出更激进的预测时，它都再一次颠覆你的想法。如果你感到第一层多重宇宙实在太大了，难以接受，那么，试着张开思维的翅膀，想象一下，假如有无穷多个第一层多重宇宙，有一些甚至拥有明

显不同的物理定律，你的脑袋会不会一个变成两个大？然而，安德烈·林德、亚历克斯·维兰金、阿兰·古斯和他们的同事们已经告诉人们，这就是暴胀理论作出的典型预测。我们将它称为第二层多重宇宙。

同一个空间，许多个宇宙

物理学家怎能允许如此疯狂的事情存在？我们在图4-8中看到，暴胀能从有限的体积内创造出无限的体积。正如图5-3所示，我们没有理由认为暴胀不会在几个相邻的体积内发生，只要交界处的暴胀永不结束，就能由此产生出几个相邻的无限区域（也就是第一层多重宇宙）。

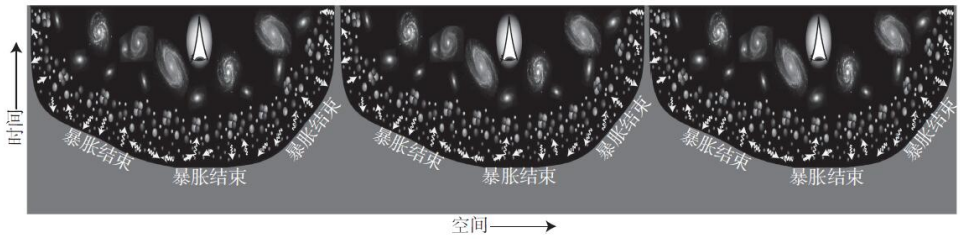


图5-3　我们用图4-8中的机制来表示永恒暴胀，假设暴胀创造出了3个无限的区域，那么，想要在不同区域间穿行是不可能完成的任务，因为暴胀不停地在你和目的地之间创造出新的空间，其速度远大于你穿行其中的速度。

这意味着，如果你居住在其中一个第一层多重宇宙中，你根本不可能去拜访相邻的某一个——暴胀不停地在边界区域创造出空间，速度非常快，你根本不可能穿越过去。

这就好像我和孩子们玩的火箭游戏，我会假装他们坐在火箭的后座上，我带着他们一起前往第一层多重宇宙的边界：

“老爸，我们到了吗？”

“还有一光年。”

“老爸，我们到了吗？”

“还有两光年。”

也就是说，尽管其他第二层平行宇宙与我们处于同一个空间中，但它们与我们的距离无限远，即使我们以光速前进，也永远无法到达它们。与之不同的是，其他第一层平行宇宙从本质上说是可以到达的，你甚至能去往第一层多重宇宙中任意远的地方，只要你有足够的耐心，并且拥有一台宇宙膨胀减速器[17]。

我在图5-3中简化了许多因素，比如忽略了空间正在膨胀。图中，我用垂直的细线将几个U形的第一层多重宇宙分开，而这里正是永恒暴胀的区域，它们膨胀得非常迅速，并且其中有一些地方最终会停止暴胀，孕育出新的U形区域。如果考虑到上述特征，会更加有趣，因为第二层多重宇宙其实更像图5-4中展示的树形结构。

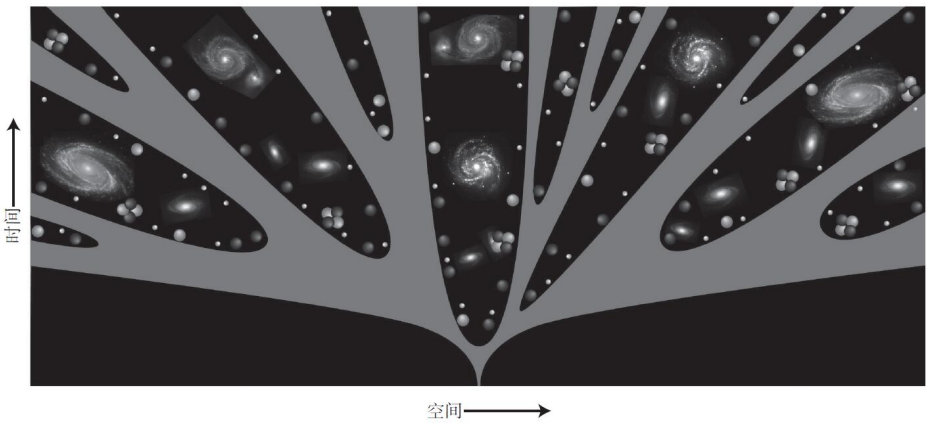


图5-4　空间持续膨胀，暴胀零星终结，使第二层多重宇宙长成了树状结构。在树枝内的时空区域，暴胀会持续下去，而树枝间的U形区域则是暴胀结束的产物，每个U形区域都代表着一个无限的第一层多重宇宙。

任何暴胀的区域都会膨胀得非常迅速，但是暴胀最终将会在其中一些部分终结，形成U形区域，而每一个U形区域都是一个无限的第一层多重宇宙。这个树形结构的树枝会永远生长下去，创造出无数多个这样的U形区域——所有U形区域一起组成了第二层多重宇宙。在每一个U形区域内，暴胀的终结都将把暴胀物质转变为粒子，最终聚集形成原子、恒星和星系。阿兰·古斯喜欢把每一个第一层多重宇宙叫作“口袋宇宙”（pocket universe），因为它可以很方便地塞进这个树形结构的树枝上。

花样繁多！被改变了的定律

在本章前面部分，我曾提到，第二层多重宇宙可以包含许多不同的无限区域，而这些区域内的物理定律也不尽相同，甚至可能有着天壤之别。诚然，这听起来十分古怪，物理定律怎么可能允许不同的物理定律存在呢？关键在于，从定义上来说，物理定律可以分为基本物理定律（fundamental laws of physics）和有效物理定律（effective laws of physics）。基本物理定律无论在何时何地都是一成不变的，但它能衍生出复杂的物理状态；在不同的物理状态中，有自我意识的观察者就会推论出不同的有效物理定律。

> 如果你是一条鱼，一辈子都生活在大海里，那么你可能会错误地认为，水并不是一种物质，只是空旷的空间。人类眼中那些水所拥有的性质，比如，游泳时受到的摩擦力，都被你这条鱼误认为是基本物理定律。例如，你会认为：“一条匀速运动的鱼如果不扇动鱼鳍，就会停下来，变成静止状态。”你可能根本不知道水有3种不同的状态——固相、液相和气相。你也可能不知道，你所谓的“空旷的空间”实际上只是液相——这是描述水的方程的一个特殊解。

这个例子可能听起来很傻，如果一条鱼真的这么想，我们也许会忍不住嘲笑它。但是，我们人类所认定的空荡荡的空间有没有可能也

是某种奇妙的介质呢？如果真是这样，我们也应该遭到嘲笑！实际上，越来越多的证据表明，这确实是事实。不止“空旷的空间”是某种介质，这种介质似乎还拥有许许多多种状态，比水的3种状态多多了，可能约有10^{500}种，甚至可能有无数种。这就开启了一种可能性：除了弯曲、拉伸和振动，我们的空间还可能存在与水的冻结和蒸发类似的性质！

物理学家是怎样得出这个结论的呢？如果一条鱼足够聪明，它就能通过实验证明自己的“空间”只不过是一些遵循着数学公式的水分子。再对这些公式进行研究，它就能如图5-5中画的那样，得出这些公式的3个解，分别对应着三相，也就是固态的冰、液态的水和气态的水蒸气，即使它可能一辈子都没有见过冰山和喷着水蒸气的海底火山口。同样，我们物理学家也正在寻找着那些能够描述我们的空间及其内容物的公式。我们还没有找到最终的答案，但是我们目前所得到的近似解和水有许多相似之处——它有不止一个解（也就是相），可以描述均匀的空间。在最终答案的候选者中，弦理论是最有可能拔得头筹的那个，人们发现它存在至少10^{500}个解。而对其他候选者（比如圈量子引力论）来说，目前也没有迹象表明它们只存在唯一的解。物理学家喜欢把一个理论可能存在的所有解的集合称作这个理论的“图景”（landscape）[18]。不同的解所具有的不同性质组成了各自的有效物理定律，但它们都是相同的基本物理定律容许范围内的不同可能性。

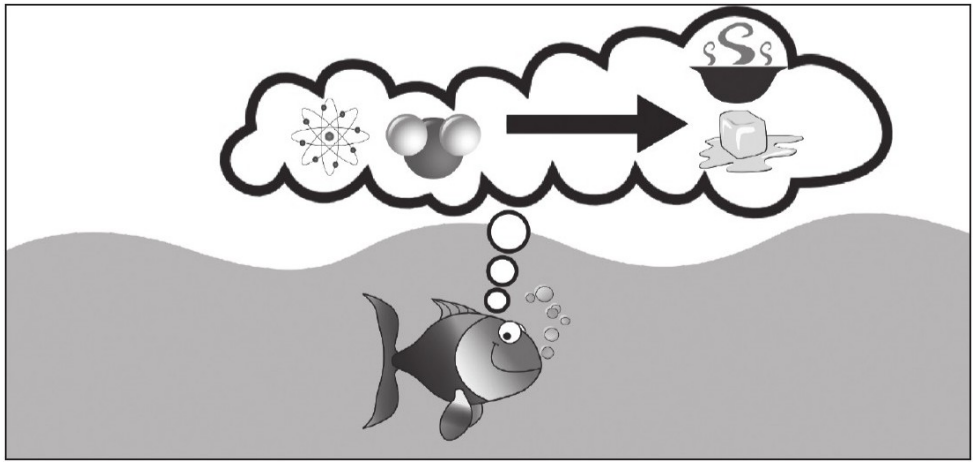


图5-5　空间可能冻结吗？一条鱼可能会把周围的水看作空旷的空间，因为这是它知道的唯一介质。但是，如果有一条聪明的鱼发现了水分子所遵循的物理定律，它就会意识到水分子有3种不同的解，也就是“相”，包括它所知道的液态水以及它永远看不见的冰和水蒸气。同样，我们所认为的空旷空间也可能是一种介质，它可能拥有超过10^{500}种状态，而我们只经历着其中一种。

这和暴胀有什么关系呢？令人惊讶的是，永恒暴胀有能力创造出任何一种可能存在的空间类型！它将整个图景变为了现实。事实上，对空间的每一种相，暴胀都能创造出无数多个第一层多重宇宙，每一个的内部都充满了这种相。这意味着，我们这些观察者很容易被愚弄，也很容易得到和鱼儿一样错误的结论：由于我们观察到我们的宇宙空间中处处拥有相同的性质，所以我们很容易错误地认为其他地方的空间也同样如此，认为它们与我们的空间一样，拥有同样的性质。

暴胀是如何做到这一点的呢？要让空间发生相变，需要大量能量，而我们日常观察到的种种过程都不具备这样的能量，所以无法完成这种改变。但是，回溯到暴胀的时代，每个微小的空间内都蕴藏着巨大的能量，足以使得前文提到过的量子涨落在微小的区域内触发偶然的相变，这个小区域随后暴胀为一个硕大无朋的区域，其内部处处拥有相同的相。此外，一个区域要停止暴胀，必须要处于特定的相，

才能够保证两种相之间的边界区域处于永恒暴胀的状态。所以，每种相都各自把一个第一层多重宇宙塞得满满当当。

那么，这些异相的空间看起来什么样呢？

想象一下，假如你以前从来没有听说过汽车，也完全不知道汽车的工作原理，可是你生日那天却收到了一辆汽车作为礼物，车钥匙就插在点火装置上。你十分好奇，钻进车里，东摸西搞，把各种按钮、旋钮、控制杆都试了一遍。最后，你终于发现了正确的使用方法，并学会了开车，开得还相当不错。但是，假设有人在你拿到车之前，神不知鬼不觉地把变速杆旁表示倒车挡的字母“R”擦掉了，并对变速器动了手脚，导致你必须使出全身力气才能把变速杆换到倒车挡。这意味着，除非有人告诉你真相，那么你可能永远也不知道车还能倒着开。如果有人向你请教如何开车，无一例外，你会错误地向他断言，只要发动机尚在运行，那么，油门踩得越狠，向前的车速就越快。同样，如果此时在另一个平行宇宙中，同一辆车被改装后，需要巨大的力量才能向前进而不是向后退，那另一个你可能会总结道：“这台奇怪的机器只能倒着开。”

我们的宇宙和这辆车有异曲同工之妙，它有一堆控制用的“旋钮”（见图5-6）。这些旋钮正是规定物体随外力如何运动的定律——就是我们在学校里所学的物理定律，包括所谓的自然常数。每设定一次旋钮的位置，都相当于设定了空间的一种相，所以，假如一共有500个旋钮，每个旋钮有10个可选的档位，那么，空间就总共有10^{500}种不同的相。

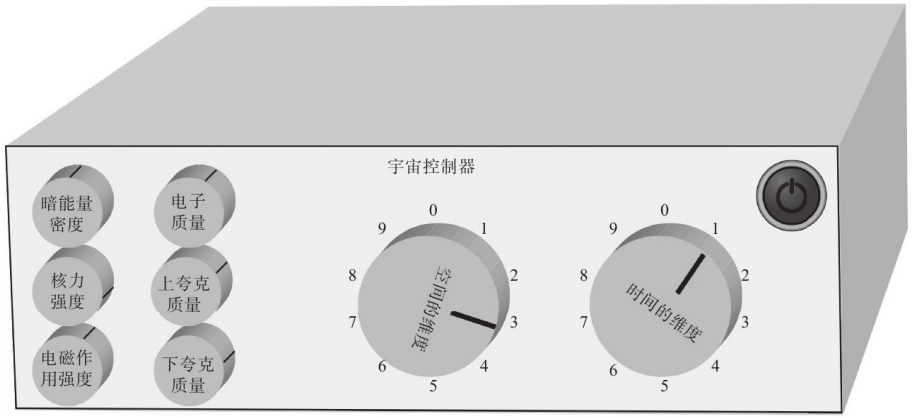


图5-6　在第二层多重宇宙的不同区域，时间和空间的内在结构也像是装有控制旋钮，可以拨动到不同的档位，分别代表着不同的设定。在第9章我们将看到，我们的宇宙似乎装有32个可以连续无级变档的旋钮，另外还有一些有级变档的旋钮，控制着粒子的类型。

当我还在上高中时，老师告诉我们，这些定律和常数都是放诸四海而皆准的，永远不会随地点和时间而改变。这显然是错误的。可是，他错在哪里呢？原来，要拧动这些控制宇宙的旋钮，改变它们的档位，就像扳动那辆汽车里的变速杆一样，需要巨大的能量——比我们目前所能支配的能量大多了，所以，我们根本不知道这些设定竟然可以改变，甚至连这些设定的存在都不知道。但是，与汽车变速杆不同，大自然的“旋钮”隐藏得非常好。这些“旋钮”以所谓的“高质量场”（high-mass fields）等晦涩不清的形式存在，不仅改变它们需要巨大的能量，甚至连探测到它们的存在也需要相当大的能量。

那么，物理学家们是如何发现这些旋钮的存在，以及它们竟然可以在巨大的能量作用下，改变宇宙运行规律的呢？用同样的方法，你也能发现你的车竟然还能倒着开，只要你拥有足够的好奇心。这种方法就是，认真研究各个零件的工作原理！比如，仔细钻研一下变速箱。同样，对自然界最小的基本构件进行仔细研究后，人们发现，只要加诸足够的能量，它们就会重新排列，改变宇宙的运行规律，我们将在下一章对这些基本构件进行探索。永恒暴胀可能早已向量子涨落提供了足够的能量，并在不同的第一层多重宇宙中触发了这种重新排列。这就好像一只身强力壮的大猩猩闯进一个停满了车的停车场，大肆地随意破坏车里的按钮和变速杆。等它搞完破坏，一定有一部分车处在倒挡上。

总而言之，**第二层多重宇宙从根本上改变了我们对物理定律的传统观念。许多曾被认定为放诸四海而皆准、不随时间和空间而变化**

的基本定律，到头来原来都只是有效物理定律，就像只对本地人有约束力的地方法规一样，每个地方的旋钮设定都可能不一样，从而形成不同的相。表5-2总结了这些观念及其与平行宇宙的关系。这延续了一个古老的趋势——曾几何时，哥白尼认为行星轨道成完美的圆形是基本物理定律，而现在，我们知道非正圆形的轨道更加普遍。行星轨道偏离正圆形的程度（天文学家称之为“离心率”）就好似一个可控的旋钮，但是，一旦太阳系已经形成，这个旋钮的相位就很难改变，即使可变，变的速度也很慢。第二层多重宇宙把这种概念上升到了一个新高度，将许许多多基本物理定律都降级为了有效物理定律。我们接下来将继续探索这一点。

表5-2　本书中与多重宇宙相关的术语和解释

关键术语	术语解释
物理实在	一切存在的事物。第 11 章中将证明，它等价于第四层多重宇宙。
空间	物理实在中，与我们能观察到的一切事物连续相连的部分。加上永恒暴胀，就等同于第二层多重宇宙
我们的宇宙	物理实在中，本质上能被我们观察到的部分；撇开量子效应的复杂性，它就是一个球形的空间区域，球面上发出的光线经历了大爆炸以来的 140 亿年时间，正好能够到达我们
平行宇宙	物理实在中，处在除我们以外的某个地方观察，本质上能观察到的部分。平行宇宙并不是一个理论，而是某些特定理论作出的预测。
多重宇宙	平行宇宙的集合
第一层多重宇宙	在空间中，尽管目前不可观测、但并非永远不可观测的遥远区域的集合；它们拥有相同的有效物理定律，但拥有不同的宇宙历史
第二层多重宇宙	在空间中，永远不可观测的遥远区域。之所以不可观测是因为它们之间的空间保持着暴胀的状态；第二层平行宇宙之间遵守着相同的基本物理定律，但它们的有效物理定律可能不同
第三层多重宇宙	量子希尔伯特空间（见第 7 章）中的不同部分；与第二层多重宇宙拥有相同的多样性
第四层多重宇宙	所有的数学结构（见第 11 章），它们每一个都拥有着不同的基本物理定律
基本定律	支配物理现象的数学方程式
有效定律	描述物理现象的数学方程式的特解；如果整个宇宙内部的有效定律处处都相同，很容易被误认为是基本物理定律
微调性	有效物理定律中的常数，它们允许生命存在的范围极其狭窄；已观测到的微调性可以作为第二层多重宇宙的证据，但尚有争议

微调性是第二层多重宇宙的证据

那么，第二层多重宇宙究竟是否存在呢？此前我们已经看到，永恒暴胀的证据（已经有很多了）正是第二层多重宇宙的证据，因为后者是前者的预测。我们也看到，如果一些自然规律或常数本质上是可以随地点而变化的，永恒暴胀就会让它们在第二层多重宇宙中全部实现。那么，有没有更多直接的证据来证明第二层多重宇宙的存在，而不用如此依赖理论推测呢？

在这一节中，我将论证这个观点，即我们的宇宙似乎经过了某种精细微调，以适应生命的出现。从根本上说，我们发现，前面提过的那些旋钮似乎被调到了非常特殊的数值，如果有人哪怕极其轻微地改变了这些数值，我们所知的一切生命形态都不可能出现。比如，如果旋动暗能量的旋钮，星系将不可能形成；再旋动另一个旋钮，原子就会变得不稳定，诸如此类。这就好像，如果我没有经过飞行训练就去开飞机，面对驾驶舱里琳琅满目的旋钮，我肯定立刻吓趴下了。但是，如果我有能力随意拧动我们宇宙的旋钮，毫无疑问，我能活下来的概率肯定更低。

据我观察，人们对已观测到的微调性有三种反应：

- 偶然说。有人认为，这只是一种偶然的巧合，别无长物。
- 设计说。有人认为这是一个证据，说明我们的宇宙是由某种实体（也许是一个神，或者一个高级的宇宙模拟生命形态）设计出来的，它谨慎小心、一丝不苟地把那些旋钮微调到了允许生命存在的数值。
- 多重宇宙说。有人认为这是第二层多重宇宙存在的证据。因为，如果旋钮的每个档位都可能出现于某处，那么，自然地，我们当然会发现自己处在一个最适宜的区域。

接下来，我们将探讨“偶然说”和“多重宇宙说”，在第11章探索“设计说”。不过首先，让我们先来看看到底有哪些微调证据，给我们带来了这么多麻烦。

微调暗能量，让宇宙正常运转

我们在第3章中已经看到，我们的宇宙史就是一场万有引力的拔河比赛，对战双方是暗物质和暗能量，前者千方百计想把物质聚集在一起，而后者则处心积虑地将物质分离开。由于星系形成需要将物质拉拢在一起，所以我把暗物质看作我们的朋友，而把暗能量看作我们的

敌人。曾经，暗物质在宇宙中占大多数，它那友善的万有引力帮助星系聚集成型，比如我们的银河系。然而，随着宇宙膨胀，暗物质被逐渐稀释，但暗能量却没有被稀释。暗能量无情的万有“斥力”最终占了上风，遏制了更多的星系形成。

这意味着，如果暗能量的密度极其庞大，它就会赶在第一个星系形成之前迅速占据上风。这样一来，宇宙就会胎死腹中，永远陷入黑暗的深渊，没有一丝生命的火种，只有近乎均匀的气体。反过来说，如果暗能量密度减少到负值（爱因斯坦的理论允许这样的情况存在），那么我们的宇宙就会停止膨胀，生命还来不及进化，宇宙就会坍缩为灾难性的“大挤压”。简而言之，如果你真的找到了旋动“暗能量旋钮”（见图5-6）以改变暗能量密度的方法，拜托你，两个方向都不要调得太多，因为这对生命来说是一件糟糕的事——这就像按下了关机键。

那么，暗能量这个旋钮最多能拧到多少，才不至于让万物轰然倒塌呢？目前旋钮的设定相当于我们实际测量暗能量密度的结果，即每立方米大约包含10^{-27}千克。这个数字与整个可调范围相比，简直相当于零——暗能量密度旋钮的最大值是每立方米10^{97}千克，那时量子涨落用微型黑洞布满了空间；而最小值的绝对值与前者相同，只是前面加了一个负号，即每立方米-10^{97}千克。如果图5-6中的暗能量旋钮旋转一整圈就能让暗能量密度在整个可调范围内最大限度地变化，那么，在我们的宇宙中，该旋钮的实际位置偏离中点刻度的比例仅为10^{-123}。这意味着，如果你从零点开始微调旋钮，想把它旋转到允许星系形成的位置，那你必须小心翼翼地拧动一个极其微小的角度。小到什么程度呢？小到小数点后120多位！尽管这听起来像是不可能完成的任务，但某些机制却似乎完美地做到了这一点，将参数调整得非常精确，好让我们的宇宙能正常运转。

微调粒子，建立稳定的原子世界

在下一章中，我们将探索基本粒子的微观世界，那里也有许多旋钮，决定着粒子的质量和相互作用力的大小。如今，科学界越来越清晰地意识到，这些旋钮仿佛也经过了精确的微调。

比如，如果电磁力略微降低4%，太阳就会立刻爆炸，氢会立刻聚变为所谓的双质子（diprotons，双质子是一种不含中子的氦，在其他情况下是不可能存在的）。而如果将电磁力稍微升高一点点，之前稳定的原子（譬如碳和氧）就会产生放射性，并很快发生衰变。

如果弱相互作用力略微降低一点点，我们周围就不会出现氢，因为它们都将在大爆炸后不久就全转变为氦了。如果弱相互作用力过高或者过低，超新星爆炸释放出的中微子就无法吹走恒星外层，那生命进化所必需的重元素（比如铁元素）就难以被回馈到宇宙空间，最终也没法落在地球这样的行星上，更别说孕育出生命了。

如果电子比现在轻很多，那就不可能存在稳定的恒星。如果电子重很多，就不可能存在晶体和DNA分子之类的有序结构。如果质子重0.2%，它们就会衰变为中子，无法捕获电子，所以原子也将不复存在。如果质子轻很多，原子内部的中子就会衰变成质子，那么除了氢之外，宇宙中不可能存在其他稳定的原子了。实际上，控制质子质量的那个旋钮拥有非常宽广的可调范围，却必须被调到小数点后33位的精确度，宇宙中才可能形成氢原子以外的稳定原子。

充满探险之旅的微调宇宙学

大部分微调的例子都发现于20世纪七八十年代，发现者是保罗·戴维斯（Paul Davies）、布兰登·卡特（Brandon Carter）、伯纳德·卡尔（Bernard Carr）、马丁·里斯（Martin Rees）、约翰·巴罗

（John Barrow）、弗兰克·蒂普勒（Frank Tipler）、史蒂文·温伯格等物理学家。近年来也正涌现出越来越多的例子。我进入该领域的第一次探险就是同马丁·里斯一道。他是一位极具英伦风格的白发天文学家，很有魅力，也是被我视为英雄的科学家之一。我从来没见过有人演讲时像他那样欢欣鼓舞，他的眼睛仿佛总是放射出热情的光芒。他也是第一位鼓励我遵从自己的内心、追寻非主流话题的科学权威。我们在上一章里看到，宇宙种子起伏的幅度大约为0.002%。马丁和我经过计算得出，如果这个数值小很多，星系就不会形成；如果它大很多，则会发生频繁的小行星撞击等艰难之事。

我正是在讲这个主题时，台下的阿兰·古斯进入了梦乡。而那场演讲的主持人亚历克斯·维兰金则一直醒着，后来，我们组成了一个研究团队，开始研究中微子——这是一种由大爆炸创造出来的鬼魅般的粒子，数量很丰富。同样，我们发现它们也仿佛经过了细致的微调，如果它们重很多，就会阻挠星系的形成。我在MIT的同事弗兰克·韦尔切克（Frank Wilczek）冒出了一个想法，关于暗物质的密度在平行宇宙之间是如何变化的。他和我、马丁·里斯、安东尼·阿吉雷（Anthony Aguirre）一起进行了计算之后发现，如果把暗物质的旋钮拧动到远离观测值的地方，我们的健康也将受到损害。

一个无法解释的巧合

那么，我们应当如何看待微调性呢？首先，让我们来看一下，为什么我们不能对它置之不理，只把它看作一堆偶然的巧合。这是因为科学方法不能容忍无法解释的巧合存在，比如，“我的理论需要一个无法解释的巧合才能符合观测结果”等同于“我的理论被排除了”。例如，我们已经看到，暴胀理论预测出空间是平坦的、宇宙微波背景中斑点的平均尺度约为1度，这些预测都得到了第3章所提到的那些实验的证明。假设普朗克卫星团队观测到的平均斑点尺度竟比这个预测

值小很多，促使他们不得不宣布以99.999%的置信度排除了暴胀理论。如果出现这种情况，暴胀依然有可能成立，因为它所预测的平坦宇宙中的随机涨落依然有可能生成与测量值一样小得异乎寻常的斑点，从而哄骗他们得出暴胀不存在的错误结论。然而，有99.999%的可能性，这种事并不会发生。换句话说，在这种情况下，暴胀理论需要十万分之一的巧合才能符合观测结果。如果阿兰·古斯和安德烈·林德现在联合举行一场新闻发布会，坚称没有任何证据证明暴胀不存在，因为他们的直觉认为普朗克卫星的测量结果只是一个偶然的巧合，应该被排除掉，那他们俩就违背了科学方法。

也就是说，随机涨落意味着我们在科学中永远不能100%确定某一件事——永远存在一个微小的可能性，会让你不幸遭遇随机的测量噪声，诸如探测器故障，甚至有可能整个实验都只是一场幻觉。不过，在实际操作中，如果一个理论以99.999%的置信度被排除掉了，就相当于已被科学界判了死刑。与之类似，那种认为暗能量的微调性只是一个偶然的理论，同样需要一个无法解释的巧合，而这个巧合被排除掉的置信度为99.999 999……%，小数点后大约有120个9。

那个A打头的单词——人择原理

那么，第二层多重宇宙如何解释微调性呢？有一个理论认为，自然界的旋钮刻度上的任意一个数值，本质上都有可能出现在某处，那么这种理论将预测到，我们这种宜居宇宙会出现的可能性是100%。由于我们只能生活在一个宜居的宇宙中，所以无须惊讶我们正好栖身于这样一个宇宙中。

虽然这个解释符合逻辑，却引来了众多争议。在地心说这种认为地球很特殊的观点被证明为愚蠢之见之后，它的对立面根深蒂固地植入了人们的大脑。这个与地心说对立的观点就是哥白尼原理，该原理

认为我们在时间和空间中所处的位置都毫无特别之处。布兰登·卡特对哥白尼原理提出了异议，他把自己的观点称为“弱人择原理”（weak anthropic principle）。他说：“我们必须考虑到一个事实，那就是，我们在宇宙中的位置必然是特殊的，至少特殊到允许我们这些观察者存在。”我的一些同行认为，这种观点是一种倒退，让人联想到地心说。但是，当我们把微调性纳入考量时，第二层多重宇宙的图景确实与哥白尼原理相悖，如图5-7所示，绝大多数宇宙都是一片死寂，我们的宇宙却与众不同——它包含的暗能量比其他大多数宇宙少很多，与此同时，其他“旋钮”的设定也迥然不同。



图5-7　如果各个宇宙的暗能量密度（这里由颜色深度来代表）不同，那么，只有在那些密度最低的宇宙中，才可能出现星系、恒星和生命。在这张图中，颜色最浅的宇宙约占总数的20%，但真实的比例大约为10^{-120}。

引入无法观测的平行宇宙来解释观测现象，惹恼了我的一些同行。我还记得1998年费米实验室的那场演讲，那里位于芝加哥郊外，拥有一台著名的粒子加速器。当一位演讲者谈到那个以“A”打头的单词——“anthropic”（人择）时，观众席上爆发出一阵嘘声。后来，为了躲避人们灵敏的嗅觉，也为了通过审稿，马丁·里斯和我一起写第一篇人择原理论文时，发明了我们自己的方法：在摘要中避免使用这个“A”打头的单词……

从个人的角度来说，我对卡特提出的人择原理仅存一点异议：它不应该只是一个原理。因为“原理”二字意味着它是可选择的，也就是说还可能存在其他选项。但事实并非如此。用正确的逻辑来对待一个符合观测的理论，这是必须的，而不是一个可选择的选项。如果大部分空间都不宜居，我们当然会出现在一个特别宜居的地方。实际上，别提其他宇宙了，只消看看我们自己的宇宙，你便会发现，大部分空间也都是相当不宜居的——如果你出生在空旷无垠的星系间空洞，或者一颗恒星内部，那只能祝你好运了！再比如，在我们的宇宙中，只有一千分之一的万亿分之一的万亿分之一的万亿分之一的空间位于一颗行星表面1公里的范围内，所以，这真的是一个非常特别的地方。这就是我们栖身的地方，一点也不用惊讶。

再举个更有趣的例子吧。比如，用M来代表太阳的质量，M影响着太阳的光度。运用基本物理定律，我们就能计算出允许我们所知的地球生命形态存在的M值区间。这个区间非常狭窄，大约在1.6×10^{30}～2.4×10^{30}千克之间。否则，地球的气候就会变化，要么比火星还要冷寂，要么比金星还要炎热。那M值究竟为多少呢？M的测量值大约为2.0×10^{30}千克。根据计算可知，恒星的质量范围很广，约为10^{29}～10^{32}千克，而太阳的质量为何如此巧合，正好位于允许生命存在的小范围内，就像被微调过一样呢？这个巧合无法解释，看起来让人有些不安。然而，我们却可以这样来解释这个巧合：宇宙中有许许多多恒星系，它们各自有着不同的“旋钮设定”，比如不同的母星尺度和恒星轨道。很明显，我们栖身的地方必然是一个宜居的恒星系。

这个例子的有趣之处在于，**我们可以用太阳系的微调性来预言其他不同恒星系的存在，即使它们还未被我们发现。用同样的逻辑，我们也可以用我们宇宙的微调性来预言其他不同宇宙的存在。唯一的区别在于，其他恒星系可以被我们观测到，其他宇宙却永远无法**

被我们观测到。但这点区别并不能弱化前面所说的论证过程，因为它与逻辑推理无关。

我们究竟希望预测什么

我们物理学家很喜欢测量数字，比如下面这些参数的测量值：

- 地球的质量：5.9742×10^{24}千克。
- 电子的质量：9.10938188×10^{-31}千克。
- 地球绕着太阳旋转的轨道半径：$149597870\ 691\times10^{24}$米。
- 电子绕着氢原子旋转的轨道半径：$5.291\ 772\ 11\times10^{-11}$米。

除此之外，物理学家还喜欢尝试从基本原理来预测这些数字。那么，我们成功过吗，或者这只是一厢情愿？约翰尼斯·开普勒在作出“行星轨道是椭圆形的”这个著名发现之前，曾经提出过一个优雅的理论，与上面所列的第3个数字有关。他提出，水星、金星、地球、火星、木星和土星的轨道就好像位于6个球体中，这6个球体像俄罗斯套娃一般嵌套在一起，每层间分别插入了一个八面体、一个二十面体、一个十二面体、一个四面体和一个立方体（见第6章图6-2）。且不说这个理论很快就被更精确的观测所排除了，它的整个前提看起来都很愚蠢，因为现在我们知道，宇宙中还存在有其他恒星系，我们测出的太阳系行星轨道数据根本无法带来任何关于宇宙本质的信息，只能告诉我们在宇宙中的位置。具体到这个案例中，也就是我们居住在哪个特别的恒星系中。从这个意义上说，我们可以把这些数字看作我们在空间中的地址的一部分，或者我们在宇宙中的邮政编码的一部分。

> 比如，一个外星人邮递员要向地球递送包裹，我们如何向他解释太阳系在银河系中的位置呢？我们可以告诉他，你应该去一个有着8颗行星的恒星系，在这个恒星系中，8颗行星距离母星的距离分别等于最里面那颗行星轨道半径的1.84倍、2.51倍、4.33倍、12.7倍、24.7倍、51.1倍和

76.5倍。这样一来，他可能就会恍然大悟地说：“噢！我知道你说的是哪个恒星系了！”

我们早就放弃通过宇宙基本原理来预测地球的质量或半径了，因为我们知道宇宙中还存在着许多尺度不同的行星。那电子的质量和轨道半径呢？找遍宇宙，你会发现，宇宙中所有电子的质量和轨道半径都完全相同，所以，我们仿佛重拾了找到宇宙本质的希望——这几个数字有可能就是我们这个物理世界的基本性质，终有一天能根据开普勒轨道模型的精神，纯粹用理论计算出来。实际上，早在1997年，著名弦理论学家爱德华·威滕就告诉我，他相信总有一天，弦理论能预言出电子比质子轻的倍数。然而，我最近一次见他是在安德烈·林德的60岁生日派对上，他酒后向我吐露真言，说他已经放弃了预言任何一个自然常数。

为何威滕如此悲观？因为历史总是惊人地相似。第二层多重宇宙之于电子质量，正如其他行星之于地球质量——让电子质量从“宇宙的基本性质”降格为了仅仅只是宇宙地址的一部分。对所有在第二层多重宇宙中变化的数字来说，测量它数值的唯一作用，就是缩小我们碰巧所栖身宇宙的可选择范畴。

我们目前已经发现了32个构建在我们宇宙内部的独立参数，我们希望能尽可能精确地测量它们的值，小数点位数越多越好（见第9章）。它们是否会在第二层多重宇宙中发生变化呢？或者，它们中的其中一些是否能从基本原理中（或从其他更少的数字中）计算出来呢？我们依然缺少一个能成功回答这个问题的基本物理理论，因此，在这个理论显露真容之前，去研究那些测量值以寻求一些线索，是非常有趣的事情。如果我们随机选择一个宇宙，那些在多重宇宙间发生变化的数字也会显得十分随机。那么，我们测量到的这些数值看起来随机吗？你可以看一看图5-8，自己判断一番。图中，我标出了9种基本粒子的质量，这9种粒子在粒子物理学中被称为费米子（fermion

s）。不用在意我使用的奇怪刻度，这种刻度从左往右每隔几厘米尺度就增大10倍。反正在我看来，它们像9个随意扔出去的飞镖。实际上，这9个数字通过了统计学家对随机性的严苛测试，插上了胜利的旗帜。它们符合从统计学家所谓的均匀分布中随机抽取的样本，斜率小于10%。

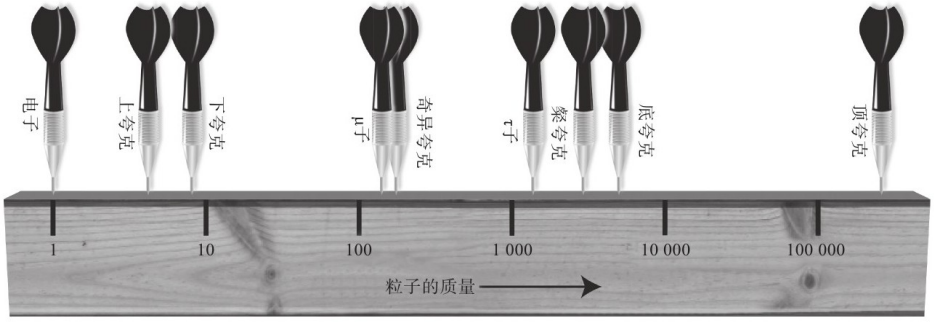


图5-8　我们设法测量了9个被称为费米子的粒子的质量，发现它们的质量分布似乎十分随机，和某些多重宇宙模型所预测的结果一样，这表明它们永远无法从某些基本原理中计算出来。图中的“尺子”刻度表示每个粒子比电子重多少倍。

并非如堕烟海

如果我们居住在一个随机的宜居宇宙中，这些数字应该看起来也很随机，但总的来说，它们应该满足与宜居性有关的概率分布。将这些数字在多重宇宙中的变化情况与星系形成等物理过程结合起来，我们就能对可能观测到的现象作出统计学预测。目前看来，这些预测与暗能量、暗物质和中微子（见图5-9）的数据十分吻合。实际上，史蒂文·温伯格对暗能量密度所作出的第一个非零预测，就是这样作出来的。

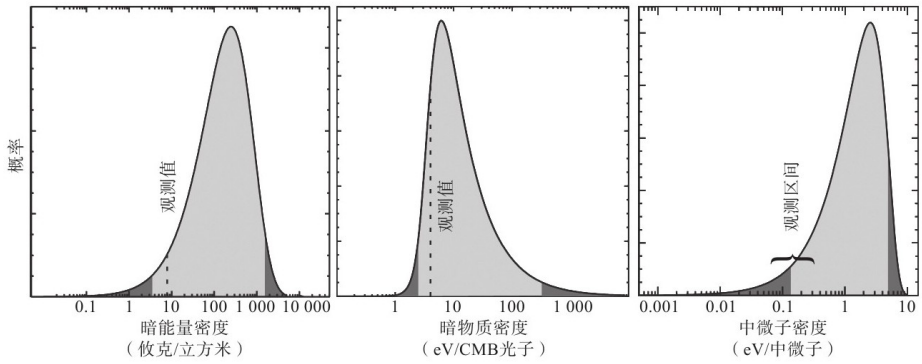


图5-9　如果暗能量、暗物质和中微子（背景辐射中的三种中微子中的一种）的密度在第二层多重宇宙之中会发生巨大的变化，那么，大多数宇宙中都不会出现星系，也没有生命。这样，一个随机的观察者所预计的观测值只会出现在本图所示的概率分布中一段非常狭窄的范围内。对我们来说，预计的测量值应当落在中部那片概率为90%的灰色区域内。事实证明，确实如此。

我非常喜欢详细研究我们“宇宙控制器”上的已知“旋钮”，暗自揣摩假如它们被设定在不同的数值上，将会发生什么事。比如，请不要随便拧动图5-6中代表空间与时间维度的两个旋钮，因为这将带来致命的影响。如果你增加时间维度的数量，让它超过3，就不可能存在稳定的恒星系，甚至连稳定的原子都将不复存在。比如，在一个四维空间内，牛顿的万有引力方程将发生改变——万有引力将不再与距离的平方成反比，而是与距离的立方成反比，这样一来，就再也不可能存在任何稳定的轨道。我对自己的这个发现感到十分兴奋，但没过多久，我就意识到我只是打破了自己的认知藩篱而已，因为奥地利物理学家保罗·埃伦费斯特（Paul Ehrenfest）早在1917年就发现了这一点……如果把空间的维度降到3以下，太阳系就不可能出现，因为万有引力将不再是“引力”。这样的空间过于简单，无法孕育出像我们这样的观察者，原因有很多，比如，两个神经元无法交叠。不过，改变时间的维度却并没有你想的那么诡异，爱因斯坦的广义相对论就能很好地处理这一点。

然而，我曾经写过一篇论文，文中探讨了改变时间的维度将抹去物理学中与预测息息相关的数学性质，这样一来，进化出大脑也就失去了意义。正如图5-10所示，唯一可行的方案就是3个空间维度加1个时间维度。换句话说，假如有一个无限聪明的婴儿，那么，即使它不进行任何观测，也能从基本原理中推演出两个事实：第一个事实是，第二层多重宇宙中包含着不同时空维度组合的宇宙；第二个事实是，在所有的维度组合中，只有时空维度为3+1的宇宙才可能存在生命。套用笛卡儿的话，这个婴儿可能会在第一次睁眼看世界之前，就顿悟到：“我思，故空间是三维的，时间是一维的。”

整个第二层多重宇宙都存在于同一个空间范围内，那么时空的维度为什么会变化呢？原来，根据最流行的弦理论模型，只有表观的维度才会发生变化，真正的空间永远拥有9个维度，但是我们却无法察觉到其中的6个维度，因为它们蜷缩在非常微观的尺度内，就像图1-7中所示的圆柱形。如果你沿着这6个隐藏维度中的任意一个维度前进一段极其微小的距离，你会发现你又回到了出发点。根据推测，所有的9个维度一开始都是蜷缩起来的，但是在我们这部分空间内，暴胀将其中3个维度从蜷缩状态伸展开，并拉伸到极其大的尺度，而剩下的6个维度依然蜷缩在微不足道的尺度内，不为人所见。在第二层多重宇宙中的其他地方，暴胀展开的空间维度可能不尽相同，从而创造出从零维到九维的众多世界。

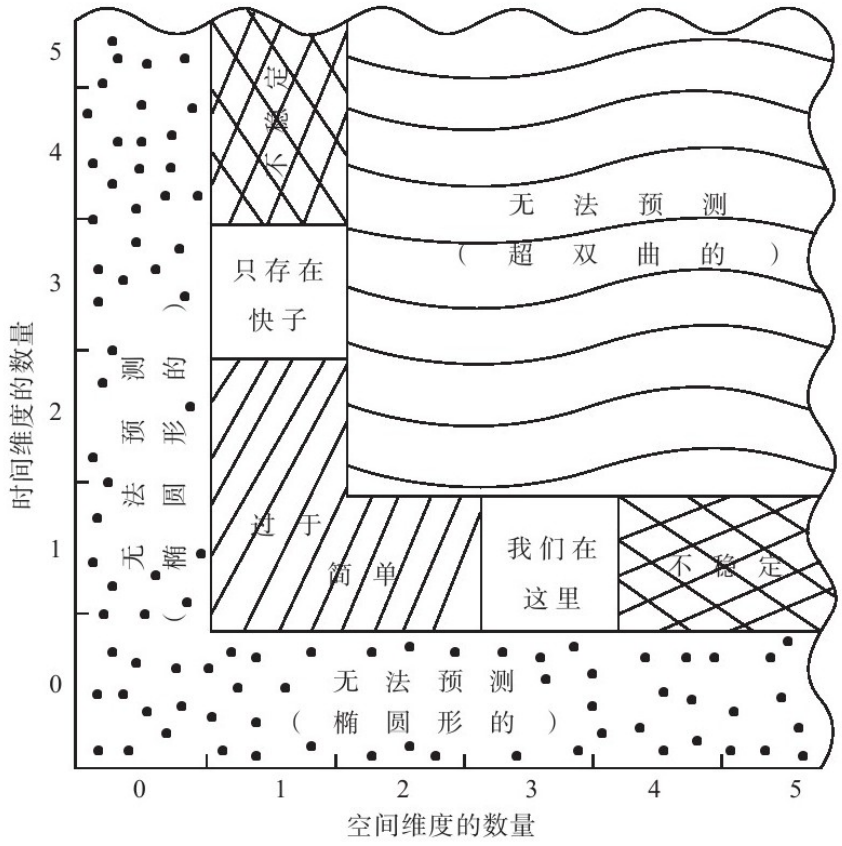


图5-10　如果空间维度超过3，就不可能存在稳定的原子和恒星系；如果空间准度小于3，就不会有万有引力；如果时间维度大于或小于1，物理学就失去了预测的能力，就算进化出大脑也毫无意义。在第二层多重宇宙中，第二层平行宇宙之间的时空维度可能各不相同，但我们一定会发现自己存在于一个有着三维空间和一维时间的宇宙中，因为其他维度的宇宙很可能不适宜生命生存。

数学家们已经确定了许多种能使多余维度蜷缩起来并充满能量的不同方式（比如，广义磁场能在隐藏维度内形成回路）。在弦理论中，这些方式就相当于我们前面所讨论过的可变旋钮。这些方式不仅对应着表观维度中不同的物理常数，还对应着不同的规则，规定可能存在哪些基本粒子，以及哪些有效方程可以描述它们。所以，很可能存在一些第二层平行宇宙，其中存在10种夸克，而不是像我们一样的6种。

简而言之，这意味着，虽然物理学（这里主要指弦理论）的基本方程在整个第二层多重宇宙中都是有效的，但位于不同第一层多重宇宙中的观察者却会发现，彼此的表观物理定律各不相同。换句话说，这些表观定律是“放诸四海而皆准”的，但这个“四海”仅指第一层多重宇宙，而不是指整个第二层多重宇宙。这些表观定律的有效性只到第一层多重宇宙，无法“皆准”到第二层多重宇宙。然而，基本方程的效力却可以覆盖第二层多重宇宙，它们会巍然不动、保持不变，直到我们踏上第四层多重宇宙的疆域（见第11章）……

种子已经埋下，所有故事必然自行徐徐展开

本章中，我们已经探讨了许多听起来十分疯狂的想法，那么现在让我们来做个小结，往回一步，看看全局吧！我把暴胀看作一个永不停息的过程，不管是暴胀本身，还是暴胀理论对宇宙的解释，都生生不息、永不停止。正如细胞分裂并不会在形成一个婴儿之后就停止一样，暴胀也不会仅形成一个宇宙就偃旗息鼓，而是会生成数量庞大的平行宇宙，可能穷尽所有物理常数的所有可能值。这还可以解释另外一个谜，那就是，我们的宇宙仿佛为生命的出现而进行了精细的微调。尽管绝大多数平行宇宙都是一片荒芜和死寂，没有生命存在，但依然有一些宇宙的条件正好适合孕育生命，那么，如果我们发现自己正处在这样宜居的宇宙中，就无须惊讶了。

我的同事埃迪·法里（Eddie Farhi）喜欢把阿兰·古斯称为“赋能者”（The Enabler），因为他提出的永恒暴胀让所有可能发生的事都必然会发生，暴胀为它们的发生创造了空间，并埋下初始条件的种子，让所有故事自行徐徐展开。

如果你对第二层多重宇宙感到不自在，那你可以用“空间”一词来替代它，你只需要记住，我们的第一层和第二层平行宇宙只是无限

空间中相距遥远的区域。只不过，这种空间的结构比欧几里得认为的要复杂得多——它正在膨胀，因此我们只能看到其中的一小部分。我们把这一小部分称为“我们的宇宙”，而在更遥远的地方，空间的性质变化多端，远不止我们用望远镜所看到的样子。第2章曾提到，宇宙是均匀的，并且无论从哪个方向看过去都几乎完全一样。这个概念只是一个小插曲，仅对中间的尺度有效，而在更小的尺度上，万有引力让事物聚集在一起，变得妙趣横生；在更大的尺度上，暴胀让事物变得花样繁多，同样饶有趣味。

如果你依然无法对平行宇宙的理念感到安心，这里向你推荐另一个可能有用的方法来思考它。这是阿兰·古斯在MIT的一场演讲上提到的方法，但它却与暴胀无关。每当我们在自然界发现一个物体，科学的做法就是去寻找那个创造它的机制。比如，汽车是由汽车厂制造出来的，兔子是由兔子爸爸和兔子妈妈生出来的，太阳系是由一团巨大的分子云在万有引力的作用下坍缩而成的。所以，我们很自然地就会想到，我们的宇宙也是由某种专门孕育宇宙的机制所创造出来的。这种机制有可能是暴胀，也可能是其他什么完全不同的东西。现在，事情是这样的：所有这些机制对它们的造物都会创造出无数个版本；假设宇宙中只包含一辆车、一只兔子和一个恒星系，看起来会很假，一点儿也不自然。同样，尽管有些争议，但一个适当的宇宙创生机制（不管它到底是什么）应该会创造出许多个宇宙，而不仅仅是我们栖身的这一个。这样，看起来才更自然一些。

如果那个引发了暴胀、最终创造出第二层多重宇宙的机制（不管它是什么）也遵循这个原理，我们就能总结说：它可能创造出了许多彼此分离的第二层多重宇宙，而这些宇宙之间完全没有连通。然而，这个想法似乎无法进行检验，因为它既没有增加性质不同的宇宙，也没有改变它们性质的概率分布——因为，第一层多重宇宙的所有可能性都已在每个第二层多重宇宙中变成了现实。

除了暴胀，还可能存在另一种宇宙创生机制。这个想法最初是由理查德·托尔曼（Richard Tolman）和约翰·惠勒（John Wheeler）提出的，由保罗·斯坦哈特和尼尔·图罗克（Neil Turok）进行了详细的阐述。他们认为，我们宇宙的历史是循环往复的，经历着一系列永无止境的大爆炸。如果这种理论成立的话，这些变身过程的效果加总起来，同样也会生成一个多重宇宙，可能也拥有和第二层多重宇宙一样的多样性。

还有一个宇宙创生机制是由物理学家李·斯莫林（Lee Smolin）[19]提出来的。他认为，新的宇宙会萌芽于黑洞中，而非暴胀中。他的理论也会产生第二层多重宇宙，其自然选择会更加青睐那些拥有最多黑洞的宇宙。我的好友安德鲁·汉密尔顿就可能发现了这样一种宇宙创生机制。他研究了黑洞刚形成不久后的内部不稳定性，发现那里暴风骤雨，相当猛烈，足够触发一场能生成第一层多重宇宙的暴胀——这个宇宙完全包含在那个初始黑洞内部，但其内部的居民却可能完全不知情，甚至根本不关心这个事实。

而在被称为“膜宇宙”的情境中，可能存在另一种三维的宇宙，它在更高的维度上与我们的宇宙相隔不远，名副其实地“相互平行”。然而，我并不认为这个宇宙（膜）担得起“平行宇宙”这个名头，因为它与我们的宇宙之间可能发生万有引力的相互作用，就像我们与暗物质之间的相互作用一样。

至今，平行宇宙依然面临着诸多争议。不过，过去10年里，平行宇宙已经从科学家们不堪提及的疯狂边缘状态，发展到现在能在物理学会议和同行评议的论文上公开讨论，可见科学界已经发生了显著的变化。我认为，精确宇宙学和暴胀在这个转变中扮演了重要的角色，因为其他理论都无法解释暗能量的微调性。即使是我那些并不喜欢多重宇宙这个理念的同行们，也不得不承认它所根植的理论是有理有据

的。他们对平行宇宙的批评已从“这种想法毫无道理，我讨厌它”转变为“我讨厌它”。

在我看来，科学家的职责并不是为了遵从人类的偏见而去解释宇宙的原理，而应该抱着开放的心态去探索宇宙究竟是如何运转的。

人类有一种狂妄的倾向，总是自大地认为自己是宇宙的中心，所有事物都应围着我们旋转。这样的例子从古至今，史不绝书。慢慢地，人类逐渐意识到，是我们在围着太阳旋转，而太阳与其他数不胜数的恒星一道，绕着一个星系中心旋转。感谢物理学的不断前行与突破，让我们得以愈发深刻地一窥实在的本质。在这本书里，我们刚刚探索了两层多重宇宙，还有两层多重宇宙在前方等着我们。下一章，我们将开始探索第三层多重宇宙。这是一场无须付费的探险，你唯一需要付出的东西就是你的谦逊——这对我们是有好处的，但作为回报，你会收获更多。你可能会发现，我们所栖身的这个现实世界，比古人最狂野不羁的梦想都还要宏伟与庞大。



◆平行宇宙不是一个理论，而是某些特定理论的预测。

◆永恒暴胀预测到，我们的宇宙（是指一个球形的区域，从球面上发出的光线经过大爆炸后140亿年的时间，正好可以到达我们）只是第一层多重宇宙中，无数个宇宙中的其中一个。在第一层多重宇宙中，所有可能发生的事情，都能在某个地方真实发生。

◆为了证明一个理论是科学的，我们并不需要去观测和验证它的所有预测，只需要检验至少一个就可以了。暴胀是宇宙起源的主流理论，因为它通过了观测数据的检验。而平行宇宙似乎是暴胀“大礼包”中不可或缺的一个部分。

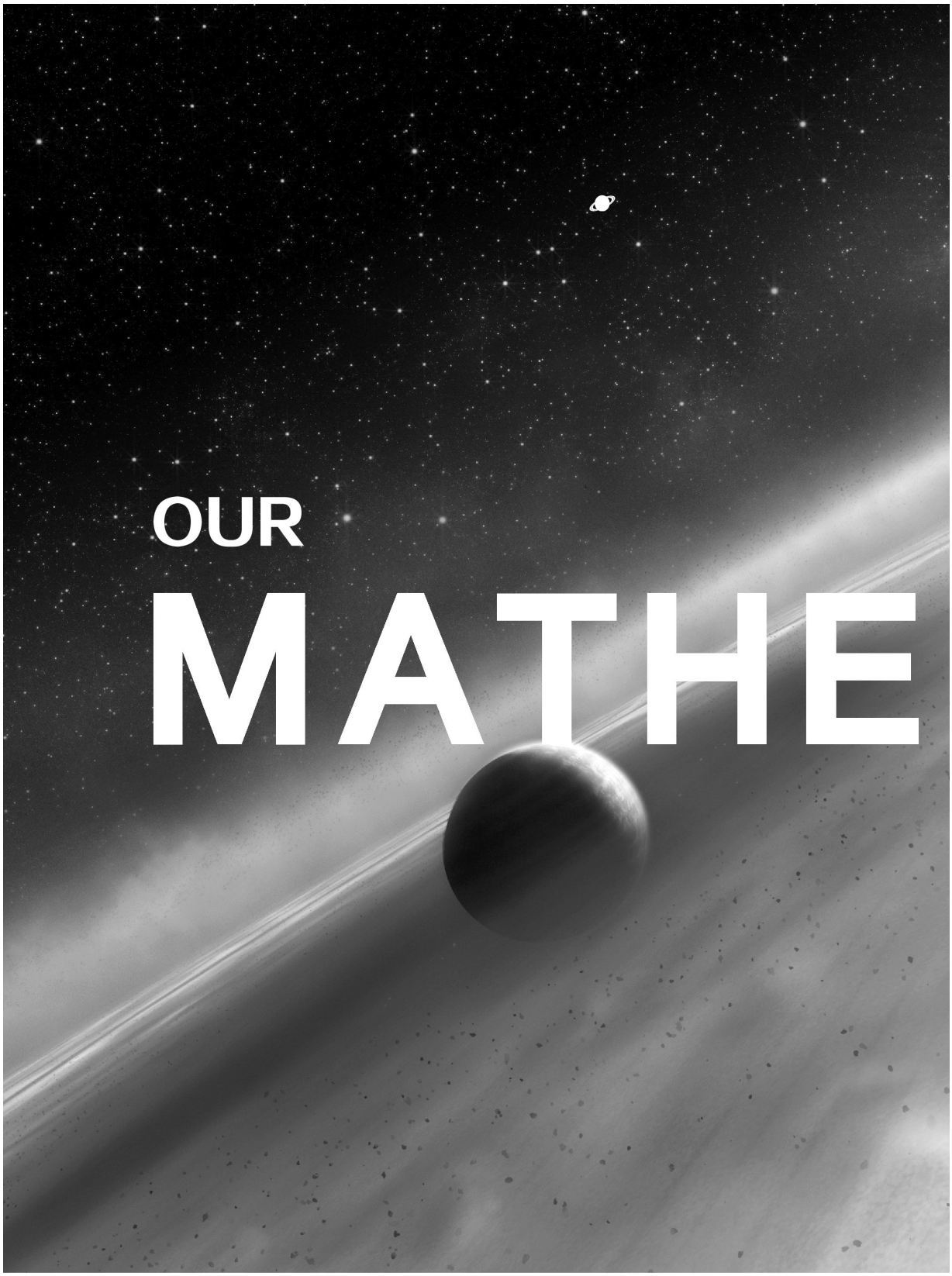
◆暴胀让可能变成了现实：如果描述均匀空间的数学方程有多个解，永恒暴胀就会创造出无数多个空间区域，将这些解逐个变成现实。这就是第二层多重宇宙。

◆许多在第一层多重宇宙中保持不变的物理定律和常数，在第二层多重宇宙中都可能发生变化。所以，处在不同的第一层平行宇宙中的学生在物理课上学到的知识是相同的，历史课的内容却不尽相同；而处在不同第二层平行宇宙中的学生在物理课上学到的知识都有着天壤之别。

◆这可以解释为何我们宇宙的许多常数都仿佛经过了精细微调。它们实在太精细了，因此只要改变一点点，我们所知的生命形态就不可能出现。

◆这将赋予物理学的许多测量数据以新的内涵。这些数字不能告诉我们物理实在的本质，只能描述我们所在的这个位置，就像我们在宇宙中的邮政编码。

◆尽管平行宇宙假说饱受争议，但主流科学家对它的批评已经从“这种想法毫无道理，并且我讨厌它”转变为“我讨厌它”。


OUR
MATHE



▶ 第二部分 穿越粒子世界


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
06
神奇的宇宙乐高

我们视为真实的万物，都是由那些不能被视为真实的事物所组成的。

尼尔斯·玻尔（Niels Bohr）

不对，这根本讲不通，一定是哪里出错了！彼时，我还在斯德哥尔摩，正在我女朋友的宿舍里学习，为我的量子力学考试做准备。教科书告诉我，像原子这样微小的物质能同时位于不同的地方，而像人类这种宏观的事物却无法做到这一点。不可能！我告诉我自己。人类是由原子组成的，如果原子能同时出现在不同的地方，我们肯定也可以啊！书上还说，每当一个人观测到一个原子的位置，这个原子就会随机地跳跃到它之前所在的某一个位置。但是，我无法找到任何一个方程来定义什么才算真正的观测。一个机器人算得上观察者吗？那么单个原子呢？书上只是说，每个量子系统都一定遵循着所谓的薛定谔方程。但是，这难道不和随机跳跃的逻辑相违背吗？

怀着惴惴不安的心情，我鼓起勇气敲开了一位著名物理学家的门，他是诺贝尔奖委员会的成员之一。20分钟后，我坐在他的办公室里，深感自己的愚蠢。这位物理学家说服了我，让我确信之前是我的理解完全错误了。这件事成了一个起点，为我开启了一段至今仍在延续的人生旅途，把我引向了量子平行宇宙。直到几年后，我到加州大学伯克利分校读博士时，才意识到我并不是唯一一个在这上面犯错的

人。我发现，许多著名的物理学家都被量子力学所困扰，而我却恰好在撰写该领域的论文中找到了极大的乐趣。

不过，在我告诉你这一切是怎么一回事（这是第7章的内容）之前，我想带你一起溯时间之流而上，去真正欣赏一下量子力学的疯狂，以及那些恼人之事的根源。

原子乐高

2013年，我问我儿子亚历山大想要什么生日礼物时，他说：“你看着办吧！什么东西都可以，只要是乐高就行……”我也非常喜欢乐高。我觉得，我们的宇宙也一定很喜欢乐高——因为宇宙中的所有事物都是由相同的基本构件组成的，（见图6-1）。在元素周期表中，80种稳定原子都是由同一套“宇宙乐高积木”组成[20]，我认为这是一件了不起的事情。正是它们构成了万事万物，从石头到兔子，从恒星到音箱——它们唯一的不同之处只在于，组成它们的“积木”数量和排列方式不同。

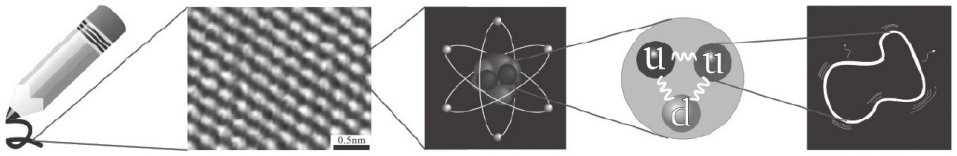


图6-1　铅笔芯是由石墨做成的，而石墨是由一层一层的碳原子组成的（这是一张真正的照片，由扫描式隧道显微镜拍摄），碳原子则是由质子、中子和电子组成。质子和中子是由上夸克和下夸克组成，而夸克有可能是振动的弦。我为写这本书而买的铅笔芯包含2×10^{21}个原子，如果你把它切成两半，最多可以切71次。

宇宙是由不可分割的构件所组成的，这种“乐高理论”有着源远流长的历史。原子的英文单词“atom”在古希腊语中正意味着“不可分割之物”。实际上，柏拉图在他的对话录《蒂迈欧篇》（*Timaeus*）

中曾说道，当时所公认的4种基本元素（土、水、气和火）就是由4种不同的原子组成的，而这些原子都是微小到肉眼不可见的数学对象——它们分别是立方体、二十面体、八面体和四面体，也就是5种柏拉图多面体中的4种（见图6-2）。例如，柏拉图认为，火之所以让人觉得疼痛，正是因为四面体有尖锐的角；水之所以能流动，是因为二十面体像球体一样圆润；地球之所以坚固，是因为立方体可以紧密地堆叠在一起。尽管这个可爱的理论被观测事实所推翻，但它的一些精神仍然留存，比如，每种基本元素都是由一种特定的原子所组成，并且物质的性质由原子的特性所决定。此外，我在第9章中还将提到，我们宇宙的终极构件其实也属于数学，但和柏拉图所说的方式有所不同——柏拉图认为，我们的宇宙是由不同的数学对象组成的；而我认为，我们的宇宙仅仅是一个数学对象的一部分。

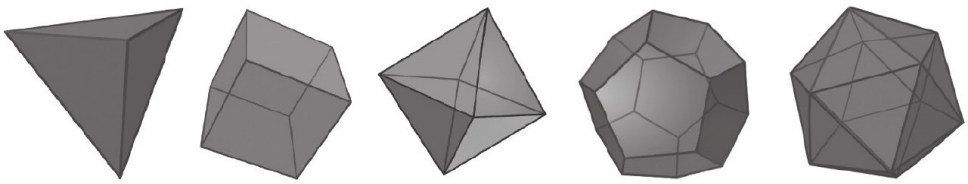


图6-2　5种柏拉图多面体：四面体、立方体、八面体、十二面体和二十面体。其中，只有十二面体被柏拉图的原子理论排除在外：有时，它被看作一种与宗教有关的神秘物体，在神话中具有重要的作用；它自古以来就是艺术作品中的常客，萨尔瓦多·达利（Salvador Dalí）的作品《圣礼上最后的晚餐》（*Sacrament of the Last Supper*）中也出现了它的身影。

直到2 000多年后，现代原子理论才逐渐建立起来。20世纪初，著名奥地利物理学家恩斯特·马赫（Ernest Mach）甚至拒绝相信原子的存在。如果他能活到今天，看到我们竟然有能力拍下一个个原子的照片（见图6-1），甚至还能操控它们，想必他一定会被深深地震撼。

原子核乐高

原子假说的胜利，很自然地让人开始疑惑“原子”这个名字是否真的适用。如果宏观物体是由被称为“原子”的微小“乐高积木”所组成的，那这些“小积木”能否继续分下去，分成某种更小的、可重新排列的“乐高积木”呢？

实际上，在我们的元素周期表中，所有原子都是由3种更小的“乐高积木”组成的，比柏拉图理论中的4种还少一种。我认为这是一件既巧妙又不同寻常的事情。我们已经在第2章中和它们简单地打过照面了。图6-1中展示了这3种“积木”，它们分别是质子、中子和电子。它们的排列方式很像微缩的太阳系，由电子围绕着一个小球旋转，而这个小球是由质子和中子紧紧靠在一起而形成，我们称之为原子核。在太阳系中，地球能在轨道上围绕太阳旋转是由于二者之间存在着万有引力；在原子中，电子与质子间存在着电荷产生的库仑力，将电子吸引在质子周围（电子拥有负电荷，质子拥有正电荷，异号电荷相吸引）。由于电子也受到其他原子中的质子吸引，这种吸引力就将原子与原子紧密地黏合在一起，组成一种较大一些的结构，称为分子。如果原子核和电子像洗牌一样来来去去，但各自的数量保持不变，这个过程就是化学反应。化学反应的速度有快有慢：它可以快到像一场熊熊的山火（主要是木头和树叶中的碳原子和氢原子与空气中的氧原子相结合，生成二氧化碳和水分子）；慢时，也可能像一棵缓缓生长的树（主要是山火的逆反应，由阳光所驱动的光合作用）。

几个世纪以来，炼金术士们徒劳无功地尝试改变原子的种类，主要目的是想将廉价的元素（比如铅）变成昂贵的元素（比如金子）。那为何他们无一例外都失败了呢？因为原子的种类取决于它所包含的质子数量（比如，1个质子就是氢，79个质子就是金子），因此，炼金术士的失败之处就在于，他们不会玩质子的“乐高游戏”，不懂得怎样将质子从一个原子转移到另一个原子中。为什么他们做不到这一点呢？

现在我们知道，他们失败的原因并不是因为这是不可能完成的任务，而是因为他们使用的能量远远不够！对于库仑力来说，同号电荷是相互排斥的，但原子核内部带正电荷的质子们却没有四散开来，原因就在于它们之间存在另一种更强大的吸引力——强相互作用力，这种力名副其实，它真的很强大。强相互作用力就像原子内部的魔术贴，只要质子和中子靠得足够近，魔术贴就会把它们黏在一起。它非常强大，需要极其巨大的力量才能将其克服。

> 举个例子，如果两个氢分子（每个氢分子包含两个氢原子）以每秒50公里的速度相撞，分子就会被撞碎，原子就会相互分离开来；然而，如果你想撞碎原子核，将其中的质子和中子分开来，你需要让两颗氦原子核（每个氦原子核包含2个质子和2个中子）以每秒36 000公里的惊人速度迎面相撞，才有机会撞飞质子和中子——这个速度是光速的12%，如果你以这个速度前进，从纽约到旧金山只需要0.1秒。

在自然界中，当温度极度炙热，高到几百万摄氏度时，就会发生这样猛烈的碰撞。早期宇宙中就发生了这样的事情。那时候宇宙中没有任何原子，只有氢等离子体（也就是单个的质子），正是因为当时的温度实在太高，即使质子和中子黏附在一起组成了较重的原子，也会很快被撞碎。随着宇宙逐渐膨胀和冷却，曾经出现过短短几分钟时间，在那段时间内，猛烈的撞击尽管依然超出质子之间的电荷斥力，但却敌不过强大的“魔术贴”的力，于是质子和中子逐渐黏合在一起，形成了氦元素——这正是被伽莫夫称为太初核合成的阶段（见第2章）。太阳内核也非常炙热，温度和宇宙早期差不多，都位于那个魔法般的范围内，促使氢原子聚变成氦原子。

经济学原理告诉我们，如果一种原子很稀缺，它就会很昂贵；物理学原理则告诉我们，如果一种原子需要很高的温度才能生成，那它就很稀有。这两种原理结合起来，我们就能推断出：假如原子会说话，那最昂贵的原子就能讲出最精彩的故事。诸如碳、氮和氧这类普通原子（它们和氢一起，组成了你身体96%的重量）都很便宜，因为与

太阳类似的普通恒星在濒临死亡的挣扎中就可以制造出这些元素。之后，这些元素又可以回到宇宙的循环系统中，孕育出新一代恒星。昂贵元素的故事却截然不同。金元素是在猛烈的恒星死亡事件——超新星爆炸中生成的。这种爆炸在宇宙中很罕见，它在短于一秒钟的时间内释放出的能量，相当于可观测宇宙中其他所有恒星释放的能量总和。难怪炼金术士们造不出金子呢！

粒子物理学乐高

如果万物都是由原子组成的，而原子又是由更小的构件组成（中子、质子和电子），那么，它们是否还能被分为更小、更基本的构件呢？历史经验告诉我们一种可以找出答案的实验方法——让这些已知的最小构件彼此猛烈相撞，看它们能否被撞碎。许多大型粒子对撞机都在尝试这个实验。然而，在日内瓦附近的CERN（欧洲核子研究组织）实验室里，即使加速到光速的99.999 999 999%，也没有丝毫迹象表明电子能被撞碎成什么更小的东西。不过，撞击质子和中子却得到了不一样的结果——它们确实是由更小的粒子所组成的，我们称之为上夸克和下夸克。2个上夸克和1个下夸克组成一个质子（见图6-1），2个下夸克和1个上夸克构成一个中子。此外，在对撞的过程中，还生成了一系列前所未知的新粒子（见图6-3）。

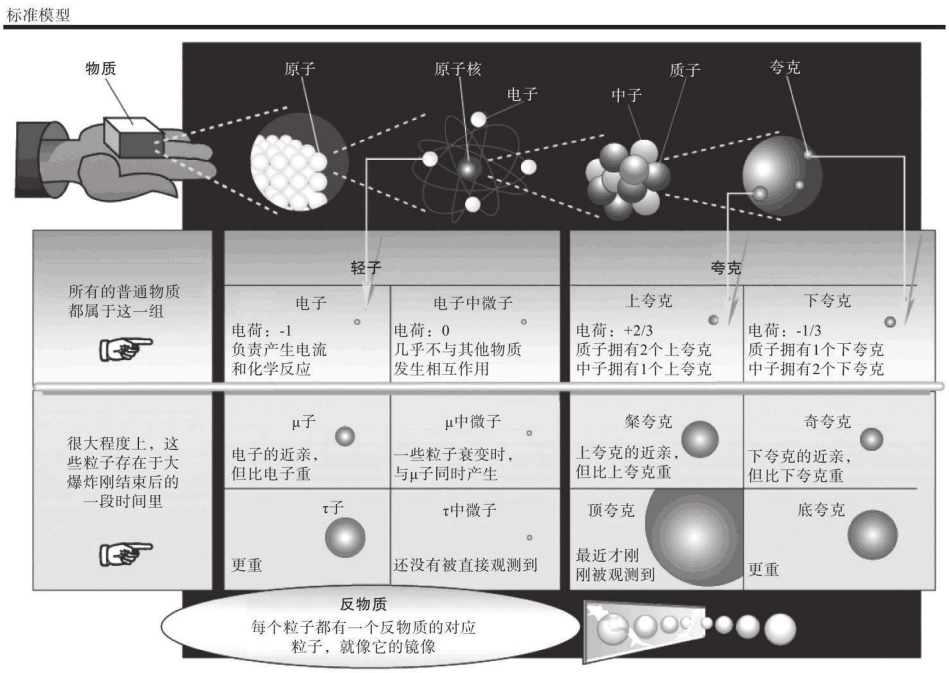


图6-3　目前粒子物理学的标准模型（图片来源：CERN）。

人们给这些新粒子起了稀奇古怪的名字，比如，π介子、K介子、Σ粒子、Ω粒子、μ子、τ子、W玻色子和Z玻色子。这些粒子十分不稳定，瞬间就会衰变成我们所熟悉的普通粒子。精细的探测器发现，在这些粒子中，除了最后4个以外，其他都是由夸克组成的——不仅有上夸克和下夸克，还有4种不稳定的新夸克，分别叫作奇夸克、粲夸克、底夸克和顶夸克。人们发现，W玻色子和Z玻色子负责传递所谓的弱相互作用力，它们与放射性有着密切的关系，还是光子的表兄弟——光子是一种玻色子，负责传递电磁力。在玻色子大家族中，还有一个成员叫作胶子，能将夸克们捆绑在一起，组成更大的粒子。而最近发现的希格斯玻色子则将质量赋予其他粒子。此外，人们还发现了一些鬼魅般的稳定粒子，如电子中微子、μ中微子和τ中微子。这“三兄弟”非常害羞，它们几乎不与其他粒子发生相互作用——如果一个中微子撞在地面上，它会直直地穿过地面，穿越地球，并从地球的另一边毫发无伤地飞出去，继续一往无前的太空之旅。最后必须要说的是，几乎所有粒子都拥有一个“邪恶”的双胞胎——反粒子。如

果粒子和反粒子相撞，就会彼此湮灭成一股纯粹的能量。表6-1中总结了本书所涉及的一些重要粒子及其相关概念。

表6-1　理解微观世界所需要了解的一些重要物理学概念

物理学概念	解释
动量	一个物体撞到其他物体时所累积的效果。严格来说，是使物体停止运动所需花费的时间乘以所需的平均推力。一个质量为 m、速度为 v（v 远小于光速时）的物体所具有的动量 p 等于 m 乘以 v（$p=mv$）
角动量	物体旋转的程度。严格来说，是使物体停止转动所需花费的时间乘以所需的平均转矩（扭力）
自旋	一个粒子绕着自己中心旋转的角动量
守恒量	不随时间变化的量，既不能被创造，也不能被毁灭。例如，能量、动量、角动量、电荷数
原子	电子围绕着一个由中子和质子组成的原子核旋转；质子数决定了这个原子的名称（如 1= 氢，2= 氦，等等）
电子	带负电荷的粒子，电流就是由它形成的
质子	原子核中带正电荷的粒子，由 2 个上夸克和 1 个下夸克组成
中子	原子核中不带电荷的粒子，由 2 个下夸克和 1 个上夸克组成
光子	光的粒子
胶子	将 3 个夸克黏在一起组成质子和中子的粒子
中微子	一种隐秘不测的粒子，它能直直地穿越地球，而不与任何事物发生相互作用
费米子	不能与同类粒子处于相同位置和状态的粒子。例如，电子、夸克、中微子
玻色子	喜欢与同类粒子处于相同位置和状态的粒子。例如，光子、胶子、希格斯粒子

到目前为止，尚无证据表明玻色子、夸克、轻子（这是电子、μ子和τ子的家族名称），以及它们的反粒子还可继续分成更小或更基本的构件。但是，由于夸克在宇宙乐高层级（见图6-1）中位于三层以下，所以，就算你不是福尔摩斯，也会怀疑：**我们无法触探更深层级的原因，是由于粒子加速器的能量不够。**实际上，在第5章里我们已经提到过，弦理论正是这么想的，它认为，如果我们能用巨大的能量

（大约是今天所使用能量的10万亿倍）让这些粒子相撞，我们就会发现，它们都是由振动的弦所组成。同样的基本弦以不同的方式振动，就产生了不同类型的粒子，就像同一根吉他弦按在不同的品位就会弹出不同的音调一样。弦理论的竞争对手是圈量子引力论，这个理论认为，万事万物并不是由微小的弦组成的，而是由所谓的“激发引力场的量子回圈自旋网络”构成——真拗口，如果你不懂这是什么东西也没关系，因为即使是弦理论和圈量子引力论领域内最忠实的践行者也不敢声称自己完全弄懂了这些理论……那么，万物到底是由什么构成的呢？基于目前最前沿的实验证据，答案很清楚——我们还不知道。但是，我们有充分的理由相信：**目前已知的万事万物，包括时空自身的结构，最终都是由一种更加基本的构件所组成的。**

数学乐高

尽管现在我们还不知道万物构成的终极答案，但我们已经找到了一个令人激动的线索，前面也曾提到过。对我来说，有一件事让我感到十分狂热，那就是在CERN的大型强子对撞机中，两个相撞的质子产生了一个质量为质子97倍的Z玻色子。我曾经认为质量是守恒的，这很好理解，就好比两辆法拉利轿车相撞，当然不可能撞出一艘游轮，因为游轮的质量远大于两辆车的质量之和。所以，两个粒子相撞竟然产生了一个质量大于二者之和的新粒子，这听起来不是很像庞氏骗局吗？不过别忘了，爱因斯坦教导我们，能量E可以被转换为质量m，它们的关系是$E=mc^2$，其中c代表光速。所以，如果在粒子相撞时，正好有一些动能可以任你安置，那么这些能量中的一部分就有可能被转换成新粒子。换句话说，总能量是守恒的（也就是保持不变），但是，粒子对撞过程对能量进行了重新分配，可能将一部分能量转变成之前不存在的新粒子。

动量也存在类似的情况。在台球游戏中，当白球撞到一颗原本静止的球时，后者直直飞向落球袋，而白球则逐渐慢下来，这个过程中，总动量是守恒的，但是进行了重新分配。守恒是物理学上最重要的发现之一。不止能量和动量，还有许多其他的量也是守恒的，我们最熟悉的例子是电荷，还有一些守恒的量比如同位旋和色荷。还有一些量在许多重要情境下是守恒的，比如轻子数（等于轻子的数目减去反轻子的数目）和重子数（等于夸克的数目和反夸克的数目分别除以3之后相减，由于质子和中子都包含3个夸克，所以它们的重子数都等于+1）。表6-2中列出了这些不同的粒子所具有的量的数目（称为量子数）。你会注意到，它们许多都是整数或简分数，在质量一列中还有3个数并未准确地测出来。

表6-2　不同的粒子所具有的量的数目

粒子名称	质量（单位：MeV）	电荷	自旋	同位旋	重子数	轻子数
质子	938.3	1	1/2	1/2	1	0
中子	939.6	0	1/2	1/2	1	0
电子	0.511	−1	1/2	−1/2	0	1
上夸克	1.5~4	2/3	1/2	1/2	1/3	0
下夸克	4~8	−1/3	1/2	−1/3	1/3	0
电子中微子	$<10^{-6}$	0	1/2	1/2	0	1
光子	0	0	1	0	0	0

注：所有已知的基本粒子都可以由一套独特的“量子数”来进行描述，该表就展示了一些范例。除了自身的量子数以外，粒子不具有任何其他性质。从这个意义上说，粒子是纯粹的数学对象。表中的质量对应着创造一颗静止粒子所需要的能量。我所使用的单位十分有趣，是MeV，相当于你用100万伏特的电压来加速一个电子时，它所能获得的动能。

我还记得一个“冷战”时期的笑话，说的是在西方世界，所有不被禁止的事情都是被允许的，而在东方，所有不被允许的事都是被禁止的。有趣的是，粒子物理学似乎遵循前者：所有不被禁止的反应（也就是违背某

些守恒定律的反应）在自然界中都可能真的发生。这意味着，应该被我们看成物理学基本构件的，是守恒量，而非粒子本身！所以，粒子物理学只是对能量、动量、电荷等守恒量进行了重新分配。比如，按照表6-2，要烹制一个上夸克，需要将2/3个单位的电荷、1/2个单位的自旋、1/2个单位的同位旋和1/3个单位的重子数糅合在一起，最后再洒上些许MeV的能量，一道上夸克大餐就做好了。

那么，能量和电荷这种量子数又是由什么组成的？什么都没有——它们只是数字！一只猫也拥有能量和电荷，但除此之外它还拥有许多其他的性质，比如名字、味道和性格。所以，如果有人声称猫只是一个纯粹的数学对象，声称仅用两个数字就能完全描述它，似乎太过疯狂。然而，我们的基本粒子小伙伴们却能被量子数完全描述，除此之外不具备任何内禀性质！从这个角度看，我们绕了一大圈，又回到了柏拉图的面前。因为，正如他所认为的那样，宇宙万物是由一些微小的基本单位组成的，就像乐高积木一样，而这些基本单位似乎只是纯粹的数学对象，它们除了数学性质以外，不具备其他特性。在第9章，我们将更详细地讨论这个观点，那时你会发现，这也仅是一座巨大的数学冰山露出水面的小小一角而已。

在更技术的层面，如果你问“粒子是什么”，一些物理学家可能会油嘴滑舌地回答道：“它是拉格朗日量对称群不可约表示的一个元素。”这也太拗口了，一段本应愉快的聊天很可能就此画上了句号。但不管怎么说，它确实是一个纯粹的数学对象，只比数字的概念更广泛一点点。当然，弦理论或它的竞争理论都可能加深我们对粒子的理解，但是，所有主流理论都只是用一个数学实体来替代另一个而已。比如，假如表6-2中的量子数正巧对应着不同类型的超弦振动，那么，你就不应该把这些弦想象成用金棕色猫毛编成的毛茸茸小物件，而应该把它们看作纯粹的数学概念。它们只是在物理学上被冠以“弦”的名字，以强调它们具有一维的本质，这样就可以用那些不那么晦涩的日常事物来打比方了。

大自然就像一个乐高金字塔，每一层都由不同尺度的基本单元构成。如果我儿子亚历山大想玩乐高，他只能玩工厂生产出来的乐高，工厂生产什么乐高，他就只能玩什么乐高。假如他想玩原子的乐高，玩法是将它们放在火中炙烤，或浸入酸液中，或用其他方法来改变原子的排布，那么，这些事情叫化学；如果他想玩原子核乐高，玩法是用某种方法重新排列原子核内部的中子和质子，生成新的元素，那么，他做的事情叫核物理学；如果他用光速来对撞他的乐高块，让中子、质子和电子的能量、动量和电荷等发生重新分配，让它们变成新的粒子，那么，他做的事情叫作粒子物理学。最深层的构件似乎只是纯粹的数学对象。

光子乐高

并不是只有物体才由积木一样的基本构件组成，光也是如此，我们在本书第一部分提到过这一点。1905年，爱因斯坦推断，光是由一种粒子构成的，这种粒子称为“光子”。

在爱因斯坦提出这个观点之前的40多年，詹姆斯·麦克斯韦（James C.Maxwell）就已发现光是一种电磁波，这是一种电干扰。如果你能精确地测定一束光线上两个点之间的电压，你就会发现它会随时间来回振荡。振荡的频率f（每秒振荡的次数）决定了光的颜色，振荡的强度（你测到的最大电压）决定了光强。我们在第3章提到过的“万远镜”就能测量这种电压。根据频率的不同，人们为不同的电磁波起了不同的名字，根据频率从小到大分别将其命名为无线电波、微波、红外线、红、橙、黄、绿、蓝、紫、紫外线、X射线、伽马射线等。尽管名字不同，但它们实际上都是光，由一个个光子组成，只不过形式不同而已。发光体每秒释放出的光子越多，它就越明亮。

爱因斯坦意识到，光子中蕴含的能量E是由频率f决定的，它们遵循一个简单的方程：$E=hf$，其中，h是一个名为“普朗克常量”的自然常数。常数h非常小，所以一个普通的光子内只含有非常微小的能量。如果我在阳光明媚的海滩上躺1秒钟，一共会有10^{21}个光子落到我身上，温暖我的身体，所以感觉起来很像一股绵延不断的光流。然而，如果我朋友送我一些能遮住90%光线的墨镜，我同时戴上21副这样的墨镜，那么1秒钟内，在之前的那些光子中，大约仅有1个光子能通过墨镜的重重阻隔，只有灵敏的光子探测器才能发觉它的存在。

爱因斯坦获得诺贝尔奖，正是因为他用这个想法来解释了光电效应（photoelectric effect）：光具有“击”出金属中电子的能力，这种能力只取决于光的频率（也就是光子的能量），而与光强（光子的数量）无关。低频光子无法完成这项任务，因为它们的能量不够，这就好比扔网球去砸碎玻璃窗，如果你使的力气过小，那么不管你扔多少个网球，玻璃也毫发无伤。今天的太阳能电池和数码照相机的图像传感器上都用到了与光电效应有关的技术。

马克斯·普朗克（Max Planck）获得了1918年的诺贝尔物理学奖，因为他发现，爱因斯坦对光子的想法同样能解释另一个困扰人们多年的谜：为何以前人们对发光发热物体的热辐射计算总是不正确。彩虹（见图1-5）展示了阳光的光谱，也展示了多种不同频率的光。人们知道，物体的温度T可以用来度量它内部粒子运动的快慢。人们还知道，一个粒子的动能E遵循公式E=kT，其中k代表玻尔兹曼常量（Boltzmann’s constant）。在太阳内部，当粒子相撞时，大约有kT这么多的动能被转变为了光能。

不幸的是，对彩虹更详细的预测陷入了一个困境，被称为“紫外灾变”（ultraviolet catastrophe）。光强会向着图1-5的右侧（也就是向着更高的频率）永远增加下去，所以只要你向任何一个有温度

的物体（比如，你最要好的朋友）瞥一眼，你就会立刻被伽马射线亮瞎眼。然而，“光由粒子组成”这个事实将救你一命：太阳发光时，只能一个一个地释放出光子，制造一个光子所需要的能量通常是kT，这个能量太小，与制造伽马射线的能量hf相比还差得远呢，所以你一点也不用担心。

凌驾于物理定律之上？

如果所有物体都是由粒子组成的，那它们都遵循什么物理定律呢？具体地说，如果我们知道我们的宇宙中每一个粒子此时此刻正在做什么，那么，我们要采用什么方程才能计算出它们未来的状况呢？如果这个方程真的存在，你一定会希望它能（至少理论上能）根据现在预测出未来的方方面面，从击出棒球的路径，到2048年奥林匹克运动会的冠军们。只要能算出所有粒子的下一步，你就能得到一切的答案。

关于这一点，可谓喜忧参半。喜的是，这个方程似乎真的存在，它被称为“薛定谔方程”（见图6-4）；忧的是，这个方程并不能精确地预测粒子的下一步。这个方程是由奥地利物理学家埃尔温·薛定谔（Erwin Schr dinger）在百年前写下的。将近百年之后，物理学家们依然对此争论不休，不明白它究竟是怎么一回事。



图6-4　薛定谔方程永垂不朽。这张照片是我在1996年拍的，从那之后，铭文字体发生了神秘的改变。难道量子力学的怪事也会在这里发生吗？

大家都认同，微观粒子并不遵从我们在中学所学的那些经典物理定律。由于原子的结构让人联想到太阳系，所以自然地，许多人会假定电子绕原子核旋转是遵循牛顿力学的，就像行星围绕太阳旋转一样。确实，当你照此计算时，看起来还真像那么回事儿。你可以拉着一个溜溜球的线，让它绕着你的脑袋旋转；如果线断了，溜溜球就会从断点沿着一条直线飞出去。所以，你对线施加的拉力必须能够克服溜溜球沿直线飞出去的惯性，才能让它做圆周运动。

在我们的太阳系中，行星和太阳之间并没有一根线，那么，保持行星不沿直线飞出去的力是什么呢？是太阳的万有引力。在原子中，原子核与电子之间存在着电荷吸引力。如果你对一个氢原子大小的轨道进行计算，你得到的电子速度与我们在实验室中测得的速度相差无几——这简直是一个理论胜利！然而，为了得到更精确的答案，我们需要在方程中引入另一个效应，即电子如果正在加速（改变速度或运

动方向），它将会辐射出能量——你的手机就利用了这一点，让电子在天线附近振动，以传输无线电波。由于能量是守恒的，辐射出的能量不可能凭空创生，而必须有一个来头。在你的手机里，能量来自电池，但在氢原子中，辐射出的能量来自电子的动能，这使得它将向原子核“落下去”，就像上层大气的空气阻力让低轨卫星逐渐减速，失去动能，最终落回地面上一样。这意味着，电子轨道并不是圆形的，而是一个通向死亡的螺旋形（见图6-5）。在旋转10万圈以后，电子最终会撞到质子上，氢原子就会因此坍缩，享年0.02纳秒[21]。



扫码获取这个死亡螺旋的推导过程。

电子沿螺旋形落入质子中？这可不妙。相当不妙啊。这里，我们谈论的可不是理论和实验之间1%的微小差异，而是宇宙中所有的氢原子（也包括其他所有的原子）都将在你读一个字所花时间的$1/10^9$内崩塌殆尽。可是，绝大多数氢原子都早已存在了140亿年，比经典物理学所预测的寿命长了28个数量级，创造了史上最糟糕物理学预测的世界纪录，直到暗能量密度的错误预测出现（我们在第2章中提到过，它错了123个数量级），才将其挤下了冠军舞台。

除此之外，当物理学家假定基本粒子遵循经典物理定律时，还遇到了许多其他问题。比如，他们发现，加热极冷物体所需的能量小于预测值。这些问题又触发了更多一连串的问题。但是，我们没必要再

列举这些例子，因为大自然的信息已经非常清楚——微观粒子并不遵守经典物理学的定律。

那么，这些粒子是凌驾于物理定律之上的吗？并不是，它们遵守一个完全不同的定律——薛定谔定律。

量子与彩虹

1913年，为了解释原子的机制，丹麦物理学家尼尔斯·玻尔想出了一个激进的念头。他想：也许，不只物质和光是一份一份的（也就是由积木一样的基本构件组成），运动也是如此。有没有可能，运动并不是连续的，而是跳跃的，就像电子游戏“吃豆人”（Pac-Man）或者卓别林的老电影一样，帧与帧之间的切换十分突兀。图6-5中展示了玻尔的原子模型——只有满足某些神秘尺度的圆形轨道才允许存在。最小的轨道被标记为n=1，接着，更大一点的轨道为n=2，以此类推，每个轨道的半径都是最小半径的n^2倍[22]。

玻尔的原子模型的第一个也是最重要的一个成就在于，它不会像左边的经典模型那样坍缩。当电子处在最里面的轨道时，它就不可能再向内跃迁了，因为里面没有可用的轨道。不止如此，玻尔的模型还能解释更多事情。较高轨道所具有的能量大于较低的轨道，由于总能量是守恒的，所以，每当电子像吃豆人一样跃迁到较低的轨道时，原子就将多余的能量以一个光子的形式释放出来（见图6-5）；如果电子要跳回原来的较高轨道，它又必须付出一定的代价——吸收一个具有所需能量的光子。由于轨道能量是一组离散的数字，这意味着原子只能释放或吸收具有特定能量值的光子。也就是说，一个原子只能吸收或释放具有特定频率的光子。这解决了一个困扰多年的谜——阳光所形成的彩虹（见图1-5）中，在特定的频率存在着一些神秘的黑线（也就是缺失了某些特定的颜色）。还有，人们在实验室里研究炙热的气

体时，观察到每种原子都只能释放和吸收某些特定频率的光，形成独特的光谱特征，就像人的指纹一样。玻尔的原子模型不仅解释了这些光谱线的存在，还解释了氢原子所对应的那个特别的频率[23]。

这是一个好消息，为玻尔赢得了诺贝尔奖（本章中我提到的大多数科学家都获得了诺贝尔奖）。但是，我们不能忽略那个暗潮涌动的坏消息：玻尔的模型只对氢原子有效，而无法解释其他原子，除非它们只剩一个电子。

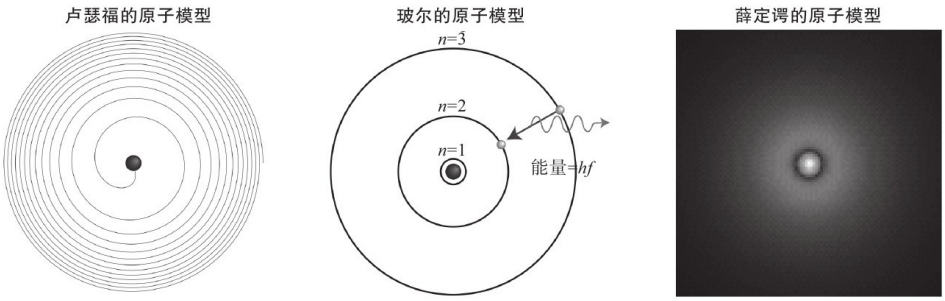


图6-5　该图是我们对原子认识的变迁。经典的“太阳系”原子模型是由欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）提出来的，不过，这个模型很不稳定，电子会沿螺旋形的轨道落入中心的质子（这张图里，为了简化，我将电荷力增强了20倍，否则它将旋转10万圈后才落入质子，那这张图将变得难以辨认）。玻尔模型则将电子限制在离散的轨道上，这些轨道分别记作n=1、2、3……，电子在不同的轨道之间跃迁，需要吸收或释放出光子。但是，这个模型只对氢原子成立，对其他原子都不成立。薛定谔模型则描述道，单个电子可能同时出现在许多不同的地方，形成一个“电子云”，电子云的形状由所谓的波函数Ψ决定。

轩然大“波”

抛开这些早期的成功事迹不说，物理学家们依然不明白这些奇怪的现象和量子规律究竟是怎么回事。它们到底意味着什么呢？为什么角动量是量子化的？是否有更深层次的解释呢？

物理学家路易·德布罗意（Louis de Broglie）提出了一个想法，他认为，电子（实际上所有粒子都如此）有一种像波一样的性质，就像光子一样。在长笛中，声驻波只能在某些特殊频率下振动，那么是否也存在一种类似的波，决定着电子在原子中旋转的频率呢？

我们知道，两个波可以互相穿越、互不影响，就像水缸里的圆形涟漪（见图6-6左图），在任何时候，它们的效果都是相互叠加的。在有些地方，我们可以看到两个波峰叠加成一个更大的波峰（这种现象被称为“相长干涉”[constructive interference]）；而在有些地方，我们则看到一个波峰和一个波谷叠加在一起，相互抵消，让水面看起来宁静如斯，仿佛并没有水波（这种现象被称为“相消干涉”[destructive interference]）。在太阳表面（见图6-6中图），人们观察到了炙热气体/等离子体内的声波。如果这种波在整个太阳表面传播开来（见图6-6右图），它就会与自身产生相消干涉，将自身抵消掉，除非它走一圈的距离正好等于波长的整数倍，才能与自身同步。这意味着，与长笛一样，太阳表面的振动也只存在于某些特殊的频率[24]。德布罗意在他1924年的博士论文里把这个逻辑运用在氢原子上，得出的频率和能量与玻尔模型所预测的完全一致。图6-7展示了一个更直接的证据，证明粒子具有波动性。这个实验被称为“双缝实验”（double-slit experiment）。

这种波动理论也直观地解释了，原子为何不会像经典物理学预测的那样落向原子核。如果你试着将一个波局限在一个非常小的空间内，它就会立刻开始向四面八方扩展开来。比如，如果一滴雨掉进水缸，最开始它只会扰动入水点附近的一小片区域，但是，这种扰动很快就会向所有方向扩展开，形成一个个圆形的涟漪，就像图6-6左图中的波纹一样。这就是海森堡不确定性原理的本质。沃纳·海森堡（Werner Heisenberg）认为，如果你想将某物限制在非常小的空间区域内，它就将获得很多随机动量，使得它具有扩展开的倾向，从而变得

不那么局限。换句话说，一个物体不可能同时具有精确的位置和精确的速度[25]！这意味着，如果氢原子中的电子如图6-5左图所示的那样被吸入质子中，那么，随着电子的位置受到越来越大的制约，它的动量和速度会越来越大，直到获得足够的速度，重新飞回到较高的轨道上。

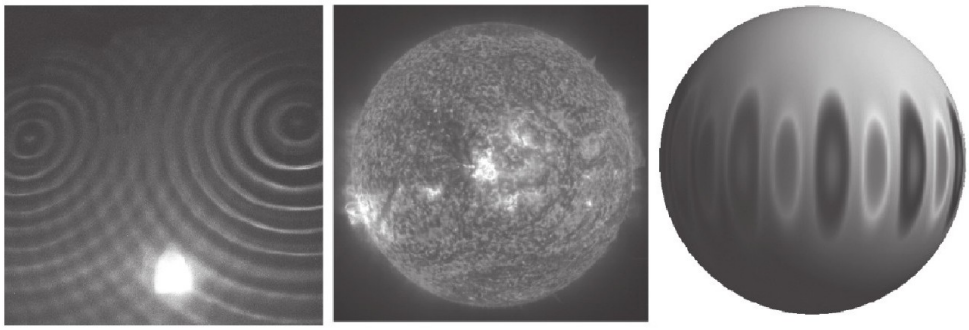


图6-6　水缸里的水波（左图）和太阳表面的声波（右图）。

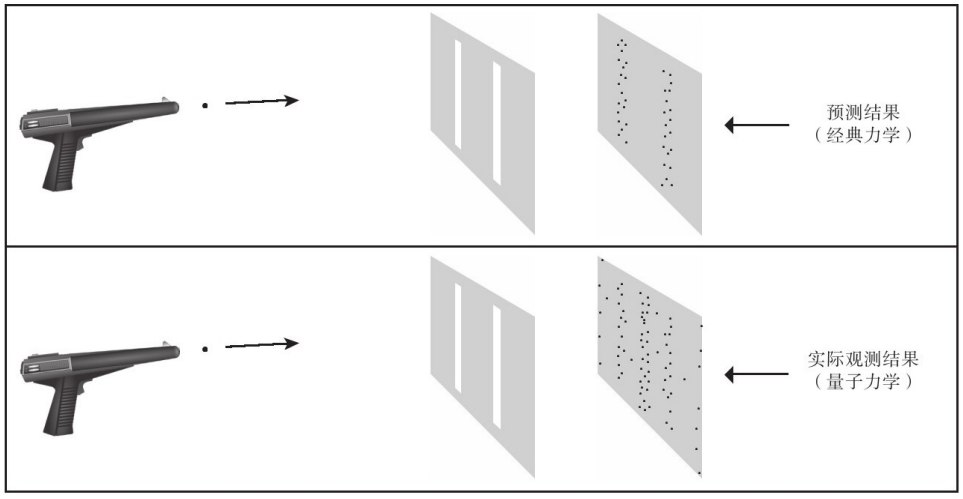


图6-7　假设我们向一道拥有两条竖直狭缝的屏障发射粒子（比如，用激光枪发射电子或光子），根据经典力学的预测，这些粒子穿过狭缝，打在屏障后面的探测器上，将呈现出与狭缝相对应的两根竖条。然而，根据量子力学的预测，粒子具有波动性，所以每个粒子都将以“量子叠加”（quantum superposition）的方式同时穿过两条狭缝，并与自身产生干涉，然后在探测器上形成与图6-6相类似的那种干涉模式。这个著名的双缝实验证明了量

子力学是正确的：你会观测到，粒子组成了一系列平行的竖条，
而并非仅有两条。

德布罗意的论文引起了轩然大波。1925年11月，薛定谔在苏黎世召开了一场与之有关的研讨会。当他讲完后，彼得·德拜（Peter Debye）说：“你讲了半天关于波动的事情，可是，波动方程在哪里呢？”于是，薛定谔向这个方向继续钻研，发表了他著名的波动方程（见图6-4），这个波动方程成了打开现代物理学的金钥匙。大约在同一时间，马克斯·玻恩（Max Born）、帕斯奎尔·乔丹（Pasqual Jordan）和维尔纳·海森堡开始用一种被称为“矩阵”的数表来解决同样的问题。有了这个强大的数学工具做基础，量子理论开始了爆发式的进展。在短短几年内，成功解决了一大批从前无法解释的观测现象，包括复杂原子的光谱和化学反应中的各种数字等。量子物理学最终改变了我们的生活：激光、晶体管、集成电路、计算机和手机等纷至沓来。量子力学的成功之处还在于，它衍生出了许多分支，比如量子场论，为寻找暗物质粒子等现代前沿研究打下了坚实的基础。

好的科学理论有什么特点呢？我认为，其中一个特点叫“数据压缩”（data compression），即能用极少的信息来解释很多问题。一个好的科学理论，你从中得到的东西远多于你为之付出的努力。例如，我试着用标准的数据压缩软件把本章的草稿文档压缩了一下。软件根据我字里行间的规律和模式，将文档压缩到了1/3那么大。让我们把它和量子力学进行一下对比吧。我从网上下载了一个列表，包含超过20 000个光谱线，是世界各地的实验室经过艰苦的工作测定出来的。根据这些数字中所找出的规律和模式，薛定谔方程能将这些数据压缩到仅剩3个数字，分别是：所谓的精细结构常数 $\alpha \approx 1/137.036$（它赋予了电磁相互作用的强度）、一个大小为1 836.15的数字（代表质子质量是电子质量的多少倍）以及氢元素的轨道频率[26]。这相当于把整本书压缩为短短的一句话！

我将薛定谔视为我的物理学英雄之一。当我还在慕尼黑的马克斯·普朗克物理学研究所做博士后研究时，实验室的复印机每次都要花很长时间才能启动。在等待的时间里，我通常会从架子上抽出一本经典书籍来打发时间。有一次，我抽出了一本1926年的《物理学年鉴》，惊讶地发现，薛定谔发表于1926年的4篇论文几乎涵盖了我在研究生量子力学课堂上所学到的所有知识。我敬仰他，并不仅仅因为他很聪明，还因为他是一位自由的思想家——他敢于质疑权威，善于独立思考，并追寻自己认为正确的事情。当他得到柏林马克斯·普朗克研究所的教授职位（世界上最德高望重的职位之一）后，他放弃了这个机会，因为他无法忍受纳粹迫害他的犹太同事。接着，他又拒绝了普林斯顿大学抛出的橄榄枝，因为他们无法接受他离经叛道的家庭（他与两名女性同居在一起，并育有一个非婚生的孩子）。1996年，当我在奥地利滑雪时，曾去瞻仰过他的坟墓。我发现，他的自由思想在他的家乡也不怎么吃香——你可以看一下我拍的照片（见图6-4），那是阿尔卑巴赫（Alpbach）的一个小城镇，这位最有名的镇民被埋葬在一个十分简朴的坟墓里，并且位于公墓的边缘地带……

量子怪诞性

那么，这一切都意味着什么呢？薛定谔方程描述的这些波，究竟是什么东西？量子力学的谜语，直到今天也没有解开，人们依旧对此争论不休。

当物理学家用数学来描述某样东西时，我们通常需要分别描述两件事：

- 它在某一特定时刻所处的状态。
- 用来描述这个状态如何随时间而变化的方程。

比如，为了描述水星绕太阳旋转的轨道，牛顿用了6个数字来描述它的状态：3个数字用来描述水星中心点的位置（类似x、y和z坐标），另外3个用来描述3个方向上的速度[27]。对运动方程，他采用了牛顿定律：加速度由太阳对水星的万有引力决定，而万有引力与二者距离的平方成反比。

尼尔斯·玻尔在他的“太阳系”原子模型（见图6-5中图）中，引入了两个特殊轨道之间的量子跃迁，改变了上述第二部分的描述，但他保留了第一个部分。薛定谔则跨出了比玻尔更大、更彻底的一步，他连第一部分也改变了——他彻底摒弃了那个认为粒子必须具有精确位置和速度的观念！相反，他采用了一个崭新的“数学怪兽”来描述粒子的状态，这个怪兽就叫作“波函数”，记作Ψ，来描述粒子如何同时存在于不同的位置。图6-5右图展示了氢原子的电子位于n=3轨道时的波函数平方[28]，也就是$|\Psi|^2$；你可以看出，它并不存在于某一个特定的位置，而是分布在质子的各个方向，只不过在某些半径的概率大一些。在图6-5右图中，“电子云”在不同位置的强度相当于电子出现在这些地方的可能性。具体地说，如果你付诸实践来寻找电子，你会发现，波函数的平方就等于你在某处可能找到这个电子的概率。所以，一些物理学家喜欢把波函数看作是对“概率云”或“概率波”的描述。需要特别注意的是，你永远不可能找到一个粒子在某处的波函数等于零。如果你想在鸡尾酒会上伪装成一位量子物理学家，建议你一定要说一个词，那就是“叠加态”（superposition）——如果一个粒子同时位于此处和彼处，那它就处于此处和彼处的叠加态，它的波函数描述了关于这个叠加态的一切。

这种量子波与图6-6中所描述的那种经典波有着天壤之别。那种你可以在其中冲浪的经典波是由水组成的，波纹形成于水的表面。而氢原子中的“波”和“云”却不是水，甚至根本不是一种物质，那里只有一颗电子，只不过它的波函数像波浪一样起伏，向世界宣告它将如何出现在空间各处。

共识的崩塌

简而言之，薛定谔从两个方面改变了人们对世界的经典描述：

●一个粒子的状态是由波函数来描述的，而不是位置和速度。

- 这个状态随时间的改变是由薛定谔方程来描述的，而不是牛顿定律或爱因斯坦的定律。

人们把薛定谔的发现看作20世纪最伟大、最重要的成就，因为它深刻地变革了物理学和化学。但同时，它也让人们抓耳挠腮，困惑不已：如果一个物体竟然能同时出现在几个不同的地方，为什么我们从来没有观察到这个现象呢（喝醉时除外）？这个谜被称为“测量问题”（measurement problem，在物理学中，测量[measurement]和观察[observation]是同义词）。

在经过各方争议和讨论后，玻尔和海森堡想出了一个补救措施，被称为“哥本哈根解释”（Copenhagen interpretation），直到今天它依然出现在众多量子力学教科书上，受到大多数人的支持。这个解释最关键的一点是在上述第二条中加入了一个“后门”，假定薛定谔方程只在某些时候起作用，而是否起作用取决于是否存在观察者。具体而言就是说，**如果某个物体没有被观测，那么其波函数的变化是符合薛定谔方程的。但是，如果它正在被观察，那它的波函数就会坍缩，这样，你就会观察到它只位于同一个地方，而不是同时位于许多地方。**这个坍缩的过程是突然发生的，而且本质上具有随机性。与此同时，你观察到粒子位于某个特定位置的概率是由它波函数的平方决定的。这样，波函数坍缩就巧妙地逃脱了神经兮兮的叠加态，并能解释我们所熟知的、物体在同一时间只出现在同一个地方的经典世界（见图6-8）。表6-3总结了迄今为止我们所探讨过的量子概念以及它们之间的相互关系（希尔伯特空间和最后三个概念将在下一章里讲解）。



图6-8　波函数Ψ摇摇欲坠。

表6-3　主要的量子力学概念总结

相关概念	概念解释
波函数	一个描述物体量子状态的数学实体。一个粒子的波函数描述了它将如何位于空间中的不同位置
叠加态	一种量子力学的情况，在其中，某物同时处在不同的状态，比如，同时位于不同的位置
薛定谔方程	一个方程，可预测波函数在未来将如何改变
希尔伯特空间	一个抽象的数学空间，波函数就存在于其中
波函数坍缩	一个假想的随机过程，通过这个过程，波函数会违背薛定谔方程，发生急剧的变化，让我们能观测到确定的结果。如果波函数坍缩不存在，则暗示着存在休·埃弗雷特所说的第三层多重宇宙
测量问题	一个有争议的问题，关于在量子观测的过程中，波函数究竟发生了什么、它到底坍缩了没有？
哥本哈根解释	一系列假设，包括波函数被观测时会发生坍缩
埃弗雷特解释	一个假设，认为波函数永远不会坍缩，这暗示着存在第三层多重宇宙（见第 7 章）
退相干	一个源自薛定谔方程的“审查效应”。有了这个效应，叠加态变得不可观测，或者隐藏了起来。其结果是，在观测过程中，尽管波函数并没有坍缩，但看起来却似乎坍缩了
量子永生	一种观念，认为如果存在第三层多重宇宙，我们在主观上会认为自己是永生的。我认为量子永生是不存在的，因为时空的连续只是一个幻觉

哥本哈根解释还包含许多其他方面，但是上面所说的这部分是最广为接受的。我渐渐发现，我的一些同行们尽管欢呼雀跃地视哥本哈根解释为量子力学的最佳诠释，但却无法在其他方面达成共识，这让谈论哥本哈根解释变成了一件时髦的事。正如相对论先驱罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）嘲笑的那样：“对量子力学有许多不同的态度。这些态度数量之多，恐怕比量子物理学家的数量还多。这并不矛盾，因为许多量子物理学家同时持有多种不同的观点。”确实，关于哥本哈根解释究竟对现实世界的本质有何隐喻，哪怕是玻尔和海森堡的意

见都有些轻微相左。不过，不管怎样，那时所有物理学家都一致同意，哥本哈根解释与实验室的观测结果十分相符。

然而，并非所有人都为之兴奋。如果波函数坍缩真的会发生，这将意味着，自然规律中隐藏着随机性的本质。爱因斯坦内心深处对这个解释十分不悦。他认为宇宙不应该是随机的，而应该是确定的。为了表达他的偏好，他说出了那句著名的话，后来被广泛引用：“我不相信上帝会掷骰子。”毕竟，物理学的本质就是由现在预测未来。现在倒好了，物理学的预测功能不仅在实践中无法做到，甚至在理论上都行不通了。即使你聪明绝顶，并且将宇宙中的每一个波函数都谙熟于心，你也无法计算出这些波函数在未来会变成什么样，因为只要宇宙中存在观察者，波函数就会发生随机改变。

波函数坍缩还引发了其他方面的恐慌，比如，由于坍缩是由观测引起的，于是，观测这一动作被提升到了一个重要的位置。当玻尔大声疾呼“没有观测，就没有真实”时，似乎把人类又推回了中心地位。许多年以来，哥白尼、达尔文等科学家的研究逐渐抹去了人类的傲慢与自大，并对那些认为宇宙万物都围着我们旋转的人类中心论提出了警告。然而，哥本哈根解释却把我们引回了老路。在哥本哈根解释中，现实世界似乎是由人类创造出来的，而我们创造它的方法很简单，只需要看它一眼。

还有一些物理学家也十分烦恼，因为哥本哈根解释缺乏数学上的严谨性。传统的物理学理论都是由数学公式来描述的，而哥本哈根解释中却没有数学公式来定义究竟什么是观测，即波函数究竟会在何时坍缩。必须要有一个人类观察者才会引发波函数坍缩吗，还是更广义的意识也可以？正如爱因斯坦所问：“月亮会因为一只老鼠看了一下天而存在吗？”那么，机器人会引发波函数坍缩吗？网络摄像头呢？

关不住的怪兽

不严格地讲，量子力学的哥本哈根解释告诉我们，微小的事物行为怪异，但较大的事物却很正常。具体地说是指，原子那么小的物体通常会同时出现在几个不同的地方，但是像人这样宏观的物体却无法做到这一点。抛开上面所谈的那些问题不说，这种说法确实站得住脚，只要量子的怪诞性像瓶中之妖一样被限制在微观世界，不偷偷溜进宏观世界大搞破坏就行。但是，它真的被囚禁起来了吗？

还记得本章开头，我在斯德哥尔摩那间宿舍里复习量子力学吗？那时候，有一件事一直困扰着我，那就是，宏观的物体也是由原子组成的，既然原子可以同时出现在几个不同的地方，那宏观的物体应该也可以才对。但是，有能力做某件事并不意味着这件事一定会发生。你可能会认为，宏观物体之所以没有同时出现在不同的地方，是因为不存在某种可将微观怪诞性放大和传递到宏观世界的物理过程。为了打破这种观点，薛定谔设计出了一个恶魔般的思想实验——薛定谔的猫。

> 薛定谔的猫被关在一个盒子里，盒子里有一罐氰化物，罐子的开关与一个放射性原子相连，如果这个放射性原子发生衰变，罐子就会打开，释放出氰化物，杀死猫。实验开始后不久，这个原子将处于衰变和未衰变的叠加态，使得猫处于死去和活着的叠加态。换句话说，单个原子的微观叠加态似乎并没有造成什么影响，但在这个思想实验中，它却能被放大成宏观的叠加态，影响一只由10^{27}个粒子组成的猫，让它同时处在两个状态。另外，即使没有薛定谔的毒气装置，这种叠加态放大的过程也每时每刻都在发生。

你也许听说过混沌理论（chaos theory）——在经典物理定律的作用下，轻微的差异也可以被指数级地放大，比如北京的一只蝴蝶扇动了一下翅膀，结果引起了斯德哥尔摩的风暴。再举一个更简单的例子，一支铅笔直立在桌上，保持着平衡，但初始状态中的微小扰动却

决定了它最终倾倒的方向。混沌动力学能发挥作用，正是因为某个原子的初始状态影响了整个系统，从而走向完全不同的道路。所以，如果原子同时位于两个位置，那么宏观物体也应该同时位于两个地方才对。

这种怪诞性的放大在量子观测过程中肯定会发生。如果你观测到一颗原子同时处于两个位置[29]，并把这两个位置记录在一张纸上，那么，原子的位置就能决定你手部的运动，进而让你手中的铅笔也同时位于两个地方。

还有一个不可忽略的事实是，这种怪诞性的放大通常也会发生在你的大脑中。在某一特定时刻，一个特定的神经元是否会被激活，取决于输入它的信号总和能否超过某一个阈值。所以，神经网络也像前面所说的蝴蝶效应和平衡铅笔一样不稳定。

> 本书前面也讲过类似的事——我骑着自行车上学，来到那个路口，正要决定是否向右看。假设在那千钧一发的瞬间，在我的前额叶皮层中，一个钙原子进入了一个特定的突触间隙，激发一个特定的神经元发射出电信号，从而触发了一连串的神经元活动，最终在我脑海中形成一个念头：“向右看看吧！”那我的小命就保住了。但是，假设那一瞬间，那颗钙原子同时出现在两个略有差异的位置，半秒钟后，我的小伙伴们就会看见我同时向两个相反的方向骑去。不久之后，我就会同时出现在两个不同的地方，其中一个我会躺在太平间里。这简直就是一个薛定谔猫的人类版本，只不过把那只猫换成了我……

量子力学的困惑

再次回到我女朋友位于斯德哥尔摩的宿舍里。在量子力学面前，我陷入了深深的困惑和沮丧。现在你知道原因了吧。我的第一门量子力学课就要考试了。教科书告诉我，哥本哈根解释就是绝对的事实真相，可是我越想越迷惑。量子怪诞性肯定不会被局限在微观世界，薛定谔的猫已经向我们泄露了这个秘密。我并不在意怪诞性本身，当时

萦绕我心头的问题是：假设你真的能把薛定谔的猫付诸实验，会发生什么事呢？如果教科书是正确的，你只需要打开盒子往里面看一眼，就在你瞥见的一瞬间，猫的波函数就会坍缩，此时它只有一种确定无疑的状态：要么死了，要么活着。

不过，假如此时我正站在你的实验室外，让我们来考量一下那个能描述实验室里所有粒子的波函数吧，这个波函数不仅描述了猫身上的所有粒子，还涵盖了组成你和实验室里所有设备的粒子。这些粒子当然都会遵循薛定谔方程，不管它们是不是位于鲜活的生命身上。在这种情况下，按照教科书的说法，只有当我亲自进入到实验室观察那只猫时，猫的波函数才会坍缩，而不是在之前你进行观察时。此时，在我进入实验室看到你之前，你处于一个叠加态，其中一个你正为杀死了猫而懊恼，另一个你则因为猫还活着而松了一口气。也就是说，即使在最好的情况下，哥本哈根解释也是不完备的，无法回答波函数究竟在何时坍缩。而在最坏的情况下，它是自相矛盾的，因为在一个遥不可及的平行宇宙居民眼里，我们整个宇宙的波函数永远不会坍缩，因为这个居民永远无法观察到我们。

那么，让我们一起进入下一章的探险吧！我们将一起探索量子力学究竟诉说着真实世界的哪些本质。也许，我们瑞典人从骨子里就喜欢批评西南方的邻国，但是，每当我想到哥本哈根解释时，脑子里就回响起《哈姆雷特》中的那句名言：“丹麦正在发生不可告人的坏事。”



◆一切事物都是由粒子组成的，包括光和人。

◆这些粒子都是纯粹的数学对象，因为它们所具有的所有内禀性质都是数学性质——数字。只不过这些数字拥有各自不同的名字，比如电荷数、自旋和轻子数。

◆这些粒子并不遵循经典物理学的定律。

◆从数学上来说，这些粒子（或许应该叫“波粒子”更准确）的状态无法用6个代表位置和速度的数字来描述，而应该用波函数来描述它们如何位于空间中的不同位置。

◆这既赋予了它们传统粒子的性质（不在此处，就在别处），又赋予了它们波的性质（以所谓的“叠加态”的形式同时位于多个不同的地方）。

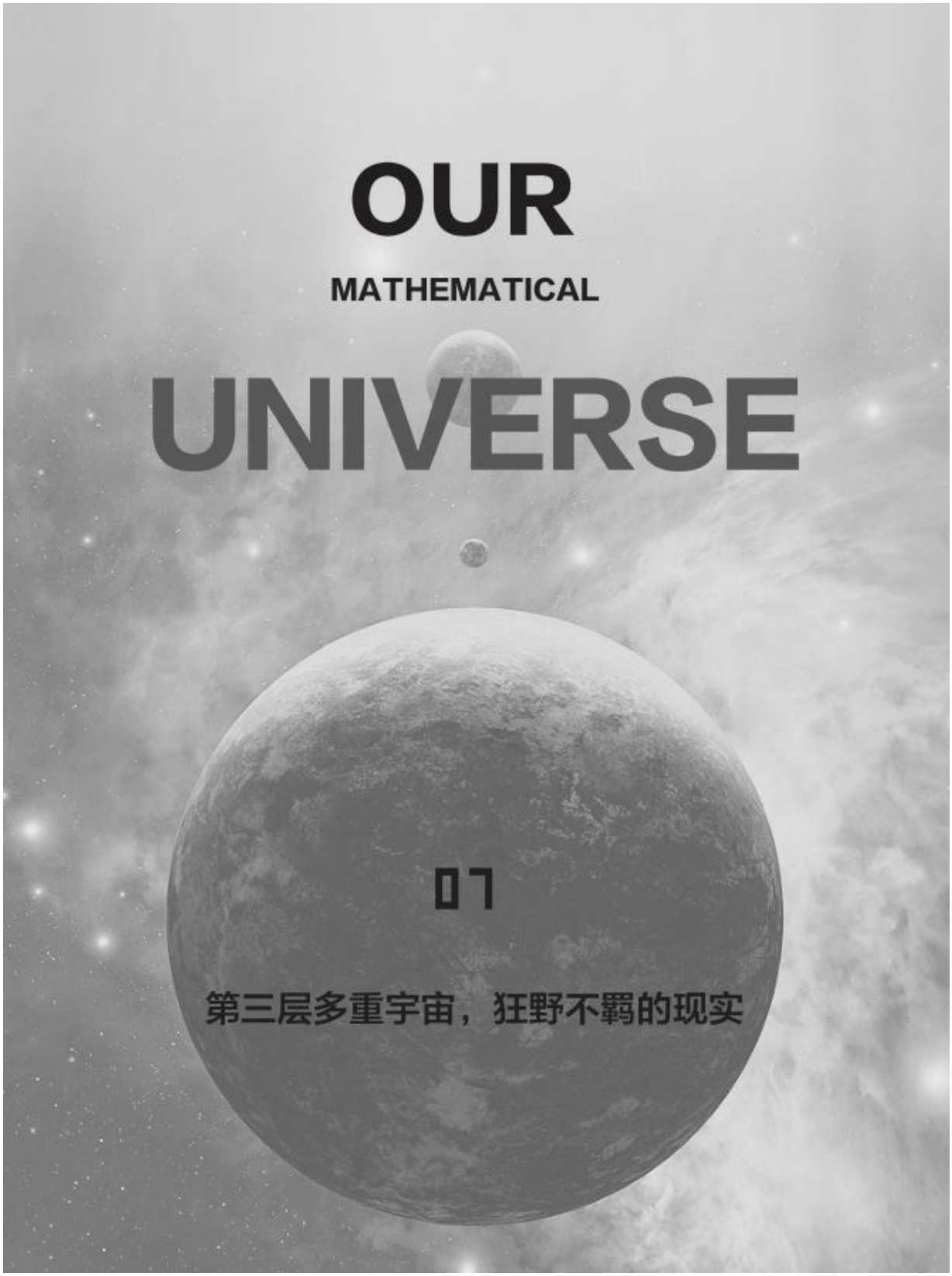
◆粒子不能被局限在一个地方（海森堡不确定性原理），这阻止了原子的坍缩。

◆粒子未来的行为不是由牛顿定律描述的，而是由薛定谔方程描述的。

◆薛定谔方程表明，看似影响甚微的微观叠加态也可以被放大成疯狂的宏观叠加态，比如薛定谔的猫。你自身也同样如此，因为你有可能同时位于两个不同的地方。

◆教科书上假定波函数有时会发生坍缩，从而违背薛定谔方程，并把随机性深深植入自然的本质中。那这一切究竟意味着什么？物理学家对此争论不休。

◆教科书对量子力学的解释要么不完备，要么前后矛盾。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
07
第三层多重宇宙，狂野不羁的现实

如果你走到了三岔路口，择一前行吧。

尤吉·贝拉（Yogi Berra）

“哇！下面真是太美了！”在夕阳的照耀下，旧金山湾区闪烁着明媚的光芒。看到这样的美景，我欣喜若狂，甚至比收到父母送我的第一套魔术道具时还兴奋。我简直像黏在了飞机窗户上，想要一眼辨认出所有著名的地标。17岁时，我曾靠卖奶酪赚到了一笔旅费，坐着火车去西班牙玩了一趟。从那时起，我就深深地爱上了旅游。由于在大学里读了费曼的大作，我又深深爱上了物理学。在冰雪中生活了23年后，如今我终于有机会花整整4年时间来践行我最爱的这两件事！而且还是在我心目中全世界最酷的地方，这里是探索疯狂念头的绝佳场所。

在幸运女神的眷顾下，我被加州大学伯克利分校的物理学专业录取，来读研究生。不管从哪方面讲，这4年的经历都完全没有辜负我那看似难以企及的过高期望。我发现，伯克利是一个鼓舞人心、不拘一格、自由自在的地方，与我的期待十分契合。我刚到学校的第二天，就找了一个来自澳大利亚的女朋友。我还发现，出生在一个很多人在地图上都找不到的国家有一个好处：我的国籍让我可以肆无忌惮地释放自己的疯狂，很快，我便获得了一个昵称“疯狂的迈克斯”，但很快我又甩掉了这个昵称——人们可能觉得，瑞典人平常或许都这么疯疯癫癫的吧！我的国籍让我根本无须为自己的行为找借口，来看看我

身边的同学吧：一个住在街对面的同学上课时总是全裸，学校只好把他开除，结果弄得满城风雨；一个常和我一起做物理作业的同班同学出演了色情片，因为他要赚钱交学费；一个在国际公寓里住我对门的家伙被拘留了，因为他身上带着一把枪，外加一张“杀人名单”[30]。在这样的环境中，如果你的怪异之处只是表现得像个瑞典人，或者总是提出奇怪的物理学观点，那你很快就能融入其中了。

高中时，我曾受到好友马格努斯·博丁（Magnus Bodin）的启发。他是一个特立独行的人，拥有与众不同的人生哲学。比如，所有人都把信封叠成长方形，他却偏要叠成三角形。从那时起，每当我看到众人步调一致地做事时，就本能地想寻找不同的方法。比如研一的时候，我班上所有的同学都在电磁学作业上花了大量时间，所以我就和教授谈了谈，请他让我免做作业，改在课程结束时接受口头答辩。与此同时，为了满足我的好奇心，我在图书馆里废寝忘食地学习各种各样奇妙的物理学知识，而这些知识在教科书上都找不到踪影。这样的学习方式让我获益良多（直到今天也是如此），也让我更自由地去研究课外的话题。

人生中第一次，我遇到了一群与我一样沉迷于疯狂物理学问题的朋友。与这些相似的灵魂在一起，我们常通宵达旦地揣测真实世界的终极本质。贾斯汀·本迪斯（Justin Bendich），他那不修边幅的外表总让我想起动画片《史酷比》（*Scooby-Doo！*）里的夏奇（*Shaggy*）。他就是一个信息的金矿，对我最古怪的问题也能给出发人深省的答案。比尔·波里尔（Bill Poirier）则沉醉于信息论，我和他一起用炫酷的信息论方法对海森堡不确定性原理进行了改进，这让我们兴奋至极，直到我在图书馆里找到了一篇有关的论文，才发现原来早已经有人做过。和这些有趣的灵魂在一起，我觉得自己我是地球上最幸运的人——我找到了自己真正想做的事情，并且正将全身心地投入其中。

隐身于希尔伯特空间

我的新老师也同样善于启发人的灵感。从尤金·康明斯（Engune Commins）那里，我学了更多关于量子力学的知识。他的冷幽默为黑板上满满当当的枯燥公式注入了生命力。有一次，我举起手问道：“这是不是就像把苹果和梨加起来？”这是一个很常见的瑞典比喻。“不，”他回答道，“这就像把苹果和橘子加起来。”

在尤金为期一年的课程中，他教会了我许多有用的技术工具，但这些工具却无法回答那个焦灼着我内心的量子力学问题。实际上，它甚至无从发问，只留我一个人独自面对。量子力学是自相矛盾的吗？波函数真的会坍缩吗？如果真的会，那是什么时候？如果不会，那为何我们眼里的万物不会同时位于两个地方呢？量子力学里的随机性和概率又从何而来呢？

我听说，早在1957年，普林斯顿大学的研究生休·埃弗雷特三世曾为此提出过一个激进的答案：平行宇宙。我对个中细节非常好奇，但这个理论却被众人忽略，在课堂上也绝少被提及。尽管我遇到过一些听说过这个理论的人，但却没有人真正读过埃弗雷特那篇与平行宇宙有关的博士论文，这篇论文从此被埋没在一本早已绝版的书里。关于这本书，我们的图书馆里只有一个非常简略的版本，其中对平行宇宙理论只是一笔带过，根本没有讲清楚。终于，1990年11月，我的搜寻迎来了曙光，我总算找到了那本失落已久的书。恰如其分的是，我是在伯克利的一家专门卖激进出版物的书店里找到它的。那家书店里，你还能找到诸如《无政府主义者的食谱》（*The Anarchist’s Cookbook*）这样的书。

埃弗雷特的博士论文让我始料不及。犹如醍醐灌顶，我突然间什么都明白了！埃弗雷特也曾为那些困扰着我的问题而心神愁闷。但是，他并没有偃旗息鼓，而是努力推进，探索所有可能的解释，由此

发现了非凡的秘密。当你脑子里冒出一个离经叛道的想法时，你很可能会对自己说“这当然是行不通的”，并把它抛到九霄云外。但是，如果你肯再花一点时间，想得更深入一些，问问自己“为什么行不通”，并苦苦追寻一个逻辑严密的答案，那你很可能正在接近某些举足轻重的大事件。

那么，埃弗雷特的激进想法到底是什么？出人意料的是，它可以用一句非常简单的话来概括：**波函数永远不会坍缩，从来都不会。**

也就是说，不管在什么时候，不管有没有观察的动作发生，那个描述我们宇宙的波函数都在发生着明确的变化，永远遵循着薛定谔方程。所以，薛定谔方程毋庸置疑占领了至高无上的地位。这意味着，你可以把埃弗雷特的理论看成“量子力学简化版”，对教科书上讲的知识，你只需要抛弃那些与概率和波函数坍缩有关的假设就好了。

这让我大为吃惊，因为我之前听说的流言称，埃弗雷特假想出了某些听起来十分疯狂的念头，比如平行宇宙，每当你进行一次观察，我们的宇宙就会分裂成若干个平行宇宙。实际上，一直到今天，我的许多同行们都还以为这就是埃弗雷特的理论。读埃弗雷特的书教会了我两件事，一件是物理学，另一件是社会学。我认识到，亲自去读一读原始资料是多么重要，仅仅依靠二手信息则会让人误入歧途。人们被误解、误传和错误引用的事情不仅发生在政治领域，还发生在其他领域，埃弗雷特的博士论文就是一个绝佳的例子。当时，物理学领域的几乎所有人对它都有自己的看法，但却几乎没有人真正把原文找来读一读[31]。

我废寝忘食地读着埃弗雷特的书。他的逻辑十分美妙，他根本没有假设出那些听起来疯狂的东西，它们只是随假设而来的结果而已！一开始，它听起来过于简单，仿佛根本行不通。毕竟，尼尔斯·玻尔和他的合作者们都是聪明人，他们并非凭空捏造出波函数坍缩的想

法，而是为了用它来解释为何实验看起来有确定的结果。但是埃弗雷特意识到了某些令人惊讶的事情：**即使实验并没有确定的结果，它也会看起来好像真的有！**

图7-1展示了我对这个问题的看法。我称这个实验为“量子扑克牌”（Quantum Cards）：你拿起一张下边缘极其锐利的扑克牌，把它完美地竖立在桌子上，并赌100美元它倒下时会正面朝上。接着你闭上眼睛，等你听见扑克牌倒下的声音时，才能睁开眼睛查看结果。根据经典物理学，它会永远保持完美的平衡状态[32]。但是根据薛定谔方程，不管你做得多么完美，扑克牌都会在很短的时间内倒下，因为海森堡不确定性原理说，物体不可能保持在同一个地方一动不动（此处指保持竖直状态）。由于初始状态是左右对称的，最终状态也应该如此。这意味着，扑克牌将同时向左右两个方向倒下，处于这两个状态的叠加态。

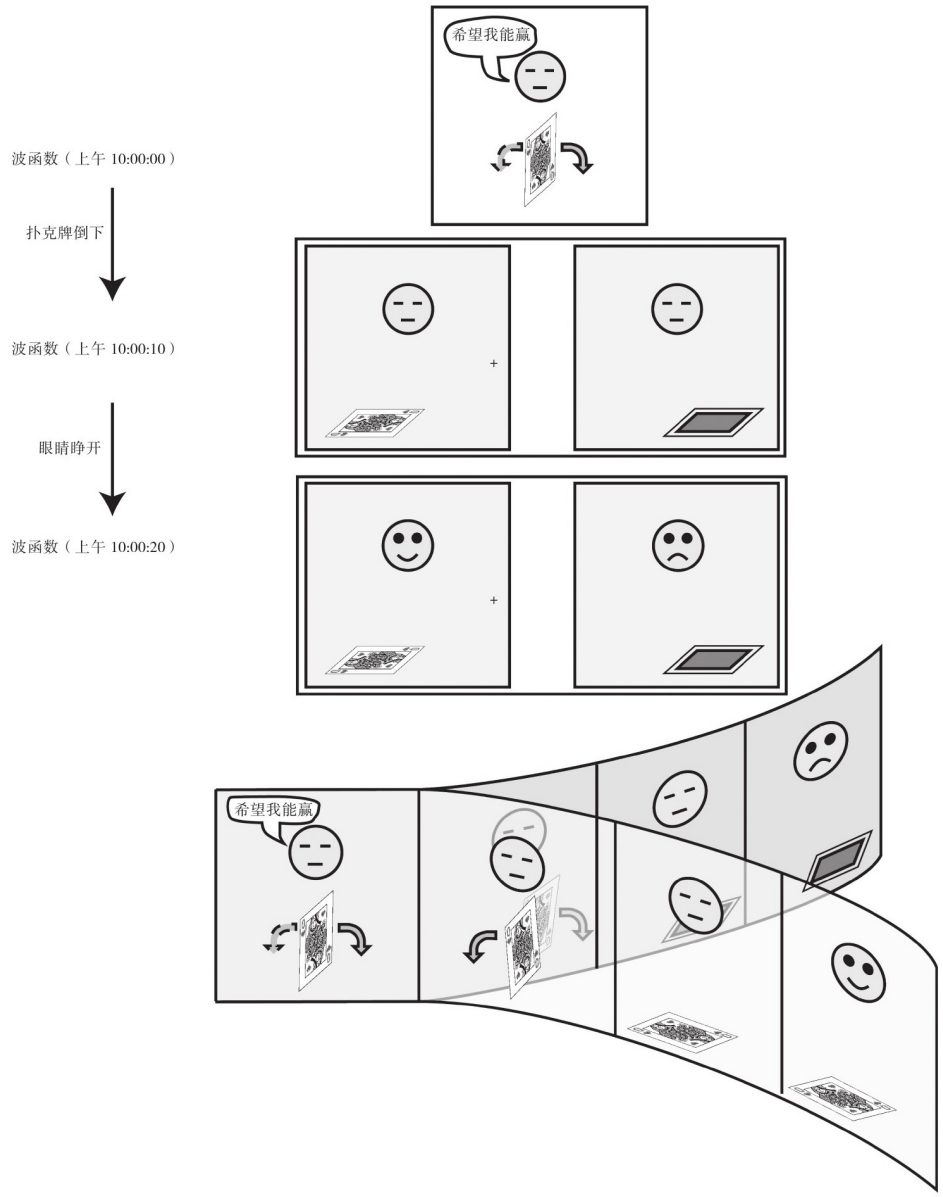


图7-1　“量子扑克牌”思想实验：在上午10：00，你将一张扑克牌竖立在桌子上，赌100美元它倒下时会正面朝上，然后闭上眼睛。10秒后，扑克牌处在同时向左和向右倒下的叠加态，所以，波函数描述了扑克牌同时处于两个地方。10秒后，你睁开眼睛，查看扑克牌，此时，波函数描述了你同时处在高兴和沮丧两个状态。尽管依然只存在一个波函数和一个量子实在（在其中，组成你和扑克牌的粒子同时处在两个不同的地方），埃弗雷特意识到，这实际上好像我们的宇宙分裂成了两个平行宇宙（下图），每个平行宇宙中都有着确定的结果。

当你睁开眼，查看扑克牌时，你就进行了一次观测。那么，根据哥本哈根解释，波函数将在此刻坍缩，你会看见扑克牌要么正面朝上、要么正面朝下，每种结果的概率为50%。于是，你有可能喜笑颜开地拿走100美元，也可能会懊悔自己竟然为这个可恶的物理实验浪费了整整100块钱。根据哥本哈根解释，物理定律无法预测究竟会发生哪种结局，因为它具有内在的随机性。

然而，埃弗雷特怎么说呢？**在埃弗雷特看来，观察并不具备神奇的能力：它只是一个普通的物理过程，和其他过程没什么两样，但它拥有一个特点，即信息传递。在这个例子中，信息从扑克牌传递到了你的大脑。如果波函数让扑克牌正面朝上倒下，你就会很开心，反之亦然。**将这些事实与薛定谔方程结合起来，他很容易就计算出了波函数究竟发生了什么事——它会发生改变，变成描述一个叠加态，这个叠加态由两个状态叠加而成，每个状态对应扑克牌和你身上所有粒子的一种配置方式：一个是扑克牌正面朝上然后你很开心，一个是正面朝下所以你很失望。以下是三个关键点：

- 这个实验让你的思维同时处在两种状态。本质上说，这类似薛定谔的猫，只不过把猫换成了你，但是该实验并不会让你像薛定谔的猫一样丧命。
- 这两个思维状态完全意识不到彼此的存在。
- 你的思维状态与扑克牌的状态相连，这样，万事万物都是一致的。（即波函数并不会描述一个“扑克牌正面朝下而你却看见正面朝上”的粒子配置。）

薛定谔方程将让事物的发展保持连贯一致，这一点很容易证明。比如，你正在做量子扑克牌实验时，你的损友恰好走进房间问你在干什么。此时，所有粒子（包括扑克牌、你和你朋友身上的所有粒子）的状态都被演变成了一个叠加态，分别是“扑克牌正面朝下/你很沮

丧/你朋友安慰你”和“扑克牌正面朝上/你很开心/你朋友向你借钱”。

将这些综合在一起，正如图7-1所展现的那样，埃弗雷特意识到，尽管只存在一个波函数和一个量子实在（在其中，我们宇宙中的许多粒子都同时处在两个位置），但这一切看起来就好像我们的宇宙分裂成了两个平行宇宙一样！**实验结束的时候，将出现有两个不同版本的你，每一个你主观上都觉得很真实，但对另一个你的存在毫不知情。**

想到这里，我的脑袋开始天旋地转，因为量子扑克牌实验只是微观量子怪诞性被放大到宏观世界的一个小小的例子。我们在上一章曾讨论过，这种微小差异被放大到宏观世界的过程每时每刻都在发生。比如，一次宇宙射线粒子的撞击可能引发或未引发某人的癌变，今天的大气条件可能演变或不会演变成明年的一场4级飓风，还有当你通过神经元进行决策的过程中发生的种种。

也就是说，平行宇宙的分裂持续不断地在进行着，使得量子平行宇宙的数量多得令人眼花缭乱。由于这种分裂从大爆炸的时刻就开始了，很有可能，你所能想象到的所有宇宙历史都已经在量子平行宇宙中变成了现实，只要它们不违反物理定律就行。这样一来，平行宇宙的数量，远远大于我们的宇宙中所有砂砾的数目。简而言之，埃弗雷特告诉我们，如果波函数永不坍缩，那么我们所感知到的熟悉的现实世界只是冰山一角——这座存在论的冰山极其庞大，由数不胜数、真实存在的量子实在构成。

可能你还记得，我们在第5章里讲到过另一种平行宇宙。为了防止混淆，先让我们来复习一下第5章讲过的概念。当我提到“我们的宇宙”时，我指的是一个球形空间区域，球面上发出的光线在大爆炸140亿年后能够到达我们，我们观测到了它的一些经典性质（有哪些星

系、分布在什么地方、有怎样的历史，诸如此类）。在第5章里，我们讲到，在我们的球形空间区域之外，在广袤无垠的空间中，在遥不可及的地方，还存在着其他球形空间区域，根据它们与我们的有效物理定律相同或不同，把它们称为第一层平行宇宙或第二层平行宇宙。

现在，让我们把埃弗雷特发现的量子平行宇宙称为“第三层平行宇宙”，所有的第三层平行宇宙组成了“第三层多重宇宙”。这些平行宇宙在何处呢？**第一层和第二层平行宇宙虽然与我们相去甚远，但终究都位于我们所熟悉的三维空间中，但是，对于第三层平行宇宙来说，如果考虑到三维空间的话，它就位于此处，而并非远在他乡。**它与我们的分离发生在所谓的“希尔伯特空间”（Hilbert space）中，这是一种抽象的空间，拥有无限多的维数，波函数就栖身于其中[33]。埃弗雷特关于量子力学的观点几乎被完全忽视了，直到10年后，著名量子引力理论家布莱斯·德维特（Bryce DeWitt）发掘了这个理论，并将它变得流行起来。他把这个理论称为“多世界诠释”（Many Worlds interpretation），这是个有点儿拗口的名字。

> 后来，我见过布莱斯，他告诉我，他一开始向休·埃弗雷特抱怨说，尽管他喜欢埃弗雷特的数学方法，但直觉上很难接受，因为他没法感觉到自己不断分裂成许多个自己。他告诉我，埃弗雷特用一个问句来回答他：“那你能感觉到自己以每秒30公里的速度绕着太阳旋转吗？”“讲得好！”布莱斯大喊一声，并乖乖认输。

经典物理学同时预测了两个事实：我们正在围着太阳转；我们丝毫感觉不到这件事。与之类似，埃弗雷特告诉我们，永不坍缩的量子物理学也同时预测了两个事实：我们正在分裂；我们丝毫感觉不到这件事。

有时候，我的信念与感觉很难统一。时间快进到1999年5月，我正在等待第一个儿子的降生。我感到很紧张，希望妻子分娩一切顺利。但是，在同一时刻，我所相信的物理学却说服我，幸运和不幸的结果

将同时存在于不同的平行宇宙。在这种情况下，我所谓的“希望”又意味着什么呢？或许，我是在希望我自己出现在一切顺利的那个平行宇宙中？不，这是废话，因为我将同时出现在所有的平行宇宙中，在一些平行宇宙中，我会欣喜若狂，而在另一些平行宇宙中，我会伤心欲绝。或许，我希望的是在所有平行宇宙中，分娩都会一切顺利？不，这也是废话。因为顺利的可能性本质上是可以用薛定谔方程计算出来的，对一件事先已经决定好的事情抱以希望并不符合逻辑。但是很明显，或许也很幸运，我的情感并不完全符合逻辑。

随机性的幻觉

我还有更多问题。大家都知道，如果你重复做一个量子实验，那么一般来说，你会得到看似随机的不同结果。比如，有一些以相同的方式预先准备好的原子，你要测定它们的自旋方向，结果你会得到一系列看似随机的结果，比如，“顺时针”“逆时针”“顺时针”“顺时针”“逆时针”等。**量子力学不能预测你的实验结果，只能预测不同结果出现的概率。**但是，这种与概率有关的说法，来源于哥本哈根解释的波函数坍缩假设。那么，在埃弗雷特眼里，量子力学为什么会出现随机性呢？其实，根据薛定谔方程，根本不存在随机性这种东西——如果你知道我们宇宙此时此刻的波函数，本质上来说，你就能预测出未来任何时刻的波函数。

1991年秋天，我报名参加了一门不寻常的课程，由我的研究生同学安迪·埃尔比（Andy Elby）讲授量子力学的各种诠释。他的宿舍曾经就在我女朋友宿舍的隔壁，宿舍门上经常装饰着一些有用的建议，比如“7个步骤让你变拖延”。和我一样，埃尔比也对量子力学的真正含义十分着迷。在课程中，他请我讲了两堂课，主题就是埃弗雷特的研究。这是我人生中一个激动人心的时刻，因为这是我第一次演讲物理方面的内容。

演讲中，我花了很长时间来讲埃弗雷特对随机性的解释。首先，如果你做了量子扑克牌实验（见图7-1），两个版本的你（在各自的平行宇宙中都是有效的）都会看见一个确定的结果。两个你都会感到结果是随机的，因为没办法进行预测——不管你预测到什么结果，在另一个同样真实的平行宇宙中，都有可能产生相反的结果。

那又如何解释概率问题呢？它们从何而来？如果你重复做这个实验4次，你将会得到2^4=16种结果（见图7-2）。在绝大多数情况下，你会觉得正面朝上还是朝下似乎是随机发生的，概率大约都为50%。只有在两种情况中，你会得到4次相同的结果。如果你一次又一次地重复这个实验，结果会变得很有趣。根据法国数学家埃米尔·波莱尔（mile Borel）在1909年提出的定理，如果你将这个实验重复无数次，那么在绝大多数情况下，你都会观察到扑克牌正面朝上的概率为50%（除了数学家称为“零测度集”之外的所有情况）。在最终的叠加态中，几乎所有版本的你都会因此总结说：尽管内在的物理定律（薛定谔方程）一点儿也不随机，但实验却符合概率的规律。

也就是说，在一个典型的平行宇宙中，某一个版本的你主观上会认为输赢序列似乎是随机的，就像从两种结果的概率均为50%的一个随机过程中抽取出来的一样。这个实验可以被设计得更严格一些。你将赢记作“1”，将输记作“0”，并在这个数列前加一个小数点。比如，如果你的实验结果分别是输、输、赢、输、赢、赢、赢、输、输、赢，那你就在纸上写下“.010 101 010 1……”。这正是0到1之间的实数用二进制的方式写出来的样子，也是计算机写入硬盘的方式。如果你想象一下，将这个量子扑克牌的实验重复无数次，你的纸上将记录下无数多个小数位，所以你可以用一个0到1之间的数字与相应的平行宇宙配对。

波莱尔的定理证明，几乎所有这些数字都有50%的小数位等于0、50%的小数位等于1。这意味着，在几乎所有平行宇宙中，你都会赢50%、输50%。[34]然而，并非只要比例刚好就能被称为随机。来看一个数字“.010 101 010 1……”，它有50%的小数位等于0，但明显不是随机的，因为它的模式很简单。于是，波莱尔的定理可以推而广之为——几乎所有数字的数位都是看似随机的，并且不存在任何一种模式。这意味着，在几乎所有第三层平行宇宙中，你的输赢序列也是完全随机的，没有任何模式，所以，唯一能预测的事情就是：你赢的次数占50%。

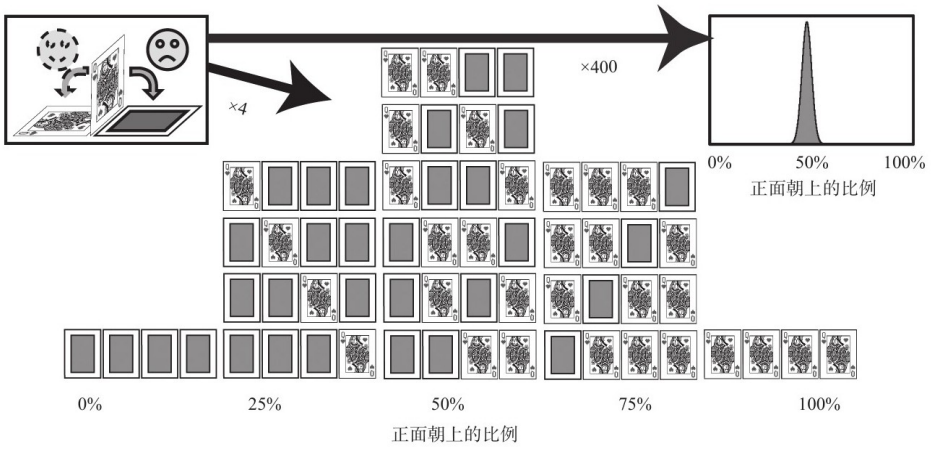


图7-2　量子概率的来源。根据量子力学，一张完美直立的扑克牌会同时倒向两个不同的方向，称为叠加态。如果你赌它倒下时正面朝上，那么世界的状态将会变成两种结果的叠加态：一种是正面朝上并且你很开心，另一种是正面朝下并且你很沮丧。每一种状态中的你对另一种状态的存在都毫不知情，并觉得扑克牌是随机倒下的。如果你重复4遍实验，将会有2×2×2×2=16种结果。在这些结果中，大多数情况里，你都会认为正面朝上或面朝下是随机发生的，概率都为50%。在这16种结果中，只有在两种情况中，你会获得4次相同的实验结果。如果你重复做400次实验，就会有2^{400}种结果，大多数结果中，正面朝上的概率都接近50%。根据一个有名的理论，如果你将这个实验重复做无数次，那么你观察到正面朝上的概率极限为50%。在最终的叠加态中，绝大多数版

本的你都会因此总结说，尽管内在的物理定律一点也不随机，但实验符合概率的规律。正如爱因斯坦所说：“上帝不掷骰子。”

我渐渐被震撼了，这种随机性的幻觉并不只是量子力学的专属。假设某种未来科技可以在你睡觉时对你进行克隆，之后，两个你被分别放置在标着“0”和“1”的房间里（见图7-3）。醒来时，他们都会觉得房间号完全是随机的，根本没法预测。如果某种科技可以把你的意识上传到计算机中，那么我在此说的话在你看来将是显而易见和符合直觉的，因为克隆你和拷贝你的意识都一样容易。如果你将图7-3中的克隆实验重复许多次，并且每次都写下你的房间号，在绝大多数情况下，你都会觉得你写下的0和1序列看起来是随机的，其中0占50%，1也占50%。

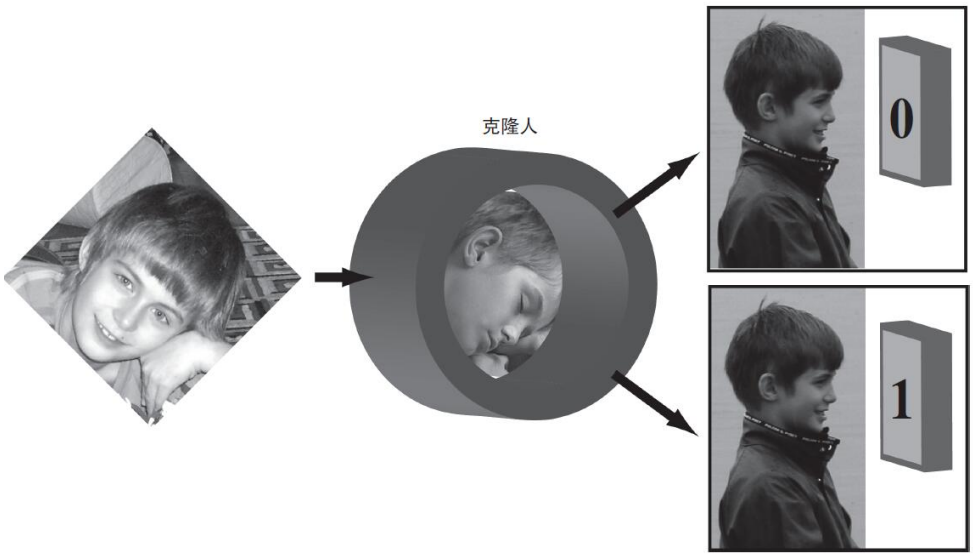


图7-3　每次你克隆自己时，都会经历一次随机性的幻觉，所以，这里其实并没有量子力学什么事。如果某种未来科技可以在我儿子菲利普睡觉时克隆他，然后把他的两个版本分别放入标着“0”和“1”的房间里，他们醒来后都会觉得房间数是完全随机和不可预测的。

也就是说，每当你被克隆一次，因果的物理过程都会在你的主观意识中产生随机性的幻觉。既然波函数的演变是事先决定好的，那为什么量子力学还是看起来很随机呢？根本原因就在于，薛定谔方程让波函数发生了演变，将一个单个的你，演变成了众多平行宇宙“克隆人”中的其中一个。

那么，被克隆时有何感觉呢？有随机的感觉！每当你身上发生了一件似乎本质上是随机的、不可预测的事情，这就是一个征兆，说明你可能已经被克隆了。

休·埃弗雷特的研究依然饱受争议，但我认为他是正确的，波函数永不坍缩。我还认为，总有一天，他会被公认为一位与牛顿和爱因斯坦平起平坐的天才，至少在大多数平行宇宙里会这样。不幸的是，在当前我们所在的这个平行宇宙里，他的研究几乎被遗忘和忽视了十多年。他在物理学领域内找不到工作，变得潦倒、孤僻、嗜烟酗酒，在1982年死于早期心脏病。

最近，我对埃弗雷特的了解越来越多，因为我在电视纪录片《平行宇宙，平行生命》（*Parallel Worlds, Parallel Lives*）的拍摄期间认识了他的儿子马克·埃弗雷特（Mark Everett）。制片人希望我向他解释他父亲的研究，我感到由衷的幸运和荣耀。当我站在伯克利那间激进书店里寻找那本书时，我无论如何也想不到，有一天我能和我的这位物理学英雄之间产生个人联系。马克是一名摇滚明星，如果你看过《怪物史莱克》，你一定听过他的歌（见图7-4）。他父亲的命运让家庭饱受折磨，你能在他的许多歌曲中听到这一点。尽管他和姐姐同父亲住在一起，但他们和父亲之间几乎没有任何交流。马克的姐姐后来自杀身亡，留下一份遗书，说她将去往平行宇宙与父亲团聚。

由于我相信休·埃弗雷特的平行宇宙真的存在，我忍不住想知道它们是什么样的。在我们这个宇宙，埃弗雷特被普林斯顿大学物理系拒绝，转而去了数学系读研究生，一年后才转学到物理系。由于他的时间很紧张，只做了一些量子方面的研究。我想，在其他平行宇宙里，也许他一开始就被普林斯顿大学物理系录取了，这样他就有足够的时间先在主流研究中留下自己的烙印，随后的量子力学研究也就不会这么容易被忽视了。这将为

他开启一段与爱因斯坦类似的职业生涯——爱因斯坦的狭义相对论一开始也同样受到铺天盖地的质疑（尤其是因为他并非职业物理学家，而是学术圈的局外人，一名普通的专利局职员），但却并未被忽视，因为爱因斯坦此前的发现已经为自己赢得了名誉。爱因斯坦从此跻身于学术界，继续发现了广义相对论。与爱因斯坦一样，埃弗雷特也有能力成为教授级别的中流砥柱，作出更多和他第一个发现一样的突破和进展。啊，我多想知道，在那些平行宇宙里，他后来又发现了什么奇妙的东西……

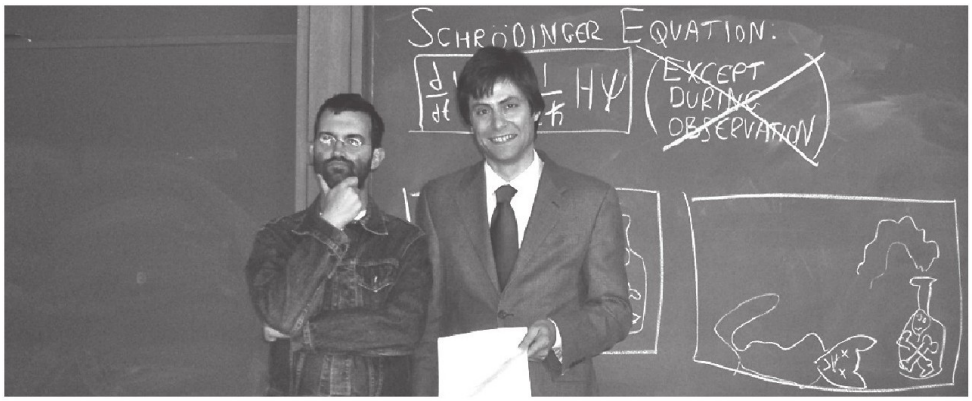


图7-4　休·埃弗雷特的儿子马克是一个摇滚明星，这张照片拍摄于2007年，当时我和他一起在探索他父亲的研究工作。

有一件事，我觉得埃弗雷特一定会喜欢参与。那是2001年8月，在马丁·里斯位于剑桥大学的家中，他召集了一帮顶尖物理学家，召开了一场非正式的会议，主题正是平行宇宙以及相关话题。对我来说，这是平行宇宙第一次得到了科学界的尊重（尽管依然饱受争议）。我想，许多人看见其他参会者都有谁之后，一定放下了心理包袱，不再因自己拥有这样怪异的兴趣而感到内疚和尴尬，并开始相互打趣，比如，“你来这个可疑的会议干什么”。在一场关于平行宇宙的讨论会中，长时间的精神高度集中让大家都很紧张，我突然意识到，许多分歧其实只是由粗糙的语言引起的误解：许多人所说的平行宇宙其实属于不同的类型，但他们都用了同样的“平行宇宙”四个字！我想，他们一共说了三四种！想通了这一点，我举起手，提出了4个多重宇宙层级的划分规则，正是我在本书中所使用的这套分类方法。

尽管埃弗雷特非常聪明，但他有一个重要的问题没有回答：如果一个宏观物体真的可以同时位于两个地方，为何我们从来没有观测到这一现象呢？诚然，如果你测量它的位置，那么，位于两个平行宇宙里的两个你都会发现它位于一个确定的地方。但是，这个回答还不够好，因为精细的实验表明，宏观物体从来不会同时出现在两个地方，即使你根本不观察它们。具体地说，宏观物体从来不会表现出波动的性质，而正是波动造就了所谓的量子干涉模式。不仅埃弗雷特没有解开这个谜，在我的教科书里，也没有任何答案。

被审查的量子怪诞性

天哪！竟然起作用了！那是1991年11月，在伯克利的一个夜晚，外面漆黑一片，我正坐在书桌前，在一张纸上捣鼓各种各样的数学符号。我感到胸中涌动着一阵从未有过的兴奋。这是真的吗，我真的发现了如此重要的事情？我需要确认一下。

我经常想，在科学领域，最难的部分不是找到正确的答案，而是提出正确的问题。如果你遇到了一个相当有趣、成熟的物理学问题，它就会自动告诉你需要什么计算过程才能回答这个问题，剩下的部分就几乎是自动进行的了。即使数学推算需要花上几小时甚至几天的工夫，但感觉起来就像是在钓鱼，鱼儿已经上钩，只消拉一下线就能看到钓到了什么。我很幸运，一不小心就撞上了一个这样有趣的问题。

当时，我已经学到，与波函数坍缩有关的事可用一种数表来概括，在物理学的行话里，这种数表叫作“密度矩阵”（density matrix）。密度矩阵不仅表示了某个物体的状态（也就是它的波函数），还包含了我对该波函数的不完备知识[35]。比如，如果有个物体能同时出现在两个不同的地方，关于此，我的知识可以被描述为一个2×2的数表，以下是两个例子：

$$\begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix} = \text{“它同时位于这里和那里。”}$$

$$\begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix} = \text{“它要么在这里，要么在那里，我只是不知道它究竟在哪里。”}$$

在这两个例子中，我在其中一个地方找到它的概率都为0.5，这个信息被编码成两个数字，分别写在每个矩阵的对角线上（左上角的0.5和右下角的0.5）。除此之外，每个数表里还有两个数字，用极客的行话说就是“密度矩阵非对角元”，表示量子和经典不确定性之间的区别。当它们都等于0.5时，它们就处于一个量子叠加态（比如薛定谔的猫同时处于死了和活着的两个状态）；如果它们都等于0，那我们面对的就是古老而熟悉的经典不确定性，就像我唱歌时找不着调的感觉一样。所以，当你把这些非对角元都换成0的时候，你就让波函数发生了坍缩！

我们在上一章已经看到，量子力学的哥本哈根解释告诉我们，如果你朋友观察一个物体，但是不告诉你结果，那他就坍缩了波函数，这个物体就会要么在这里，要么在那里，总之肯定处在一个确定无疑的地方，只不过你并不知道是哪个地方。换句话说，哥本哈根解释认为，“观察”这个动作用某种神秘的方式让非对角元都变成了0。

我很怀疑，是否有某些不那么神秘的物理过程也能做到这一点呢？如果有一个封闭孤立的系统，不与外界发生任何交互，用薛定谔方程很容易证明，那些讨厌的数字永远不会消失。但是，真实的系统却不可能是孤立的，于是我开始问自己，在这些系统中，情况又是如何呢。比如，当你正在读这句话时，空气分子和光子不断撞击着你的身体。所以，如果某个物体同时处在两个不同的地方，当其他物体和它相撞时，那个描述它的2×2数表又会发生什么事呢？

这就是那个奇妙的“自问自答”问题，剩下的一切秘密都会自动展开。为了简化，我把那个物体和与之相撞的一颗粒子看作一个孤立的系统，用薛定谔方程来计算接下来会发生什么事。

几个小时后，我坐在那里，面前摆着几大张纸，密密麻麻写满了数学符号。我喘了一口气，那些非对角元会变得非常接近0，就像波函数坍缩了一样！当然，它并没有真正坍缩，平行宇宙依然存在，却出现了一种崭新的效应。有了这种效应，不管你从什么方向看、从哪个角度闻，波函数都像是坍缩了一样，看起来和真正的坍缩没什么两样。这样，我们就无法观察到一个物体同时位于两个地方。所以，量子怪诞性并没有消失，它只是被审查了！就像新闻被审查一样，事情并不是没有发生，只是你看不见而已。

我的结论是，**量子力学需要进行保密：某个物体的位置只有在不为世界所知晓的情况下，才能同时处于两个位置的叠加态。如果秘密被泄露了，所有量子叠加态效应就会瞬间坍缩，变得不可观测，从我们实际观察到的角度看，也就是说物体瞬间变成了“这里”和“那里”二选一的状态，只不过你不知道是哪一个。**

那如何才算泄露秘密呢？如果一个实验室技术人员测定了它的位置，把它记录在纸上，这很明显是一种信息泄露。但是，还有很多情况都可以被看成是秘密泄露，哪怕只是一个光子撞到了这个物体上，关于位置的信息也被泄露了——物体的位置信息就被编码进了光子接下来的位置信息中。根据所撞物体所在的位置不同，1纳秒后，这颗光子将处在两个十分不同的位置（见图7-5）。所以，只要你能测定光子的位置，你就能计算出镜子的位置。

在上一章的开头部分，我曾陷入深深的疑惑，不明白波函数坍缩是否一定需要人类观察者作为条件，还是说机器人也可以。现在，我已确信，此事与意识毫不相关，因为一颗小小的粒子也能做到这件事

——单个光子撞到一个物体上，对该物体的影响，等同于它被一个人观察到。我意识到，**量子力学里所说的观测并不是指人类有意识的观测，而仅仅是指信息的交换。最后，我终于理解了为什么我们永远看不到宏观物体同时处在两个位置，即使它们实际上确实同时位于两个位置：这并不是因为它们个头很大，而是因为它们很难被分离成孤立的系统！**

一般情况下，一个保龄球每秒会受到10^{20}和10^{27}个空气分子的撞击。很显然，从定义上说，我们不可能看见一个不被光子撞击的物体，因为物体能被我们看见正是因为撞击在它表面的光子（也就是光）进入了我们的眼睛。所以，即使一个保龄球同时处在两个地方，它的量子叠加态也会早在我意识到它之前就消失在视线中。相比之下，如果你用一台绝好的真空泵不断向外泵出尽可能多的空气分子，那么，一般来说，一颗电子在大约1秒的时间内不会撞到任何东西。这个时间对证明诡异的量子叠加态行为来说，已经远远足够了。比如，一颗电子在原子内绕一圈只用花费10-15秒，所以，在如此“漫长”的1秒钟时间内，它同时出现在原子各个方位的能力几乎不会受到什么影响。

此外，如果一个空气分子撞到一个保龄球，并把保龄球的位置信息编码入自己的位置信息（见图7-5），由于这个分子很快就会和其他空气分子相撞，那么，保龄球的位置信息就会迅速传递给其他分子。

这很像维基解密在网上公布了一些绝密的信息，这个信息会被人拷贝，接着，拷贝的版本也会被拷贝……很快，情况就变得不可控制，根本不可能再把这个信息从公众视线中完全剔除，再次变成保密状态。对保龄球来说，如果你不能再把它的信息变成秘密，它就不可能继续维持量子叠加态。现在，我终于明白了我们为什么看不到第三层平行宇宙了！

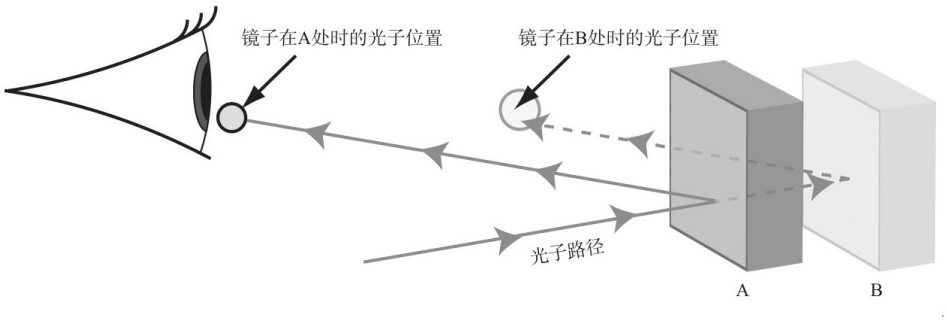


图7-5　如果你在一间黑暗的房间里拍摄一张闪光照片，照相机所捕捉到的光子中编码了房间里的各种信息。这张图展示了单个光子如何能“测量”物体——当一个光子撞到一面镜子后，光子就将镜子的位置信息编码到自己的位置信息内。如果镜子处于A处和B处的量子叠加态，那么，发现它位置的究竟是一个人还是一个光子，完全不重要，因为这两种情况都会毁掉它的量子叠加态。

那天晚上，我简直超常发挥，干什么都很顺利。我还进行了定量计算，得到了更多细节。比如，大多数物体同时所处的位置其实并不止两个，而是许多个，我把这个也算出来了，正如图7-6里画的那样。我发现，基本上只要一个光子就能把量子叠加态几乎完全摧毁，但能留下一点点残余物——一个小小的、只有光子波长那么宽的叠加态。一个波长为0.000 5毫米的光子就像一个观察者，但本质上说，这个光子观察者对物体位置的测量只能精确到0.000 5毫米。上一章我们已经讲过，所有粒子都具有波动的性质，因此都拥有波长，而我的发现表明，任意一个粒子撞到某个物体上面，大于粒子波长的量子叠加态都将会摧毁殆尽。

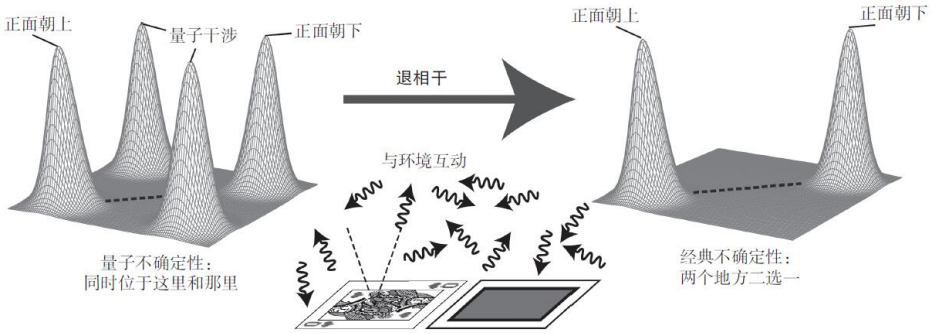


图7-6　关于倒下的扑克牌，你所知道的信息可以表示为一个所谓的密度矩阵。密度矩阵可以表示为一个起伏不平的曲面，就像图中所示的鼓出的四座山峰。对角线（已用黑线描出）上两座“山峰”的高度代表扑克牌位于不同位置的概率。而另外两座山峰，不严格地讲，表示了量子怪诞性的程度，也就是它同时位于不同位置的性质。左边的密度矩阵中，有两座山峰被标记了“量子干涉”，代表扑克牌同时位于两个不同的地方，处于量子叠加态。当一颗光子撞到扑克牌后，发生退相干，将两座山峰抹平，得到了右边的密度矩阵，代表着扑克牌位于一个确定的位置，也就是两个地方二选一，你只是还不知道究竟是哪一个。这些山峰的宽度相当于与正面朝上和正面朝下相关的残余量子不确定性。

时光荏苒，我早就知道了自己热爱物理学，并想为这个领域鞠躬尽瘁，但我以前并不知道自己是否真的具备研究物理的能力、是否真能为之添砖加瓦，还是只能学习前人的成就、在领域边缘的观众席上为他人鼓掌。那天夜晚，当我终于平复思绪，躺到床上时，我人生中第一次满怀信心地对自己说：“是的，我能！”会不会有人把我当晚的发现命名为“泰格马克效应”？我知道，不管结果如何，我永远不会忘记那个兴奋的夜晚。想到自己所获得的种种机会以及那些曾启发我灵感、引领我踏上伟大科学征程的师长，我感到自己真的很幸运。这一切太完美了，完美得简直不像真的。事实证明，确实如此……

两个星期后，我对那晚的发现进行了扩展计算，写出了一份论文草稿，初步命名为《散射引起的表观波函数坍缩》（*Apparent Wave Function Collapse Caused by Scattering*）。“散射”（scatterin

g）是一个科技术语，用来表示粒子在物体表面撞来撞去的行为。这是我第一次为了公开发表而撰写学术论文，感觉很像小时候的圣诞前夜。我是个左撇子，写一手惨不忍睹的字（上学时，几乎每份作业后老师都会留下“请书写工整一点！”的评语），一想到论文发表后，我乱七八糟的手写体会变成工整的印刷体，我心里就十分兴奋。

与此同时，我陷入了一种有趣的妄想症，总害怕自己的发现已经被别人公开发表过，只是不知为何被我忽略掉了。然后我又安慰自己，如果这么基本的东西早已被人发现，它一定会出现在教科书上，我的研究生量子力学课堂上也肯定会讲到这一点。在查找资料的过程中，每当我翻开一本可疑的参考书时，手都止不住地颤抖，生怕里面已经提到了我的新发现。到目前为止，一切还算好……

抱着论文一定会发表的期待，我甚至改了自己的名字，把姓氏改得更加特别，从我的父姓“夏皮罗”（Shapiro）改成了我的母姓“泰格马克”（Tegmark），免得和别人重名。在瑞典时，我很喜欢我原来的姓——夏皮罗，因为它非常特别，我们几乎是全瑞典唯一姓夏皮罗的家庭。但到了美国，我简直被吓坏了：“夏皮罗”这个姓在国际学术界里几乎和“安德森”（Andersson）在瑞典一样普遍。让我下定决心改姓的最后一根稻草是，当我在数据库里搜索“夏皮罗先生”写的物理学论文时，我得到了几千条相符的结果。单单在我们伯克利物理系，就有3个夏皮罗，其中有一个叫玛乔丽·夏皮罗（Marjorie Shapiro）的，甚至还教过我粒子物理学！相比之下，我搜寻良久之后发现，我母亲和她的亲戚却是地球上唯一姓“泰格马克”的人，所以我义无反顾把姓改成了“泰格马克”。

对于改姓这件事，我很怕我父亲会误解，将其视为对他的冒犯，但是，当我小心翼翼向他提起这件事时，他却向我保证他毫不在意，并引用了莎士比亚的一句名言来表明他的态度：“名字有什么关系呢？”（What’s in a name？）

被人抢先，苦中作乐

一个月后，我从瑞典过完圣诞节回学校，正准备上传我的论文，但忽然一切都崩塌了。我的时间全都白费了。我的心血和热情全都白费了。我的快乐和兴奋瞬间消逝了。我的所有希望也全部化为乌有。砰！就像一颗炸弹一样，只花了几分钟的时间，一切都化为泡影。是谁点燃了火柴？安迪·埃尔比。他告诉我，一位名叫沃依切赫·楚雷克（Wojciech Zurek）的波兰物理学家早就发现这一点了。忘记什么“泰格马克效应”吧！它早就有名字了，叫作“退相干”（decoherence）。实际上，我很快又发现，德国物理学家迪特尔·泽（Dieter Zeh）早在1970年就已经发现这个效应了。

一开始，我并没有什么明显的感觉，就像我平时听到坏消息时的反应一样。我还用开玩笑的口吻向我的好友韦恩、贾斯汀和泰德聊起了这件事。当我回到家时，我根本没注意到自己已濒临崩溃的边缘，反而因为一件愚蠢而琐碎的小事和女朋友大吵一架——只因为她做了一顿只够自己吃的饭，却从冰箱里拿出一份冷冰冰的饭给我吃。一瞬间，我感到悲伤如潮水一样袭来，只想大哭一场，却连哭的力气也没有了。

慢慢地，我对自己被抢先这件事逐渐想开了。首先，我选择科学为毕生事业，正是因为我喜欢发现的快乐，不管我所发现的东西是否已经被别人发现过了，那份快乐都一样深刻，因为在你发现的一瞬间，并不知道有没有人发现过。其次，由于我相信宇宙中还存在更高级的文明，可能在我们的宇宙中、也可能在平行宇宙中，那么，我们在地球上新发现的所有事情，他们肯定早就知道了，所以本质上都是一种重复发现，但这并不会让发现的乐趣减少半分。最后，当你独自发现一件事情时，你的理解会更加深刻，也会怀有更多的尊敬和珍惜。在我的学习生涯中，我逐渐意识到，大部分科学突破都是由一次又一次的重复发现累积起来的——当正确的问题浮现出来，随着解决它们的工具变得唾手可得，自然会有许多人独立找到同样的答案。我

记得尤金·康明斯在量子力学课堂上说过一句不动声色的妙语。他说：“它被称作克莱因-戈尔登方程式（Klein-Gordon equation），因为它是薛定谔发现的。”

从那时起，我重复发现了许多前人已经发现过的东西。通常情况下，我会重复发现别人已论述过的基本部分，除此之外还包括一些前人不曾注意的细节（或者反过来）；这些都让我足够发表一些难度较低的新论文，在文中引用前人的论文，并添加一些新东西。

> 我记得还有一次，感觉有点儿毛骨悚然。我自己列出了一个“退相干的自然界十大来源”榜单，从空气分子、阳光中的光子这样的日常事物到难以屏蔽的背景辐射和太阳中微子。结果，不久之后，我发现在迪特尔·泽和他的学生埃里克·朱斯（Eric Joos）6年前合著的一篇漂亮的论文中，他们也列出了一个几乎完全一样的表单。当然，我那篇论文里包含了一点新东西，足够发表在一本不那么权威的学术期刊上，但是对一个从一开始就想发表轰动论文的人来说，这感觉就像一场惨败。



扫码获取作者的论文。

事后看来，这并不算我所经历过的最滑稽的“被抢先事件”。1995年，我发明了一种方法，可以用来测定粒子的量子状态（波函数或密度矩阵）。我永远也忘不了那个夜晚，正当我要上传论文的时候，我站在空荡荡的图书馆里，呆若木鸡，感觉自己简直就是个傻瓜：摆在我面前的，是一篇已经发表过的论文，那些家伙不仅抢了我的先，而且他们的图表十分精细，和我的想法完全一样。更令人惊奇的是，他

们给这个方法起了一个模棱两可的名字，竟然也和我想的分毫不差：相空间层扫描法（phase-space tomography）。我只能大喊一声“HURF”，这是我和弟弟佩尔发明的一个特别的词，用来形容当时的心情，再合适不过了。

后来，我终于有机会和这些“假想敌”见面，发现他们都是非常友善的好人。迪特尔·泽和楚雷克都给我发来了邮件，热情洋溢地鼓励我的工作，还邀请我去他们那里访问和演讲。2004年，我去洛斯阿拉莫斯（Los Alamos）拜访了楚雷克，这次行程让我发现了作为科学家最棒的好处：你可以受邀去从未去过的奇妙地方，在此期间你还可以不停地和那些迷人的家伙们聊天，这些都是工作的一部分！他们甚至还会付你钱！

楚雷克有一头厚重的头发，眼睛里闪着顽皮的光芒，昭示着他的冒险精神，不管对工作还是对娱乐都同样如此。在雄伟的冰岛黄金瀑布（Gullfoss Waterfall），他曾劝我和他一起爬下一块危险区的大石头，往前一步看看那奔腾直下的水流——那里是瀑布突然改变方向的地方。我怀疑，有多少个平行宇宙因此在一声惨叫中同时失去了两名退相干理论家。

1996年，我去海德堡拜访了迪特尔·泽和他的团队。他对退相干的发现作出了极其重要的贡献，但我更震惊于他所获得的赞誉之少。实际上，在海德堡大学物理系里，他那些小气的同事根本不把他的成果放在眼里，因为他们认为他的理论太哲学化了，而他们的物理系就位于“哲学家街”，这实在是很讽刺。他的团队不得不搬到一座教堂里开会。而最让我目瞪口呆的是，当迪特尔·译写作全世界第一本退相干领域的书时，唯一的一笔研究经费竟然来自德国信义会教堂。

这让我想起了休·埃弗雷特，原来，他并不是特例。**研究物理学，并不是一条通往名誉和光辉的康庄大道。物理学更像是艺术：你从事这个职业，只是因为你热爱它。**在我的物理学同行中，只有极少数人选择研究那些真正宏大而重要的问题，每当我看到他们，内心就涌起一种同舟共济的感情。我想，这种感情就好像一帮好友拒绝了高薪工作，决定一起成为诗人的感觉。他们清楚地知道，自己的选择不是为了金钱，而是一场探索人类智慧边界的大冒险。

每当飞机上的邻座问我科学问题时，我就会回想起科学界的竞争以及我被抢先的那些事，也提醒我必须用正确的方法来对待。此时，坐在飞机座位上的，是一位来自物理学国度的大使，他不仅要向外国友人描述自己亲力亲为的事，还必须讲述整个物理学界发生的故事，并为此感到由衷的快乐和骄傲。在研究中，有时我会抢得先机，但更多的时候是我被别人抢先。然而，最重要的事情是，在这个过程中，我们能互相学习，互相启发，共同完成那些单靠一己之力无法完成的伟大事业。这是一个妙不可言的团体，我为自己能跻身其中而感到幸运。

你的大脑为什么不是量子计算机

“罗杰·彭罗斯爵士处于非相干状态，而迈克斯·泰格马克说他能证明这一点。”哇！我在读2000年2月4日的《科学》杂志时，被这个标题惊呆了。我可绝对不会用“非相干”（incoherent）这个词来形容这位著名的数学家，但记者们就喜欢用双关语营造冲突。我只是写了一篇论文，在其中声称彭罗斯的一个理论被退相干干掉了而已。

扫码获取作者这篇被《科学》杂志引用的论文。

最近几年，掀起了一股热潮，人们热衷于建造所谓的“量子计算机”，试图挖掘出量子力学怪诞性的潜力，用来进行高速计算。比如，如果你在网上买了这本书，你的信用卡号会被一种方法加密，而

这种方法是基于下面这一事实：两个300位质数相乘很容易，但是要将一个600位数进行因数分解（也就是找出它是哪两个数字的乘积）却很困难。如果用现在的计算机，要算出结果需要花费的时间比宇宙的年龄还长。假如能建造出大型量子计算机，那么，使用我MIT的同事彼得·舒尔（Peter Shor）发明的一种量子算法，黑客很快就能算出答案，偷走你的钱。正如量子计算先驱大卫·多伊奇（David Deutsch）所说，“量子计算机能与无数个平行宇宙中的自己分享信息”，在其他宇宙的“自己”的帮助下，就能迅速获得自己栖身的这个宇宙的答案。

量子计算机还能极其有效地模拟原子和分子的行为，取代化学实验室的测定工作，就像传统计算机取代风洞测量一样。许多现代计算机之所以速度更快，是因为它可以同时运行多个并行程序。量子计算机可以被看成终极的并行计算机，只不过它是将第三层多重宇宙作为计算资源。从某些意义上说，相当于在不同的平行宇宙中并行运行不同的程序。

在建造这样的机器之前，需要克服一些主要的工程障碍，比如如何能更好地分离出量子信息，好让退相干不至于摧毁量子叠加态。我们还有很长的路要走——尽管你的手机都能存储几十亿比特的信息（0和1），但世界各地的实验室里最先进的量子计算机也只具备很小存储能力。不过，彭罗斯等人却提出了一个惊人的想法：也许，你已经拥有一台量子计算机了——就在你的脑袋里！他们认为，我们的大脑（或者是大脑的一部分）就是量子计算机，这或许也正是理解意识的关键点。

由于退相干搅乱了量子效应，我决定用那个被别人抢先发表的退相干公式来检验彭罗斯的想法是否真的可行。首先，我对神经元（见图7-7）进行了计算。大脑中约有数千亿个神经细胞，也就是神经元，

它们就像电线一样，传输着你脑中的电信号。神经元又细又长，如果把你的所有神经元排成一列，它们可以绕地球4圈。神经元传递电信号的方式是运送钠原子和钾原子，这两种原子都失去了一个电子，因此都带一个单位的正电荷。

如果你用电压计测量一个休眠的神经元，你会发现，神经元内部和外部之间的电压为0.07伏特。如果神经元的一端被激活，使这个电压降低，那么，细胞壁上一些对电压敏感的大门就敞开了，带电的钠原子就开始源源不断地穿过大门，进入到细胞内部。这一连串的反应叫作放电（firing），并以每小时320公里的速度飞速传遍整个神经元。在这个过程中，大约有100万个钠原子进入了细胞内部。轴突复原的速度相当迅速，最快的神经元每秒能将这个过程重复上千次。

现在，假设你的大脑真的是一台量子计算机，正用神经元的放电进行着量子计算。这样，单个神经元应该能同时处于放电和休眠的叠加态，这就意味着，大约有100万个钠原子会同时位于两个不同的地方，也就是同时位于神经元内部和外部。我们之前曾讨论过，一台量子计算机只有当它处于不为外界所知的保密状态时才能正常工作，那么，一个神经元放电与否的秘密能保守多久呢？

当我输入数据进行计算后，我得到的结果是“根本不够长”。更具体一点说，这个时间大约为10-20秒。在这短暂的时间后，就会有一个横冲直撞的水分子不小心撞上这100万个钠原子中的其中一个，揭穿它位置的秘密，摧毁它的量子叠加态。我还对彭罗斯提出的另一个模型也进行了数学计算，这个模型不是用神经元来进行量子计算，而是用微管（microtubules）。微管是细胞骨架的一部分。我的计算表明，微管退相干的时间大约为10-13秒。

在我看来，量子计算必须赶在退相干之前完成，也就是说，我的思想必须足够快，快到每秒能想出10 000 000 000 000个点子才行。

也许罗杰·彭罗斯的思维能达到这种速度，反正我肯定是不行……

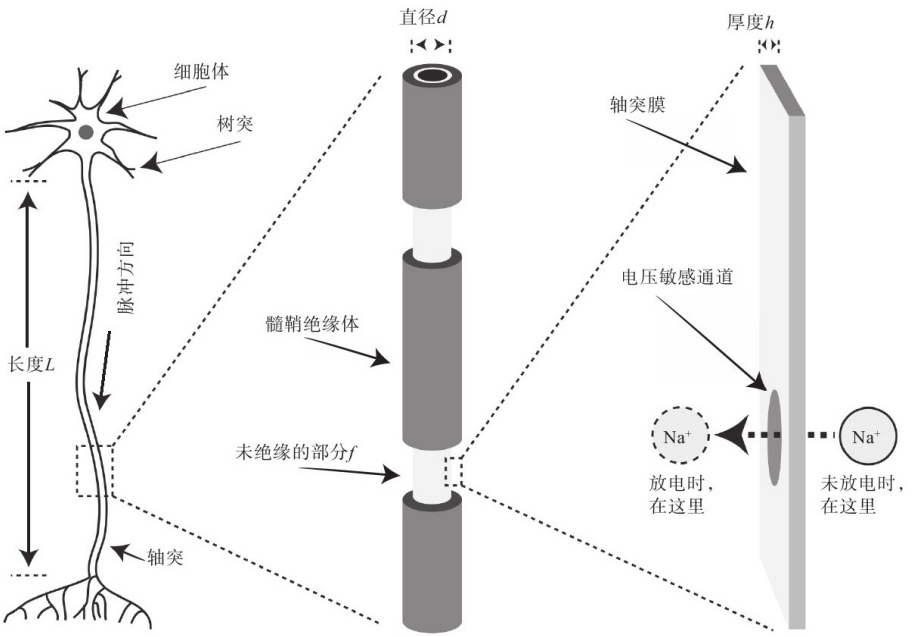


图7-7　神经元及其结构的示意图，左为神经元，中为神经元中称为轴突的细长部分，右为轴突膜的一部分。轴突通常被一种叫作“髓鞘”的绝缘物质所包裹，但每隔半毫米左右就会有一小段裸露在外，这里聚集了许多电压敏感通道。如果神经元处于放电和休眠的叠加态，那么，差不多有100万个钠原子（化学式为Na）同时处于“神经元内”和“神经元外”的叠加态（见图右）。

你的大脑不是以量子计算机的方式运行的，这并不惊奇。我那些试图建造量子计算机的同行们与退相干展开了胶着的持久战。通常，他们会把设备隔离在冰冷黑暗的真空中，让它们的状态保密，不为外界所知。但你的大脑呢？它是一团温暖潮湿的物质，其中有无数的连接，每个部分都不是孤立的。然而，有些人对我的论文提出了异议，让我经历了人生第一场科学论战。斯图尔特·哈默罗夫（Stuart Hameroff）是一位量子意识（quantum-consciousness）理论的先驱。他说，我为量子意识研究者们带来了很多问题，就像在这个领域“扔下了一颗臭气弹”。他问我：“你是为传统科学卖命的职业杀手吗？”

我觉得这是一段略带讽刺的经历，因为通常情况下，我才是站在传统科学对立面的人，我骨子里有一种不走寻常路的倾向。并且，我做这些计算的目的不是为了得到某个特定的结果，只是想寻找答案而已。实际上，如果我得出相反的结论，说不定我会更加高兴，因为这意味着我自己就拥有一台量子计算机，这该多酷啊！后来，哈默罗夫与两名共同作者一起，发表了一篇批评我论文的文章。我认为这篇文章中有很多纰漏[36]，不禁感慨，有时候科学家会太执着于某一个观点，对其抱有近乎宗教式的狂热，以至于任何板上钉钉的事实都无法说服他们。我怀疑，“量子意识”这个令人印象深刻的术语可能只是在为这句话找借口：“意识很神秘，量子力学也很神秘，所以，它们一定有关联。”

2009年，我终于见到了传说中的斯图尔特·哈默罗夫，发现他竟然是一个天性开朗友善的人。我们还在纽约一起共进了午餐。有趣的是，在聊天过程中，我们却找不到双方在计算过程或测量结果上的分歧，于是我们礼貌地达成共识：双方意见相左之处只在于对意识的定义不同。

支配我们宇宙的主体、客体与环境

我必须承认一件事：我的大脑退相干计算只是一个借口，并不是我撰写那篇论文的真实目的。当时，我对自己的一个想法感到十分兴奋，很想将它公布于世，却发现它可能会被认为太过哲学化，而被学术期刊拒绝发表。所以，我想出了一个好办法，我把它叫作我的“特洛伊木马战略”：把意欲逃过审稿人眼睛的哲学部分隐藏在长篇累牍、令人望而却步的数学公式里。好笑的是，我这个战略既卓有成效，又收效甚微。卓有成效的是，它确实躲过了审稿人的眼睛，最终得以发表；但同时，人们却只注意到了我用来掩饰真实目的的面具，也就是——大脑不是量子计算机。

那么，我的隐藏信息究竟是什么呢？它是一种用于思考量子实在的统一方法（见图7-8）。费曼曾强调说，量子力学将我们的宇宙分裂

为两个部分：所有被研究的对象，以及余下的一切（称为“环境”）。然而，我却觉得这拼图好像缺了一块，即你的思维。正如埃弗雷特的研究所告诉我们的那样，要理解观察的过程，就需要将我们宇宙中的第三个部分纳入考虑，即你作为观察者的思维状态，也即图7-8中的“主体”。

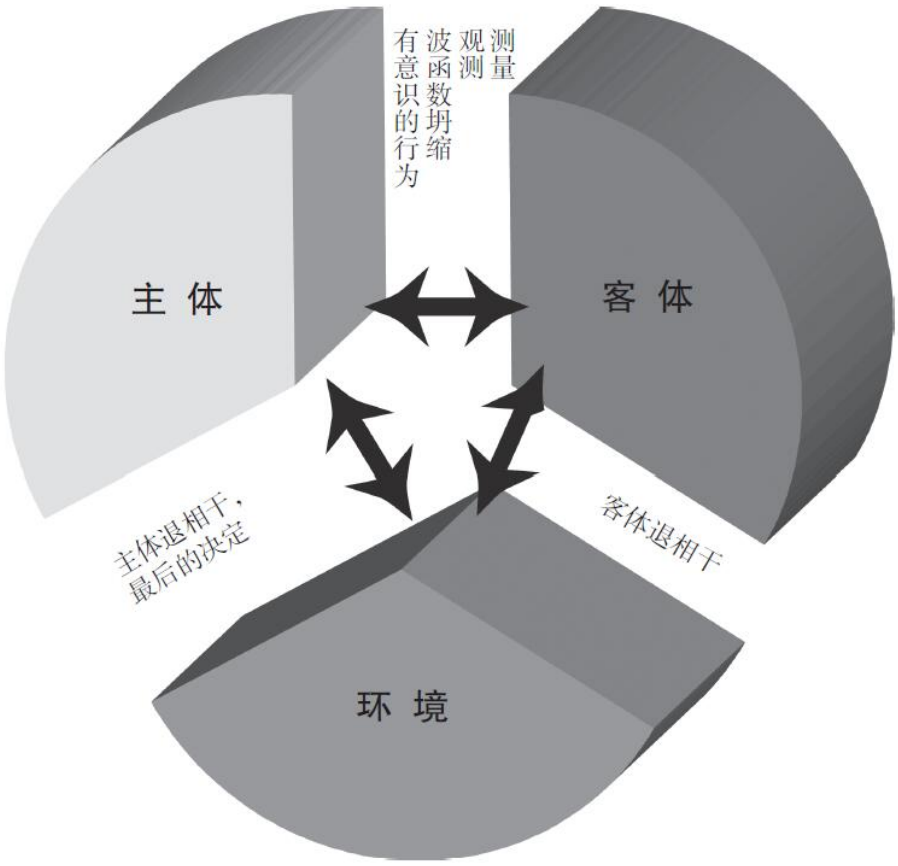


图7-8　世界可以被分为三部分：一是你主观感知的部分（主体），二是被研究的对象（客体），以及剩下的一切（环境）。正如图中所示，这三个部分的相互作用会造成性质不同的效应，可以用这幅统一的示意图来表示，其中包括了退相干和表观波函数坍缩。

如果你不是物理学家，当你看到物理学界几乎不谈论思维时，可能会觉得有点可笑，因为量子力学里有许多与“观察”有关的怪事。

毕竟，将观察和思维割裂开，就像讨论近视却半句不提眼睛一样。我想，原因可能在于我们并不理解意识究竟是如何运作的，所以大多数物理学家在提到它时会感觉不自在，害怕自己被别人认为太哲学化。我个人认为，不理解某件事并不意味着我们可以忽略它，我们依然可以期待正确的答案。

在下一章中，我会讨论更多与意识有关的事。不过，要理解图7-8，并不需要你理解思维运作的细节，这一点关系也没有——在这里，我只会作出一个假设，即你的主观意识源自大脑中粒子的复杂运动，这些粒子与其他所有粒子一样，都遵循薛定谔方程。

在我那篇“特洛伊木马”论文里，我将薛定谔方程拆解成了几个部分——其中有3个部分分别支配我们宇宙的3个部分（主体、客体和环境），其他的则支配粒子之间的相互作用。接下来，我分析了方程中不同部分各自的效果，结果发现，一部分给出了教科书上的内容，一部分给出了埃弗雷特的多世界诠释，一部分给出了迪特尔·泽的退相干，还有一部分给出了一些新鲜的东西。标准的教科书通常都只聚焦在薛定谔方程支配客体（比如，一颗原子）的那部分。还原论者认为，即使抛开物体所在的那个更大的整体，所有的物体本身都是可分析的。主体和客体的相互作用为埃弗雷特带来了平行宇宙理论，将量子叠加态从客体扩散到主体，也就是你自己。环境和客体的相互作用带来了退相干，解释了为何一张红桃Q扑克牌不会出现奇怪的量子行为，比如同时处在两个位置什么的。

想在实践中消除退相干基本上是不可能的，然而，就算你想出一个真可以消除退相干的思想实验（比如，在一个黑暗冰冷的真空房间里重复做量子扑克牌实验，并且，每次你的眼睛看见扑克牌时，只有一个光子撞击到扑克牌），也不会有太大区别。由于扑克牌同时处在两个地方，那么那颗光子也一样，于是，当你看着扑克牌时，你的视

神经中至少有一个神经元会进入放电与休眠的量子叠加态。我们在前文提到，这个叠加态会在大约10^{-20}秒后退相干。

然而，这种退相干依然无法完全解释为何你不能感知到任何量子怪诞性，因为你的思维过程（主体内部的动态过程）完全可以用你熟悉的思维状态创造出怪诞的叠加态。幸运的是，图7-8中的第三个相互作用给出了答案，那就是，主体和环境的相互作用。神经元退相干的速度远远超过了它们处理信息的速度，这个事实意味着，假如意识真的与你大脑中复杂的神经放电模式有关，那大脑中超快的退相干也会让你感知不到任何怪诞的叠加态。

主体和环境的相互作用还解答了另一个问题。楚雷克后续对退相干的研究又发现了许多我没有发现的东西。他发现，退相干还为我们做了一件重要的事。它不仅解释了为什么宏观物体不会同时出现在两个地方，还解释了为什么惯常的状态（比如只能位于一个特定的地方）如此特别。对宏观物体来说，在量子力学所允许的那么多种状态中，为什么单单只出现了一个状态呢？这是因为，这些惯常状态对退相干来说是最强健的，所以它们幸存了下来。这就好比，为什么沙漠中总是长有仙人掌，却没有玫瑰花呢，这是因为仙人掌是面对干旱的环境时最强健的植物。

后来，我和我父亲一起就这个话题写了一篇论文。正是因为这篇论文，楚雷克邀请我去洛斯阿拉莫斯演讲。

现在，运用一些精密的实验室设备（比如真空泵和极端的冷却装置）可以减弱一些退相干效应，但我们却永远无法关掉我们神经元中的退相干。我们不知道思维是如何运作的，但是我们清楚地知道，所有从外界到达思维的信息，最初都必须经过感觉器官里的神经元，比如眼睛里的视神经元和耳朵里的耳蜗神经元等，它们的退相干速度都相当快，快到简直不可思议。所以，**当我们从主观上察觉到外部世界**

时，所有事物都已经退相干了，以保证我们永远无法感知到量子怪诞性，这也解释了我们为何只能感知到那些强健的惯常状态。

物理学中存在许多争议，但只有很少一部分话题能宏大到让其他话题相形见绌，并能延续数代人。很显然，量子力学的大争论就是其中之一。还有一个争议是热力学第二定律。根据这个定律，一个孤立系统的熵从不降低。熵是一个定量的度量值，表示我们对一个系统的信息缺乏程度——本质上说，它指的是我们要确定一个系统的量子态所需要的信息量比特数。

一方面，一些科学家将这个定律提升到了一个近乎神圣的地位。伟大的天体物理学家亚瑟·爱丁顿爵士（Sir Arthur Eddington）曾说：“我想，熵增定律是自然界最至高无上的规律。如果有人向你指出，你最爱的宇宙理论与麦克斯韦方程不一致，这对麦克斯韦方程来说可不是一件好事。如果有人发现你的理论与实验观测相悖，没关系，那些实验物理学家们干活儿笨手笨脚，时常会出错。但是，如果你的理论与热力学第二定律相违背，那我只能说，你一点儿希望也没有了。让你的理论怀揣着最深的谦卑退下吧。”

另一方面，包括麦克斯韦、约西亚·吉布斯（Josiah Gibbs）、约翰·洛施密特（Johann Loschmidt）在内的物理学巨擘们却严厉地拒绝热力学第二定律。这个争议是否已经被圆满解决？至今尚无定论。

在我看来，量子力学和热力学第二定律这两大争论实际上是联系在一起的，只要你抛弃波函数坍缩，转而采用标准量子力学中对熵的定义（由约翰·冯·诺依曼提出），并把实在的三个部分（主体、客体和环境）都考虑在内，就能一箭双雕，成功解决这两个问题。

如图7-8总结的那样，测量和退相干分别对应着客体与主体和环境的相互作用。尽管测量和退相干的过程可能看似不同，但有趣的是，从熵的角度看，它们却有很多共同之处，比如在二者中，我们都缺乏客体的信息，而这正是物理学中对熵的定义。

如果客体不与任何物体发生相互作用，它的熵就会保持不变。也就是说，如果你知道它现在的状态，你就能预测它1秒钟后的状态，因为你可以用薛定谔方程通过初始状态计算出它1秒钟后的状态。

如果客体与你发生相互作用，你通常会获得更多关于它的信息，所以它的熵降低了。比如，图7-1中，当你睁开眼时，会出现两个版本的你，每一个你都会看见一个不同的结果，但是你们都知道各自的平行宇宙中扑克牌倒下的方向，所以你们都额外获得了一点关于扑克牌的信息。

然而，如果客体与环境发生相互作用，你通常会失去一部分关于它的信息，所以它的熵增加了。如果我儿子菲利普起初知道他的宠物小精灵卡片放在什么地方，那么，当我的另一个儿子亚历山大把卡片搞乱以后，菲利普所知的关于卡片的信息就减少了。同样，如果你知道扑克牌同时处在两个位置的叠加态，假如有人或有个光子发现了扑克牌确切的位置却没有告知你，那么你就失去了一点信息。因为最开始你知道量子叠加态的信息，但现在它位于两个状态中的其中一个状态，而你却并不知道是哪一个状态。

总结而言，我是这样通俗地理解这个问题的：对于一个客体的熵，你看它时，它的熵减；你不看它时，它的熵增。退相干只是简单地度量了你对结果的无知。更严格一点，我们可以把热力学第二定律稍稍修改一下，改成下面这样：

- 客体的熵不可能减少，除非它与主体发生相互作用。

●客体的熵不可能增加，除非它与环境发生相互作用。

这个定律的传统版本忽略了客体的作用。当我发表一篇与之有关的技术论文时[37]，我在其中论述了上述第二个部分的数学证明（也就是退相干如何使熵增加），但我却没能找到第一个部分的严格证明方法，尽管我的计算机模拟程序透露出它是真的。

后来发生了一件奇妙的事，再一次提醒了我在MIT工作是多么幸运的事——赫兰特·格瑞比安（Hrant Gharibyan），一名20岁的美国本科生问我有没有什么好玩的问题，可以让他研究一下，于是我们组成团队开始研究这个问题。他在这个问题上倾注了极大的热情，像吃爆米花一样狼吞虎咽地读了大量数学书籍，掌握了许多物理学家中鲜有人知的数学工具，如Schur积（Schur products）和频谱优化（spectral majorization）等，我也只有从我的数学家父亲那里听说过这些概念。然后，有一天，当我见到赫兰特时，他露出了胜利的微笑——他真的解决了这个问题！现在，我们的论证过程已经发表。

扫码获取作者和赫兰特的这篇论文。

量子自杀奇案

我总感觉，世界上有两种物理学家——巨擘和凡人。巨擘指的是那些高高在上的历史人物，比如牛顿、爱因斯坦、薛定谔和费曼，他们仿佛都具有超自然的力量，身边围绕着数不清的传说和神话。而凡人则是我生活中经常会遇到的物理学家们，尽管他们都很聪明，但显然都只是你我这样的普通人——直到约翰·惠勒出现（见图7-9）。

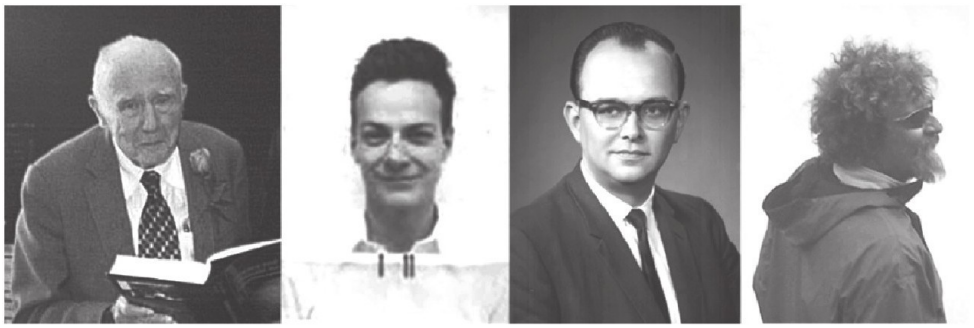


图7-9　我记忆中的约翰·惠勒（照片拍摄于2004年，他手里捧着一本为庆祝他90岁生日而出版的书，我则帮忙组织了生日庆典会）；接下来是他的研究生理查德·费曼（拍摄于约1943年）、休·埃弗雷特（拍摄于约1957年）和沃依切赫·楚雷克（拍摄于2007年，就在那个冰岛的瀑布旁边）。（图片来源：帕梅拉·康特拉斯科[Pamela Bond Contractor]、马克·埃弗雷特、安东尼·阿吉雷）

1996年，我遇见了惠勒，让我感到醍醐灌顶。在哥本哈根的一间自助餐厅，84岁高龄的他就坐在那里，我们都在那里吃会议午餐。对我来说，惠勒是“最后的巨擘”。他曾经与尼尔斯·玻尔一起研究核物理学。惠勒发明了“黑洞”这个词，他是研究时空泡沫的先驱。费曼和埃弗雷特都是他的研究生。他那野马脱缰般的思想和热情让他成了我的物理学超级英雄。而当时，他就那么坐在那里吃饭，竟然像个普通的凡人！我感到，我必须上前去向他介绍我自己，否则我将永远不会原谅自己，并后悔一辈子。但我非常紧张，越靠近他的桌子，我就越是紧张得说不出话来。过去，我曾经在“学术界食物链”上遭到过前人的鄙视——有两位教授在我话说到一半时就转身走掉了，而他们也只是凡人而已。而接下来发生的事，让我目瞪口呆——我只是一个毫无经验的博士后，一个完完全全的小人物，而惠勒竟然向我报以热情的微笑，并邀请我和他一起共进午餐！他听说我对量子力学感兴趣之后，告诉了我一些他关于存在的新想法，还送给我一些他近期笔记的复印本。他一点没有居高临下的架子，和我说话的方式就像我和他是平等的一样，尽管事实上我们根本不平等。

两个星期之后，我甚至还收到了惠勒发来的电子邮件——巨擘发来的邮件！

> 在哥本哈根时，与你的谈话十分愉悦，也很鼓舞人心，因为我相信你和我拥有同样的信念，都相信在量子力学的背后，还隐藏着某些深邃而又奇妙、但尚未被发现的原理。这就像爱因斯坦伟大的几何观投下了突如其来的光芒，令牛顿定律黯然失色，并动摇了它的权威性和普适性一样。一定还有一些同样具有颠覆性的未知理论，正等待着人们去发现。

接着，惠勒鼓励我去普林斯顿大学，并在信里写道：“我希望每天都能和你探讨问题。”当时，我正在几个博士后机会之间犹豫不决——我怎么可能拒绝普林斯顿大学的邀请呢？自从我搬到普林斯顿大学之后，我就开始定期去拜访他，并逐渐更多地了解了他。惠勒和他妻子还参加了我的乔迁聚会。他甚至还签署了我的新泽西州结婚证——在我的世界里，这感觉就像是上帝成了我的证婚人一样。

在办公室里，惠勒常会被打扰，所以他聊天时喜欢“转圈”，也就是沿着普林斯顿大学物理系大楼第三层上能俯瞰内部庭院的环形走廊散步。他的讲述让历史故事在我眼前变得栩栩如生，比如，他向我描绘了他看见第一颗氢弹爆炸时的感受。惠勒还让我与本领域的奠基者们之间产生了更加个人化的联系，而这些奠基者在他面前不过是凡夫俗子而已。

我给惠勒看了我最受争议的疯狂论文。在那篇论文中，我探讨了数学宇宙的理念，这也正是本书讨论的内容。结果，他说他很喜欢。然而，尽管审稿人持积极态度，但学术期刊仍然拒绝发表这篇论文，因为编辑认为“推测程度太高”。惠勒鼓励我对拒稿进行申诉，结果竟然奏效了。不久以后，我们为《科学美国人》杂志合写了一篇文

章，名为《量子之谜的100年》（*100 Years of Quantum Mysteries*）。在文中，我们尝试用平实的语言来解释量子平行宇宙和退相干现象。我问他是否真的相信量子平行宇宙的存在，他回答道：“我会在星期一、星期三和星期五找点儿时间来相信它们的存在。”

> 我平生很少哭泣，但是在2008年，当我得知约翰·惠勒去世的消息时，我忍不住流下了眼泪。我曾深受惠勒的感动和启发。在他的追悼会上，有许多人都和我感同身受。会后自由分享时，我讲述了他对我的意义。我说，如果用一个词来概括他对我的影响，那就是“鼓舞人心”。一位如此杰出和知名的人物，却愿意放下身段鼓励他人，这是怎样的一种心胸。正如另一位吊唁者所说的那样：“他以同样的尊严对待所有人。”这个描述真的很恰当。他鼓励我跟随自己的内心，探索我真心热爱的领域。而惠勒“鼓舞人心”的最佳证明，就是这满屋子的人，他们都是很棒的人，从五湖四海赶来，只因他们都曾获得过他的鼓励。而这些人，现在都载入了名副其实的“物理学名人录”。

我还记得一天下午，我骑自行车载惠勒回他位于草甸湖（Meadow Lake）老年公寓的家时，我很兴奋地向他提及我最近冒出来的一个疯狂想法，我称之为“量子自杀”（Quantum Suicide）。我花了很多时间来思考，到底有没有实验能证明埃弗雷特的平行宇宙是真的。最后，我终于想出了一个办法。

出人意料的是，这个实验只需要一些极易获得的低科技设备。当然，它还需要你来充当一个乐于奉献的实验员，因为它相当于一个快速重复版本的薛定谔的猫实验——只不过把猫换成你。你所需的仪器叫作“量子机关枪”，它会根据量子测量的结果来发射子弹；具体地说，每次枪的扳机被触发，它就会让一个粒子处于叠加态，也就是同时处于两个状态（比如，同时顺时针旋转或逆时针旋转）。接下来，测量这个粒子。如果粒子处在第一个状态，机关枪发射子弹；如果粒子处在第二个状态，枪就只会发出一声清脆的咔哒声，而不发射子弹。触发的机制不是我们讨论的重点，所以我们不展开讲[38]，我们

只假设说，量子测量和实际开枪之间的时间极其短，短于人类感知的速度，比如0.01秒。

现在，假设你将量子机关枪设置为自动模式，在该模式下，它每秒钟会自动启动一次。不管你是否相信埃弗雷特的平行宇宙理论，你都可以预测你会听见一串看似随机的声音，由枪响和咔哒声随机交替出现，比如“砰-咔哒-砰-砰-砰-咔哒-咔哒-砰-咔哒-咔哒”。突然，你做了一件激进的事，你把脑袋放到了枪管前方，然后等待着。那么，你预计接下来会发生到什么呢？

这取决于埃弗雷特的平行宇宙是真的还是假的！如果平行宇宙是假的，那么量子测量只有一种确定的结果，所以1秒钟过后，你要么死了，要么活着，概率都是50%。如果你运气一般般，那么，听到一两声咔哒之后，你就一命呜呼了。n秒后你还活着的可能性为1/2n，所以，1分钟后你还没死的可能性极其小，小于10^{-18}。然而，假如埃弗雷特的平行宇宙是真的，那么，1秒钟后会出现两个平行宇宙——其中一个你活着，另一个你死了，血溅四方。换句话说，一定有一个你在扳机扣下前后都保有知觉，所以你有100%的概率会听到咔哒声，而非枪响。

再等久一点，你会发现一件惊人的事情——当你把脑袋放到枪管前时，看似随机的“砰”和“咔哒”序列突然全部变成了“咔哒-咔哒-咔哒-咔哒-咔哒-咔哒-咔哒……”。在10声咔哒以后，你就能得出结论：你以99.9%的置信度排除了波函数坍缩，因为如果波函数坍缩真的发生的话，你已死去的可能性已经超过了99.9%。1分钟以后，你还坚持埃弗雷特是错误的可能性已降到了10^{-18}以下。此时，你也许会怀疑机关枪是不是坏掉了，于是你把头移开，想检查一下，结果你会发现，它就像被施了魔法一样，立刻变回了正常的随机发射序列。

假设你已确信埃弗雷特是正确的，于是叫来一个朋友见证你的实验，此时事情却没那么顺利。由于你只会在一个平行宇宙中幸存，而他却出现在所有平行宇宙中，所以大多数情况下，她会在几秒后看见你死去。所以，如果你想说服朋友相信你，那他们只会相信一件事：你已经疯了。

惠勒认为这很有趣。我说，如果一个无所不能的精灵来到一位物理学家临终的病榻前，告诉他，为了回报他一生对好奇心的追逐，决定向他透露他所选择领域的终极答案，我想许多物理学家都会欣然接受。然而，假如这个精灵禁止他向别人透露这个答案，他还会高兴吗？也许，量子力学最大的讽刺就是，如果埃弗雷特是正确的，那将发生类似的事情：**你已准备好去另一个世界了，却会一直经历“量子自杀”——你可能已经确信量子平行宇宙是真实的**[39]**，但你却无法说服别人！**

当然，你并非完全不可能说服你的朋友，只要你做一个更加宏大的“量子自杀”实验，比如把量子开关连接到一个原子弹上面，这样你就只会出现在两个平行宇宙中——要么你和你的朋友全都活着，要么你们都牺牲了。但是，从那以后，他们可能也不想再和你做朋友了。

量子永生？

在我发表了那篇关于“量子自杀”的论文后，《新科学家》杂志和《卫报》上都刊登了与之有关的文章，引起了不少注意。好玩的是，我的这个想法后来还被许多科幻小说借鉴。正如我之前所提到的，当时机成熟，会有相似的想法浮现在许多人的脑海中。不久后，我发现，过去已经有一些人曾有过类似的思考，最早的大概当属奥地利数学家汉斯·莫拉维克（Hans Moravec）。1988年，他在一本讲人

工智能的书《思维之子》（*Mind Children*）中提到了这个想法。但是，与我早年的“再次发现”经历不同，这一次我感到很高兴，因为我总算产生了一些影响，让这个想法变得更加广为人知。

很快，许多与“量子自杀”有关的有趣邮件像潮水一样涌进我的电子邮箱，让我开始思考，它是否还蕴含着更多含义。我最喜欢的一个是：我们能否把自然界所有潜在的致命事件都看成“量子自杀”实验，从而在主观上感知到自己是永生的呢？

你可以用一个简单的实验来回答这个问题，那就是：等着瞧！如果有一天，在长长的一连串看似不可能发生的巧合之后，你发现自己变成了地球上年龄最大的那个人，那你就能大胆地回答这个问题了！请注意，估计你不会看见其他和你一样老得不正常的人，就像你不可能旁观别人成功验证“量子自杀”实验一样。

那么，假设埃弗雷特是正确的，波函数永不坍缩，那么物理定律能预测些什么呢？为了实验能成功，“量子自杀”实验需要满足以下三个条件：

- 随机数生成器必须是量子的，而不是经典的（也就是说，不能是决定性的），这样你才能真正进入“死去”和“活着”两种状态的量子叠加态。
- 它杀死你（或者至少是让你失去意识）的时间非常快，快于你能意识到量子测量结果的时间——否则，将在一两秒钟内出现一个因确知自己即将死去而非常不高兴的你，这会毁掉整个实验。
- 它必须能真的杀死你，而不只是让你受伤。

大多数意外情况和普遍的死因显然都不能同时满足这三个条件，这意味着你在主观上并不能感觉到永生。比如，让我们先来看看第二个条件，在一般情况下，死亡的过程并不是突然发生的，而是一个逐渐丧失自我意识的过程。而“量子自杀”之所以能运作，正是因为它

触发了一个突然的转变。我想，当我年老以后，我的脑细胞会逐渐衰亡（说真的，现在已经开始了），所以，尽管我会一直拥有自我意识，但自我意识却会一直衰减，变得越来越少。这会让我死亡的最后阶段显得虎头蛇尾，就像一只阿米巴原虫的死亡一样。

第三个条件限制了你在实际操作“量子自杀”实验时的时间必须很快，以免有什么偶然事件救了你的命。比如，我居住的小区平均每几年就会经历一次供电故障，相当于每隔$10^8 \approx 2^{27}$秒发生一次。这意味着，如果我的量子机关枪不是用电池供电，而是采用插座的交流电，并且我在超过27秒后还活着，那么，这把枪很可能已经因供电故障而失效。因为在我还活着的平行宇宙中，机关枪失效的宇宙数量将多于机关枪运行良好的宇宙数量。我等待的时间越长，就可能遇到越古怪的偶然事件。比如，如若不是出故障（如断电），那么68秒后，我应当预计我还活着的原因是因为机关枪被陨石砸中了……道格拉斯·亚当斯的科幻讽刺小说《银河系漫游指南》中有一个“无限非概率驱动”，可以让你经历极度不可能发生的事情。尽管这样的装置一听就是科幻作品中才会出现的玩意儿，但量子机关枪运行起来就很像一台这样的设备！

我觉得第一个条件十分有趣。假设你的自杀装置并不依赖量子随机性，而是遵循某种类似扔硬币的规律，也就是说，理论上，你能预测结果是正面朝上还是反面朝上，只不过在实际操作中，由于你不清楚硬币的初始运动状态，也没有进行数学运算，所以你不知道具体结果如何。如果是这样，那么，如果实验开始时你只有一个平行宇宙，那一秒后你也只有一个平行宇宙——在其中，你可能已经死了，或者依然活着，这取决于硬币的初始位置和运动状态，所以你主观上并不会感觉到永生。

不过，如果第5章中所讲的第一层多重宇宙是真的，结果会怎样呢？如果是这样，实验开始时，你不止有一个平行宇宙，而是有无数多个，每个平行宇宙中的你的心理状态在主观上都毫无差别，只有硬币的初始位置和速度有一丁点儿无法察觉的细微差异。一秒钟后，在一半的平行宇宙中，你死去了。然而，不管实验重复多少次，总有一些平行宇宙中，你没有中枪，依然坚强地活着。也就是说，这种令人毛骨悚然的随机自杀实验不仅能揭示出第三层（量子）平行宇宙的存在，还能揭示出更一般的平行宇宙。

我知道，这听起来实在太像狂人呓语。我得说：“请勿在家自行尝试”。此外，我将在第10章中解释，我现在已经确信，不管是“量子自杀”还是量子永生都是不可能的，因为它们都严格依赖于某种我认为自然界中不存在的东西——无限可分的数学连续统。但是，谁又真的知道答案呢？在未来，天命之日来临的那一天，当你认为你的生命快要走到尽头了，请记住不要对自己说：“终于活到头了。”因为，也许你还没有活到头。你可能会亲自发现那个不能说的秘密——平行宇宙或许真的存在。

多重宇宙统一了

所有动物都是平等的，但是有一些动物比其他动物更为平等。

乔治·奥威尔（George Orwell），《动物农庄》（*Animal Farm，1945*）

有一个恼人的想法一直在我的脑海中挥之不去：第一层多重宇宙和第三层多重宇宙在某种程度上是一回事吗？它们是不是统一的，就像麦克斯韦将电和磁统一为电磁学，爱因斯坦将时间和空间统一为时空一样？

一方面，它们的性质似乎大相径庭：第5章所说的第一层平行宇宙在三维空间中与我们相隔甚远，而本章所描述的第三层平行宇宙在三

维空间内却与我们重叠，只有在波函数栖身的无限维度抽象空间——希尔伯特空间中才会分离。但从另一个角度看，第一层多重宇宙和第三层多重宇宙却有许多相同之处。贾米·加里加和亚历克斯·维兰金写的一篇论文中说，由宇宙暴胀创造出的第一层平行宇宙中所包含的所有事件序列，可能与埃弗雷特的量子平行宇宙中的事件完全相同。

我也得出了同样的结论。图7-10说明了这种观点。如果一个量子事件引发了两个处于量子叠加态的事件，你的未来即将分裂成两个平行的量子分支，那么，在你意识之外的那个量子平行事件，不仅发生在另一个量子分支中，也会发生在你所在的这个量子分支中，只不过发生在距离极其遥远的空间里。

除此之外，还有一个困扰我的人——安东尼·阿吉雷。阿吉雷是我最要好的朋友之一，我们的生活上有许多相似之处——我们都有两个年幼的儿子，都试图在工作和生活中找到平衡点，我们都着迷于宏大的问题。我们还一起创建了基本问题研究所（Foundational Questions Institute, http：//fqxi.org/），这是一个慈善资助组织，专门资助那些被传统基金会所回避的、高风险、高回报的物理学研究。那么，他困扰我的问题是什么呢？“是否有一些平行宇宙真的比其他平行宇宙更平等呢？”他问道。

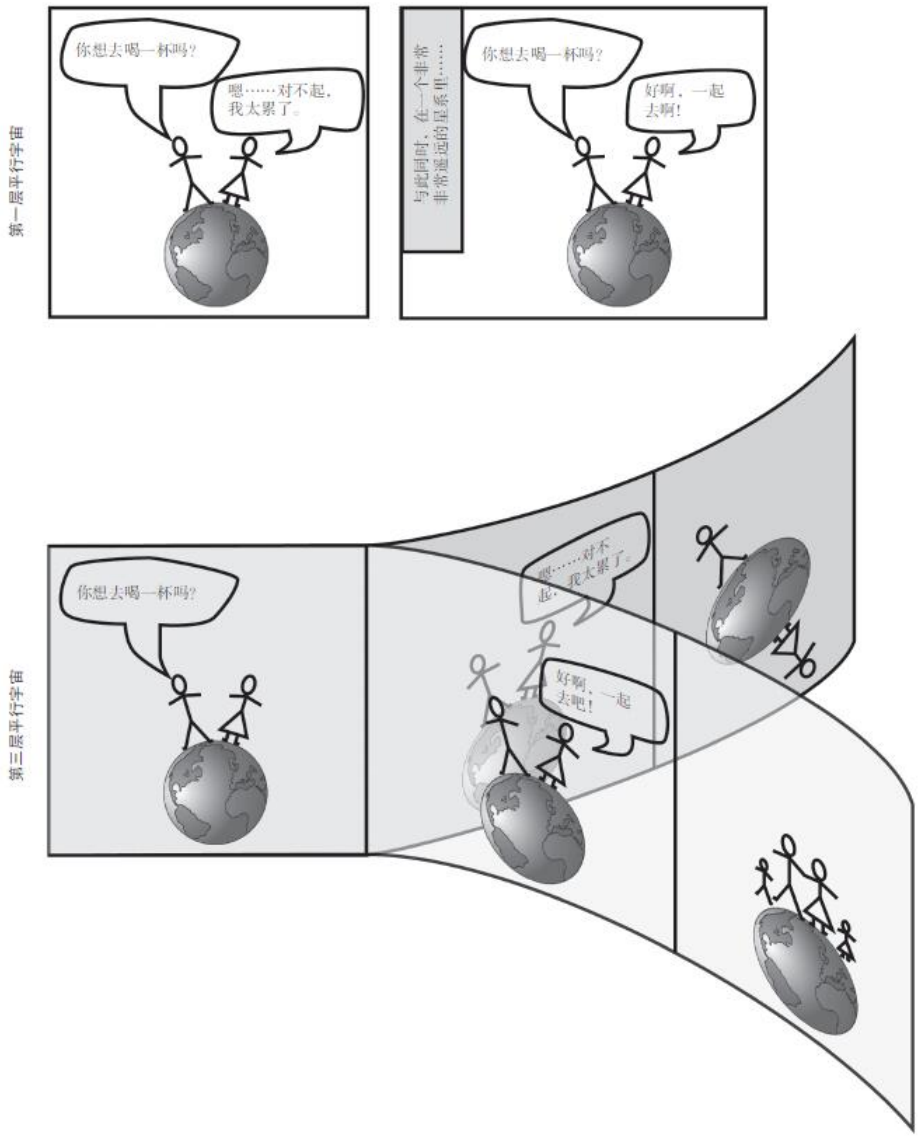


图7-10　第一层平行宇宙和第三层平行宇宙的对比。第一层平行宇宙在空间里距离我们极其遥远，但某些第三层平行宇宙却就在此处，只不过量子事件将现实分裂成了不同的平行情节。然而，第三层平行宇宙并不会增加第一层和第二层平行宇宙之外的情节。

阿吉雷之所以会问这个问题，是因为在前文，我对量子概率所进行的阐述都是基于同样的五五开概率，也就是说，两个量子分支出现的可能性均为50%（比如在量子扑克牌实验中，扑克牌倒下时正面朝上和正面朝下的概率都是50%）。在这个前提下，我的诠释严丝合缝，没

有漏洞。然而，假如概率并不相同，那可就不好办了。比如，假如扑克牌一开始有轻微的倾斜，以至于概率（也就是波函数的平方）发生改变，使得正面朝上的概率变为2/3，背面朝下的概率变为1/3。但此时，图7-2并不会发生变化——4次试验后，依然有2×2×2×2=16种结果，其中最典型的情况依然是50%正面朝上，而非2/3正面朝上。

埃弗雷特扭转了局面，他预测说，最多的那种情况将变成2/3，而非50%。他是如何做到的呢？埃弗雷特的方法是声称，其中一些结果在实际测量中存在的次数比其他结果更多。具体地说，对存在的测量结果可用波函数的平方来计算。这十分奏效。从那时起，许多论文作者都意识到，波函数平方是一个好主意，但阿吉雷却让我认识到，这在埃弗雷特优雅的理论中是一个刺眼的瑕疵。人们经常问我是否相信埃弗雷特的平行宇宙是真实的，假如我回答“是的，但是……嗯……唔……其中一些比另一些更真实一些”，这听起来真的很逊。

2008年3月，阿吉雷告诉我一个想法（一会儿我将详细解释），是他哈佛大学的教授大卫·雷泽尔（David Layzer）提出的一个可能的解决办法。我们在贝尔蒙特（Belmont）咖啡馆兴奋地讨论了两个小时，在餐巾纸上写满了数学符号[40]，但还是徒劳无功。我们的数学过程总是不对劲，算不出结果。这个问题一直萦绕在我的心头。

两年后，我又开始沉溺于这个问题。这一次，我发现了量子引力学理论家吉姆·哈特尔（Jim Hartle）写于1968年的一篇论文，我认为这篇文章里蕴藏着拼图的另一半。但是，2010年3月6日深夜，当我坐在位于温彻斯特的公寓里奋力演算时，我却无论如何也没法把两个谜一般的拼图拼在一起。沮丧至极，我决定出去，在镇上走走。令我惊讶的是，只在清冽的冬日空气中待了5分钟，我的脑子突然开窍了！我突然想出了一个一箭双雕的解决方法，既能统一第一层和第三层多重宇宙，又能理解不平等的概率问题。那天晚上，我一直工作到凌晨3

点，第二天又花了整整一天的时间，一直处在一种狂喜和亢奋的状态中，那种感觉只有亲身经历过的人才能完全理解。我觉得，这是自19年前“重复发现”了退相干现象以来，我最兴奋的时刻之一。我完全停不下来，直到打印出一份4页的论文框架给阿吉雷看。

图7-11中表达了我的关键想法。假设你在做前文介绍的量子扑克牌实验时，扑克牌的初始状态有轻微的倾斜，使得它倒下时正面朝上、并让你赢得100美元的概率为2/3。在经典学派的观念里（见图7-11中每个方框的最左边），实验开始时只有一个你。但根据波函数是否坍缩，实验结束时可能有一个或者两个版本的你——如果哥本哈根解释是正确的，那么只会随机产生一个确定的结果；如果埃弗雷特是正确的，则会产生两个平行宇宙，每个宇宙中包括一个你，其中一个你因赢钱而高兴，另一个因输钱而沮丧。

现在，让我们假设第5章中提到的第一层多重宇宙是真实存在的——这也正是现代宇宙学的观点。这意味着，在空间中极其遥远的地方，有无数多个完全相同的你，身处无数多颗完全相同的行星上，正要开始做一个完全相同的实验，图7-11中用一排中性的面孔来表示。这些你以及你的实验器具都是由许许多多粒子组成的。在计算中，我把薛定谔方程运用在了描述所有这些粒子的波函数上。

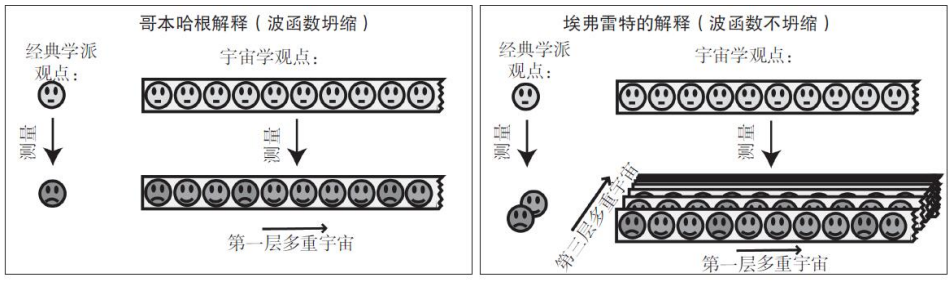


图7-11　第一层和第三层多重宇宙是如何统一起来的。每个圆圈都代表一颗你赌量子扑克牌正面朝上的行星。在测量之前，你的心情很平静；但在测量之后，你有可能因赢钱而开心，也可能因输钱而沮丧。扑克牌的初始状态有轻微的倾斜，这样你赢钱的概

率为2/3。这些行星彼此之间都非常遥远，比如，在每个方向上都相距1古戈尔普勒克斯米，但为了简化和表达关键信息，我把它们紧密地排列在一起。

结果会发生什么呢？如果波函数坍缩，那么，对整个无限的空间（也就是第一层多重宇宙），你将仅得到一个随机的结果，也就是说，在2/3的行星上，你很开心，而在1/3的行星上，你很沮丧——这完全在意料之中，没什么好惊讶的。但如果埃弗雷特是正确的，即波函数永不坍缩，那么，整个无限的空间都将处于多个状态的量子叠加态，每个状态中，都有一些行星上的你很开心，另一些你很沮丧。现在，出人意料的地方来了——在无垠空间的叠加态中，每一个状态都是完全相同的，而每个状态中的无数颗行星中，你开心的行星数量占该状态中行星总数量的2/3！每个状态中，任何一个有限的行星序列（也就是高兴和沮丧的你的序列），都能在其他状态中的某处找到一个完全相同的序列。你可能会认为，一定有一些空间的状态是不同的，比如，会不会存在一个状态，其中每颗行星上的你都很高兴。然而，使用薛定谔方程和希尔伯特空间的数学特征进行计算后，我能证明，你实际得到的波函数等同于一个由无数完全相同的状态组成的叠加态。阿吉雷和我认为这个发现十分惊人，原因如下。

第一，波函数是否坍缩的大争论终于入土为安，结论令人大跌眼镜，竟然是：它根本不重要！从图7-11中可看出，不管埃弗雷特是正确还是错误，都会有2/3的行星上你很高兴。实际上，争论的双方都有些受伤。哥本哈根解释引入了这个饱受争议的“坍缩事件”，纯粹是为了甩掉讨厌的平行宇宙，从而得到一个独一无二的结果。然而，从图7-11中你可以看出，这个方法不再奏效——即使波函数坍缩，你还是会得到包含两个结果的平行宇宙。埃弗雷特诠释的标志是第三层（量子）平行宇宙，但你从图7-11中能看出，你几乎可以忽略它们，因为它们完全相同，无法区分。从这个意义上说，第一层和第三层多重宇宙就是一回事。只要第一层多重宇宙所栖身的空间是无限大的，

你就可以忽略所有的第三层平行宇宙，因为它们实际上是完全相同的，没有丝毫差别。也许，第三层平行宇宙也能和第二层平行宇宙统一起来，但我们还不能证明这一点。

第二，图7-11通过将埃弗雷特的多世界诠释引入我们熟知的三维空间中，展示了不等概率的起源——不同的结果并不仅仅发生在难以捉摸、数学化的希尔伯特空间中，也发生在我们自身所处的、用望远镜来研究的空间内，只不过位于极其遥远之处。这里的关键点是，当扑克牌已倒下，但你还未睁开眼检查结果时，你并不知道自己是许多版本中的哪一个，因为截至目前，每个你的主观感觉都完全相同，无法区分。此时，你可以把自己看成这些版本中的一个随机成员。由于你知道在所有的你当中，有2/3的你睁开眼后会看见扑克牌正面朝上，那你就会思考：你接下来将看到一个随机的扑克牌状态，但它正面朝上的概率为2/3。这与法国贵族们最初为优化赌博策略而提出的概率概念很相似：如果在一场牌局中，你只知道你将会遇到多个概率相等的情况中的其中一种（比如，发到你手中的牌有许多种不同的方式），这样你就可以说，你赢钱的概率等于你赢钱的情况在所有情况中所占的比例。

第三，我们两人的发现催生了所谓的“量子力学的宇宙学诠释”。在其中，我们没有把波函数诠释为由某个物体可能出现的概率汇成的一首假想的时髦合奏曲，而是把它看作无数相同复本在空间上的集合——这些复本都真实存在于我们所栖身的这个无限空间内。此外，你所经历的量子不确定性，反映了你在第一层多重宇宙中缺乏自我定位的能力。缺乏这种能力，使得你在空间内无数多个相同的复本中，无法准确地知道哪一个才是你主观感知的那一个。

在许多领域，学术论文的作者名单通常都按字母表排序。但是在宇宙学中，我们通常是按对论文的贡献大小来排序。在绝大多数情况下，只需要看一眼作者名单，你就能判断出谁做了最大贡献。但这一次，我们却犯

了难。到快要提交论文的时候，阿吉雷和我都为此付出了辛苦的努力，可以说我俩的贡献是均等的。为此，我们在电话上争执不下，盛赞对方的贡献，坚持对方的名字应该写在前面。最后，我想出了一个我们两人都会喜欢的解决办法：用量子随机数生成器来决定作者顺序。在这个特定的宇宙中，他担任第一作者，但是假如我们的论文是正确的，那么，在运用这个方法的所有平行宇宙中，我将在一半第三层平行宇宙和一半第一层平行宇宙中担任第一作者。



扫码获取作者与阿吉雷两人的这篇论文。

2010年，亚历克斯·维兰金邀请我去塔夫茨大学以这篇论文为主题做一场演讲。和第4章开头所讲述的一样，阿兰·古斯又来到了观众席。我不禁回想起13年前的那场演讲，当时阿兰昏昏欲睡，脑袋止不住地往下垂。13年前，我试图从心理上接受这件事，因为我想不起有哪一场演讲他不会打瞌睡。而这一次，奇迹发生了，感觉就好像是我们的论文得到了前所未有的承认，仿佛到达了我科学生涯的顶峰——在整场演讲中，阿兰都醒着！

多世界，还是多废话？

那么，你究竟应该如何理解量子这档子事儿呢？你是应当相信波函数坍缩，还是相信量子平行宇宙？尽管量子力学算得上迄今为止人类发明的最成功的物理理论，但一个世纪以来，关于它如何才能符合物理实在一贯的大图景，人们依然争论不休。渐渐地，各种诠释如雨后春笋般冒了出来，多得像个动物园，包括系综诠释、哥本哈根解

释、工具主义诠释、流体力学诠释、量子意识、玻姆诠释、量子逻辑、多世界诠释、随机力学、多心灵诠释、一致性历史诠释、客观坍缩理论、交易诠释、模态诠释、存在诠释、关系性诠释、蒙得维的亚诠释和宇宙学诠释。此外，同一个诠释的支持者常在细节上各执一词。实际上，甚至对哪些哪些可以被称为“诠释”，都没有达成共识……



扫码登陆作者推荐的相关主题网站，获取更多参考文献。

你可能会发现，量子力学问世一个世纪以来，科学家们依然在争论不休，看不到达成共识的前景，他们很可能还要再吵上一个世纪。然而，争论的内容却发生了三个重要的变化，涉及理论、宇宙学和技术，引发了一连串我认为十分有趣的社会变化。

第一，埃弗雷特、迪特尔·泽等科学家的理论发现告诉我们，即使你抛弃饱受争议的波函数坍缩假定，只留下最基础的量子力学骨架，也就是“薛定谔方程总是成立”，那么，当你观测时，你主观上依然会感觉到波函数坍缩，遵循所有正确的概率规则，你将被幸福地蒙在鼓里，而对其他量子平行宇宙毫不知情。

第二，我们在第4～5章中提到的宇宙学发现意味着，即使埃弗雷特是错误的，我们也逃脱不了平行宇宙的魔咒。此外，我们在上一节

已经看到了第一层平行宇宙与第三层量子平行宇宙如何能够优雅地融合在一起。

第三，曾经有人认为，量子引力能以某种方式引发波函数坍缩，然而，一个名为“AdS/CFT对偶”的弦理论进展却证明这种观点是错误的。这几个字母缩写代表什么意思对我们的讨论而言并不重要——最关键的一点是，人们发现了一种数学转换过程，能将某种包含引力的量子场论重新诠释为不包含引力的量子场论。很显然，如果引力只出现在某些而不是所有的诠释中，那么引力肯定不是引发波函数坍缩的原因。

第四，越来越精确的实验数据排除了许多试图消除量子怪诞性的解释。比如，表观的量子随机性能用某种藏匿在粒子内部的未知量（所谓的隐变量）来解释吗？爱尔兰物理学家约翰·贝尔（John Bell）认为，在这种情况下，某些复杂实验测得的量总是不符合标准的量子预测。多年以后，科技终于发展到了可以实现这些实验的阶段，隐变量诠释就被排除掉了。

那会不会是薛定谔方程中还存在一个尚未发现的小缺陷，导致宏观物体的量子叠加态坍缩？回到量子力学刚刚问世的年代，许多物理学家都相信，量子力学被证明只能在原子尺度发挥作用。现在，再也不是了！被费曼冠以“量子效应之母”的简单双缝干涉实验（见图6-7），在大于单个基本粒子的物体上一次次被验证：原子、小分子、甚至足球形状的碳-60“巴基球”（Bucky Ball）分子。

在我上研究生的时候，我曾问过我的同班同学基思·施瓦布（Keith Schwab），是否可能用实验证明宏观物体也能同时处在两个位置。令人惊叹的是，20年过去了，他在加州理工学院拥有了自己的实验室，他研究的主题不是别的，正是这个！他的研究对象是一根由数以亿计的原子组成的金属棒。实际上，圣塔芭芭拉的物理学家安德鲁·

克莱兰（Andrew Cleland）已经在一个肉眼可见的金属桨状物上进行了这个实验。而维也纳的安东·蔡林格（Anton Zeilinger）团队甚至开始探讨用病毒来做这个实验。

我们像做思想实验一样想象一下，假如这个病毒拥有某种原始的意识，那么我们将不可避免地走向多世界诠释——将叠加态在其他自知的生物（比如人类）身上推而广之，将不再是一个遥不可及的质变，而仅仅是一个触手可及的量变。蔡林格的团队还证明，光子在空间中行进89公里时，还能保持违背直觉的量子特性——这很难称为一个微观的距离。所以我认为，实验证据正逐步向我们证明：世界是怪诞的，我们必须学着适应它。

实际上，许多人已经做好了接受量子怪诞性的准备，原因与金钱有关，而与哲学无关——这种怪诞性可能带来有用的新技术。根据最近的估算，美国超过25%的GDP都基于量子力学带来的发明创造，从激光到计算机芯片。实际上，像量子密码学和量子计算这样的前沿科技，已经开始大张旗鼓地探索第三层多重宇宙；并且，只有在波函数不坍缩的情况下，它们才能运转。

这些宇宙学和技术的理论突破，引发了一场显而易见的观念变革。当我做演讲时，我喜欢听听观众们的想法。表7-1所示是他们对“你最熟悉哪一个量子力学诠释”的回答。第一列数据来自1997年的马里兰大学量子力学会议，第二列来自2010年我在哈佛大学物理系的演讲。

表7-1　不同观众对不同诠释的熟悉度

不同诠释	马里兰大学（1997）	哈佛大学（2010）
哥本哈根诠释	13	0
埃弗雷特的多世界诠释	8	16
玻姆诠释	4	0
一致性历史诠释	4	2
修正动力学诠释	1	1
以上都没有 / 未决定	18	16
总票数	48	35

虽然这些投票并不正式，也不科学，并且明显不能代表所有的物理学家，但它们多多少少表现出了一个令人吃惊的观念变迁：在卫冕几十年之后，哥本哈根诠释的支持率在1997年降到了30%以下，到了2010年竟然降至0。与之相反的是，1957年提出的埃弗雷特多世界诠释，经过了10年的埋没和25年的严厉批评，竟然在2010年的投票中占据了最高位。值得注意的是，还有相当可观的一部分投票者选了“未决定”，这说明量子力学的争论仍在继续。

奥地利动物行为学家康拉德·劳伦兹（Konrad Lorenz）经过观察和思考得出一个结论——重要的科学发现都会经历三个阶段：起初，它们会被完全忽视；接着，它们会遭到狂暴的攻击；最后，它们变得人尽皆知。前述投票表明，埃弗雷特的平行宇宙理论在20世纪60年代处于第一个阶段，而现在它已经进入了第二个阶段和第三个阶段之间的某处。

我认为，这个变迁意味着，是时候更新一下量子力学的教科书了。教科书里应当提到退相干（许多教科书仍然对其置之不理），并最好解释清楚，哥本哈根解释应该被看成“哥本哈根近似法”——尽管只能近似，哥本哈根解释仍然是一个很有用的近似法。用它来进行计算时，尽管波函数可能并不坍缩，但感觉起来就像波函数在你的观察下坍缩了一样。

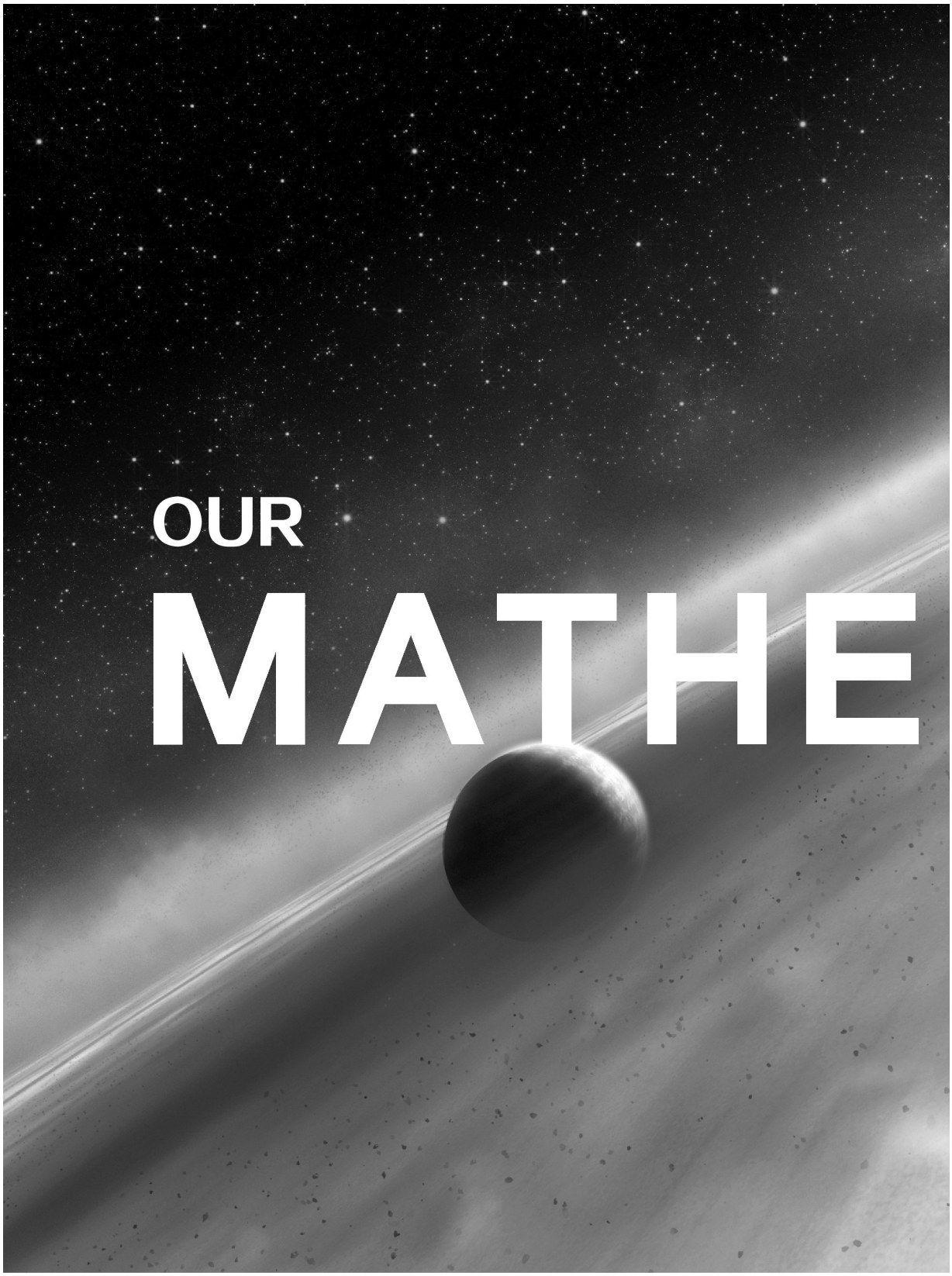
所有的物理理论都由两部分组成：数学公式和解释其内涵的文字。尽管上文中我一口气列出了十几个量子力学的诠释，但它们大都只在“文字”部分略有差异。我最感兴趣的问题是，它们的数学部分什么样。具体而言，它们是否能用最简单的数学公式（无一例外，都是薛定谔方程）来描述。到现在为止，尚无一丁点儿反面的实验证据，但许多量子力学诠释都增加了一段冗长的“文字”部分来喋喋不休地解释平行宇宙。所以，当你从中挑选自己最喜欢的诠释时，其实就归结于你最烦扰的问题究竟是世界太多，还是文字太多。

我在为1997年的马里兰会议撰写论文时，为了取笑我的一些同行，我给论文起的标题是《量子力学诠释：多世界，还是多废话？》（*The Interpretation of Quantum Mechanics: Many Worlds or Many Words?*）k当时我已经准备好收到一大波骂人的邮件，结果我并没有。看来，尽管我认为这些同行在量子力学上是错误的，但显然他们的幽默感都还不错……

在第6章中，我们讨论了，万事万物都由粒子组成，而粒子从某种意义上说都是纯粹的数学对象。在本章中，我们看到，在量子力学中还存在着某些更加基本的东西——波函数，以及它所栖身的、拥有无限维度的希尔伯特空间。粒子可以被创生和摧毁，也可以同时位于几个不同的地方。然而，无论过去、现在还是将来，波函数都只有一个，它在希尔伯特空间中循着薛定谔方程描述的路径运动着。但是，如果终极的物理实在就是波函数，那波函数究竟是一种什么怪兽？它由什么组成？希尔伯特空间又是由什么组成？迄今为止，我们所知的答案是，虚无——它们似乎什么都不是，只是纯粹的数学对象！于是，再一次，随着我们对深埋的物理实在挖得越来越深，泥淖中的线索告诉我们：**这片土地是纯粹的数学，连基岩本身也不例外。**在第9章中，我们将继续探讨这个问题。



- ◆在数学上最简单的量子理论中，除了三维空间以及其中的粒子之外，还有一些更加基本的东西，即波函数及其栖身的无限维度空间，也就是希尔伯特空间。
- ◆在这个理论中，粒子可以被创生和毁灭，并可以同时处在不同的位置，然而不管是过去、现在还是将来，都只有一个波函数，它在希尔伯特空间中沿薛定谔方程所决定的路径运动。
- ◆这个数学上最简单的量子理论永远遵循薛定谔方程，它预测了平行宇宙的存在，在这些平行宇宙中，你度过了无数个版本的人生。它还预示着，量子随机性只是一个幻觉，造成这种幻觉的原因是你的“量子克隆”。
- ◆表观的随机性与量子无关。即使你真的被生物技术克隆了，表观随机性依然存在。
- ◆这个数学上最简单的量子理论还预言了一个叫作“退相干”的审查效应，它将大部分量子怪诞性向我们隐藏起来了，让波函数看起来仿佛坍缩了一样。
- ◆你的大脑中不断发生着退相干，这个事实推翻了流行于世的“量子意识”说法。
- ◆量子多重宇宙与第5章所讨论过的空间多重宇宙是相同的。所以，一个系统的波函数也同样描绘了它分布于空间中的无数个版本，量子不确定性则反映了你不知道自己正在观察哪一个特定的版本。
- ◆如果我们栖身的空间与宇宙学标准模型是统一的，那么，“波函数究竟是否坍缩”这个问题就变得根本不重要了。因为，在埃弗雷特的多世界中，所有的世界都完全相同、没有差别，就算波函数坍缩也无法阻止所有的量子结果全部实现。
- ◆一个有争议的观点是，量子多重宇宙会让你主观上感觉到自己是永生的。如果这真的发生，你最终会成为地球上最年老的人。这也许根本不需要量子力学，只需要无限空间中的第一层多重宇宙就足够了。但我不认同这种观点，我将在第10章中进行解释。
- ◆还有一个尚有争议的观点是，波函数和希尔伯特空间构成了最基本的物理实在，二者都是纯粹的数学对象。


OUR
MATHE



▶ 第三部分 探秘数学宇宙

OUR MATHEMATICAL UNIVERSE



08

万物理论的追索之旅

甜蜜是约定俗成的，苦涩是约定俗成的，颜色也是约定俗成的，只有原子和虚空是实在的。

德谟克利特（Democritus）

“不是吧！我的箱子呢？！”

彼时，我的航班已经开始让乘客登机了。我要从波士顿飞往费城，为BBC拍摄一部关于休·埃弗雷特的纪录片。结果我突然发现，我手中并没有拖着行李箱。我赶紧跑回安检区。

“有人看见一个黑色的滚轮箱子吗？”

“没有。”保安说。

“但是它就在那里啊——那是我的箱子，就在那里！”

“那个箱子不是黑色的，”保安说，“它是青绿色的。”

在那之前，我从来不知道自己是色盲。当我恍然知晓，自己之前对现实（包括衣服颜色）的许多假设都错得离谱时，那感觉真的很耻辱。我怎能如此信任我的感官告诉我的关于外部世界的一切呢？然而，假如我不信任它，我又如何才能确定外部实在是真实的呢？毕竟，我所知道的一切，包括我对靠不住的感官的顿悟，都来自我的感官。这动摇了我认识论的根基，我感到自己很像一个在监狱里度过了

一生的囚犯——他对外部世界的一切信息（包括与那个靠不住的狱警有关的信息），都是那个不可信的狱警告诉他的。更一般地，如果我不理解思维究竟是如何运作的，我如何才能相信自己的意识感知所告诉我的关于世界的一切呢？

这个触及根基的困境已被雄辩的哲学家们探讨了许多年。他们中有许多哲学巨擘，包括柏拉图、笛卡儿、大卫·休谟和康德。苏格拉底说："唯一的智慧就是知道自己什么都不知道。"那么，我们要怎样才能在理解实在的道路上走得更远呢？

到目前为止，我们已经用物理学的方法探讨了外部物理实在。我们先将镜头拉远，观看了星系的宏大与辽远；再把镜头拉近，细窥了微观的亚原子结构，试图从物质最基本的构造单元——基本粒子来理解万物。然而，我们拥有的一切直接知识都只是"感质"（qualia），这是我们意识知觉的基本构造单位[41]，比如，玫瑰的艳红、铜钹的声响、牛排的香味、橘子的口感或针刺的微痛。那么，在我们完全理解物理学之前，难道不也需要先理解意识吗？如果在过去，我的回答一定是肯定的，因为我曾认为，如果我们不先弄清楚我们赖以感知的心灵是如何像哈哈镜一样扭曲外部物理实在的，就永远无法理解外部物理实在那个独一无二的"万物理论"。但是，我现在已经改变了看法。在这简短的一章中，我将告诉你原因。

心灵之眼并不能看到真正的外部实在

或许你会想："好吧，迈克斯，就算你说对了，但我并不是色盲。现在我正用自己的眼睛看着外部世界，如果我强迫自己接受这不是它看起来的样子，我一定是偏执狂。"先不要这么快下结论，来试试下面这两个实验吧：

实验1：从左到右、再从右到左转动几次你的头部。

实验2：保持头部不动，只从左到右、再从右到左动几次眼睛。

你是否注意到，在实验1中，外部实在似乎在旋转，但在实验2中，尽管眼睛在转动，但你感知到的外部实在却保持不动。这证明，你的心灵之眼所看到的一切并不是真正的外部实在，而是外部实在存储在你脑中的一个模型。实验1看起来很像一台旋转的摄像机拍下的视频。但是，你的眼睛是某种形式的生物摄像机，所以实验2告诉我们，你的意识并不直接感知视网膜上形成的图像。神经科学家对此已有详细的研究——视网膜上记录的信息以一种非常复杂的处理方式，不间断地更新着你脑中存储的关于外部实在的模型。再看看四周，你会发现，得益于这种先进的信息处理方式，尽管你视网膜上形成的原始图像是二维的，但你脑中的模型却是三维的。

我的床头没有安装电灯开关，所以每天入睡前，我都会先仔细看看我的卧室，看清地面上所有的障碍物后，再关灯上床。你也可以自己试试——放下这本书，站起来，看看四周，然后闭上眼睛走几步。在你闭眼走路时，你是否“看见”或“感知”到房间里的物体与你有相对运动呢？这是你脑中的实在模型正在更新，只不过这一次不是通过图像，而是通过你腿部的运动。你的大脑用它能接收到的所有有用信息，不断更新着它的实在模型，这些信息包括声音、触感、气味和味道等。

让我们把这个实在模型称为你的“内部实在”，因为这是你的内部思维对外部实在的主观感知。这个实在的内部性还体现在，它只存在于你个人的内部：你的心灵觉得它仿佛正在看着外面的世界，实际上它只是在看着你脑中一个实在的模型。反过来，这个实在模型又不停地用精密的自动程序追踪着脑外的世界，而你对这个程序却毫无知觉。

我们不能把内部实在与它所追踪的外部实在混为一谈，因为二者有着天壤之别。我大脑中的内部实在就像是汽车的仪表盘——它只是最有用信息的便利聚合。正如我的汽车会告诉我车速、油位、发动机温度等有用信息一样，我大脑的仪表盘（实在模型）也能告诉我自身的速度、位置、饥饿程度、空气温度、周遭环境中的亮点等信息，这些信息对人体使用者——也就是我们自身来说，也是至关重要的。

真相，所有真相，只要真相

有一次，我的汽车仪表盘出现了故障，尽管车是完好无损的，但仪表盘上的“检查引擎”指示灯却一直亮着。同样，人脑中的实在模型也可能会出故障，使得它与真实的外部实在相去甚远，导致出现错觉（对外部实在中确实存在的物体产生了错误的感知）、遗漏（没有感知到外部实在中确实存在的物体）和幻觉（感知到了外部实在中不存在的物体）。如果我们发誓要说出真相、所有真相、且只有真相，那么要当心，我们的感知可能会分别以错觉、遗漏和幻觉的方式违背上述誓言。

所以，从拟人的角度看，“检查引擎”指示灯的故障就像是我的车出现了幻觉，或者感受到了幻痛。我最近还发现，我的车还遭遇了错觉——从车速表的读数可以看出来，它总是觉得自己每小时行进的速度比真实速度快上3公里。这比起认知科学家所发现的大量人类错觉来说，根本不算什么。错觉可以出现在所有感官中，并扭曲我们的内部实在。

图8-1就展示了视错觉的两个例子，说明我们的视觉系统创造出的内部实在与外部实在之间存在差别。（如果你手中的本书是彩色版的而不是黑白版，那你可以看看图8-1左图中那两个圆点，你或许会觉得下方的圆点是橘黄色的，而上方的圆点是棕色的。）在外部实在中，

两个圆点具有相同的性质，光的波长都约为600纳米。如果一个射灯发出同样的光束，那就是橘黄色的光。那么，有没有棕色的光线？想一想，你有见过射灯或激光笔发出棕色的光吗？你不可能见过，因为世界上并没有棕色光！棕色在外部实在中根本不存在，只存在于你的内部实在中，它只会出现在当你看到橘黄色的光呈现在较暗的背景中时。

扫码关注“湛庐教育”，回复“穿越平行宇宙”，获取本图彩色版。

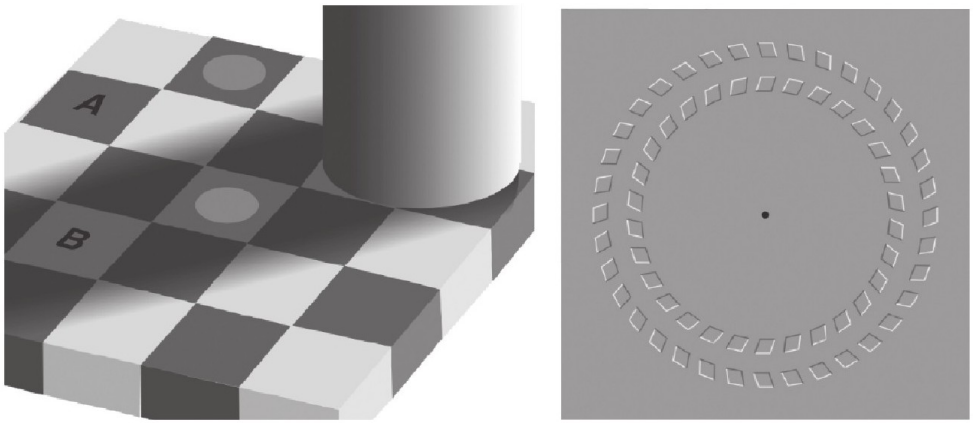


图8-1　视错觉。左图中，A和B所在的方格灰度相同，两个圆点的颜色也完全相同。而在右图中，如果你一直盯着中间的黑点，并前后移动你的头，你会发现圆圈在转动。

为了好玩，我常会比较不同的媒体会如何报道同一个新闻，包括MSNBC（微软全国广播公司节目）、FOX新闻、BBC、半岛电视台等。我发现，在“说出真相、所有真相、只要真相”这件事上，他们描绘事

实的区别通常在于他们省略和遗漏的真相不同。我觉得，我们的感官也同样如此。尽管它们会产生幻觉和错觉，但是，导致内部和外部实在不一致的原因，通常是“遗漏”。我的视觉系统遗漏了黑色和青绿色的区别，但即使你不是色盲，光所携带的绝大多数信息也会被你遗漏。当我在小学课堂上学到所有光线的颜色都是由红、绿、蓝三种基本颜色混合而成的时候，我以为，“3”这个数字能告诉我们外部实在中某些基本的东西。但是我错了，它只能告诉我们人类视觉系统遗漏的部分。具体而言，它只能告诉我们，人类的视网膜上有3种视锥细胞，它们在光谱（见图1-5）上千万种颜色中挑选了3种，分别对应着3个波长区域。

此外，波长在400～700纳米以外的光线对我们的视觉系统来说，是完全隐形的。当人们发明了可以探测不可见光的机器时，才发现外部实在原来比我们看到的要丰富得多，充满了射电波、微波、X射线和伽马射线，这着实令人类大为吃惊。并且，视觉并不是唯一一种惯于遗漏的感官，听觉和嗅觉也同样如此。我们听不到老鼠、蝙蝠和海豚发出的超声波；我们闻不到许多微弱的气味，但狗却能闻到，这些气味甚至占了它们嗅觉内部实在的绝大部分。这样的事实不胜枚举。尽管许多动物能捕捉到人类遗漏的视觉、听觉、嗅觉、味觉等感官，但是它们却对亚原子世界、星系闪烁的宇宙以及构成95%外部实在的暗物质和暗能量一无所知。

共享的共识实在

在本书的前两个部分，我们已经看到，数学方程可以很好地描述物理世界，点亮了找到“万物理论”方程的希望之火。这个“万物理论”能在任意尺度完美地描述我们的外部实在。物理学要取得这个终极胜利，最开始必须由一位数学家以“飞鸟视角”研究这些方程（方程必须足够简单，简单到可以印在T恤上），并从中推出他的内部实

在，也就是他在外部实在中以“青蛙视角”形成的主观感知。要做到这一点，就必须细致地理解意识运作的原理，这就包括错觉、遗漏、幻觉以及其他复杂情况。

然而，在外部实在和内部实在之间，还有一个中间区域，称为“共识实在”（consensus reality，见图8-2）。这种共识实在，是地球上所有生命形态都一致认同的实在，也就是宏观物体的三维位置和运动状态，以及我们可用经典物理学的常见概念来描述的其他日常属性。表8-1总结了几种不同的实在和视角，以及它们的相互关系。

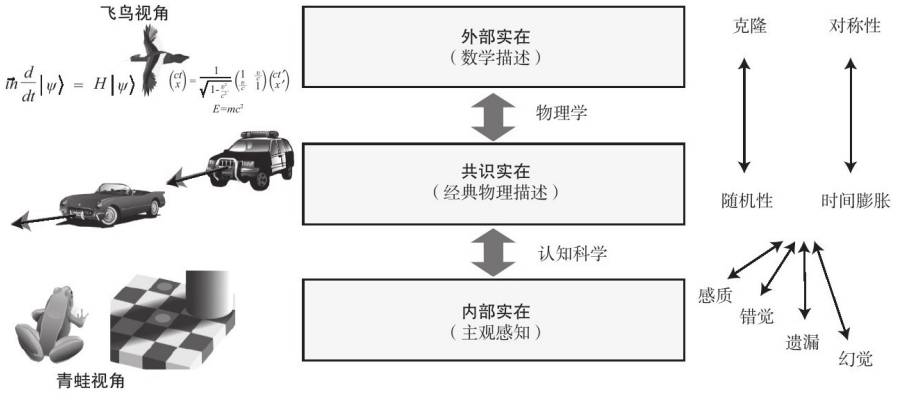


图8-2　我们可以用三种相互联系的方法来看待实在：第一是从一个数学家的角度，他用“飞鸟视角”来研究描述实在的数学方程；第二是从一个有自我意识的观察者的角度，他用主观的“青蛙视角”来观察实在；第三是从中间的共识视角，也就是我们常向彼此描绘的视角（比如一个日常物体在三维方向上的运动）。为了方便，对理解的终极追寻可以分为两个部分，并可分别解决：一是物理学，二是认知科学。物理学是为了揭示外部实在与共识实在是如何联系起来的（包括一些复杂的情况，比如克隆的观察者看起来是随机的，以及高速运动时时间看起来变慢了）；认知科学是为了揭示共识实在是如何与内部实在联系起来的（包括感质以及一些复杂的情况，比如错觉、遗漏和幻觉）。

表8-1　本章接下来将用到的一些关键术语

关键术语	术语解释
外部实在	物理世界。我相信，即使人类不存在，物理世界也会一直存在
共识实在	有自我意识的观察者都认同的关于物理世界的共有描述
内部实在	你主观上对外部实在的感知
实在模型	你大脑中的外部实在模型，也是你感知到的内部实在
飞鸟视角	当你研究描述外部实在的抽象数学方程时，你所具有的视角
青蛙视角	你对物理世界（你的内部实在）的主观视角

我们每个人都有自己的内部实在，那是从我们各自的位置、方向、心理状态的主观视角所感知到的实在，但同时也受到个人认知偏差的扭曲——在你的内部实在中，梦与真实无异，当头朝下时你不会觉得翻转的是整个世界，而不是你自己。

与内部实在不同的是，共识实在是共享的。当你向朋友描述到你家的行车路线时，你会试着改变自己的描述，从内部实在中的主观概念（比如“这里”和“我面向的方向”）转变成共识实在中的共享概念（比如“瓦萨尔街70号”和“朝北”）。由于我们物理学家在谈及共识实在时需要非常精确并定量，所以我们总是努力保持客观，我们会说一束光“波长为600纳米”而不是“橘黄色”，某物质含有“$CH_3COOC_5H_{11}$分子”而不是“香蕉味”。

共识实在并不能避免一些对外部实在的共有错觉。比如，猫、蝙蝠和机器人也经历着同样的量子随机性和相对论时间膨胀。毕竟，错觉的定义就决定了它只是生物大脑独有的现象，所以量子随机性和相对论时间膨胀与错觉无关，也与人类意识的运作原理无关。内部实在让我感受不到青绿色，让海豹只能看见黑白色，让四色觉的鸟类看到彩虹色。我们还可以想象，对能看见偏振光的蜜蜂来说，它的内部实在一定更加不同，还有采用回声定位的蝙蝠、触觉和听觉极度敏锐的盲人、扫地机器人……我们的内部实在迥然相异，但我们都会在某些问题上达成共识，比如门是否开着。

这就是我改变心意的原因。尽管理解人类意识的细节和本质是一个令人着迷的挑战，但它对理解物理学的基本理论来说并不是必要的，后者“只”需要从它的数学方程中推出共识实在就可以了。换句话说，**道格拉斯·亚当斯所谓的“生命、宇宙和万物的终极问题的答案”可以被分为两部分，并可以分别解决：物理学的挑战是从外部实在中得出共识实在，而认知科学的挑战是从共识实在中得出内部实在。**这是三千纪[42]亟待解决的两个重大问题。两个问题都令人望而生畏。欣慰的是，我们并不需要同时解决它们。

外部实在与共识实在的桥梁

我们已经看到，共识实在与内部实在之间有着巨大的差别，要把二者连接起来，需要克服一个艰难的问题——理解意识。然而，正如本书前面几部分所谈到的那样，共识实在与外部实在也迥然相异，所以，不能把二者混为一谈。实际上，我认为，**现代物理学的历史告诉我们，在最伟大的物理学突破中，最困难的部分都不是数学，而是理解这两种实在是如何连接在一起的。**

1905年，当爱因斯坦发现狭义相对论之时，许多重要的方程早已被亨德里克·洛伦兹（Hendrik Lorentz）等人发现了。然而，爱因斯坦的天才之处在于弄清了数学与测量之间的关系。他意识到，外部实在的数学描述中的长度和时间与共识实在中的测量存在差别，而这种差别取决于运动状态——如果一架飞机从人群上空飞过，在人群的共识实在中，这段时间将比起飞前短暂，而机载时钟将走得更慢[43]。

10年后，当爱因斯坦发现广义相对论之时，波恩哈德·黎曼（Bernhard Riemann）等人早已得出了其数学形式的关键部分。然而，最耀眼的成就再一次被爱因斯坦获得。它需要天才的洞察力和理解力——

外部实在的数学描述中的弯曲空间与共识实在中的万有引力是等价的。

> 为了理解这究竟有多困难，你可以想象一个场景：一个精灵来到了牛顿临终的病榻前，声称可以满足他最后一个愿望。在经过短暂的思索后，牛顿作出了决定：
>
> “请告诉我，300年之后的万有引力方程。”
>
> 精灵在一张纸上写下了广义相对论的所有方程。作为一个好心的精灵，它还将其翻译成了当时使用的老式数学符号。那么，牛顿能很快看出这是对他自己理论的一般化概括吗？相信答案是否定的。

量子力学横空出世后，连接外部实在和共识实在的困难程度达到了前所未有的新纪录。这体现在，100年后的今天，物理学家依然在争论如何诠释这个理论。我们在第7章中看到，在描述外部实在的希尔伯特空间中，波函数随时间发生着确定的变化，但在共识实在中，一切却好像又是随机发生的，其概率分布可以用波函数来近似计算。量子力学出现30年后，埃弗雷特才发现了怎样调和这两种实在。又过了10年，才有人发现了退相干，这对理解外部实在中的宏观叠加态为何没有出现在共识实在中，是至关重要的。

今天，理论物理学家面临的大挑战，是如何统一量子力学和万有引力。基于此领域的历史进展，我预言，如果人们发现了量子引力学正确的数学理论，它将打破纪录，成为最难诠释的理论。设想一下，假如在下一场量子引力学会议前夕，我们的精灵朋友再一次闯进会议室，在黑板上写下了终极理论的方程式。参会者们真的能理解这是什么意思吗？次日清晨，他们是否能意识到前一天黑板上擦去的是什么东西？我深表怀疑！

总结一下，我们对实在的追寻可以分为两部分，这两部分可以分别解决：一是认知科学的大挑战，二是物理学的大挑战。认知科学旨在将共识实在与内部实在连接起来，而物理学旨在将共识实在与外部

实在连接起来。这两个挑战都令人望而生畏。共识实在看起来似乎充满了坚实稳定的物体，但实际上，如果把一块石头放大10^{15}倍，你会发现，在恒久振动的粒子之间，只有空荡荡的空间。共识实在认为，随着时间的推移，一切故事都在三维的空间内上演，然而，我们将在第10章中看到，爱因斯坦的研究暗示着改变是一种幻觉，时间只是恒常时空中的第四维，永不创生、永不消亡，像刻录着一部电影的DVD碟片一样，包含着整个宇宙历史。量子世界感觉起来是随机的，但是在第7章中我们看到，埃弗雷特的研究暗示了，随机性也是一种幻觉，它只是思想在无数平行宇宙中被克隆时的一种感觉而已。而量子引力论的世界感觉起来什么样呢？——好吧，要弄清这个问题，物理学家还有漫长的路要走。

在本书接下来的部分里，我们将聚焦在物理学问题上，并将其推至逻辑的极境。有了我们对共识实在所知的一切，外部实在究竟又是什么样呢？它终极的本质是什么？



◆尽管只存在一个真实的实在，却存在若干个互补的视角。

◆在你脑中的内部实在中，你所拥有的关于外部实在的信息只是通过感官传输进来的一个小样本。

◆这些信息在许多方面都被扭曲了，但它除了能告诉你外部实在之外，或许还能告诉你感官和大脑是如何运作的——尽管这尚有争议。

◆在外部实在和内部实在之间，还有一个区域，叫作“共识实在”。这是所有拥有自我意识的观察者一致认同的物理世界共有描述。

◆道格拉斯·亚当斯戏谑的所谓“生命、宇宙和万物的终极问题的答案”可以被清楚地分为两个部分，并能分别进行解决：物理学的挑战和认知科学的挑战；物理学的挑战旨在从外部实在中得出共识实在，而认知科学的挑战旨在从共识实在中得出内部实在。

◆本书接下来的部分将聚焦在两个挑战中的第一个部分，也就是物理学。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
09
宇宙是由数学写就的伟大之书

哲学就写在这本伟大的宇宙之书中，它永远敞开，充盈着我们的视线。然而，在你理解书中的语言和符号之前，你不可能理解它。这本书是用数学语言写就的，它的符号就是三角形和圆形等几何形状。如果没有这些符号，人类就完全无法理解书中的字句，并将会永远迷失于黑暗的迷宫中。

伽利略

《试金者》（*The Assayer，1623*）

自然科学中的数学具有难以解释的有效性，这一事实近乎神秘……简直无法解释。

尤金·维格纳，1960

哇！那是普林斯顿一个周五的早晨，我好不容易读完了邮箱里的所有邮件，主题包括一本书的写作计划、一台坏了的烤箱和一个关于“量子自杀”的争论。此时，我在收件箱里发现了一封珍宝般的邮件，发件人是我认识的一位资深教授。

发件时间：1998 年 12 月 4 日，7:17:42（美国东部标准时间）

主题：一封艰难的邮件……

亲爱的迈克斯：

……你那想入非非的论文对你一点儿帮助都没有。如若你把它们提交给一本好期刊，并不幸发表了出来，你就毁掉了“好玩”的部分……我是一个一流期刊的编辑……我永远不会让你的论文发表。当然，我的观点可能并不重要，但如果同行们一致认同我的观点，将预示着你的未来将走向歧途……你必须认识到，如果你不把这些行为和你的严肃研究完全区分开，或者干脆把二者都抛弃，不把它们降低到酒吧这种地方的谈资，你的未来就将处在危险中。

看到这封邮件，我就像被泼了一盆冷水。这是一个重大的时刻，再一次刷新了我的个人纪录。我把这封邮件抄送给我父亲——他曾极大地鼓励我对科学的热爱，我父亲的回信引用了但丁的一句话：“Segui il tuo corso et lascia dir le genti！”这是一句意大利语，意思是：“走自己的路，让别人说去吧！”

我发现，尽管我们口头上经常说要跳出思想的藩篱，要敢于挑战权威，但事实上，物理学领域墨守成规的现象相当严重。早在研究生期间，我就敏锐地注意到了这种现象。比如，爱因斯坦革命性的相对论从未得过诺贝尔奖[44]，他本人也拒绝接受弗里德曼关于膨胀宇宙的发现，而埃弗雷特甚至在物理学领域找不到工作。也就是说，许多我迫切希望自己也能发现的重要理论，都曾被领域内的人们无情地忽视或拒绝。所以，我在研究生期间曾面临着一个两难的选择：我爱上物理学的原因正是因为我深深地着迷于那些宏大的问题，然而很明显，假如我一直追随自己的内心，那我的下一份工作恐怕就是去麦当劳了。

在爱好和职业之间，我不想只选其一。所以我暗中决定采用一种秘密策略，让我可以兼得熊掌与鱼。后来事实证明，这个策略竟然运转得很成功。我把它称为我的“杰克博士与海德先生策略”[45]，它的目标是一个社会学漏洞。1600年，布鲁诺因坚持自己的观点（所谓的“异端邪说”，比如空间是无限的）而被活活烧死；伽利略因声称地球围着太阳转而被判终身监禁，而今天的裁决则更加温和一些。如果你对一些听起来很哲学化的宏大问题感兴趣，大多数物理学家对待你的态度就好像你沉溺于电子游戏一样——下班后的事是你自己的事，别人管不着，但是请不要在白天的工作中分心去思考这些问题，也不要在上班时间讨论这些话题。所以，每当权威人士询问我在研究什么时，我就变身为受人尊敬的“杰克博士”，告诉他们我正在研究宇宙学领域的主流话题，比如第3章提到的那些，涉及大量的测量和数字，诸如此类。但是私底下，在没人注意的时候，我就变身为“邪恶的海德先生”，着手于我真正想做的事情——追寻实在的终极本质，正如第5章和第7章以及本书接下来要讨论的大部分内容。

为了消除顾虑，我还在个人网站上宣传自己的“业余爱好”，打趣说我每写10篇主流论文，就允许自己沉浸到一篇“古怪”的论文中。这很方便，因为我是唯一一个在心里默数着这些数字的人……当我从伯克利毕业时，我已经发表了8篇论文，但其中有4篇都是“海德先生”写的，所以我在我的博士论文中省略了这部分内容。我真的很喜欢我在伯克利的研究生导师乔·西尔克，但是为了安全起见，每次我打印“海德先生”的论文时，都要先确保他不在打印机附近，并且直到他在我的博士论文上签字后，我才给他看了那些论文[46]……我越来越无法摆脱这种策略：每当我申请工作和研究经费时，我就只提及“杰克博士”的论文；在业余时间，我一直对宏大的问题做着自己的研究。正是这些研究让我“引火上身”——与布鲁诺身上的火不同，这是一把蛮好的火。

这种双重人格式的策略取得了超乎想象的结果。我非常欣慰自己能在一所拥有杰出同事和优秀学生的大学里工作，也不用付出中断我最大兴趣的代价。但是现在，我觉得我亏欠科学界太多太多，到了我回馈的时候了！如果我们想象一下，在一个虚拟的空间里，所有研究课题在我们面前排列好，有一条边界线可以区分出哪些课题属于主流物理学、哪些不是（见图9-1）。这条边界线有一个神奇的性质——它在不停地变形！在某些地方它收缩了，比如，炼金术和占星术走下了主流的舞台；而在另外一些地方它发生了膨胀，对学科进行了重新分类，比如，相对论和疾病微生物学从高度推测性的少数观点变成了主流科学。一直以来我都相信，一定有一些额外的课题可供物理学家发挥长处，尽管这些课题一开始听起来很哲学化。我已经蛰伏太久了，不能再为自己找借口。我感到，我对年轻科学家肩负着一种道义上的责任，我要帮助他们从学术的狭龛中召唤出内心的“海德先生”，帮助他们将科学的边界往外推进一点点。这就是我和安东尼·阿吉雷成立基本问题研究所（我在第7章提到过这个研究所）的初衷，也正是我写这本书的原因。

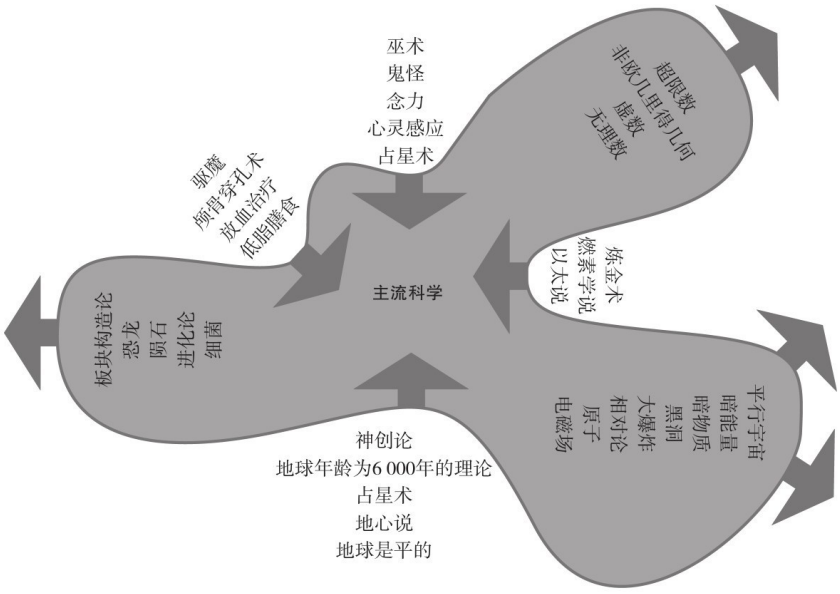


图9-1　主流科学的边界在不断变化。

那么，究竟是哪一篇论文招来了那封暗示我“停下来，否则你将自毁前程”的邮件呢？到底是什么话题，超出了图9-1所描绘的当代主流科学的边界，以至于那位教授觉得需要把我拉回来呢？那篇论文的主题，也正是本书的中心思想，那就是，我们的宇宙是一个巨大的数学对象。在这一章中，我们将开始探索这片神秘的疆域。

数学，到处都是数学！

生命、宇宙和万物的终极问题的答案究竟是什么？道格拉斯·亚当斯在科幻小说《银河系漫游指南》中曾这样追问，他给出的答案是42；最困难的部分原来是找到真正的问题。实际上，我们那些问个不休的祖先们无疑也问过同样宏大的问题，但随着他们知识的增长，他们对“万物理论”的追寻在逐渐演化。当古希腊人不再寄希望于神话传说，而是精心建立起太阳系的机械模型时，从那时起，他们追问的重点就从“为什么”转向了“如何做”。

从那时起，我们提出的问题在某些领域变少了，但在另一些领域却如雨后春笋般不断涌现，图9-1清楚地描绘了这一点。一些问题被放弃是因为太过天真或误入歧途，比如，文艺复兴时期流行从第一原理来解释行星轨道的尺度。同样的事情可能也会发生在目前十分流行的理论上。比如，宇宙中暗能量总量的预测值——如果我们最终发现，周边区域的暗能量数量只是历史偶然事件的话，那些预测值就必须推倒重来（我们在第5章探讨过这个话题）。我们回答这些问题的能力也早已超过了祖辈们最大胆的预期：牛顿如果知道我们能以1%的误差测算出宇宙的年龄，还能领悟微观世界的秘密从而制造出iPhone，那他一定大为惊讶。

我发现，道格拉斯·亚当斯对数字“42”的戏谑其实十分恰当。因为，在人类取得的种种成就中，数学扮演了不可或缺的角色[47]。

宇宙从某种意义上说是数学的，这种观念可以追溯到古希腊的毕达哥拉斯，并在物理学家和哲学家的争论中延续了千百年。17世纪时，伽利略说过一句著名的话，将我们的宇宙比喻成一本用数学语言撰写而成的伟大之书。而在近代，20世纪60年代期间，诺贝尔物理学奖得主尤金·维格纳认为“自然科学中的数学具有难以解释的有效性”，是一个亟待解决的问题。

形状、模式与公式

接下来，我们即将探索一个真正的终极解释。不过首先，我们需要澄清一下我们要解释的对象究竟是什么。请放下这本书，看看四周。我们要谈论的数学公式到底在哪里呢？数学难道不就是数字吗？你也许会在某些地方看见一两个数字，比如这本书的页码，但是，数字其实只是人类发明出来可供印刷和书写的符号，所以它们很难深邃地反映宇宙的数学性。

由于教育系统的灌输，许多人把数学等同于算术。然而，数学早已演化得大不一样了，它可以用来探讨诸如物理学这样更加精深的问题。比如，伽利略曾说，几何图形（如圆形和三角形）是数学化的，那么当你环顾四周时，你有没有看到一些几何形状或者模式呢？不过需要强调的是，人类设计的东西不算，比如长方形的书籍。但是，请观察一颗小石子被扔出后的轨迹，大自然为它勾勒出了一条多么美丽的线条！伽利略发现了一件了不起的事（见图9-2）：不管你扔出什么东西，它们的轨迹都是一样的，这条轨迹被称为“下开口的抛物线”。此外，抛物线的形状可以用一个非常简单的数学公式来描述：$y=x^2$，其中x代表水平位置，y代表垂直位置（也就是高度）。根据初始速度和方向不同，抛物线可以在水平或垂直方向上任意拉伸，但它永远是抛物线。

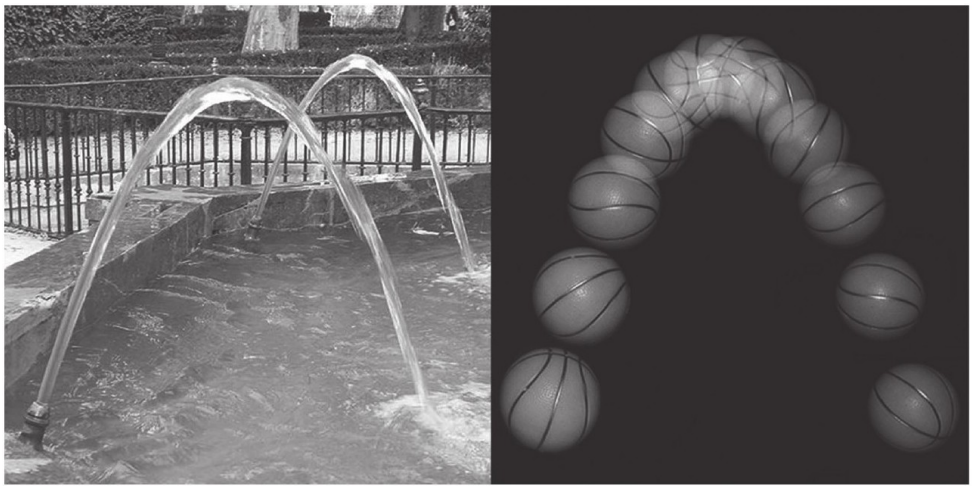


图9-2　当你向空中抛出某物时，在它撞到某物之前，其运动轨迹的形状总是完全一样，即“下开口的抛物线”（这里忽略了空气阻力）。

当我们观察太空中物体的运动轨迹时，我们发现了另一个重复出现的形状——椭圆形（见图9-3）。方程$x^2+y^2=1$描述了一个正圆形上的点，简单来说，椭圆形就是被拉伸的正圆形。根据初始速度、方向和它所围绕的物体质量的不同，轨道的形状也会发生变化，或被拉伸，或被倾斜，但它永远是椭圆形。此外，椭圆形和抛物线这两种形状还有联系：每个被拉伸的椭圆形的一端与某个抛物线都几乎完全相同，所以实际上，所有的运动轨迹都是椭圆形的一部分[48]。

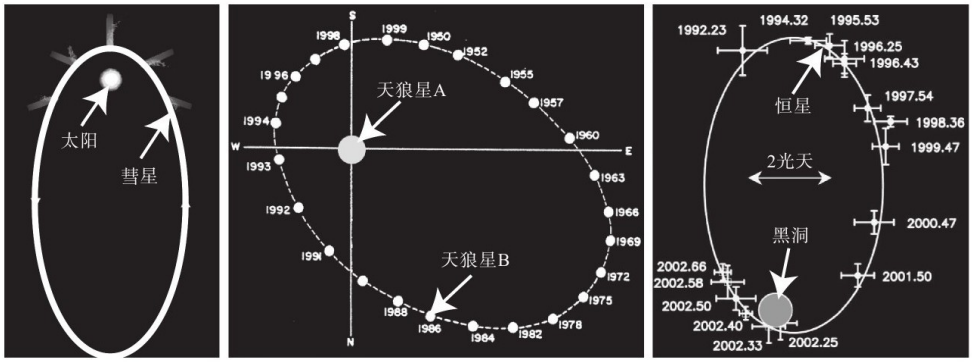


图9-3　当一个物体因为万有引力而绕着另一个物体旋转时，它的轨迹永远拥有相同的形状——椭圆形。简单来说，椭圆形就是将圆形在某一个方向上进行拉伸（这里不考虑摩擦力，也忽略了爱

因斯坦对牛顿引力理论的修正，因为该效应极其微小，除非靠近一个黑洞）。物体可能千差万别，但它们的轨迹都是椭圆形。比如，一颗彗星绕着太阳旋转（左图），一颗白矮星的残骸围绕着夜空中最亮的天狼星A旋转（中图），一颗恒星绕着银河系中心的超级黑洞旋转（右图），这颗黑洞的质量比我们的太阳大400万倍。（图片来源：右图由莱因哈德·甘泽尔[Reinhard Genzel]和莱纳·薛德尔[Rainer Sch del]提供）

在历史的长河中，人类又渐渐在自然界中发现了更多重复出现的形状和模式，不仅涉及运动和引力，还涉及许多不同的领域，比如电、磁、光、热、化学、放射性和亚原子等。我们对这些模式的总结被称为“物理定律”。就像椭圆形的轨迹一样，所有定律都可以用数学公式来描述（见图9-4）。这是为什么呢？

数字，物理实在的基本性质

公式并不是大自然由数学构成的唯一线索——还有数字。与人类造物中的数字（比如本书的总页数）不同，我所谈论的数字是指物理实在的某些基本性质。比如，拿出几支铅笔，把它们两两垂直（也就是相互成90°）地摆在一起，总共能摆出几支铅笔？答案是3支。比如，你可以把它们摆放在你房间的一个角上。那么，3这个数字从何而来呢？我们把这个数字叫作我们空间的维度。

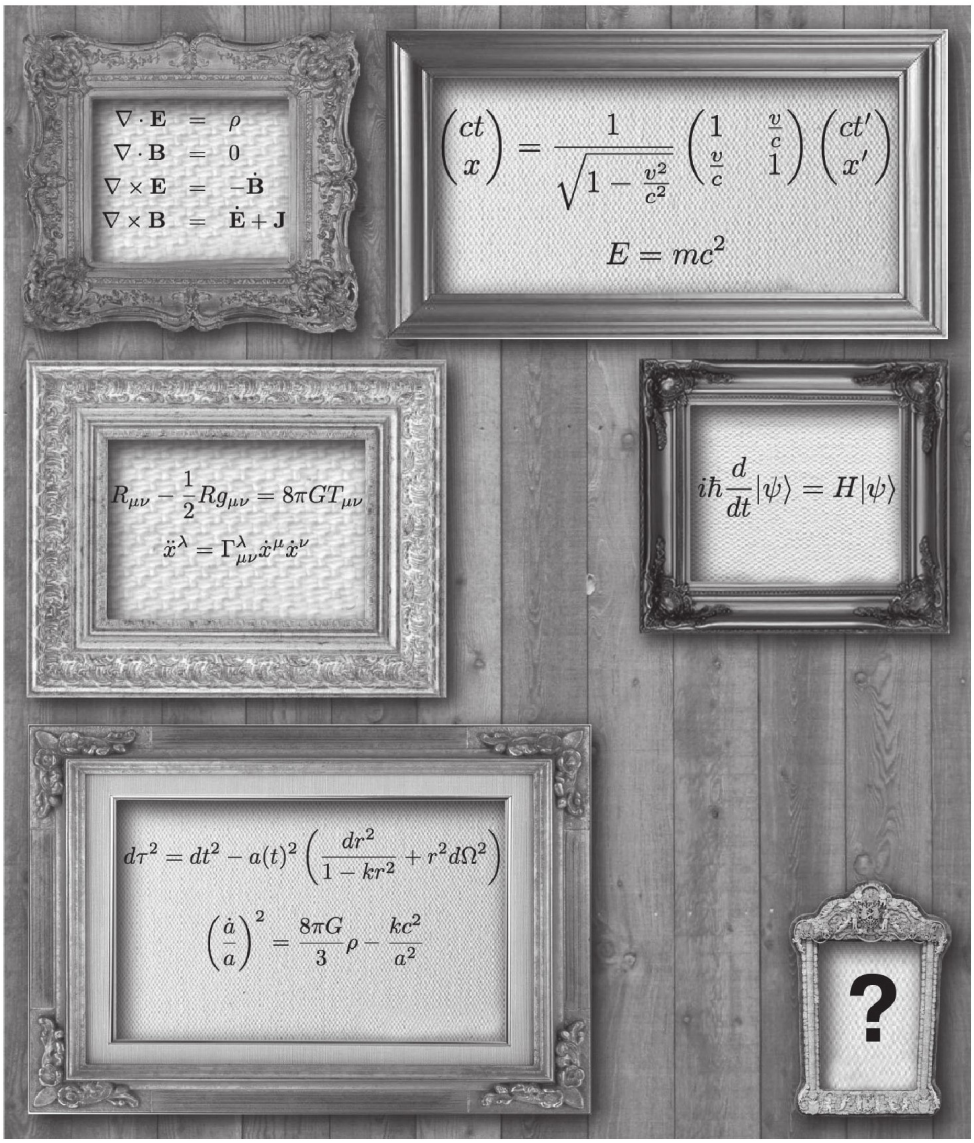


图9-4　正如诗歌和艺术作品能从少数符号中表达出深刻的内涵一样，物理学公式也同样如此。从左到右，从上到下，这些杰作描述了电磁学、近光速运动、引力、量子力学和膨胀宇宙。我们尚未找到一个可以描绘万物的统一方程。

可是，为什么维度是3，而不是2或者42呢？为什么在我们的宇宙中总共有6种夸克（至少目前来看）？我们在第6章看到，还有一些额外的整数，构筑入了大自然的本质，描述了基本粒子的种类。

这还不够。在大自然的内核中，还有许多非整数，需要小数点才能写出来。我最近数了一下，大自然内部总共编码了32种基本数字。你站在体重秤上显示的数字算吗？不算。因为它测量的是一个每天都在变化的东西（你的质量），所以它不能代表宇宙的基本性质。那么，质子的质量（1.672 622×10^{-27}kg）算吗？电子的质量（9.109 382×10^{-31}kg）呢？这两个数字看起来完全不随时间变化。但是，它们也不算，因为它们是用千克数来测量的，而千克只是人类随意杜撰出来的一个质量单位。但是，如果你用这两个数中的其中一个去除另一个，你就会得到一个真正基本的数字——质子质量是电子质量的1 836.152 67倍[49]。1 836.152 67是一个纯数，就像π和一样，因为它们都不涉及人类创造的各种量纲（如千克、米、秒或伏特）。为什么它会如此接近1 836？为什么不是2 013或者42？我们并不知道个中缘由。但我们认为，我们从理论上可以计算出这个数字，也可以从表9-1中列出的32个数字中，计算出大自然的其他基本常数。

表9-1　大自然中32个基本参数

续前表

参数	意义	测量值
$\sin\theta_{12}$	夸克 CKM 矩阵角	0.224 3 ± 0.001 6
$\sin\theta_{23}$	夸克 CKM 矩阵角	0.041 3 ± 0.001 5
$\sin\theta_{13}$	夸克 CKM 矩阵角	0.003 7 ± 0.000 5
δ_{13}	夸克 CKM 矩阵相	1.05 ± 0.24
θ_{qcd}	CP 破坏 QCD 真空相	$< 10^{-9}$
G_{ve}	电子中微子汤川耦合	$< 1.3 \times 10^{-11}$
$G_{v\mu}$	μ 中微子汤川耦合	$< 9.8 \times 10^{-7}$
$G_{v\tau}$	τ 中微子汤川耦合	< 0.000 09
$\sin^2 2\theta'_{12}$	中微子 MNS 矩阵角	0.857 ± 0.024
$\sin^2 2\theta'_{23}$	中微子 MNS 矩阵角	⩾ 0.95
$\sin^2 2\theta'_{13}$	中微子 MNS 矩阵角	⩽ 0.098 ± 0.013
δ'_{13}	中微子 MNS 矩阵相	?
$\rho\Lambda$	暗能量密度	$(1.16 \pm 0.07) \times 10^{-123}$
ξ_b	每个光子对应的重子质量 ρ_b/n_γ	$(4.66 \pm 0.06) \times 10^{-29}$
ξ_c	每个光子对应的冷暗物质质量 ρ_c/n_γ	$(24.9 \pm 0.7) \times 10^{-29}$
ξ_v	每个光子对应的中微子质量 $\rho_v/n_\gamma = \frac{3}{11}\sum m_{vi}$	$< 0.5 \times 10^{-29}$
Q	水平方向上的标量波动幅度 δ_H	$(2.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$
n	标量谱指数	0.960 ± 0.007
$\sin\theta_{12}$	夸克 CKM 矩阵角	0.224 3 ± 0.001 6
$\sin\theta_{23}$	夸克 CKM 矩阵角	0.041 3 ± 0.001 5
$\sin\theta_{13}$	夸克 CKM 矩阵角	0.003 7 ± 0.000 5
δ_{13}	夸克 CKM 矩阵相	1.05 ± 0.24
θ_{qcd}	CP 破坏 QCD 真空相	$< 10^{-9}$
G_{ve}	电子中微子汤川耦合	$< 1.3 \times 10^{-11}$
$G_{v\mu}$	μ 中微子汤川耦合	$< 9.8 \times 10^{-7}$
$G_{v\tau}$	τ 中微子汤川耦合	< 0.000 09
$\sin^2 2\theta'_{12}$	中微子 MNS 矩阵角	0.857 ± 0.024
$\sin^2 2\theta'_{23}$	中微子 MNS 矩阵角	⩾ 0.95
$\sin^2 2\theta'_{13}$	中微子 MNS 矩阵角	⩽ 0.098 ± 0.013
δ'_{13}	中微子 MNS 矩阵相	?
$\rho\Lambda$	暗能量密度	$(1.16 \pm 0.07) \times 10^{-123}$
ξ_b	每个光子对应的重子质量 ρ_b/n_γ	$(4.66 \pm 0.06) \times 10^{-29}$

注：人类曾测量过的大自然的每个基本性质都能从表中的32个数中计算出来——至少理论上可以。其中一些数的测量值已经非常精确，还有一些尚未在实验中得到。这些数字

的具体含义与我们的讨论无关。可是，到底是什么决定了这些数字呢？



表9-1中所列数字的具体含义可以从作者的一篇论文中找到答案。扫码获取作者的这篇论文。

表9-1中的数字都有着吓人的名字，不用担心，这与我们要讨论的事情没有关系。我想强调的一点是，从中可以看出，我们的宇宙有着某些非常数学化的性质。我们看得越仔细，就越能发现更多的数学。关于自然界的常数，综观物理学的每个领域，可以得到成百上千个纯数，从基本粒子质量的比值，到不同分子发出的光波长的比值等。运用强大的计算机来求解那些描述自然规律的方程，我们会发现，似乎每一个数都可以从表9-1的32个数字中计算出来。有一些计算和测量太过复杂，目前还没有人能完成。也许到它们完成之时，一些小数并不能在理论与实践之间完美地吻合。这样的矛盾在过去发生过无数次，解决的途径一般有三种：

- 有人发现实验出错了。
- 有人发现计算出错了。
- 有人发现物理定律出错了。

在第三种情况下，人们通常会摒弃之前的定律，从而发现一个更加基本的物理定律，就像爱因斯坦的理论取代了牛顿的引力方程，并解释了水星绕太阳运动的轨迹并不是完美的椭圆形一样。不管是哪种

情况，都进一步加深了“自然界一定有什么东西是数学化的”这一印象。

现在，表9-1中总共有32个参数。在未来，如果你发现了一个更加精确的物理定律，那么，表9-1中的参数数量可能会减少，也可能会增加。如果根据你的物理定律，其中某些数字可以由其他数字计算出来，那参数数量就可能减少。但如果日内瓦的大型强子对撞机发现了某些新粒子，那它的质量也可能为表9-1增添一些新成员。

更多线索：上帝是数学家吗

那么，通过物理世界的数学线索，我们了解了什么呢？大多数物理学家都认为，这意味着，出于某种原因，大自然可以由数学来描述（至少近似的），仅此而已。天体物理学家马里奥·利维奥（Mario Livio）在他的著作《上帝是数学家吗？》（*Is God a Mathematician?*）k中总结道：“科学家们选择了那些可用数学方法检验的问题来进行研究。”但是，我相信一切不止于此。

首先，为什么数学可以如此完美地描述大自然？我赞同维格纳，认为这需要一个解释。其次，纵观本书，我们已经遇到了许多线索，暗示着大自然不仅能用数学来描述，它本身的某些方面就是数学。

- 在第1章，我们看到了物理世界的基本结构——空间自身。从内禀性质的意义上说，空间是一个纯粹的数学对象，因为它唯一的内禀性质就是数学性质——数字，比如维度、曲率和拓扑性。
- 在第6章，我们看到了物理世界的所有“物体”都是由基本粒子构成的。从内禀性质的意义上说，基本粒子也是纯粹的数学对象，因为它们唯一的内禀性质都是数学性质，即表6-2所列出的那些数字，比如电荷、自旋和轻子数。
- 在第7章中，我们看到了某种尚有争议的，比三维空间及其内部的基本粒子更加基本的东西——波函数及其栖身的无限维度的希尔伯特空间。

> 粒子可以被创生，也可以被消亡，还可以同时处在几个不同的位置。但是，不管过去、现在还是将来，波函数都只有一个，它在希尔伯特空间中循着薛定谔方程决定的路径运动着，而波函数和希尔伯特空间都是纯粹的数学对象。

这一切都意味着什么？现在，请听听我的想法。我的理论是否比那位警告我前途将毁的教授更有说服力呢？留给你自己来判断。

我们宇宙中的万事万物，都是纯粹的数学

在研究生期间，我深深着迷于这些数学线索。1990年的一个夜晚，在加州大学伯克利分校，我和好友比尔·波里尔（Bill Poirier）正坐着聊天，探讨着实在的终极性质。突然间，我脑中冒出一个想法：**从某种意义上说，我们的实在并不只是被数学所描述，它本身就是数学。并且，它不仅某些方面是数学，它的全部都是数学，包括你在内**[50]。这个想法听起来十分疯狂，有些勉强。在我把这个想法告诉比尔之后，就像小火炖肉一样酝酿了好多年，我才写下了与之有关的第一篇论文。

外部实在假说
存在着一个完全独立于人类的外部物理实在。

在探讨细节之前，我先向你介绍一下我的逻辑框架。首先，有两个假说，其中一个听起来无伤大雅，另一个则似乎很激进。然后，我的论证是：从“数学结构”充分广义的定义上来说，前者能推出后者。

数学宇宙假说
我们的外部物理实在是一个数学结构。

我的第一个“外部实在假说”争议并不大。大多数物理学家都赞成这个由来已久的观念，尽管它仍有争议。形而上的唯我论者会竭尽全力地否定它；哥本哈根诠释的支持者也拒绝这个假说，他们认为实在不能独立于观察存在，没有观察就没有实在。假设真的存在一个外部实在，物理学理论理应尽可能

全面地描述它。而我们最成功的理论，比如广义相对论和量子力学都只能描述实在的一部分——引力或亚原子粒子的行为。然而，理论物理学界竞相追逐的圣杯就是一个“万物理论”——对物理实在的完整描述。

减轻人造包袱，回归纯粹

我个人对万物理论的追寻始于一个极端的观点：**如果我们假设，实在的存在是独立于人类之外的，那么，为了进行完整的描述，它必须还能被那些完全不理解人类概念的非人实体很好地定义，比如外星人、超级计算机等。换句话说，这种描述可以用某种形式来表达，而这种形式不能是人类创造的“包袱”，比如不能有“粒子”“观察”等人类创造的词语。**

然而，我在大学里教的所有物理理论都由两个部分组成：数学公式和“包袱”——“包袱”指的是那些用来解释的语句，描述公式如何与我们的观察和直观理解相联系。当我们对理论进行推导时，会为它们引入新的概念和词语，比如“质子”“原子”“分子”“细胞”“恒星”，因为这很便利。但是我们必须牢记，这些词语只是人类创造出来的概念。从本质上说，万物在去掉“包袱”后依然是可计算的。一台假想的理想超级计算机能在忽略人类的基础上，计算出我们的宇宙随时间如何变化，它只用简单计算出所有粒子的运动状态或者波函数的变化趋势。

比如，假设图9-2中的篮球轨迹是一记优美的绝杀，注定你将赢得这场比赛。赛后，你想向朋友描述它的样子。由于篮球是由基本粒子（夸克和电子）组成的，本质上说，你描述它的运动状态时可以丝毫不用提及“篮球”。比如，你可以像下面这样说：

- 第1个粒子以抛物线运动。
- 第2个粒子以抛物线运动。

●……

●第138 314 159 265 358 979 323 846 264个粒子以抛物线运动。

不过，这稍微有点不方便，因为说完所有的粒子需要花上比宇宙年龄还长的时间。而且，这么做也很多余，因为所有粒子都黏附在一起，以一个整体运动。所以人类发明了一个词叫“篮球”来指代这个整体，让我们可以一次性描述整体的运动状态，节省了大量的时间。

篮球是人类设计出来的，但它也与许多非人造的自然物体（比如分子、石头和恒星）有很多相似之处。人类发明词语是为了便利，这体现在两个方面，一是节省时间，二是提供概念或所谓的简化符号，以便能更直观地理解这个世界。尽管这些词语很有用，但它们都是可扔掉的“包袱”。比如，我在本书中多次使用“恒星”这个词，但从本质上说，每次这个词出现时，你都可以将其替换成它的组成定义，比如你可以把“恒星”替换为“由万有引力束缚的一堆物质，包含10^{57}个原子，其中一些原子正在进行核聚变”。也就是说，自然界中有许多实体都需要命名。当然，地球上几乎每个人类文明在自己的语言中都有一个与“恒星”对应的词，这个词是独立发明出来的，反映出自身的文化和语言传统。我猜，大多数居住在遥远恒星系的外星文明一定也发明出了代表“恒星”的名字或符号，即便他们根本不使用声音作为交流手段。

还有一个惊人的事实是，你可以在数学上预言这些值得命名的实体的存在，只要你知道支配它们各个部件的公式。换句话说，第6章中讨论过的乐高积木般的金字塔结构——从基本粒子到原子和分子，都是可预测的，我们人类所做的事情只是给每层中的物体起一个吸人眼球的名字。

比如，如果你用5个或更少的夸克求解出了薛定谔方程，并发现只有两种稳定的排列方式——2个上夸克和1个下夸克组成一团，或者2个下夸克和1个上夸克组成一团，于是为了方便起见，人类就给这两种团簇物质添加了“包袱”，将它们分别命名为“质子”和“中子”。同样，如果你

把薛定谔方程代入这些团簇中，你会发现总共257种稳定的聚集方式。人类也为其添加了“包袱”，把这些质子/中子的聚集团统称为“原子核”，并给每种团簇都起了名字：氢、氦……薛定谔方程还可以让你计算出如何把原子组装成更大的物体，不过这一次，稳定的状态非常之多，如果要全部命名会很不方便——于是，我们只命名了那些重要的级别（比如“分子”“晶体”）以及每个级别中最常见或最有趣的物体（比如“水”“石墨”“钻石”）。

我认为，这些复合物体是自然显现出来的，因为它们作为某些方程的解显现出来，而这些方程中只包含更加基本的物体。这种显现过程十分微妙，很容易被忽略，因为从历史的角度看，科学进展通常是沿相反的顺序发生的。比如，人类知道太阳的存在后，才意识到它们是由原子组成的；我们知道原子的存在后，才发现它们是由电子、质子和中子组成的；我们知道中子的存在后，才发现它们是由夸克组成的。每一个对人类而言十分重要的显现之物，我们都用新概念为其创造出了新的“包袱”。

图9-5中可以看到同样的“人造包袱”的浮现过程。这里，我绘制了一幅粗糙的图画，将科学理论组织成一张谱系图，其中的每一个理论从本质上说都能从更加基本的理论中推演而出。正如我们之前所提到的那样，每个理论都包含两部分——数学部分和文字部分，后者用以解释它们是如何与我们的观察相联系的。比如，我们在第7章中看到了量子力学在教科书中的两部分：数学部分（比如薛定谔方程）以及用平实的语言写就的基本假定（比如波函数坍缩的假设）。理论金字塔中的每一层都引入了新概念（比如“质子”“原子”“细胞”“生物”“文化”），因为它们使用起来很方便，抓住了本质，而不用再求助于上层更基本的理论。人类为它们引入了概念和文字——**从本质上说，万物都可以从谱系图最顶端的基本原理推演出来，尽管从实践来说，这种极端的还原论方法通常并没有什么用。大致来说，沿着谱系图向下移动，文字部分会越来越冗长，而方程的数量则会不**

断减少，在某些高度应用化的领域（如医药学和社会学），方程的数量甚至会降为零。相比之下，靠近顶端的理论都是高度数学化的，物理学家们仍在苦苦追寻，试图以我们可以读懂的形式来理解那些概念——如果有的话。

物理学的圣杯就是找到那个被打趣地称为“万物理论”的东西。万物理论又被称为ToE（Theory of Everything），从它可以推知一切——它将取代谱系图顶端大大的问号。第6章中我们曾讨论过，我们知道某处缺失了一环——能将万有引力和量子力学统一起来的环节。而这个万物理论则可以完整地描述外部实在假说所假定的外部物理实在。在本节开头，我曾声称这样的完整描述必须剔除人类创造的“包袱”。这意味着它将不包含任何概念！也就是说它是一个纯粹的数学理论，不需要任何像量子力学教科书那样的解释或“假定”（数学家们完全可以研究那些缺乏任何内禀含义，或与物理概念毫无关联的抽象数学结构——他们也常引以为傲）。

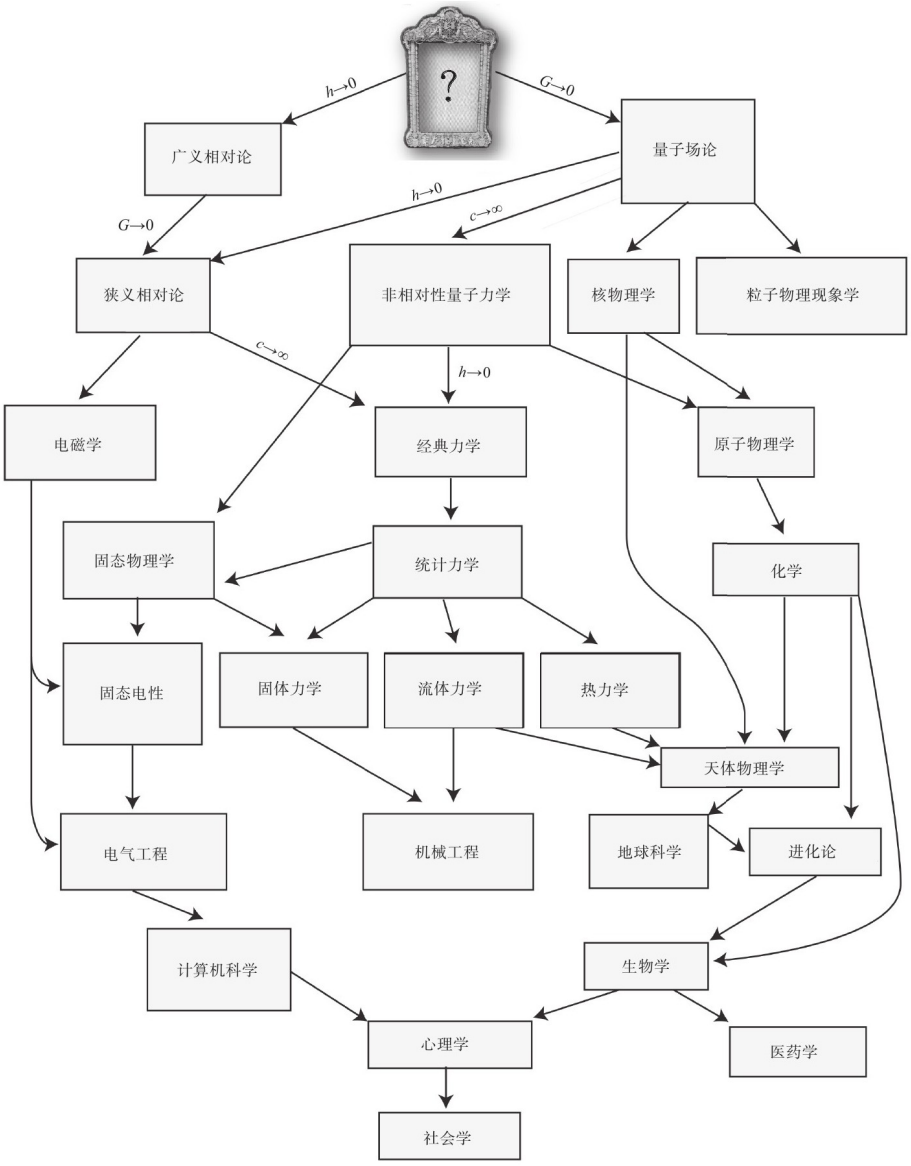


图9-5　所有的理论组织起来，都可以放入上面这个谱系图中。从理论上说，本图中每个理论都可以由在它之上的更加基本的理论推演出来。比如，狭义相对论可以由广义相对论近似地推出（假设牛顿万有引力常数G等于0）；经典力学可以由广义相对论近似地推出（假设光速c为无限大）；流体力学及其各种概念如密度和压力，可以由经典力学中关于粒子如何相撞的理论推出。这些推演关系在图中用箭头符号来表示。然而，只有少部分箭头能被人们很好地理解。比如，要从化学推出生物学或从生物学推出心理学，在实践中很难实现。因为这些理论中，只有少部分和近似计

> 算的某些方面是数学化的。目前物理学中发现的所有数学模型似乎都是对物理实在的有限方面的近似模拟。

当然了，一位极其聪明的数学家一定可以仅从这些公式就推知图9-5中的整个理论谱系图，只要通过推演出公式所描述的物理实在及其内部居民的性质、居民对世界的认知，甚至他们发明的语言，就可以实现。这个纯粹的万物数学理论可能非常简单，简单到足以印在T恤衫上。

这一切引出了一个问题：是否真能找到一个不涉及任何“包袱”的外部实在的完整描述？如果有，这个外部实在中的物体及其相互关系的描述必须是完全抽象的，迫使所有语言和符号都只是标签，不具备任何事先规定的意义。相比之下，这些实体仅有的性质都是由它们之间的关系所呈现出来的。

万物理论描述的外部实在，正是一个数学结构

要回答上述问题，我们需要再进一步研究一下数学。对一个现代逻辑学家来说，数学结构的精确定义是：一组相互联系的抽象实体，比如整数或几何图形，比如毕达哥拉斯最喜欢的十二面体。这与我们大多数人对数学的认知形成了鲜明的对比——在许多人看来，数学要么是一种虐待狂式的惩罚，要么是一个操控数字的魔法袋子。与物理学一样，数学的发展也追问着更广泛的问题。

现代数学研究的是纯抽象方式定义的结构，无须任何“人造包袱”。想想那些不具任何内禀意义、仅作为标签的数学符号吧！你写成任何形式都没有关系：“2加2等于4”“2+2=4”“Dos más dos es igual a cuatro”[51]。用什么符号来代表这些实体及其相互关系，是无关紧要的。整数仅有的性质是由它们之间的关系所呈现出来的。也就是说，数学结构并不是人类发明出来的——我们只是发现了它

们，并发明了用来描述它们的符号。千万不要混淆（我们发明的）数学语言和（我们发现的）数学结构。如果一个外星文明对每面平坦且全等的三维形状感兴趣，他们可能会发现图6-2中的5个被地球人叫作“柏拉图多面体”的形状。他们可以为它们随意起一些具有异“星”风情的名字，但是他们却无法任意创造出第6个形状——因为它根本不存在。正因如此，现代物理学中流行的数学结构，从3+1维的伪黎曼流形（pseudo-Riemannian manifolds）到希尔伯特空间，都是被我们发现而非发明出来的。

总而言之，上面的讨论可以总结为以下两个关键点：

- 外部实在假说意味着，“万物理论”（外部物理实在的完整描述）没有任何“包袱”。
- 一个不带任何“包袱”的描述，正是一个数学结构。

这两条关键点恰恰证明了数学宇宙假说，即被万物理论所描述的外部物理实在，就是一个数学结构[52]。结果就是，如果你相信我们的外部实在是独立于人类存在的，那么你也必须相信我们的物理实在是一个数学结构。只有它才是不含“包袱”的。也就是说，我们都栖身在一个巨大的数学对象中，它比正十二面体还要精致优雅，可能比卡拉比-丘流形（Calabi-Yau manifolds）、张量丛（tensor bundles）和希尔伯特空间等拥有吓人专业名字的最前沿物理学概念更加错综复杂。我们宇宙中的万事万物，都是纯粹的数学——包括你在内。

数学结构到底是什么

“等一等！”每当一个物理学理论或主张提出一些亟待解决的问题时，我的好友贾斯汀·本迪斯就会这样喊道。而数学宇宙假说则提出了三个此类问题：

- 到底什么是数学结构？

●为何我们的物理世界是一个数学结构？

●它是否能作出一些可供检验的预测？

我们将在第10章和第11章分别探讨第二个和第三个问题。现在，让我们开始探索第一个问题——第11章中，我们将回到这个问题，进行更详细的讨论。

“不朽对局”的棋局

前面我们看到了人类如何为我们的描述添加上各种“包袱”。现在，让我们来看看对立面——数学抽象如何能消除“包袱”，剥离至万物赤裸的本质。我们先来看看那个被称为“不朽对局”（Immortal Game）的棋局（见图9-6）。对局中，白棋引人注目地牺牲了两个车、一个象和一个后，用剩下的最后3个轻子完成了将死。这个对局最早于1851年出现在阿道夫·安德森（Adolf Anderssen）与莱昂内尔·吉塞芮茨基（Lionel Kieseritzky）的对弈中。每年，同样的棋局都会重复出现在意大利的马罗斯蒂卡（Marostica），世界各地的象棋爱好者会涌至此地，重复这个对局，有的棋手还会装扮成棋子的样子。一些棋手（包括我弟弟佩尔、他儿子西蒙和我儿子亚历山大，图9-6左一）会使用木头做的棋子；还有一些人会用大理石或塑料做成不同形状和大小的棋子，棋盘有的是棕色和米黄色相间，有的是黑白相间；还有一些则是虚拟的三维或二维计算机图像（图9-6右一）。但是你会觉得，这些细节都不重要——当棋迷们用“美丽”这个词来形容不朽对局时，他们并不是指棋手、棋盘和棋子具有吸引力，而是指一个更抽象的实体，一场抽象的比赛，或者说是棋子运动的序列。

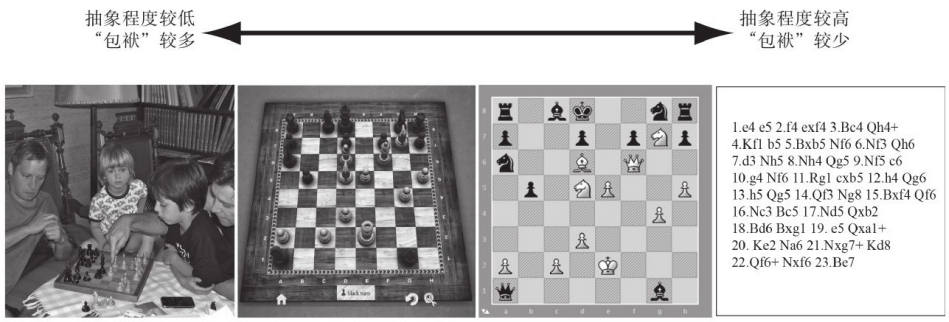


图9-6　一场抽象的象棋比赛与棋子的颜色和形状无关，也与棋子是在物理存在的棋盘还是虚拟的计算机渲染图像上运动，或是所谓的代数记谱法上运动无关——它都是同一场棋局。类似地，数学结构也与描述它的符号无关。

现在，让我们来看看人类是如何描述这些抽象实体的。首先，一段描述必须明确而具体，所以我们发明了客体、语言或其他符号来表示抽象的思想，比如，在美国，我们把可斜着走的棋子叫作“主教”（bishop）。其次，这个名字显然是很随意的，换个名字也无妨——实际上，法国人管这个棋子叫作“小丑”（fou），斯洛伐克人称之为“射手”（strelec），瑞典人称之为“跑者”（l pare），而波斯语称之为“象”（fil）。然而，我们可以引入一个强大的武器，将这些不同的称谓统一起来，让不朽对局保持独一无二的特性。这个武器就叫作“等价”。

- 我们将同一个事物的两个不同描述定义为“等价”。
- 如果两个描述是等价的，则它们描述的是同一个事物。

比如，我们都一致认同，如果两个对棋子位置的描述的不同点仅在于棋子的大小，或棋手母语对它的不同称谓，那这两个描述就是等价的。

等价

所有的语言、概念或符号，如果它们只出现在某些而非全部等价描述中，那么很显然，它们

如果两个描述之间存在一个保留了所有关系的对应性，那么这两个描述就是等价的。

就是可有可无的，因此都是“包袱”。那么，如果我们想要深入至不朽对局的真正本质，到底要剥离掉多少“包袱”呢？很显然，答案是许多。因为计算机在下棋时可以不涉及任何人类的语言和概念（如颜色、材质、大小和棋子的名字）。要完全理解我们到底可以走多远，需要先对“等价”下一个严格的定义。

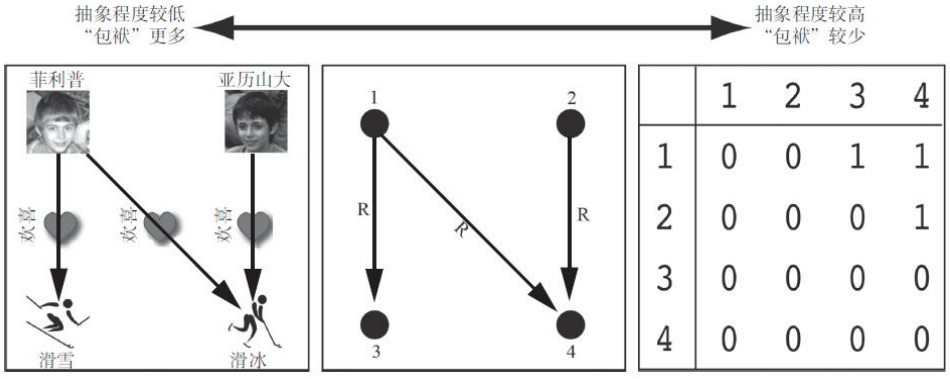
象棋涉及抽象的实体（不同的棋子和棋盘上不同的方格）以及它们之间的关系。比如，棋子与方格的一种关系是前者在后者之上。还有一种关系是，棋子允许移动到某个方格。比如，在我们的定义中，图9-6中间的两幅图是等价的：三维的棋子棋盘和二维的棋子棋盘之间存在一个对应关系，不管三维的棋子位于哪个方格中，在二维棋盘中都能找到一个对应的棋子位于对应的方格中。同样，对棋子位置的纯英文描述与纯西班牙文描述是等价的——只要你有一本英文和西班牙文相对应的词典，你就可以将西班牙文的描述翻译成英文的描述。

当报纸和网站在介绍棋局时，通常会采用另一种等价描述即所谓的“代数记谱法”（algebraic cless notation，见图9-6右一）。这种形式中，棋子并不是以文字或物体的形式呈现的，而是用单个字母（比如，象用B）来表示，而方格用一个代表列的字母和一个代表行的数字来表示。由于图9-6右图中对棋局的抽象描述与一段在实体棋盘上下棋的视频是等价的，所以，在后者中，所有不包含在前者中的描述都只是“包袱”——从棋盘的物理实体到棋子的形状、颜色的名称。甚至代数记谱法的特性也是“包袱”——当计算机下棋时，它们采用的是另一种抽象描述来代表棋子的位置，只涉及内存中0和1组成的特定模式。那么，当你剥离所有的“包袱”，还剩下什么呢？这些等价描述究竟在描述些什么呢？不朽对局本身，100%纯净，不含任何“添加剂”。

包袱与数学结构

我们对抽象的棋子、棋盘及其相互关系的研究，是一个更广泛的概念的例子，即数学结构。这是现代数理逻辑中的一个标准概念。我将在第11章给出一个更技术性的描述，但是现在，我们只需要这个非技术性定义就够了：**数学结构是指一组相互关联的抽象实体。**

要理解它的含义，让我们来看几个例子。图9-7左图是一个拥有4个实体的数学结构，其中一些实体的关系是“喜欢”。在图中，名叫“菲利普”的实体用一张图片来代表，这张图片拥有许多内禀性质，比如棕色头发等。相比之下，数学结构中的实体是纯粹抽象的，这意味着它们并不具有任何内禀性质。也就是说，不管我们用什么符号来代表这些实体，都只是标签，而标签的性质无关紧要——为了避免将符号的性质赋予它们所代表的抽象实体，让我们把图片简化一下，得到中间的那张图。中图与左图是等价的，因为，如果你建立一个对应关系的“词典”，即菲利普=1，亚历山大=2，滑雪=3，滑冰=4，喜欢=R，那么所有的关系都保留下来了。比如，“亚历山大喜欢滑冰”被翻译为“2 R 4”，这个关系在中图中同样成立。



	1	2	3	4
1	0	0	1	1
2	0	0	0	1
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0

图9-7　同一个数学结构的三个等价描述，数学家会称其为“4个元素的有序图”。每个描述中都包含一些任意的“包袱”，但是它们所描述的数学结构却是100%无“包袱”的：它的4个实体没有

任何性质，除了它们之间的关系，而这些关系也没有任何性质，除了它们所连接的元素的有关信息。

棋局可以单用符号来描述，而不用任何图形。数学结构也同样如此。比如，图9-7右图给出了前述数学结构的第三个等价描述，采用的形式是一个4×4的数表。在这个数表中，等于1的条目意味着，某个关系（“喜欢”）在该行对应的元素与该列对应的元素之间成立，所以，第1行第3列的“1”意思是“菲利普喜欢滑雪”。很显然，这个数学结构的等价描述可以有很多种，但是所有这些等价描述都只描绘了同一个，也是唯一一个独特的数学结构。**总而言之，一个数学结构的任何特定描述都包含“包袱”，但这个结构自身却不包含。不要混淆数学结构和等价描述，这一点至关重要：对一个数学结构来说，即便是看起来最抽象的描述也不是结构本身；结构对应着所有等价描述组成的集合。**表9-2总结了与数学宇宙理论有关的重要概念。

表9-2　与数学宇宙有关的重要概念的总结

重要概念	概念解释
包袱	我们人类为便利而发明的概念和文字，对描述外部物理实在来说并不是必要的
数学结构	一组相互关联的抽象实体的集合，可以用不含“包袱”的方式来描述
等价	如果数学结构的两个描述之间存在一个保留了所有关系的对应性，那这两个描述就是等价的；如果两个数学结构拥有等价的描述，那这两个数学结构就是相同的
对称	变换后保持不变的性质，比如，一个理想的正圆形在旋转时，其形状保持不变
外部实在假说	认为存在着一个完全独立于人类的外部物理实在的假说
数学宇宙假说	我们的外部物理实在是一个数学结构的假说；我认为这是外部实在假说的推论
可计算宇宙假说	我们的外部物理实在是一个数学结构，该数学结构由可计算的方程来定义（第 11 章）
有限宇宙假说	我们的外部物理实在是一个有限的数学结构（第 11 章）

对称性以及其他数学性质

一些数学家喜欢争论什么是真正的数学。当然，在这个问题上，他们没有达成共识。不过，数学的一个流行定义是“对数学结构的正式研究”。在这方面，数学家们确定了大量有趣的数学结构，从我们很熟悉的东西，如立方体、二十面体（见图6-2）和整数，到拥有奇异名字的东西，如巴拿赫空间（Banach spaces）、轨形（orbifolds）和伪黎曼流形。

数学家们在研究数学结构时，最重要的事就是证明与它们性质有关的定理。然而，既然数学结构的实体及其相互关系都不允许拥有任何内禀性质，那数学家们究竟在研究什么性质呢？

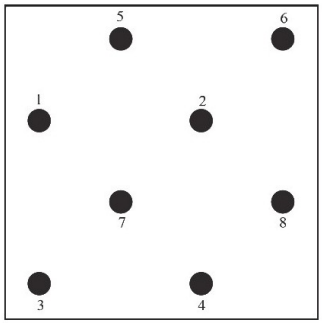
让我们来看看图9-8左图所描述的数学结构。它的各个元素之间没有任何联系，所以，没办法将各个实体区分开来。这意味着，这个数学结构除了“基数”（cardinality，基数是指它所包含的实体的数量）外，没有任何性质。数学家将这个数学结构称为“8个元素的集合”，它唯一的性质就是拥有8个元素。真是一个无趣的结构！

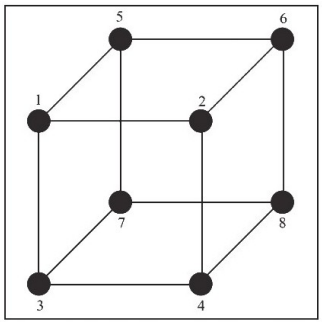
图9-8中间的图片描述了一个不同的、更有趣的数学结构，也拥有8个元素，但元素之间存在着关系。这个结构的其中一个描述说，它的元素是一个立方体的顶点，而关系则是相邻顶点之间的连线，也就是立方体的边。然而请牢记，不要将数学结构和描述混为一谈——数学结构自身不具备任何内禀性质，如大小、颜色、质地或组分，它只包含8个相互关联的元素，你可以选择将其理解为立方体的8个顶点。实际上，图9-8右图是该数学结构的另一个等价描述，却没有提到任何几何概念，如立方体、顶点和边。

那么，既然这个数学结构的实体不具备任何内禀性质，那这个结构自身是否拥有什么有趣的性质呢（除了8个元素之外）？实际上，它

真的有，即对称性！在物理学中，如果你将某物以某种方式变换一下，它还是保持原样，这就叫对称。比如，如果把你的脸左右镜像一下还是与以前一样，那么它就是镜像对称（mirror symmetry）的。同样，图9-8中图中的数学结构也是镜像对称的：如果你将元素1和2、3和4、5和6、7和8对调，它们的关系图还是和从前完全一样。它还具有某种旋转对称性（rotational symmetry）：如果你将立方体绕某一面旋转90°，或者绕一个顶点旋转120°，或者绕某一边的中心点旋转180°，它还是与从前保持一样。尽管我们直观地认为对称性与几何有关，但是当你看看图9-8右图时，你会发现，数表同样具有对称性——如果你用某些特定的方式为这8个元素重新编号后，再通过扩展行列数，对数表重新排序，你会发现，你得到了一个与从前完全相同的数表。

在哲学上有一个著名的棘手问题，叫作“无穷后退问题”（infinite regress problem）。举个例子，如果我们说，一颗钻石的性质可以用碳原子的性质和排列来解释，碳原子的性质可以用它内部质子、中子和电子的性质和排列来解释，质子的性质可以用夸克的性质和排列来解释等，那么如果我们想要解释各个零件的性质，看起来注定要这样永远继续下去，无穷尽也。数学宇宙假说为这个问题提供了一个激进的解决办法——在最底层，实在是一个数学结构，所以它的各部件根本不具备任何内禀性质！也就是说，从这个意义上讲，数学宇宙假说暗示着我们居住在一个“关系实在”（relational reality）中，因为我们周遭世界的性质并不是来源于它的终极构件，而是来源于这些构件之间的相互关系[53]。这样看来，**外部物理实在不仅仅是它各个构件的简单加总，因为它拥有许多有趣的性质，而它的基本构件却不具备任何内禀性质。**





	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	0	1	0	0	0
2	1	0	0	1	0	1	0	0
3	1	0	0	1	0	0	1	0
4	0	1	1	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	1	1	0
6	0	1	0	0	1	0	0	1
7	0	0	1	0	1	0	0	1
8	0	0	0	1	0	1	1	0

图9-8　中图描述了一个拥有8个元素（用黑点来表示）的数学结构，元素之间有相互关系（用线表示）。你可以把元素理解为立方体的顶点，把关系理解为立方体的边，连接着相关联的顶点。但这个理解完全是一个可有可无的“包袱”。右图给出了同一个数学结构的等价描述，不包含任何几何图形，比如，第5列第6行的条目为“1”，意味着元素5和元素6之间的关系成立。这个数学结构拥有许多有趣的性质，包括镜像对称性和某些旋转对称性。与之相比，在左图描述的数学结构中，元素间没有任何关系，也不具备任何有趣的性质，除了它的基数为8。

图9-7和图9-8中所画出的几个特定的数学结构都属于同一类数学结构，叫作“图”（graphs）——抽象的元素，其中一些两两相连。你可以用其他图来描述与图6-2中的十二面体等柏拉图多面体相对应的数学结构。还有一个图的例子是Facebook上的好友网络——其中，所有的元素对应着所有的Facebook用户，如果两个用户是好友关系，那他俩就相连。尽管数学家对图研究得很多，但它们只是数学结构众多类别中的其中一个。我们将在第11章对数学结构的各种细节进行更深入的探讨，但是现在，让我们先来看一些简单的例子，好让你了解数学结构是多么多样化。

许多数学结构对应着不同种类的数字。比如，所谓的自然数1、2、3……一起组成了一个数学结构。这里的元素是数字，它们之间有着各种各样的关系。一些关系（比如等于、大于和除以）可能在两个数字之间成立（比如，“15除以5”），一些关系可能在三个数字之间成立（比如“17是12与5的和”），还有一些关系可能在其他数量的数

字之间成立。渐渐地，数学家发现了更多种类的数字，它们都能形成自己的数学结构，比如整数（包括负整数）、有理数（包括分数）、实数（包括2的平方根）、复数（包括-1的平方根）和超限数（包括无穷大）。当我闭上眼，脑中想着数字5时，它看起来是黄色的。但是，在所有的数学结构中，数字本身都不具备任何内禀性质，它们唯一的性质就是与其他数字之间的关系。比如，5具有的一个性质是4与1的加和，但它不是黄色，也不是由任何东西制成的。

还有一种数学结构对应着不同类别的空间。比如，我们学过的三维欧几里得空间就是一个数学结构。在这里，元素就是三维空间中的点，以及被理解为距离和角度的各种实数。还有各种各样的关系。比如，如果三个点位于一条直线上，那它们就能满足一个关系。还有许多数学结构，对应着四维甚至更高维度的欧几里得空间。数学家们还发现了许多其他更广义的空间，形成了它们自身的数学结构，比如所谓的闵氏空间（Minkowski spaces）、黎曼空间（Riemann spaces）、希尔伯特空间、巴拿赫空间和豪斯多夫空间（Hausdorff spaces）。许多人曾认为，我们的三维物理空间就是一个欧几里得空间。其实，正如我们在第1章中看到的那样，爱因斯坦终结了这种看法。他先是用狭义相对论提出，我们栖身在一个闵氏空间中（包含时间作为第四维度）。接着，他的广义相对论又提出，我们其实生活在一个黎曼空间中，因为它可以弯曲。然后，正如我们在第6章看到的那样，量子力学问世了。它告诉我们，我们其实居住在一个希尔伯特空间中。再次强调，这些空间中的点并不是由任何构件组成的，它们没有颜色、没有材质，也没有任何其他内禀性质。

尽管目前已知的数学结构又多又奇妙，但还是有更多的数学结构等待着人们去发现。每一个数学结构都可以通过分析来确定它的对称性质。人们发现许多结构都具备有趣的对称性。令人着迷的是，物理学上最重要的发现之一就是我们的物理实在也具有内在的对称性。比

如，物理定律拥有旋转对称性，也就是说，我们的宇宙中没有一个特殊的方向可以被称为“上”。它们似乎还具有平移对称性，也就是说，没有一个特殊的地方可以被称为空间的中心。我们刚才提到的大多数空间都拥有美丽的对称性，其中一些符合我们物理世界的观测对称。比如，欧几里得空间同时具有旋转对称性（空间旋转之后与之前没什么两样）和平移对称性（空间平移后与之前没什么两样）。四维闵氏空间的对称性更多：如果你在空间和时间维度之间做一种广义旋转，它与从前没什么两样。爱因斯坦认为，这解释了为何近光速运动的时间会变慢，我们在上一章曾提到过这件事。20世纪，人们还发现了自然界中许多更加微妙的对称性，这些对称性构成了爱因斯坦相对论、量子力学和粒子物理学标准模型的基石。

需要注意的是，这些对物理学来说至关重要的对称性正是来源于实在的基本构件缺乏任何内禀性质，也就是说，来源于数学结构的最深含义与本质。如果你给一个无色球体的一边涂上黄色，那它的旋转对称性就被破坏掉了。同样，如果一个三维空间中的点拥有某种性质，可以让一些点与其他点拥有本质上的不同，那这个空间就失去了它的旋转对称性和平移对称性。对空间来说，“少即是多”，因为点拥有的性质越少，空间所具有的对称性就越多。

如果数学宇宙假说是正确的，我们的宇宙是一个数学结构，那么，一个极其聪明的数学家就能够从它的描述中推演出所有物理学理论。他将如何做到这一点呢？我们并不知道，但是我很肯定，他的第一步一定是计算出数学结构的对称性。

在本章开头的时候，一位教授曾作出可怕的预言，说我那些关于数学与物理之间关系的论文太过疯狂，将毁掉我的前程。现在，我已经将这些想法的第一部分和盘托出：我认为我们的外部物理实在是一个数学结构。这听起来确实很疯狂。然而，这只是一个热身。接下

来，一切将变得更加疯狂，因为我们将去探索数学宇宙假说蕴含的启示和可检验的预言！除此之外，我们将被无情地领入一个新的多重宇宙，它是如此广袤无垠，即使是量子力学的第三层多重宇宙在它面前也黯然失色。不过在此之前，我们需要回答一个棘手的问题。我们的物理世界随时间而变化，但数学结构却一成不变，它们只是简单地存在着。既然如此，我们的世界怎能是一个数学结构呢？下一章，我们将一起解决这个问题。



◆从古至今，人们都很迷惑，为什么数学能如此精确地描述物理世界。

◆从那时起，物理学家在自然界发现了更多能用数学公式描述的形状、模式和规律。

◆物理实在的内在结构中包含几十个纯粹的数字。从本质上说，所有测量出来的常数都可以由这些数字计算出。

◆一些重要的物理实体，如空荡的空间、基本粒子和波函数似乎都是纯数学化的，因为它们仅有的内禀性质都是数学性质。

◆外部实在假说是说，存在一个完全独立于人类的外部物理实在，被大部分（但并非所有）物理学家接受。

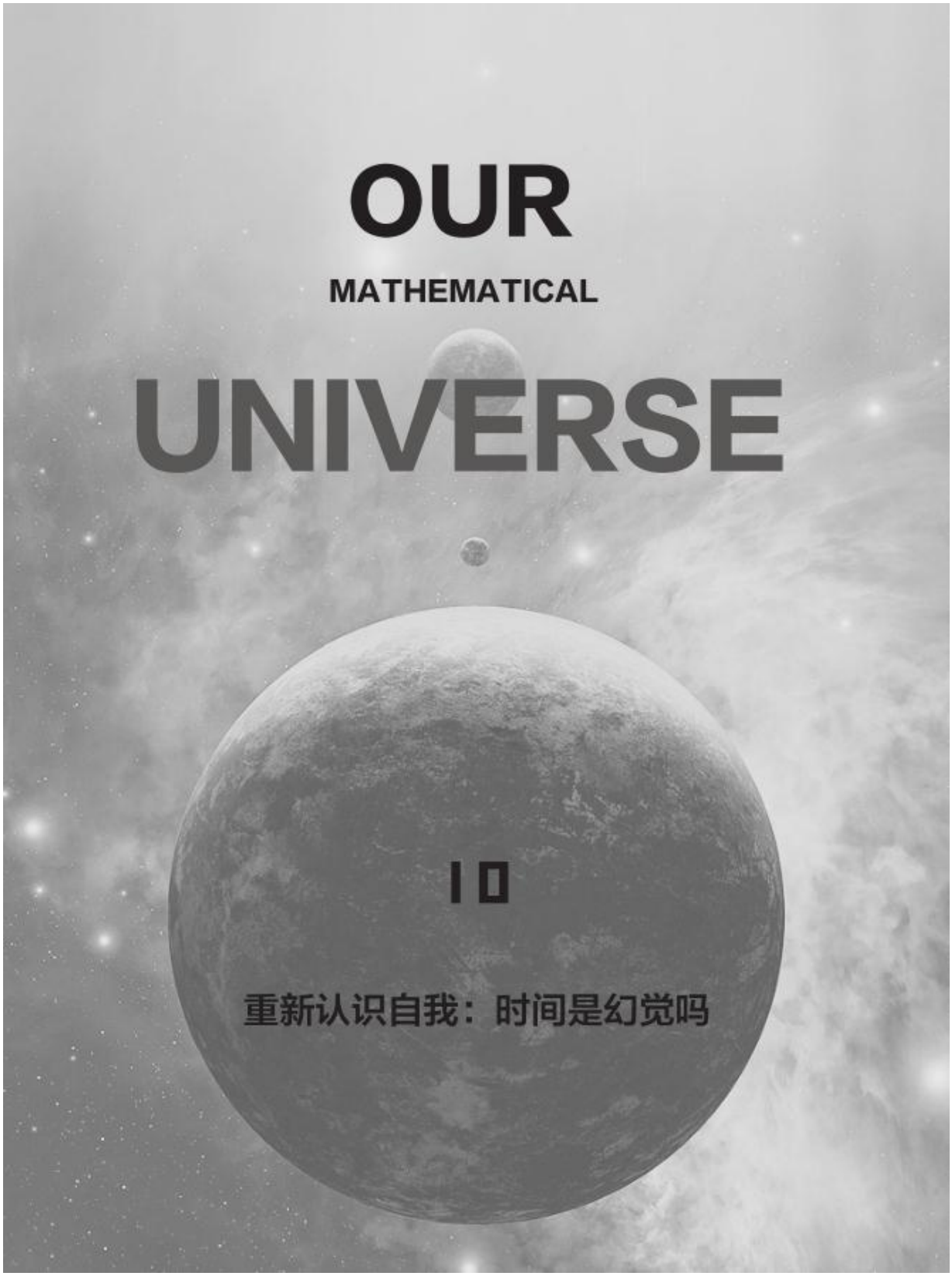
◆有了一个足够广泛的数学定义，外部实在假说便暗含着数学宇宙假说，即我们的物理世界是一个数学结构。

◆我们的物理世界不仅能被数学所描述，它本身就是数学（一个数学结构），使得我们成为一个巨大数学对象中拥有自我意识的那个部分。

◆一个数学结构是一组实体及其相互关系的抽象集合。这些实体没有“包袱”；除了彼此之间的相互关系之外，它们不具备任何性质。

◆一个数学结构可以拥有许多有趣的性质（比如对称性），尽管它的实体和关系都不具备任何内禀性质。

◆数学宇宙假说解决了声名狼藉的“无穷后退问题”。在这个问题中，自然界物体的性质只能由它的组成构件的性质来解释，而组成构件的性质又需要进一步解释，从而衍生出无穷无尽的问题。而数学宇宙假说认为，自然界物体的性质不是源自终极构件的性质（它根本不具备任何性质），而是源于这些构件之间的相互关系。


OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE
10
重新认识自我：时间是幻觉吗

过去、现在与未来之间的区别，只有一个顽固的幻觉。

爱因斯坦，1955年

时间是幻觉，午餐时间更是虚无缥缈的。

道格拉斯·亚当斯，《银河系漫游指南》

如果你像我一样，那你一定也总是会被未解之谜扰乱心绪。我在第9章提出了很多这样的问题，所以你难免会对我所说的一切提出质疑。比如，我认为我们的外部物理实在是一个数学结构，这究竟是什么意思？我们所在的这个物理实在永远在变化——残叶飘在风中，行星绕着太阳。然而数学结构却是静态的：一个抽象的十二面体无论是过去、现在还是未来，都永远拥有12个五边形的面。那么，一个永远变化的事物怎么可能恒常不变呢？还有一个亟待解决的问题是：如何将你塞进这个假定的数学结构中——如果你真是一个数学结构的一部分，为何会有自我意识、想法和感觉？

物理实在怎么会是数学的

超然时间之外的实在

爱因斯坦帮助我们回答了这些问题。他告诉我们，有两种思考物理实在的方法：空间和时空。**空间是三维的，在其中，万物都随时间**

而变化；而时空则是四维的，它只是简单地存在着，恒常不变，没有创生，也永不毁灭。[54]我们在第8章中曾讨论过，这两种角度对应着青蛙和飞鸟对实在的视角——后者是物理学家研究数学结构时超然物外的整体概览，就像一只飞鸟在高空俯瞰整片地形；前者是生活在该结构中的观察者的内部视角，就像一只青蛙住在飞鸟所俯瞰的这片地形中。

从数学上来说，时空其实是一个四维空间，前三个维度是我们熟悉的空间维度，第四维是时间。图10-1所示就表达了这种观点。

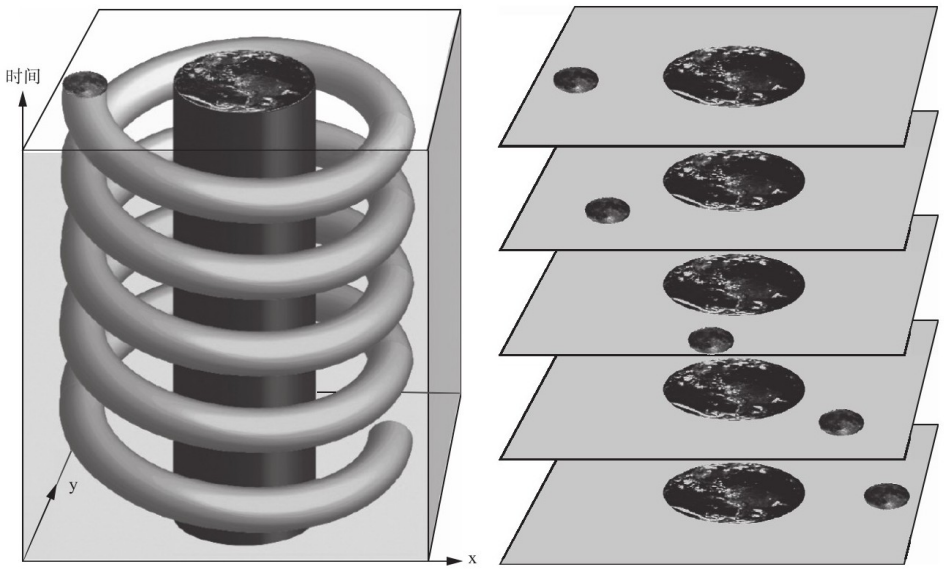


图10-1　月球绕着地球旋转的轨道。我们可以将其看成四维空间中的位置随时间在变化（右图），也可以等价地看成时空中一个不变的螺旋形（左图），它们都对应着同一个数学结构。对空间的快照（右图）只是时空（左图）的一张张横截面。

在图10-1中，我将时间维度画在垂直方向，空间维度画在水平方向。为了避免误解，我只画出了三维空间中的两个维度，分别标为x和y，因为如果要让我画出一个四维物体，我的脑袋一定会死机，耳朵里开始冒烟……图中显示，月球绕地球以圆形轨道旋转。为了让图片更直观，我并未按照地月轨道的真实比例绘制，而是把它缩小了很多，

并做了一些简化[55]。右图显示的是青蛙视角，在5张空间快照中，月亮位于不同的位置，地球则保持不动。左图显示了飞鸟视角，此时，青蛙视角中的运动被时空中一个不变的形状所取代。由于地球并不运动，所以它任何时候都位于空间中的样本位置，因此，在时空中形成了一个垂直的圆柱体。月球更有趣，由于它在不同的时刻位于不同的空间位置，因此它在时空中形成了一条螺旋形。请看看左图和右图，找出它们之间的联系，因为这对接下来的讨论至关重要。要从时空（左图）中获得空间（右图）的快照，你只需要在时空中你感兴趣的时间点水平切一刀就可以了。

时空并不存在于时间和空间之中，相反，时间和空间存在于时空之中。我认为，我们的外部物理实在是一个数学结构，从定义上说它是一个抽象的、不变的实体，存在于时间和空间之外。这个数学结构相当于对物理实在的飞鸟视角，而不是青蛙视角，所以它应当包含着时空，而不仅仅是空间。下面我们将讲到，这个数学结构中还包含其他元素，它们相当于我们时空中包含的各种物体。然而，这并不会改变它超然于时间之外的本质：如果我们宇宙的历史是一盘棋局，这个数学结构并不是对应着一个位置，而是对应着整盘棋局（见图9-6）；如果我们宇宙的历史是一部电影，那这个数学结构并不是对应着其中的一帧画面，而是对应着整张DVD碟片。

所以，从飞鸟视角来看，物体在四维时空中运动的轨迹就像一团纠结的意大利面。在青蛙看来匀速运动的物体，在飞鸟看来就是一根笔直的生的意大利面。在青蛙眼中，月亮绕着地球旋转；而在飞鸟眼中，却像一根旋绕的螺旋面。青蛙看见千亿颗恒星在银河系中旋转，而飞鸟却只看见千亿根相互缠绕的螺旋面。在青蛙看来，实在可以由牛顿的运动定律和引力定律来描述；但在飞鸟眼中，实在是意大利面形状的几何结构。

时间不是幻觉，但是时间的流逝是

“请问你知道现在的时间吗？”我猜，你和我一样，一定也问过这个问题，就好像在最基本的层面上真的存在“时间”这种东西一样。如果你迷路了，你可能不会问一个陌生人：“请问你知道这是什么地方吗？”你可能只会问：“请问一下，我这是在什么地方？”以此来表明，你并不是在询问一个关于空间的性质，而是关于你自己的性质，也就是你在空间中的位置。同样，如果你询问时间，你实际上并不是想知道关于时间的性质，而是想知道你在时间中的位置。时空包含了所有的时间和空间位置，所以，对时空来说，并不存在一个特定的时间和空间。所以，从科学上（而非社交）来说，询问“我这是在什么地方”更加合适。时空很像一张描绘宇宙历史的地图，但并不包含一个“你在这里”的标记。如果你需要一个标记来导航，我建议你买一个带有时钟和GPS功能的手机。

当爱因斯坦写下“过去、现在与未来之间的区别，只有一个顽固的幻觉”时，他是想说，这些概念在时空中都没有客观意义。图10-2表示，当我们脑中想着“现在”时，我们所指的是时空中的一个时间切片，这个切片对应的是我们脑中冒出这个想法的时间。我们所说的“未来”和“过去”指的是时空中高于或低于这个切片的部分。

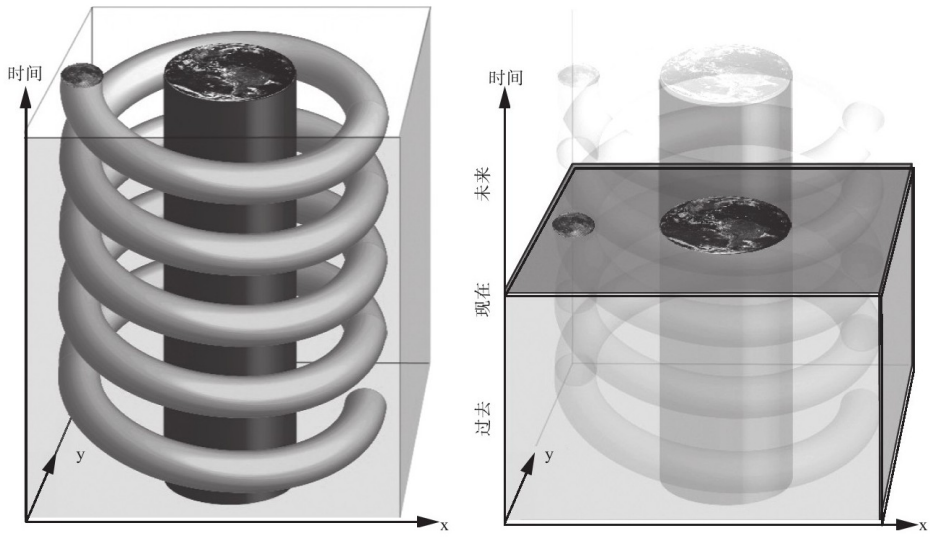


图10-2　过去、现在与未来之间的区别，只存在于青蛙的视角中（右图），而不存在于飞鸟对数学结构的视角中（左图），在后者中，你不能问“现在几点了”，只能问“我在哪里”。

这很像在时空中用“我这里”“我前面”“我后面”来指代不同的时空相对于你的位置。很显然，你前面的部分并不比你后面的部分更加虚幻。实际上，如果你向前走，现在位于你前面的某些部分在未来将被你甩在身后，它们甚至现在就已经位于某些其他人的身后了。同样，在时空中，未来与过去同样真实——时空中现在处在你未来的一部分，在未来将成为你的过去。时空是静止不变的，任何部分都不能改变它们的实在状态，所以，所有部分都同样真实。[56]

简而言之，时间不是幻觉，时间的流逝却是。改变也是如此。在时空中，未来早已存在，而过去永不消逝。当我们将爱因斯坦的经典时空理论与量子力学结合起来时，就得到了量子平行宇宙。这意味着，同时存在许多同样真实的过去和未来，但这丝毫不影响整个物理实在的数学本质。

这就是我的观点。然而，尽管这个“不变实在”的观念值得尊敬，并可追溯到爱因斯坦，但它仍一直处在争议当中，许多我十分尊

敬的科学家对其都有自己的观点。比如，布赖恩·格林在《隐藏的现实》一书中，对否定“变化和创生具有根本性”的看法表达了担忧。他写道：“我总是希望存在一种物理机制，就算是一种初步设想也好……能够帮助我们产生多重宇宙。”李·斯莫林在《时间重生》一书中进一步声称，变化是真实的，实际上，时间可能是唯一真实的东西。而在争论的另一阵营，朱利安·巴伯在《时间尽头》中说，不仅变化是幻觉，甚至你能够在完全不引入“时间”这个概念的情况下，对物理实在进行描述。

“你”怎么能是数学的呢

我们已经看到，时空可以被看作一个数学结构。那么，时空中的物体呢？比如，你正在读的这本书，它怎么可能是一个数学结构的一部分呢？

近年来，我们已经看到，许多看起来与数学毫无关系的东西，如文字、声音、图片和电影，都能被计算机用数学形式表现出来，或以一堆数字的形式在互联网上传播。让我们来看看计算机是如何完成这个任务的——我们接下来将看到，这是因为大自然正在做着类似的事情，来表现我们周遭的物体。

我刚刚在键盘上打出了一个单词“word”，我的笔记本电脑在内存中用4个数列来表示它：“119 111 114 100”。它的方法是，每个小写字母都表示为数字96加上它在字母表中的序数，所以a=97，w=119。与此同时，我的笔记本电脑正在播放爱沙尼亚作曲家阿沃·帕特（Arvo P rt）写的曲子《自深深处》（*De Profundis*），它也将其表现为一组数列，不过这些数字不是文字形式，而是一些位置，让喇叭膜以每秒44100次的速度振动，转而引起我耳中空气的振动，从而被我的大脑解读为声音。当我按下键盘上的“W”键时，笔记本电脑的屏幕

上就显示出一个视觉化的字母“W”，这个图像同样也是用数字来表示的。尽管电脑屏幕上所有的图像看起来都平滑连续，但我的显示器其实是由1 920×1 200个像素排成的矩形阵列（见图10-3），每个像素的颜色由3个数字来表示，每个数字在0～255之间，规定了该像素点发出的光线中红、绿、蓝光的强度；这三种颜色的组合可以呈现出彩虹中所有颜色的所有光强。昨晚，当我和孩子在观看YouTube上的视频时，我的笔记本电脑并不只是在两个空间维度上将屏幕划分成若干像素，它对时间维度也同样如此，将每秒划分为30帧图像。

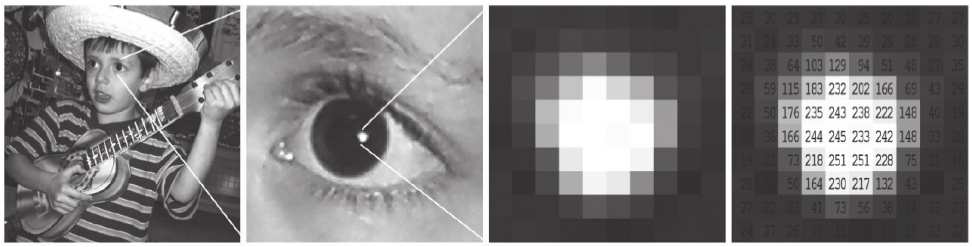


图10-3　计算机通常用每个点（像素）的数字（右一）来表示灰度图像。数字越大，像素的光强就越强，0代表黑色（完全没有光），255代表白色。同样，经典物理学中所谓的“场”也是用时空中每个点的数字来表示的，大致来说，表征了每个点存在多少“东西”。

在研究中，我们物理学家经常进行三维模拟仿真，比如模拟一场飓风、一颗超新星爆炸或太阳系的形成。为了做到这一点，我们将三维空间划分为三维像素（也叫体素）。我们还将四维的时空划分为四维体素。每个体素用一组数字来代表与此时此地发生之事相关的一切，比如温度、压力、密度和像素中不同物质的速度。例如，在对太阳系的模拟中，一个代表太阳的体素拥有极大的温度数值，而位于太阳外空荡空间内的体素则拥有接近于零的压力数值。邻近区域的体素满足由数学方程描述的特定关系。每当计算机在进行模拟时，它就会用这些方程来填充缺少的数字，就像玩数独游戏一样。如果一台计算机在进行天气预告，那么，对应着此时此刻的时空体素就被填进了代

表气压、气温等的测量数值。接着，计算机用相关的方程计算出明天及未来一周的时空体素数字。

尽管这种模拟方式可以用数学的形式表示外部物理实在的某些方面，但它只能近似地模拟。时空当然不是由模拟天气用的粗糙体素所构成，这就是为什么天气预报总是不准确。但是，这种认为时空中每个点都拥有许多数字的思想却很深刻。我认为，它不仅能告诉我们关于实在的描述，还能告诉我们关于实在自身的一些事。现代物理学中最基本的一个概念叫作“场”，即一种可由时空中每个点的数字来表示的东西。比如，“温度场”对应着你周遭的空气——每个点都有一个意义明确的温度值，完全独立于任何人类发明的体素，你可以通过温度计来测量温度值；如果你不需要很精确，也可以用手指来测量温度值。再比如“气压场”——你可以用气压计来测量每个点的气压值，也可以用你的耳朵来测量，但如果数值过大，你就会感觉疼痛；如果压力随时间不断波动，你就会听见声音。

我们现在知道，这两种场都不是真正基本的东西：它们只是度量了空气分子的平均运动速度，所以，如果你想从亚原子尺度去测量，它们的数值就会失去意义。然而，还有一些场，看起来似乎很基本，似乎构成了我们外部物理实在的一部分基本结构。

让我们来看看第一个例子：磁场。对时空中的每个点，磁场都用3个数字来表示，代表强度和方向，而不像温度场只有一个数字。用指南针来测量磁场时，你会看到磁针追随地球的磁场，指向北方。磁场越强，磁针指向的速度就越快，如果你把它放到一台MRI机器旁边就能看出这种趋势。第二个例子是电场，也是由3个代表强度和方向的数字来表示。一个简单的测量方法是看它对带电物体施加多大的力，比如塑料梳子会吸引你的头发。电场和磁场可以统一为电磁场，在时空中的每个点用6个数字来表示。我们在第6章讨论过，光其实只是荡漾在

电磁场中的波，所以，如果我们的物理世界是一个数学结构，那么我们宇宙中的所有光（似乎很物理化）都相当于时空中每个点的6个数字（似乎很数学化）。这些数字遵循着麦克斯韦方程所确定的数学关系（见图9-4）。

需要注意的是，我刚刚描述的只是经典物理学对电、磁和光的理解。量子力学把这幅图景更加复杂化了，但它并没有将其中的数学部分减少半分，而是用量子场论来取代了经典的电磁学理论。量子场论是现代粒子物理学的基石。在量子场论中，波函数表征了每种可能的电磁场组合到底有多真实。这个波函数本身就是一个数学对象，是希尔伯特空间中一个抽象的点。

我们在第6章中看到，量子场论认为光是由被称为“光子”的粒子所组成的。并且大致来说，构成电场和磁场的数字也可看作对某时某处光子数量的表示。正如电磁场的强度对应着某时某处的光子数一样，还有一些其他的场，对应着我们所知的其他基本粒子。比如，电子场和夸克场与每时每处的电子数和夸克数有关。这样，经典物理学中的所有粒子在所有时空中的所有运动，都对应着一个四维数学空间（也就是一个数学结构）中每个点处的一堆数字。在量子场论中，波函数表征着这些场可能形成的组合到底有多真实。

我们在第6章曾讨论过，物理学家还没有找到一个数学结构能完全描述物理实在的所有方面，包括万有引力。然而，就我们目前所知，那些炙手可热的候选者（如弦理论）的数学程度并不会比量子场论更低。

如果两个结构等价，那么它们就是一回事

在进入下一个议题之前，我们需要先解决一个重要的语义学问题。大多数物理学家都会说，我们的外部物理实在是用数学来描述的（至少近似的），我却认为不止如此，因为我认为它本身就是数学（更具体地说，是一个数学结构）。换句话说，我的结论比他们更进一步。为什么这么说呢？

本章讲到这里，我所说的一切都意味着我们的外部物理实在可用一个数学结构来描述。如果未来的物理学教科书包含了人们垂涎已久的万物理论（ToE），那么，它的方程就“是”外部物理实在的数学结构的完整描述。请注意，我用的词是“是”而非“对应着”，因为，正如哲学家马里厄斯·科恩（Marius Cohen）所强调的那样，如果两个结构等价，那么它们就是一回事。我们在第9章探讨过，“等价”是一个强大的数学概念，它深植于数学结构的本质中——如果两个完整的描述是等价的，那么它们就是在描述同一个东西[57]。也就是说，如果某些数学方程完全描述了外部物理实在和某个数学结构，那么外部物理实在和这个数学结构就完全是一回事，这样，数学宇宙假说就是正确的：我们的外部物理实在就是一个数学结构。

我们提过，如果两个数学结构中的实体和关系都可以一一对应，这两个数学结构就是等价的。如果外部物理实在中的所有实体都能与一个数学结构内的实体一一对应（比如，“物理空间中的电场强度与一个数学结构中的数字一一对应”），那么外部物理实在就符合一个数学结构的定义。实际上，它们是同一个数学结构。我们在第9章中看到，如果有人不愿意接受数学宇宙假说，他也必须拒绝外部实在假说，即“存在一个完全独立于我们人类的外部物理实在”。他们也可以争辩说，尽管我们的宇宙是由一些能被数学结构完全描述的东西组成的，但它们还拥有数学结构未能描述的性质，所以不能用一种抽象的、独立于人类的、不含任何“包袱”的方式来描述。然而，我认为这种观点会让卡尔·波普尔九泉之下不得安宁（我们在第5章提到过这

位著名的科学哲学家），因为波普尔曾强调说，科学理论必须拥有可观测的效应。相比之下，由于数学描述本应是完美的，是它让万物具备可观测的性质，而那些会减弱宇宙数学性的额外花样从定义上来说，就不具备任何可观测到的性质，导致它们100%不具科学性。

你是什么

我们现在已经看到，不论是时空本身，还是时空内部的物体，都可以看作一个数学结构的一部分。那么，我们自己呢？我们的思想、情感、自我意识，以及那个对于“我自己”的深邃的存在感——这一切让我感觉不到一丁点儿数学的痕迹。但是，我们同样也是由构成物理世界中其他万物的基本粒子构成的，而我们刚刚论述了物理世界是纯粹的数学。那么，如何调和这个矛盾呢？

在我看来，我们并未完全理解我们到底是什么。此外，正如我们在第8章所讨论的，要理解我们的外部物理实在，我们并不需要先完全明白意识的秘密。并且，我认为现代物理学已经在这方面作出了一些卓有成效、让人好奇的成就。现在，就让我们来进一步探索这个话题吧！

迄今为止最精妙的生命之辩

我们在第2章曾提到过宇宙学先驱乔治·伽莫夫，其自传名为《我的世界线》（*My World Line*）。“世界线”是爱因斯坦提出的概念，用来指代时空中的路径。然而，严格来说，你的世界线并不是一条线——它的厚度不为零，并且也不是笔直的。首先，让我们来考虑一下构成你身体的约10^{29}个基本粒子（夸克和电子）。它们一起在时空中组成了一个管道一样的形状，有点类似图10-1中月球轨道形成的螺旋形，但有着更加复杂的形状，反映出你从出生到死亡的运动轨迹，它

比月球轨迹复杂多了。比如，如果你在泳池里游泳，从这头游到那头，又从那头游回来，那么你的这部分时空管道就是一个形如字母Z的锯齿形；如果你在荡秋千，那么你这部分的时空管道就是形如字母S的蛇形。

然而，你的时空管道最有趣的性质并不是它的形状，而是它的内部结构，它非常复杂。对月球来说，组成它的粒子黏附在一起，相当稳定；而我们身上的粒子通常却会动来动去，彼此做相对运动。

想想那些构成你红细胞的基本粒子。你的血液在周身循环，将所需的氧气输送到各处。在这个过程中，每个红细胞都沿着各自独特的时空管道运行，形成了一个极其复杂的路径，贯穿你的动脉、毛细血管和静脉，并周期性地回到心脏和肺部。不同红细胞的时空管道交织在一起，形成了一个辫子般的模式（见图10-4中图），这可比你在美发沙龙见过的任何辫子都精妙——普通的辫子通常由3股构成，每股约有3 000根头发，它们缠绕成一个简单而重复的模式。而红细胞时空管道组成的辫子则由几万亿股构成（每股代表一个红细胞），每股又由几万亿根发丝般的基本粒子轨迹组成，相互缠绕、交错不绝，形成一个从不重复的复杂模式。也就是说，如果你有闲心花一整年的时间为你朋友编织一条疯狂的发辫，你采用的方法不是将头发分成若干股，而是将每根头发作为单独的一股，那么一年后，你编好的发辫和红细胞的辫子相比，依然相当简单。

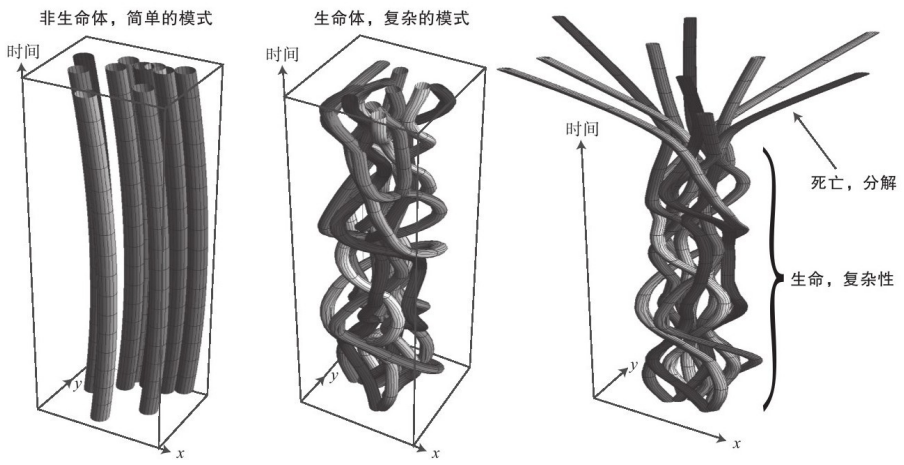


图10-4　复杂性是生命的标志。物体的运动对应着时空中的模式。左图所示为一个由10个粒子组成的非生命体，它们构成了一个简单的模式；而组成生命体的粒子却缠绕出复杂的模式（中图），对应着复杂的运动，比如大脑处理信息等重要过程。当一个生命体死亡，最终分解，各个粒子彼此分离开来（右图）。这些粗糙的画面只表现了10个粒子，而你的时空模式包含了10^{29}个粒子，所以它的模式极其复杂，超乎想象。

然而，这种复杂性在大脑处理信息的模式面前，都会黯然失色。我们在第7章曾讨论过（见图7-7），你的大脑中约有几千亿个神经元不停地生成电信号（称为“放电”），涉及几亿亿个原子，主要是钠离子、钾离子和钙离子。这些原子的轨迹在时空中形成了极其精妙优雅的辫子，它那复杂的纠缠模式对应着大脑处理信息的方式——或许正是从中产生了我们熟悉的自我意识。科学界广泛认为，我们依然不理解这是怎么回事，所以，公平地说，我们人类并未完全理解我们究竟是什么。然而，粗略地说，我们可以认为，**你是时空中的一个模式、一个数学模式。具体而言，你是时空中的一根辫子——迄今为止最精妙的辫子。**

有些人从情感上难以接受自己只是一堆粒子的集合体。实际上，在我20多岁时，我的朋友埃米尔企图攻击另一个朋友马茨，前者把后者称为“atomh g”（瑞典语的“原子堆”），当时我笑得不行。然

而，如果有人说“我不相信我只是一堆原子”时，我会反对他用“只是”这个词。其实，他们的思想所对应的那根精妙的时空之辫，是我们在宇宙中邂逅的最美丽而复杂的模式。世界上最快的计算机、大峡谷，甚至太阳的时空模式与之相比，都无比简单，黯然失色。

在你体内，那些与生命活动息息相关的基本粒子不停地做着复杂的运动，也有一些粒子的运动不那么复杂，比如位于皮肤上防止其他粒子分崩离析的粒子。这意味着，你的时空管道有点儿像电缆线，内部的线缆编织在一起，外部则有一个共同的中空管与外界隔离开。此外，你身上的大部分粒子都会周期性地更新。比如，你身体约有75%的重量都是水分子，它们大概每个月会被更新一遍。你的皮肤细胞和红细胞每几个月会更新一遍。在时空中，这些粒子到达和离开你身体的轨迹组成的模式，会让你联想到玉米须。在你的时空之辫的两端，分别对应着你的出生和死亡，所有的线头逐渐分离，对应着粒子们的连接、交互，最终各自分道扬镳（见图10-4右图）。这使得你一生的时空结构看起来很像一棵树：底部对应着早年时光，根茎繁复的系统对应着众多粒子的时空轨迹。渐渐地，这些粒子融合进较粗的辫股中，逐渐累积成一个管道形状的树干，对应着你当前的身体（内部则拥有极其复杂的辫子模式）；树顶对应着你的晚年时光，树干分裂成不断变细的枝杈，对应着在你生命终结之后，粒子们“各走各路”。也就是说，生命的模式在时间维度上的延展是有限的，时空之辫在生命的两端分崩离析，蜷曲皱缩。

当然，我们讨论过的所有模式都存在于四维而非三维中，所以严格来说，关于辫子、电缆和大树的比喻都不太准确。最关键的要点是，你在时空中是一个不变的模式，在此，这个模式的具体细节对该要点来说并不重要。这个模式是我们宇宙的数学结构的一部分，模式中的不同部分之间的关系就编码在数学方程中。正如我们在第7章看到的那样，埃弗雷特的量子力学赋予了你一个更加有趣但数学性并未减

少的结构，因为单个的你（树干）能分裂成不同的树枝，每个树枝都觉得他们是唯一的你自己（后面我们会回到这一点继续讨论）。

活在当下，时间流逝只是幻觉

现在，我们讨论了空间自身、空间内的物体，甚至你自己都可能是一个数学结构的一部分。但这需要付出代价：我们必须放弃那熟悉的“时间流逝是幻觉”的感觉，而把时间看作一个不变的数学结构的第四个维度。可是，在我们的主观经验上，物体的确是随着时间的流逝而变化的。那么，我们如何调和这个矛盾呢？

你所有的主观感知都存在于时空中，就像一部电影的所有画面都存在于一张DVD碟片中一样。具体而言，时空包含了巨量的辫子模式，对应着身处不同地方、不同时间的主观感知（不同人的感知也不同）。让我们把这种不同的感知称为“观察者时刻”（observer moment）。在我1996年的数学宇宙论文中，我曾为其起了另一个名字，但我更喜欢“观察者时刻”这个名字。尼克·波斯特洛姆（Nick Bostrom）等哲学家创造了这个词，近年来一直作为标准术语。你从经验可以得知，这些观察者时刻似乎是相互连接的，并融合为一个似乎无缝隙的序列，对应着我们称之为“人生”的东西。然而，这种感觉带来了很多艰巨的问题。比如，它们是如何连接起来的？具体地说，是否存在某种规则，让观察者时刻看起来是连续的？为何这些观察者时刻连接起来的序列主观上感觉起来就像时间在流逝一样？

一个明显的猜测是，连接与连续性有关：如果两个观察者时刻在时空内同一个模式中相邻，感觉起来就是相互连接的。然而，从图10-5中可看出，问题比这诡异得多，答案也不可能如此简单。图10-5假设了一个场景：我从波士顿乘飞机前往伦敦，在飞机起飞后不久，我就睡着了，在飞机降落前不久，我醒来了。第一，我醒来时的观察者时

刻（标记为C）感觉上与我睡着时的时刻（标记为B）是连接的。具体而言，对我来说，C点就好像是B点的延续，尽管这两个观察者时刻在时空中相隔甚远。第二，还有许多其他的观察者时刻（对应着航班上其他乘客的感知）不管在时间上还是空间上都更靠近C点，为何C点感觉起来并未和他们的这些观察者时刻相连呢？第三，假如在我睡着时，有人对我进行了完美的克隆，这个克隆人与我所有粒子的组成配置都完全一样，但他坐在另一架看起来完全一样的飞机上。于是，我的克隆体在醒来时的主观感知与我在C点的主观感知完全相同，所以，从定义上来说，他醒来时也会感觉与B点是连接的，但它们的时空模式并未相连[58]。

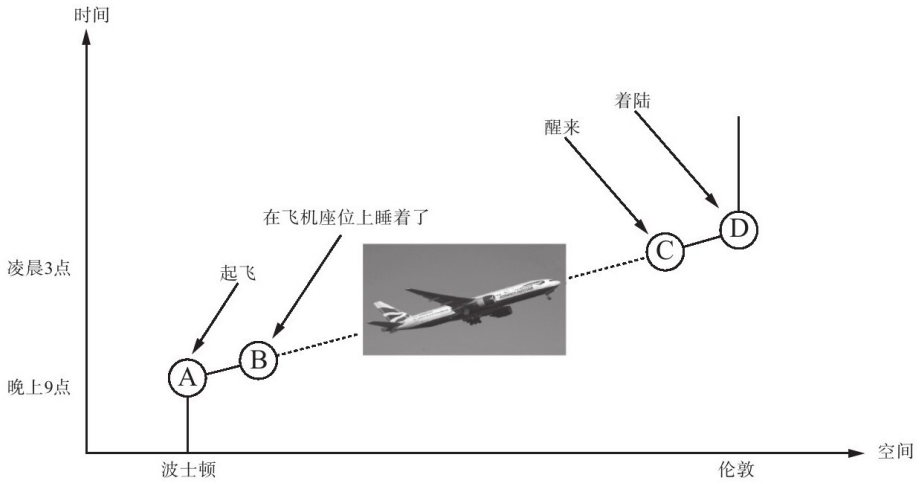


图10-5　在飞向伦敦途中的世界线。我在A点起飞，之后很快睡着（B点），并在着陆前醒来（C点）。尽管我在C点的意识感知不管是在时间还是在空间上都与B点相去甚远，但它感觉起来却与我睡觉前的最后一份意识感知（B点）无缝连接，而与其他人（比如其他乘客）的意识感知不相连，尽管它们在时间和空间上都比B点更靠近C点。

这说明，提及连续性只是在转移话题，我们并没有发现什么新的物理过程，让你对观察者的感觉是连续的，从而解释我们对时间流逝的熟悉感觉。幸运的是，有一个简单的解释，不需涉及任何新的物理

概念，现在我们就来探索一番。数学宇宙假说与我们的主观经验相结合，告诉我们时空中存在着一种非常复杂的辫子状的结构——人类，他们拥有自我意识，并仿佛能感觉到观察者时刻。我们知道，人类在时间和空间中的范围都非常有限——你的大脑所占的空间只比一升多一点，它产生一个单独的想法或感觉通常需要0.1秒，误差在10倍以内。这意味着，观察者时刻的主观感觉只取决于当时当地的时空局域内有什么东西，而不取决于空间中的其他区域（比如你所见的周遭外部实在），也不取决于时间中的其他时刻（比如你几秒前的经历）。但是，你的意识感知包含了以下两个重要的部分：你意识到面前摆着的这本书以及5秒前读过的那句话，尽管二者都不属于你观察者时刻的小小时空区域。也就是说，你的观察者时刻的主观感觉包含了时间和空间中的其他地方——尽管它本不应将其包含进去。这是怎么回事呢？

我们在第8章曾讨论过这个矛盾的空间部分。当时我们总结到，你的意识并不是在观察外部世界，而是在观察你脑中形成的一个精妙的实在模型。由于你的感官不断输入各种信息，这个模型也在不停更新，并用这些信息来追踪外部世界发生的事情[59]。所以，你当前的观察者时刻的时空模式也包含了你当前脑中实在模型的状态。正如图10-6所示，时间的部分也十分类似，你对世界的模型不仅包括当下周遭的信息，还包括你对过去周遭环境的记忆。这8条胶片中的每一条都代表了一个单独的观察者时刻。每一个都包含一张清晰的图片，表示当下正在发生的事情，还包含一串逐渐消隐的记忆，表示过去发生的事情。所以，在现在这个时刻，你就能感受到一整个时间序列的事件。因此，你的空间实在模型让你产生了一种主观感觉，好像你正在观察一个三维的空间，但实际上你的思维只是在观察你脑中的一个关于实在的模型；同样，你的时间实在模型也一样，它的一连串记忆序列让你产生了一种对时间的主观感觉，仿佛时间在一系列事件中流淌向前，但实际上，你的思维只是在观察大脑中一个观察者时刻的实在模

型而已。换句话说，你对时间流逝的主观感觉来自你现在所拥有的记忆之间的关系。

让我们来做一个思想实验：在我睡觉时，有人对我进行了完美的克隆，这个克隆人拥有我所有的记忆，并且醒来时感知到了一个观察者时刻。他依然会感觉到时间从一个复杂有趣的过去流淌而来，即使他实际上只有片刻经历。这意味着，对“时段”和“改变”的主观感知都是感质，是基本的瞬时感知，就像红色、蓝色和甜蜜一样。

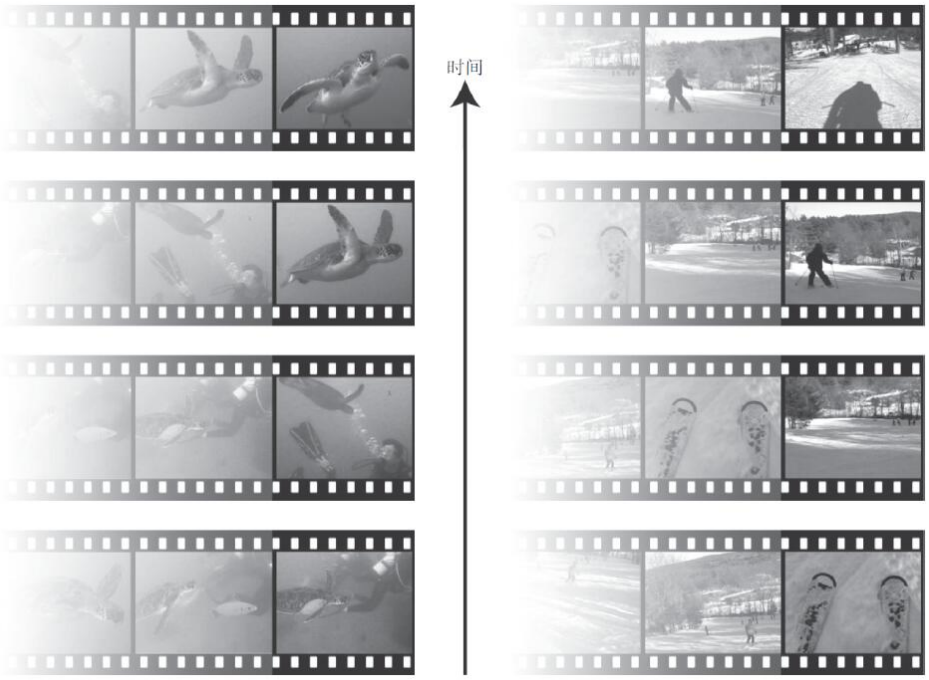


图10-6　一个潜水者和一个滑雪者在4个不同时刻对时空的主观感知（观察者时刻）。每条胶片都对应着一个观察者时刻，包括一张清晰的照片（代表正在发生的事情），以及逐渐消隐的记忆（代表过去发生的事情）。如果我打乱这8条胶片的顺序，你也可以很轻易地将其重新进行排列，因为它们之间有着关联——某些观察者时刻的当下视觉印象（最右帧）与其他时刻的记忆相符合。

这个数学宇宙假说的推论十分激进，所以现在请放下书，停下来想一想。此时此刻，你所意识到的一切感觉起来并不像一张照片，而像一部电影。这部电影并不是实在本身，它只存在于你的大脑中，作

为你脑中的实在模型的一部分。它包含了大量关于真正的外部物理实在的信息，只要你不是在做梦或产生幻觉。但它所组成的依然是一个经过了大量剪辑的版本，就像电视里的晚间新闻一样，主要特写了某些亮点，而这些亮点都是发生在附近的时间和空间内的模式。你的大脑认为这些模式对你有用，于是选择让你知晓。

当你看电视新闻时，你并不能直接看到空间中那个遥远的部分，你只是在观看一段与那部分空间有关的、经过了剪辑的电影。同样，你也并不能直接看到过去，只能看到一段与过去有关的、经过了剪辑的电影。但是，与几分钟就能看完的新闻节目不同，你同时观看着大脑中的所有影片，也就是说，你同时意识到现在和过去的事件。一秒钟后，你又看了一遍脑中的影片，它和一秒钟前的那段影片几乎完全一样，就像电视节目的重播，但经过了略微的编辑，在末尾加上了一秒钟的新材料，并缩短了之前的部分。也就是说，即使一个观察者时刻在客观上只占据了小于一升的空间和短于一秒钟的时间，它主观上也会感觉自己占据了你所意识到的所有空间，以及你所能回忆起来的所有时间。你觉得，你正从此时此地观察时间和空间，但那部分时间和空间都只是你所经历的实在模型的一部分。这就是为什么你从主观上感觉到时间在流逝，尽管它并没有。

自我意识，源于一个你自己的模型

此外，你自己也身处这部电影中，因为你的实在模型包含了你对自己的模型。这就是为什么你不仅只拥有意识，还拥有“自我意识”的原因。这意味着，当你感觉你正在读这本书时，实际上只是在你脑中的实在模型中，一个你自己的模型正在看着这本书的模型（见图10-7）。这就引出了一个关于意识的终极问题：到底是谁在看着你脑中的实在模型，从而产生了主观意识？我的猜测是：没有人！如果你脑中真有另一个部分在看着你的实在模型，并感知到其中的所有信息，那

么这个部分必须将这些信息全部传送到它自己的局域副本中。从进化论的角度看，这是一个巨大的浪费，神经科学中也没有发现任何与之有关的证据。此外，它也无法解决以下这个问题：如果真需要一个旁观者，那么，这个实在模型副本又需要另一个旁观者才能被主观感知到……周而复始，将引发一个无穷后退问题。

当然，我猜答案很简单，也很美丽——不需要任何旁观者，因为从根本上说，你的意识就是你的实在模型。我认为，意识是信息以某些复杂的方式加工时的感觉。因为，你大脑的不同部分之间会相互交流，你的实在模型的不同部分之间也会彼此沟通，所以，你的自我模型会与你的外部世界模型相互交流，于是就产生了“前者感知到后者”的主观感觉。当你看着一颗草莓时，你主观上会觉得脑中的红色模型非常真实。同样，你主观上也会觉得脑中心灵之眼模型的主观视角非常真实。

我们知道，一束神经元中，同一种基本电信号可能会被极富创造力的大脑解读为不同的感质，你主观上会觉得这些感质完全不同——根据神经束来源（眼、耳、鼻、口或皮肤等）的不同，我们会把它们感知为颜色、声音、气味、味道或触觉。最重要的区别并不在于携带这些信息的神经元不同，而在于它们连接的模式不同。尽管你对自我的感知与对草莓的感知有着天壤之别，但它们本质上都一样，都是时空中的复杂模式。也就是说，我认为，你所拥有的自我，也就是那个你称为“我”的主观视角，也只是感质，同你对“红色”和“绿色”的主观感知没什么两样。简而言之，红色和自我意识都是感质。

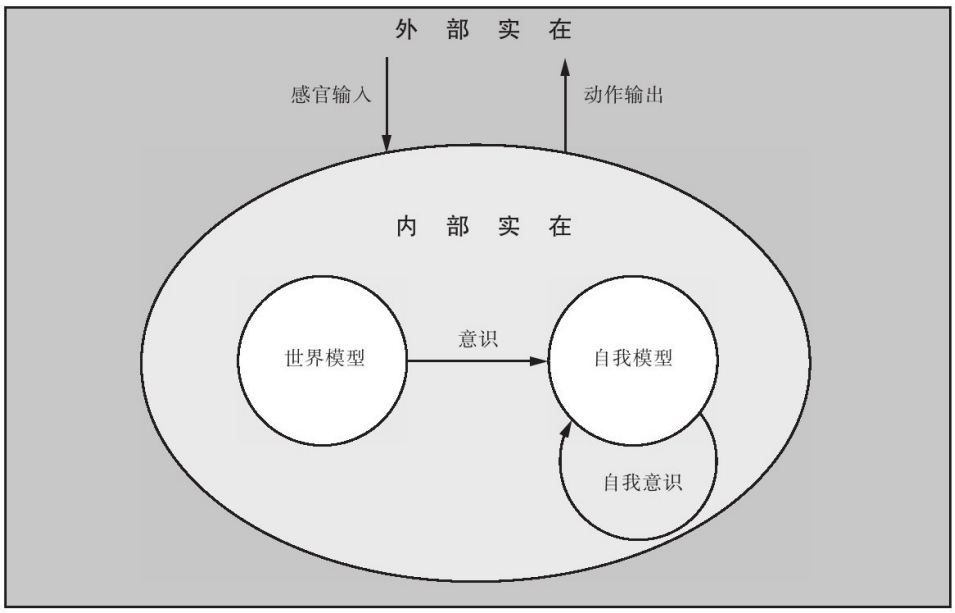


图10-7　我认为，意识是信息以某些复杂方式加工时的感觉。人类主观感知到的那种意识，来自脑中的自我模型与世界模型的交互。图中的箭头符号表示了信息的流向。比如，感官不断输入着信息，帮助你的世界模型不断追踪外部实在中发生的事情，而信息输出通过运动皮质控制着你的肌肉，从而影响外部实在，比如，翻开这本书。

预测你的未来

科学的主要目的之一，其实也是拥有大脑的主要目的之一，即预测我们的未来。但是，假如时间并不流逝，那所谓的预测未来又指的是什么呢？

从图10-6中可以看出，即使变化和时间流逝的概念并不存在，我们也可以将其修改为一个合理的问题。图中的8个观察者时刻分别属于两个不同的人，其中一人在潜水，另一人在滑雪，每个人都对应着时空中一个长长的辫状模式。对这8个观察者时刻进行比较，可以揭示出它们之间的一些有趣的关系：在某些观察者时刻中，当下的视觉印象（每条胶片的最右帧）与另一些观察者时刻的最新记忆（中帧）相匹

配；而某些观察者时刻的最新记忆（中帧）与另一些观察者时刻的较早记忆（左帧）相匹配。这唯一地确定了两个单独的观察者时刻的时间序列，分别对应着左右两列胶片，并且越往上，时间越靠后。

考虑所有时空中的所有观察者时刻。你在未来的感知也能以相同的方式与你当下的观察者时刻相匹配，像拼图一样吻合在一起。尤其是，它们会以正确的次序共享你当下的记忆（允许某些合理的遗忘和记错的情况），并在序列的末尾加上额外的最新记忆。

比如，假设你就是图中那位潜水者，刚刚看见一只巨大的海龟向右上方游过去（见图10-6，左列，从上往下数第二个观察者时刻），此时，你想要预测你的未来。由于这只是一个思想实验，我们还可以假设你智力超群，已经搞清楚了我们宇宙的数学结构，也已经计算出了它的所有观察者时刻是什么样，以及它们主观感觉起来怎么样。你意识到，唯一与你当下的观察者时刻相匹配的观察者时刻位于图片的左上方，并在末尾处添加了1秒钟的新感知。于是，你预测道，这就是你1秒钟后将会感知到的东西：1秒钟后，你将看到一只巨大的海龟向你游过来。用这种方式，你就发现了传统科学中的“因果关系”概念，因为你能从过去预测未来。

你在哪里

我们已经看到，我们的物理实在可能是一个数学结构，包括时间、空间、物体，甚至你自己。我们还看到，你能够怎样分析观察者时刻，并像拼图一样将其匹配起来，从而预测自己的未来（至少本质上可以）。在实践中，如果要预测未来，这个观察者时刻的方法常被降为“一如往常”的物理学方法。比如，假设你做图9-2中的实验，扔出一个篮球并研究它的轨迹。如果你作出如下两个假设：

- 它的运动由爱因斯坦的万有引力方程描述；

- 世界上没有第二个人与你的主观感觉完全相同，并拥有相同的人生记忆。

那么你就会知道，只有那些看见篮球以抛物线轨迹（见图9-2）运动的未来，才能与你当下的观察者时刻光滑匹配。所以你预测，这就是你即将感知到的未来。那么，你怎会知道它的轨迹是抛物线，而不是别的，比如螺旋形呢？这是因为，通过求解爱因斯坦的方程，你能得到一个抛物线的解。

再次预测你的未来

然而，第二个假设有可能是错误的，如果第一层或第三层多重宇宙存在的话，那么，确实存在其他同你主观感知完全一样的人，这样一来，对你未来的预测就变得更加有趣了！当我问“你在哪里？你感知到了什么”时，我感到自己有些鬼鬼祟祟的。因为我在说“你”时，其实我是想用复数形式的“你们”。我们接下来将看到，当“你们”的数量增加或减少时，事情将变得十分棘手。

让我们继续刚才的思想实验。在这个实验中，假设你已事无巨细地知晓了我们宇宙的数学模型。那么，预测你的未来就可以归结为三个步骤：

- 找到宇宙中所有拥有自我意识的实体。
- 计算出他们的主观感知，以便了解哪些人可能是你，以及他们未来将感知到什么。
- 预测你在未来的主观感知（可能有多个选项）。

奇妙的是，正如我们接下来要讨论的那样，每一步都涉及令人望而却步的不解之谜！

找到所有自我意识

让我们从第一步开始。在外部物理实在的数学结构中（或许包括了一个多重宇宙），我们怎样才能找到其中拥有自我意识的实体呢？我们之前讨论过，人类相当于时空中一种复杂的辫状模式。不过，我们并不想把自我意识局限在人类这种生命形式中，所以，让我们换一个更广义的术语——“自知的子结构”（self-aware substructure, SAS），来指代一个数学结构中任何拥有主观感知的部分。有时我们也会用“观察者”来作为它的同义词，但每当我需要提醒大家避免“人类中心论”时，我仍会使用“自知的子结构”。

那么，怎样才能在一个数学结构中找到自知的子结构呢？最简短的回答就是：我们尚不知道，科学还没有进步到那个程度。我们甚至不能在自己最熟悉的时空范畴内回答这个问题。首先，我们不知道自己栖身于什么数学结构中，因为自洽的量子引力论依然犹抱琵琶半遮面。其次，即便我们了解了我们的数学结构，也不知道怎样才能在其中找到自知的子结构。

想象一下，一个友好的外星人送给你一个“自知的子结构探测器”，这是一台方便的手持设备，有点儿像金属探测器，当它遇到自知的子结构时，就会发出响亮的哔哔声。你把它玩来玩去，发现如果把它对准金鱼，它的声音很小；对准一只猫，哔哔声稍微变大了一点点；而对准你自己时，它就会发出刺耳的哔哔声。但把它对准一根黄瓜、一辆车或一具尸体时，它就一声不吭。那么，这个自知的子结构探测器的工作原理会是怎样的呢？

自知的子结构探测器配有一张简单的说明书，只提到它使用了一种“专有算法”。我猜它可能是测量了指向对象的复杂性和信息含量。某物的复杂性指的是，要完全描述它，最少需要多少比特的数据量（1比特是指1个0或1）。比如，一颗钻石可以描述为10^{24}个碳原子

排列成完美的晶格模式，所以它的复杂性远低于一块拥有1TB随机数字的硬盘，因为要描述这块硬盘所需要的信息远不止1TB（约为8×10^{12}比特）。但硬盘的复杂性与你的大脑比起来，还是黯然失色。因为在大脑中，仅仅是要描述神经元突触的状态，就需要10^{17}比特的信息。

然而，不管硬盘的容量有多大，它都不可能产生自我意识。所以，仅有复杂性还不足以称之为自知的子结构。我猜测，除此之外，自知的子结构探测器还需要测量物体的信息含量（information content）。在数学和物理学上，信息含量的定义十分严格，可以追溯到半个多世纪前克劳德·香农（Claude Shannon）和约翰·冯·诺依曼的研究。**复杂性是在描述一个物体有多复杂，而信息含量[60]表示的是它对外部世界的描述程度。也就是说，信息含量是对复杂性拥有多少含义的度量。**如果你在硬盘里塞满随机数字，那么它并不包含任何关于外部世界的信息，但是如果你装满历史书或家庭视频，那它就包含了信息。你的大脑包含着关于外部世界的巨量信息，不管是对遥远过去的记忆，还是不断更新着的关于周遭事物的模型。当一个人死去，大脑中整个神经元电流系统都关闭了，所以关于它们放电模式的信息也消逝了。不久之后，以化学和生物形态储存在突触中的信息量也开始消逝。

然而，仅有复杂性和信息含量还不足以保证出现自我意识。比如，一台摄像机同时拥有这两者，但不管怎么看，它都不像有自我意识的样子。这意味着，自知的子结构探测器还需要为自我意识寻找额外的特征，这可能会更难以理解。比如，图10-7告诉我们，一个自知的子结构不仅需要能够存储信息，还需要以某种计算的形式来处理信息；在信息处理过程中，或许还需要一种高度的互联性。神经科学家朱利奥·托诺尼（Giulio Tononi）提出了一种迷人的观点，他的核心观点是，一个信息处理系统要产生意识，必须集合入一个不会分崩离析的统一整体[61]。这意味着，每个部分都必须与关于其他部分的大

量信息进行联合计算——否则，就会出现多个独立的意识，就像一间塞满了人的屋子，或者左右脑的胼胝体连接被切断的病人。如果独立的各部分过于简单，就好比摄像机上的单个像素点，根本不会产生意识。

一代又一代的物理学家和化学家都曾研究过，巨量的原子组合起来会发生什么事。他们发现，原子的集体行为取决于排列组合的模式——固体、液体和气体之间的最大区别并不在于原子的种类，而在于原子组合的模式。我想，也许有一天我们会明白，意识只是另一种物质形态。如果真有那么一天，我期待会有多种类型的意识，就像液体有多种形态一样，但是在两种情况下，它们都拥有某些我们可以试着理解的共同特征。

作为理解意识的第一步，我们首先来看看记忆内存。它有什么特征呢？作为一种存储信息的有用物质，很显然，它必须具备一个必杀技，即某种能够保持很长时间的状态。固体拥有这个技能，但液体和气体却不然——如果你把某人的名字刻在一个金戒指上，这个信息能保持很多年，但如果你把名字“刻”在一个池塘的水面，它会转瞬即逝，因为水面的形状不断在变化。记忆内存还有一个合意的性质是，它不仅很容易读取（就像金戒指一样），也很容易写入——改变你的硬盘或突触的状态所需要的能量，远远小于在金子上刻字。

哪些性质可以归于“计算质”（computronium）呢？计算质是能像计算机一样处理信息的最基本的物质。与稳定不变的金戒指不同，计算质应该会展现出复杂的动态，因此它未来的状态将取决于现在的状态，只不过是以某种复杂的方式（我们希望它是一种可控或可编程的方式）。它的原子排列必须比一块无趣且不变的固体更加混乱一些，但又比液体或气体更有秩序。在微观层面上，计算质并不需要非常复杂，因为计算机科学家告诉我们，只要某种装置能进行某些基础

的逻辑运算，它就是普适的。只要有足够的时间和内存，它就能被编程，完成与其他任何计算机相同的运算。

那么，“知觉质”（perceptronium）呢？知觉质是主观上拥有自我意识的最基本的物质。如果托诺尼是对的，那么，它就不止拥有计算质的性质，还拥有如下性质：它的信息是不可分割的，形成一个统一的整体。所以，当自知的子结构探测器分析一间充满原子的屋子时，首先，它会找到哪些原子和其他原子是强连接的，并把这些强连接的原子划分为一个群组，作为一个物体，比如一张坐着两人的凳子。接着，它会识别出符合计算质标准的物体，比如两个大脑和两个手机CPU。最后，它会发现，只有那两个大脑中才存在知觉质，而这两个大脑是彼此分离的，每一个大脑对应着一个人的意识。

计算内部实在：以史为鉴

每当你用自知的子结构探测器找到一个自知的实体，下一步就是计算它的主观感知。在第8章中，我们希望能从外部实在来计算它的内部实在。这是一个棘手的挑战，我们的经验十分有限，因为纵观人类历史，物理学倾向于聚焦在相反的问题上：从我们的主观感知去寻找描述外部实在的数学方程，而不是从外部实在来计算主观感知。比如，牛顿观察到月球的运动，提出了可以描述它的万有引力定律。但是，我认为，物理学的历史教会了我们很多有价值的事，关于内部实在和外部实在是如何连接起来的。下面是7个例子。

●不要惊慌

尽管这个未解之谜艰深难懂，但正如我们在第8章谈到的，我们可以将其简单地分为两个部分：物理学和认知科学。物理学家从外部实在开始，预测所有合乎理性的观察者都赞成的共识实在，并将探寻内

部实在的任务交付于神经科学家和心理学家。下面，我们将谈到一些关于“预测未来”的狡猾问题。在大多数问题中，我们都会看到，共识实在与内部实在之间的区别并不重要。此外，物理学历史提供了许多有用的案例，比如经典力学、广义相对论和量子力学，在这些案例中，我们不仅知道了最重要的方程，还了解了被它们支配的感觉。

●我们只能感知到稳定的东西

在我们人类的一生中，“硬件”（比如细胞）和“软件”（比如记忆）都会更新许多次。但是，我们却感到自己是稳定和持久的。同样地，除了自己之外，我们也会感到客体是持久的。或者说，被我们感知为客体的东西，正是世界显现出某种持久性的方面。比如，当远眺大海时，我们感知到行进的波涛是客体，因为它们表现出了某种持久性，即使水本身在上下波动。同样，正如我们在第7章所说，我们只能感知到世界上那些相对于量子退相干来说，还算稳定的方面。

●我们感知到自己身处某个局域

相对论和量子力学都表明，你感知到的自己是局限在一个区域内的，即使你并不是。虽然在广义相对论的外部实在中，你是稳定的四维时空中一个延伸的辫状模式，但你主观上会觉得自己被局限在万物发生的三维世界中某个特定的时间和空间内。正如我们早先讨论的那样，你最基本的感知都是观察者时刻，每一个观察者时刻都对应着辫状模式的某个局部，而不是整个辫状模式（也就是你的一生）。

量子力学也告诉了我们一个同样的故事：如果你进入量子叠加态，同时位于外部实在（薛定谔方程支配的数学化希尔伯特空间）中两个不同的地方，那么，正如我们在第7章所看到的那样，你的所有版本都会感知到一个内部实在——他们都位于一个确定无疑的位置。

●我们感知到自己是独一无二的

在第7章，我们还看到，我们感知到自己是独一无二的孤立系统，尽管我们并不是。我们看到，尽管量子力学将我们“克隆”为若干个版本，这些版本同时处于若干个不同的宏观位置，并与其他系统纠结缠绕，但我们感知到自己是独特且独立的，各自保留着一个独立而清晰的身份。外部实在中的“观察者分支”在我们的感知中，只是内部实在中的些许随机性而已。

不仅“量子克隆”如此，假设发生真正的生物学意义上的克隆（见图7-3），结果也是一样的——在我们的感知中，我们自己也是独一无二的，伴随着些许随机性。也就是说，意义明确的“局域感”和独一无二的身份认知，都只存在于我们的内部实在中；从最基本的层面看，它们都是幻觉。

●我们能感知到自己是永生的吗

在第7章，我们还讨论了第一层和/或第三层多重宇宙可能会让我们感觉自己是永生的。简而言之，当平行宇宙中的“你”的数量增加或减少时，内部实在与外部实在之间的关系会发生微妙的变化。

- ●当你的数量增加时，你能在主观上感知到随机性。
- ●当你的数量减少时，你能在主观上感知到自己是永生的。

后者饱受争议。这个推论正确吗？这个问题的答案或许能解决所谓的测度问题。我们会在下一节讨论这个问题。

●我们能感知到有用的东西

为什么我们会感知到世界是稳定的，以及我们自己身处局域并且独一无二？我猜，是因为这样很有用。看起来，人类最初进化出自我

意识的原因似乎是，因为世界的某些方面从某种意义上说是可预测的，所以，如果能建立起关于世界的良好模型、预测未来并作出聪明的决策，将极大地提高繁殖的成功率。这个先进的信息处理系统产生了一个副产品，那就是自我意识。更一般地说，任何一个自知的子结构，不管它是进化来的，还是设计出来的，只要它拥有一个目标，就会拥有一个关于外部世界和它自己的内部模型，从而生出一个副产品——自我意识。

接下来，很自然地，自知的子结构就只能感知到外部世界中对达成它的目标有用的方面。比如，迁徙的鸟能感知到地球磁场，因为这对辨认方向很有用；星鼻鼹鼠是盲眼，因为视觉感知对它们的地下生活来说毫无用处。尽管对不同的物种来说，有用和无用的标准差别很大，但所有的生命形式在一些基本方面都是相同的。比如，只有对预测未来有帮助的、稳定而规律的方面，感知起来才是有用的。如果你正望着窗外一片暴风骤雨中的海域，那么，感知到亿万颗水分子的精确运动对你来说毫无用处，因为它们会互相撞击，并在极短的时间内改变运动方向。但是，感知到一道巨大的浪墙朝你袭来，却是非常有用的，因为你就能提前几秒预知它未来的运动状态，并立刻采取行动，避免巨浪吞噬并冲走你的基因库。

同样，对一个自知的子结构来说，感知到自己身处局域和独一无二都十分有用，因为信息只能在局域内处理。就算在1古戈尔普勒克斯米外或量子希尔伯特空间内退相干的地方，存在一个与你完全相同的版本，你和他之间也不会有任何信息交换，所以你们二位会继续过着自己的小日子，就好像对方并不存在一样。

●我们能感知到要有意识才能感知到的东西

由于我们大脑中负责建立世界模型（包括我们自身在内，并最终产生了意识）的部分非常有用，需求很高，因此它们主要留给那些真

正需要它们的计算或决策。正如你不会用一台超级计算机来处理文字一样，你的大脑也不会用意识模块来处理那些过于平凡的任务，比如调节心跳——这种任务通常被“外包”给其他无意识的脑区。**这意味着，如果一个未来的机器人拥有了自我意识，它可能对那些独立的、死板的、不涉及实在模型的任务（比如求数字的乘积）毫无知觉。**这种意识结构是由朱利奥·托诺尼提出来的，它解释了无意识的认知是怎样被“外包”出去的。

对于人类来说，我发现了一件有趣的事情：我们的身体对微观敌人（极端复杂的免疫系统）的防御似乎并不需要自我意识，但我们对宏观敌人（大脑控制多处肌肉）的防御却需要自我意识。这也许是因为，我们的世界中，微观与宏观大相径庭（比如，时间和空间尺度的不同）。微观世界中，精妙的逻辑思考和随之而来的自我意识根本毫无用武之地，也不需要。

你在何时

之前我们讨论了数学结构怎样包含自知的观察者时刻，比如你现在正在经历的这个时刻。我们也探索了找到这些观察者时刻的挑战，以及它们主观上能感觉到什么。你存在于一个包含着某种时空的数学结构中，所以，为了作出物理学预测，你必须去了解你所栖身的数学结构到底是什么样的，以及你当下的观察者时刻在其中的位置。也就是说，你在时间和空间中位于何处呢？我们将看到，“时间”的部分比“空间”的部分更加微妙，尤其是在当你的众多平行版本的数量随时间发生变化时。

按下暂停键：超越波普尔的“二时法”

对于我来说，科学就是为了理解物理实在，以及我们在其中的地位。从实用主义的角度看，它是为了构建一个关于实在的模型，让我们能尽可能准确地预测未来，从而让我们选择那些预计会带来最好结果的行为。我想，正是这个过程催生了意识的进化。纵观古今，思想者们无不尝试着对这个科学过程抽丝剥茧。我认为大多数当代科学家都同意，它归根结底无非以下三项：

- 由假设作出预测。
- 将观察与预测进行比较，改进假设。
- 重复以上步骤。

科学家通常将一组假设的集合称为“理论”。在数学宇宙假说（MUH）的语境中，最重要的假设是：深入到实在模型的深处，我们究竟栖身于什么数学结构中，以及我们当下正在经历哪一个特定的观察者时刻。在上面列出的三项中，卡尔·波普尔特别强调了第二项的作用，他认为，如果一个假设不可验证，那它就不是科学。尽管他特别强调可证伪性（即对一个科学假设来说，本质上必须存在一种方法可以验证它是真是假），但有一个绝妙的数学工具泛化了这种真-假二分法，并允许灰色地带存在，这就是贝叶斯决策理论（Bayesian decision theory）：每个可能的假设都被指定了一个0～1之间的数字，代表你认为它为正确的概率。每次你进行新观测时，都可以用一个简单的公式来更新上述概率。

尽管这种追寻科学理论的方法十分优雅，且被人们广为接受，但依然存在一个问题：它需要两个相互连接的观察者时刻，我们将其简称为“二时法”。在第一个观察者时刻，你作出预测；在第二个观察者时刻，你凝视着观测对象。在传统的情况下（也就是不管过去、现在还是未来，都永远只有一个你的情况下），这套方法运作得很完美（见图10-8左图），但是一旦涉及包含有无数个略微不同的你的平行

宇宙，它就崩溃了。我们在第5章和第7章曾看到，这种崩溃会导致一些古怪的效应，比如主观感知的永生和主观感知的随机性（见图10-8中图和右图）。

在数学宇宙假说的语境中，我们论证了对时间流逝以及既往假设与观测的感知，存在于我们所经历的每个观察者时刻中。这意味着，我们必须超越波普尔对科学的“二时法”，而改用一种可运用在单个观察者时刻的“单时法”。我喜欢想象我拥有一个超棒的、可以控制现实的袖珍遥控器。每当参加一个无趣的会议时，我就可以按下快进键。当我经历某些奇妙的时刻，我就可以倒回去重播，想重播多少次就重播多少次。而要超越波普尔，我只需要按下暂停键就可以了。那么我就可以贯彻贺拉斯的精神[62]，真正活在当下，抓住此刻，理解、吸收和仔细地思考它，而不用担心好时光转瞬即逝、未来匆匆而来。尤其是，我可以好好思考一下我的假设和观测结果。如果我的大脑运转得很好，我会发现，我的内部实在模型与我的感官从外部世界获得的最新信息非常吻合。同样，如果我的科学推理算法也很不错，那我会发现，我曾为这一刻所作出的预言与现在正在发生的真实情况也十分吻合。我的感官努力记录下新的信息，好让我未来的观察者时刻可以有意识地感知到它们。同时，我思维中的意识部分也在努力使用我的科学推理算法，来更新我对实在中更微妙、抽象的那一部分的假设。

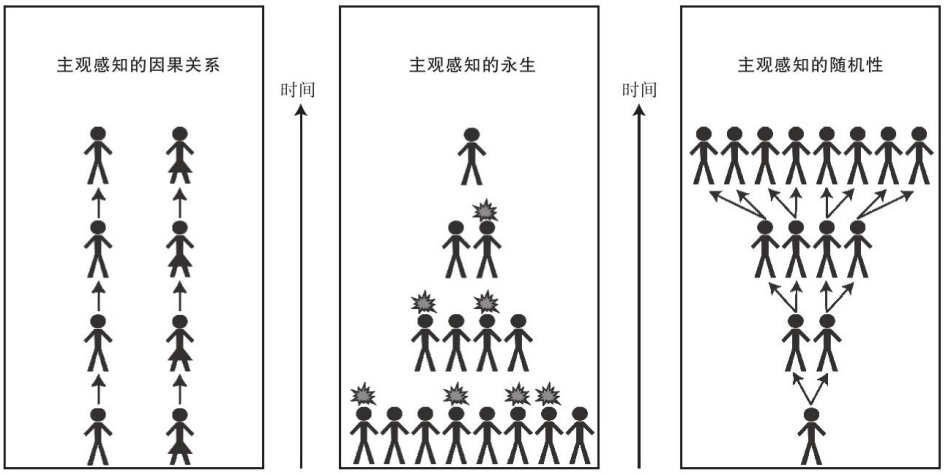


图10-8　如果每个观察者时刻都能与一个前续者和一个后续者唯一相连，我们就在主观上感知到了因果关系（左图）。当其中一些（并非全部）后续者消失时，我们可能会在主观上感知到自己是永生的（中图）。当若干个主观上可区分的后续者共享同一个前续者时，我们就在主观上感知到了随机性（右图）。

为何你不是一只蚂蚁

那么，每次你按下暂停键时，你应该如何在观察者时刻中进行推理呢？为此，你需要一个好框架，不仅为了理解多重宇宙，还为了理解所谓的末日论（doomsday argument）等著名的哲学难题。如果你相信数学宇宙假说，那么你必须试着弄清楚你到底居住在哪一个数学结构中。如果那个数学结构中包含着许多主观上与你相同的观察者时刻，那么你可能只是其中任意一个。除非在这个数学结构中存在一些东西，以某种方式打破了对称，偏爱其中一些而偏恶余下的部分，否则你成为其中任一个的概率都是均等的。因此，正如我在1996年有关数学宇宙的论文中所论证的那样，你会得出以下结论：你应该以这样的方式进行推理——在众多可能的观察者时刻中，你的观察者时刻只是其中随机的一个。

过去20年里，哲学文献中对多种不同的推理方式展开了严肃和迷人的讨论，部分原因是由末日论（我们下面将简短地探讨一下）及相关的谜题所引发。其基本观念是：我们不应期待我们的意识位于一个随机的空间位置（根据哥白尼原理），而是位于一个随机的观察者内部。这种观念已有很长的历史。我们在第5章中提到，布兰登·卡特将其归纳为“弱人择原理”；在第4章中提到，亚历克斯·维兰金则将其归纳为平庸原理（principle of mediocrity）。尼克·波斯特洛姆、保罗·阿尔蒙德和米兰·瑟科维克（Milan ircovi）等当代哲学家对其进行了广泛的探索。2002年，波斯特洛姆创造了一个新术语：强自我抽样假设。

强自我抽样假设
每个观察者时刻都应该以这样的方式进行推理——它是它的参考类中所有观察者时刻中随机的一个。

这里的微妙之处在于“参考类”（reference class）应如何解读。在这一点上，即使是认同强自我抽样假设的哲学家们也常争论不休。如果你采用最严格的限制条件，也就是将参考类限制在那些主观上与你自己的观察者时刻不可区分的观察者时刻，你就回到了我的老方法。但是，我们将会看到，如果你不拘泥于上述限制，将范围扩大一些，你常会得到其他有趣的结论，比如，如果将主观上可区分的观察者时刻也算入参考类中，那么，只要它们的主观差异在你寻求的答案上并无偏见，那你依然会得到相同的结论。为了解释其中奥妙，让我们来看一个强自我抽样假设的例子——波斯特洛姆的“睡美人之谜”（Sleeping Beauty puzzle）。

睡美人自愿参与接下来的实验，并已被告知后述所有细节。星期日，她开始睡觉。接着，有人进行一个抛硬币实验。如果硬币正面朝上，美人只会在星期一被唤醒，并接受采访。如果硬币反面朝上，美人会在星期一和星期二被唤醒，但是当她在星期一再次入睡时，她被注射了一剂会导致失忆的药物，保证她记不起之前醒过来的情形。每一次睡美人醒过来并接

受采访时，都被要求回答一个问题：“你认为硬币正面朝上的概率有多大？”

哲学家们围绕这个主题上发表了大量的著作。如今，他们分为两个阵营：“一半党”和“三分之一党”，分别认为睡美人给出的答案是1/2和1/3。在数学宇宙假说的框架下，真正的随机性并不存在，所以，让我们用量子测量来替代抛硬币试验。在量子测量中，两种结果都会变成现实，只不过分别发生在两个第三层平行宇宙中。那么，在“睡美人接受采访”所对应的数学结构中，一共有三个主观上不可区分的观察者时刻，并且这三个时刻都是同等真实的：

- 硬币正面朝上，今天星期一。
- 硬币正面朝下，今天星期一。
- 硬币正面朝下，今天星期二。

这三种情况中，只有一种情况是硬币正面朝上，所以她应该会认为硬币正面朝上的概率是1/3，并且，一旦她发现真相，将会在主观上经历相应的随机性。

现在，假设实验员私下决定为睡美人的指甲涂上颜色，颜色取决于量子测量的结果。这样一来，这些观察者时刻就不能完全区分开了。但是，只要她不知道颜色密码，她给出的概率就不应该发生变化。换句话说，我们可以任意扩大参考类，只要它不会对结果造成任何偏差就行。

这个结论暗含着深刻的推论。**它意味着，不管存在多么广袤无垠、超乎想象的多重宇宙，我们人类在所有追寻着类似问题的观察者中可能是相当典型的一种！**比如，一个典型的恒星系极其不可能包含几万亿个与我们类似的人类居民，因为如果那是真的，我们将有100万倍的可能性，居住在这样一个人口稠密的恒星系中，而不是像现在

一样，居住在一个总共只有70亿人口的太阳系。换句话说，强自我抽样假设允许我们对那些目不可及之处正在发生的事作出预测。

然而，同所有强大的武器一样，强自我抽样假设使用起来必须小心谨慎。比如，为什么你不是一只蚂蚁呢？如果我们将地球上的碳基生命作为参考类，那么，既然蚂蚁这种六脚小动物在地球上有10^{19}之众，比我们这种双足动物的数量多了不止100万倍，那岂不是意味着，你当下的观察者时刻是一只蚂蚁的可能性比是一个人的可能性大100万倍？如果是这样，你的基本实在框架将以99.999 9%的置信度被排除掉。好吧，我们忽略了人的寿命比蚂蚁长100倍，但即使把这个因素考虑进去，对这个麻烦的结论来说也于事无补。

因此，解决的办法就藏在如何选择参考类中。如图10-9所示，你可以选择多种不同的参考类，范围最广可覆盖到所有自知子结构的观察者时刻，最窄可到那些与你当下的主观感知完全相同的观察者时刻。如果你问：“我应该预计自己是哪一种实体呢？”那么，你的参考类就必须限定在那些能问出这些问题的实体中。很显然，蚂蚁并不包含在这个范围内！

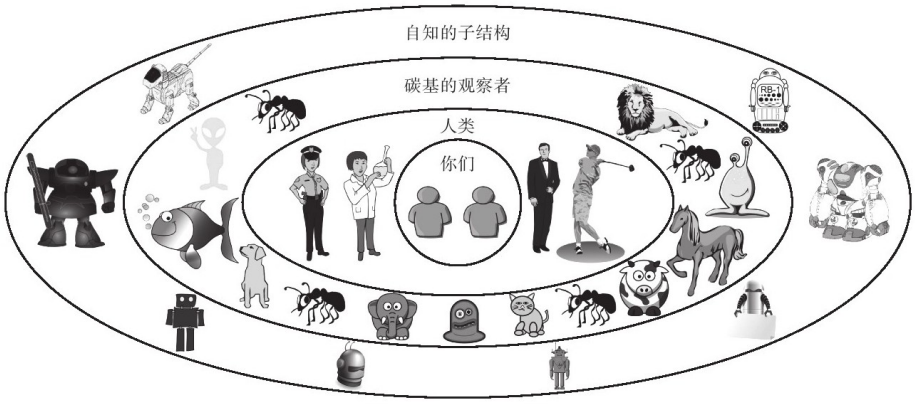


图10-9　假设你问：“如果我是一个……，那么，【这里插入你感兴趣的任何问题】的可能性是多大呢？”请注意，你用省略号取代的部分，就是你的“参考类”。在数学宇宙假说中进行推理时，通常会取范围最窄的参考类，也就是“所有主观上与你完全

相同的观察者时刻”。但某些情况下，你也可以将参考类的范围扩大，也能得到额外的有效性和有趣的结论，比如，扩大到“整个人类，或其他能够问出同样问题的自知实体”。

参考类与统计学家们所谓的“条件概率”（conditional probabilities）有异曲同工之妙，都必须被正确使用。如果使用不当，将导致灾难性的后果。2010年，一项大规模民意测验竟然没有预测出美国参议院多数党领袖哈里·里德（Harry Reid）会在内华达州连任，因为预录电话软件如果听见接听电话的人没讲英文，就会自动挂断，所以没能将那些讲西班牙文的支持者纳入考虑。

一片典型的空间区域预计将出现在一个因暗能量过多而无法形成星系的宇宙中，而我们宇宙中一颗典型的氢原子预计将出现在一片星际气体云或恒星中（见第5章）。但是，你不应该预计自己也出现在那些地方——“所有的点”或“所有的原子”对你来说，是毫不相干的参考类，因为无论是点还是原子，都不会像你一样追问问题。

为何你不是一个玻尔兹曼大脑

如果你认为把外星人囊括进参考类太疯狂，那么，如果你知道一些物理学家正在激烈争论的话题后，一定会目瞪口呆，因为他们的议题是某些更加奇异的参考类“同僚”：模拟程序（simulations）和玻尔兹曼大脑（Boltzmann brains）。

我们知道，原子组成的模式可以达到非常精妙的程度，甚至能产生自我意识——我们自身就是鲜活的证据。但目前为止，我们的物理学研究尚未发现任何证据，证明我们的意识就是意识的唯一途径。因此，我们必须将其他可能产生意识的原子组合也纳入考量。并且，我们也必须考虑到，某些生命形式（也许包括我们或我们的后代）某天甚至可能建造出有意识的实体：它们可能会让你联想到那些拥有物理

实体，并能与周围环境进行交互的智能机器人，或者不具有物理实体的仿真模拟程序，就像《星际迷航：下一代》中全息甲板上的人物，或者《黑客帝国》[63]中的史密斯先生，他们的身体都是纯虚拟的，在一个超强计算机中的虚拟现实内上演一幕幕惊险剧情。在这些模拟“人”中，也可能存在一些观察者时刻，其主观上与你现在的感觉完全一样。

如果这是真的，很显然，你还需要将那些模拟的你也纳入参考类中。在这个话题上，尼克·波斯特洛姆等人发表了一系列著作，并总结说，存在合理的可能性，我们自己就是仿真模拟。下一章中，我将对这种观点进行反驳。但是，如果你想以“帕斯卡赌注”（Pascal’s Wager）的名义尽量待在安全范围之内，我的建议是，你应当将生活过到极致，遍尝世间新奇欢乐之事。因为这样一来，即便你是一个模拟人，那个创造了你的家伙（不管他是谁）在观看你的人生时就不大容易变得无聊，也就不会轻易把你的程序关掉……

模拟程序是刻意创造出来的，但所谓的“玻尔兹曼大脑”却纯粹是巧合的产物。150多年前，奥地利物理学家路德维希·玻尔兹曼（Ludwig Boltzmann）成了统计力学的先驱。此后，他意识到，如果你将一个有温度的东西单独放置足够长的时间，即使是最不可能出现的原子组合也会随机出现。原子要自发重组为一个“自知”的大脑需要花费极其漫长的时间，但是，只要你有耐心，等待足够长的时间，它就一定会发生。

现在，快进到今天的宇宙，让我们来考虑一下它的长期命运。宇宙的加速膨胀最终将稀释所有充斥宇宙空间的物质，但是，假如宇宙暗能量密度保持不变（也就是保持当代测量推出的结果），那它将永远能提供些许热能。这点热能来自量子涨落——正是同样的量子涨落，产生了宇宙微波背景起伏（见第4章）。霍金的一大著名发现就

是，我们的宇宙膨胀得越快，这个温度就越高，它被称为“霍金温度”（Hawking temperature）。暗能量让我们的宇宙膨胀得比暴胀时期慢许多，所以，它所能提供的温度只比绝对零度高出10-30度。

即使以我们瑞典人的标准来看，这也算不上什么安慰，但它并不是绝对零度，也就意味着如果你等上足够长的时间，这点热能就能自我重组成你想要的任何东西。在标准宇宙学模型中，这种随机重组将永远进行下去，所以，它将随机产生一个与你的主观感知完全相同的复制品，它拥有虚假的记忆，以为自己度过了你的一生。更多的情况是，它只会以无实体的方式复制你的大脑，它只需存活足够长的时间，以便复制你当下的观察者时刻就行。接着，它会将这个过程重复无数次，以至于对于任何一个拥有实体和真实生活的你，都有无数多个无实体的玻尔兹曼大脑，它们近乎妄想式地存在着，以为自己度过了和你一样的人生。

这实在令人烦恼。如果我们的时空中真的包含这种玻尔兹曼大脑，那么，你基本上有100%的可能性是它们中的一员！毕竟，你的观察者时刻的参考类与这些大脑的参考类完全相同，因为它们的主观感觉都完全相同。所以，当你进行推论时，应该把自己看作这些观察者时刻中随机的一个，而那些无实体大脑的数量远远大于有实体的大脑，相当于无穷大与1的比值……

你也许已经开始担心你的身体是否真的存在。不用过于担心，这里有一个简单的测试，能够让你确定你是不是一个玻尔兹曼大脑：暂停、反思、检查记忆。如果你是一个玻尔兹曼大脑，你所拥有的某些记忆很可能是虚假的，而不是真实的。对每一组曾被认为是真实的虚假记忆，都存在众多略有差异的随机版本（比如，其中一个你回忆起的贝多芬第五交响曲听起来就像纯粹的静电干扰），这些版本的数量十分庞大，因为拥有这些记忆的无实体大脑数量多得不计其数。这是

因为，让事物刚刚好的方式只有一种，而让它差不多好的方式却数不胜数。这意味着，如果你真是一个玻尔兹曼大脑而自己却不知道这一点，那么，当你开始摇晃你的记忆之盒时，你应该会发现越来越多的荒谬之事。此后，你会感觉自己的现实世界正在消融，因为组成你的粒子正在逐渐飘散，再次回到那个冰冷刺骨、几近空虚的空间。

也就是说，如果你现在还在读这本书，就说明你不是一个玻尔兹曼大脑。这意味着我们对宇宙未来的假设一定有什么地方出了基本错误，必须吸取教训。我们将在后文有关“测度问题”（measure problem）的一节中进行简短的探索。

末日论：终点将至？

前面我们已经看到，“你应该是一个典型观察者”的观点是十分强大的，并能推出惊人的结果。还有一个饱受争议的结果是末日论，1983年由布兰登·卡特首次提出。

> 第二次世界大战期间，盟军从德国坦克的序列号中成功估算出了德军坦克数量。如果他们俘虏的第一辆坦克序列号为50，这就以95%的置信度排除了“坦克数量超过1 000辆”的可能性，因为假如坦克数量超过1 000辆，那么他们能俘获前50辆之一的概率小于5%。这其中有一个重要的前提：俘获的第一辆坦克可以被看作所有坦克的参考类中随机的一个。

卡特指出，如果每个人出生时都被分配一个序列号，那么，我们可以用同样的方法估算出地球上总共将生活多少人口[64]。我出生在1967年，差不多是地球上第500亿个出生的人。所以，假设我是地球总人口中的一个随机抽样，那么，我就能以95%的置信度排除掉“地球上出生的总人口超过1万亿人”的假设。也就是说，不太可能有超过1万亿人出生在地球上，因为这将把我置于所有人口的前5%——而我刚好位于总人口前5%的概率是如此之低，低到少于5%，简直只能用巧合来

解释。此外，假如世界现存人口保持100亿，并且平均寿命为80岁，那么，我们人类约有95%的可能性会在公元10000年前灭绝。

如果我相信我们的末日将由核武器（或计算机技术、生物技术等1945年以后才存在的科技）造成，那我的预测将变得更加黯淡——从危险的科技诞生开始，我是第16亿个出生的人，那么我将以95%的置信度排除“在我之后，到2100年，还有320亿人即将出生”这件事。这就是“95%置信度”这种方法的局限：人类的末日似乎很快就要来临了。为了避免这个消极的结论，我必须为“我为什么是危险科技阴影笼罩下的所有人中的前5%”，想出一个先验理由。我们将在结语回到这个严肃的“存在风险”上继续讨论。

有些人对这种末日论十分认真。比如，我有幸在一次会议上见到了布兰登·卡特本人，他兴奋地告诉我，最新的证据表明人口爆炸正在减缓，说他曾预测过这件事的发生，这意味着，预计人类在地球上幸存的年限将变长。还有一些人从其他方面批评了末日论。比如，假如还存在其他居住着类人生命的外星球，事情将发生微妙的变化。图10-10就描绘了这样一个例子，其中，每个行星上出生的人口总数变化很大。如果你知道这个事实，那么，你对未来的预计应当比标准的末日论更加乐观。确实，如果我相信某个更加极端的理论——时空中只存在两个宜居的行星，其中一个从头到尾居住过100亿人口，另一个1万万亿人口，那么，有50%的可能性，我现在正居住在那颗总共抚育1万万亿人口的行星上。

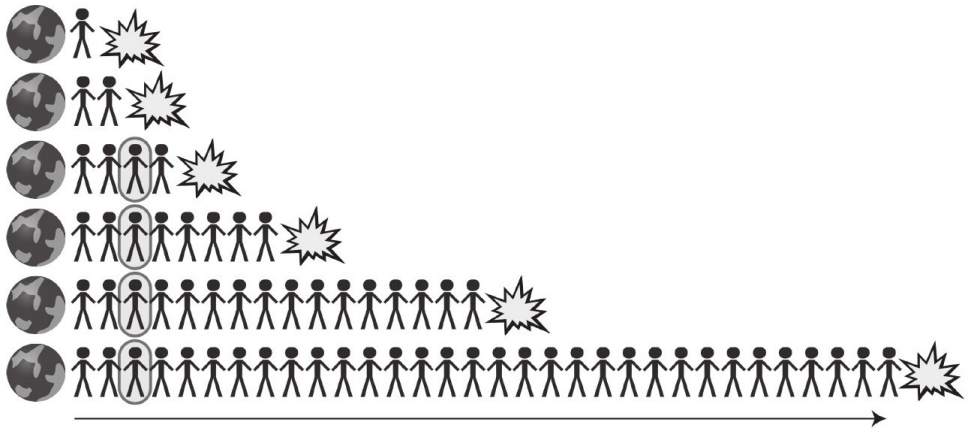


图10-10　如果你知道你的出生序号是30亿，那么你可能会认为，你的行星上出生的人口总数会超过300亿人的可能性只有10%。但是假设你知道，总共有6颗行星与我们的行星十分相似，这6颗行星上从头到尾出生的人口总数分别为10亿、20亿、40亿、80亿、160亿和320亿（图中的每一个小人代表10亿人）。那么，你的行星上出生的人口总数超过300亿人的可能性实际上等于25%；总共有4个人可能和你拥有相同的出生序号，你可能是这4个人中的任意一个（概率都相等），所以你出生在最底端那个最成功行星上的概率为25%。

然而，这个论证只会带来错误的希望。我并未拥有“宇宙中只存在两个宜居行星”的信息，并且我有很好的理由认为这个理论是错误的——对“我的出生序号是500亿”这件事的观察结果已经以99.999%的可能性排除了这个理论，因为随机抽取一个人，他出生在前500亿人口中的可能性只有0.000 05%。

为何地球如此年老

2005年3月，在加州的一次会议上，我有幸见到了尼克·波斯特洛姆。我们很快就发现，我们不仅都在瑞典度过了童年，同时也都着迷于宏大的问题。在喝了点儿小酒后，我们谈论的话题转向了末日论。大型强子对撞机是否会制造出一个微型黑洞，最终吞噬地球？它会不会制造出“奇异物质”，促使地球转变成一团奇异夸克物质？我信任

我在MIT的同事们的计算结果，他们说这样的风险微不足道，可以忽略不计。但是如果我们忽略了某些东西，会发生什么事呢？过去的经历曾一次次让我确信，大自然比任何人造机器都暴虐得多。比如，产生于超大黑洞附近的宇宙射线粒子无时不刻以大于加速器百万倍的能量轰击着地球，然而地球诞生45亿年后依然好好地待在这里。这说明地球显然十分强健，我根本不用担心它的安危。基于同样的原因，我也不应该担心其他的宇宙末日情境。比如，如果空间“冷却”为低能相（见第4章），就会出现一个致命的宇宙泡泡，包裹着新诞生的非宜居空间，以光速膨胀，在人们意识到危险之前，就瞬间毁灭挡在它路上的所有障碍物。但是这么长时间以来，我们一直好好地活在地球上，说明这样的事件根本不存在，或者非常罕见。

接着，我冒出了一个可怕的念头：我的推理过程有缺陷！假设每颗行星每天有50%的概率会被毁灭掉。那么，大多数行星在一个星期之内都会毁灭殆尽，但是在一个拥有无数颗行星的无限空间内，永远会有无数颗行星幸存下来，它们的居民依然快乐地生活着，丝毫意识不到前方迎接他们的将是惨淡的命运。假如我只是时空中一个随机的观察者，那么，我将预计自己是这些天真无邪的人们中的一员，无忧无虑地生活着，不知道自己是正待被宰割的羔羊。也就是说，我栖身的这部分空间区域还没有被毁灭，并不能告诉我任何信息，因为所有活着的观察者必然都栖身于还没有被毁灭的空间区域内。想到这个，我变得相当紧张。我感觉自己好像被关进了动物园，面前是一群饥饿的狮子，而我刚刚才醒悟过来，原来笼子的栏杆根本没法保护我，因为它只是一个视错觉，并且是狮子们看不见的视错觉。

我和波斯特洛姆为此伤透了脑筋。过了一会儿，我们一起想出了一个反对末日论的论证，这一次没有缺陷。地球形成于大爆炸后90亿年，并且现在已经很明显，我们的银河系（以及其他地方的相似星系）中还孕育了大量早于地球几十亿年形成的类地行星。这意味着，

如果我们将那些与我们相似的观察者都纳入考虑，那么，他们中将有相当大的比例远远早于我们存在。现在，考虑这个情况：所有的行星都会以很短的半衰期被毁灭掉（比如，1天、1年或1 000年），那么，几乎所有的观察者时刻都将发生在很早的时期，所以在这场比赛中，我们几乎不可能出生在一个步调缓慢、形成时间极晚的星球上。于是，我们两人决定为此写一篇论文。那天晚上，我们在酒店大堂待到了很晚。当我最终迷迷糊糊睡去时，我满脑子都是：有99.9%的可能性，我们在接下来的10亿年里都不会遭遇到死亡泡泡、黑洞或奇异物质。

当然，除非我们人类作出什么大自然中前所未有的蠢事……

为何你没有更年轻一些

我们刚说到，如果物理世界中有某种可怕的机制，使得所有行星都十分短寿，那么，我们应该预计自己出生在那些诞生得更早的宜居行星上，而不是现在这颗运转得慢吞吞的地球上。所以，那个令人沮丧的理论就被排除掉了。不幸的是，阿兰·古斯发现，在某些听起来十分合理的前提假设下，暴胀也会预测出同样的事情！他被自己这个预测了更年轻地球的想法所困扰，并给它起名叫“年轻悖论”（youngness paradox）。2004年，当我和他同在MIT工作时，我花了很多时间来担忧多重宇宙中如何进行预测。我以此为题写了一篇论文，其过程艰辛痛苦，打破了我写论文的时间纪录。但我发现，年轻悖论甚至比我们之前所认为的更加极端。

正如我们在第4章所看到的那样，暴胀会永远进行下去，每隔大约10^{-38}秒就将宇宙的体积翻一倍，创造出一个混乱的时空，其中，无数的大爆炸在不同时刻发生，无数的行星在不同时刻诞生。我们看到，任意一颗行星上的观察者都会认为，宇宙大爆炸发生在他所在的区域

停止暴胀之时；对我个人来说，我的大爆炸与我目前的观察者时刻之间的时间差大约是140亿年。现在，让我们考虑一下所有同时发生的观察者时刻。对其中一些来说，大爆炸发生在130亿年前，还有一些大爆炸发生在150亿年前，诸如此类。由于宇宙体积发生着狂乱猖獗的翻倍，那么，1秒后，将发生$2^{10^{38}}$多倍的大爆炸，因为宇宙的体积在1秒内扩大了10^{38}倍。同样地，在这些大爆炸形成的星系中，将出现$2^{10^{38}}$多倍的观察者。这意味着，如果我是当下所有观察者时刻中随机的一个，那么，我将有$2^{10^{38}}$多倍的可能性位于一个年轻1秒的宇宙中，该宇宙的大爆炸发生的时间晚1秒钟！这个可能性的倍数是1后面跟着100万亿、万亿、万亿个零。我的行星应该更年轻，我的身体也应当更年轻，万事万物都似乎以更加慌张的步调诞生和演化着。

某部分空间的大爆炸发生得越晚，这部分空间就会更热，因为它冷却的时间更短，所以，我们不太可能出现在一个相对较冷的宇宙中，那么，就出现了一个“冷却问题”（coolness problem）——我计算了宇宙微波背景温度的测量值比绝对零度高3度以下的概率，得到的数字是$10^{-10^{56}}$，所以，当COBE卫星测量出这个温度值为2.725开尔文时，这个测量结果以99.999……999%的置信度排除了整个暴胀理论——小数点后有1亿、万亿、万亿、万亿、万亿个9。听起来不妙啊……在理论与实验不相符合的耻辱之殿中，这甚至打破了第6章曾提过的氢原子稳定问题（28个9），以及第3章曾提过的暗能量问题（123个9）的纪录。那么现在，各位朋友，请欢迎“测度问题”的闪亮登场！

测度问题：物理学的危机

一定出了什么严重的问题！可是，究竟是什么问题呢？难道永恒暴胀理论真的被排除掉了吗？让我们再仔细看看。我们问了一个合理

的问题，关于一个典型的观察者预计自己将测量出什么结果——我们选择的测量对象是宇宙微波背景的温度。由于我们考虑了永恒暴胀，并分析了一个包含许多观察者时刻的时空（他们都会测量出不同的温度），所以，我们不能预测出一个独一无二的答案，只能预测不同温度区间的概率。只能预测概率并不是世界末日——我们在第6章已经谈到，量子力学就只能预测出概率而非确定的结果，但它依然是一个完全可检验的、成功的科学理论。相比之下，更大的问题在于，我们计算出来的概率告诉我们，实际观测的结果是相当不可能出现的，甚至到了荒谬的程度，所以理应排除掉那个潜在的理论。

那么，会不会是我们的概率计算出错了呢？从根本上说，数学是简单直接的——概率就等于我们的参考类中测量出不同温度值的观察者时刻各自所占的比例。假设总共只有5个观察者时刻，他们观测到的温度比绝对零度分别高出1度、2度、5度、10度和12度，其中有2个低于3度，那么低于3度的比例就等于2/5=40%。这太简单了！但是，假如真像永恒暴胀所预测的那样，有无数多个观察者时刻，低于3度的观察者时刻也是无数多个，那么，低于3度的观察者时刻所占的比例岂不是等于无穷大除以无穷大了？我们要如何理解这件事？

还好，数学家们发明了一个优雅的方法，叫作“求极限”。用这个方法，∞/∞在许多情况下也是有意义的。比如，所有自然数（1、2、3……）中偶数的比例是多少呢？自然数的数量有无数多个，其中偶数的个数也有无数多个，所以偶数所占的比例是∞/∞。但是，如果我们只数前面n个数，我们就能得出一个可理解的答案，这个答案会根据n的值发生轻微的摆动。如果不断增加n的值，我们会发现比例摆动的幅度越来越小。现在，我们在n趋于无穷大的情况下对比例求极限，就能得到一个意义明确的答案，而这个答案与n值没有丝毫关系。这个答案就是：偶数在自然数中所占的比例正好是一半。

这看起来似乎是一个合理的答案，但是，无穷大是非常狡诈的——偶数的比例竟然会随我们数数的顺序变化而发生改变！如果我们将顺序改成：1、2、4、3、6、8、5、10、12、7、14、16……偶数的比例竟然变成了2/3！因为我们在写下这个数列时，每3个数中都有2个偶数、1个奇数。我们并没有作弊，因为所有的奇数和偶数最终都将出现在这个数列中；我们只是为它们重新排列了顺序。同样，如果我们对数字进行适当地重新排列，我能向你证明，偶数所占的比例可以等于1除以你的手机号码……

类似地，时空中观测到特定结果的观察者所占的比例，取决于你数他们时所采用的顺序！我们宇宙学家用“测度”这个词来表示一个观察者时刻的排列顺序，或者更一般地说，用来表示一种从恼人的无穷大中计算出概率的方法。我为冷却问题计算出来的疯狂概率就相当于一个特定的测度，并且，我的大多数同行都猜测，问题并不出在暴胀，而出在测度身上：当谈及某个特定时刻的所有观察者时刻的参考类时，不知道出于什么原因，它似乎是有缺陷的。

过去几年，相关论文如雪崩一般涌现，提出了许多替代的测度。人们证明了，要找到一个对永恒暴胀有效的测度太难了，简直难于上青天。某些测度在冷却问题上失败了，有一些失败了是因为它预测出你是一个玻尔兹曼大脑，还有一些预测出我们的天空将被许多巨大的黑洞扭曲。亚历克斯·维兰金最近告诉我，他变得十分沮丧。几年前，他希望能找到一个能避免所有陷阱的测度，它将非常简单优雅，能说服我们所有人；但是现在，我们有了一系列不同的测度，每一个都给出了不同但合理的预测，很难决出胜负，从中选出一个最好的。如果我们预测的概率取决于假设的测度，那么只要事先假定一个特定的测度，我们就能得到任何想要预测的结果。这样一来，我们其实根本不能预测任何东西。

我和维兰金有着同样的担忧。实际上，我把测度问题看作当代物理学中最大的危机。以我的看法，暴胀在逻辑上已经自毁了。我们开始认真对待暴胀理论，是因为它能作出正确的预测（见第4章）。它预测出典型的观察者进行测量后会发现周围的空间其实是平坦的，而不是弯曲的（平坦性问题），它还预测出，典型的观察者在各个方向上测量出的宇宙微波背景温度都应该是相似的（视界问题），他们测出的功率谱应该与WMAP探测器看到的一样，诸如此类。但是现在它却预测出，无数多个观察者测量出不同东西的概率取决于某些我们不知道的测度。这意味着，严格来说，暴胀根本不能预测一个典型的观察者应当看到什么东西。所有的预测都将被取消，包括那些一开始使我们认真对待暴胀理论的预测！自毁完成。我们暴胀的婴儿宇宙进入了不可预测的青春期。

平心而论，我不觉得目前存在比暴胀理论更好的宇宙学理论，所以我并未将此看作对暴胀理论本身的辩驳。我只是有一种强烈的感觉，觉得我们需要解决测度问题。我想，一旦我们解决了它，某种形式的暴胀依然会保留下来。此外，测度问题并不是暴胀理论独有的问题，只要某个理论涉及无数多个观察者，那它就存在这个问题。举个例子，让我们再来看看永不坍缩的量子力学。第7章提及的量子永生就是严格建立在“无数多个观察者”基础上的，所以才会产生永生。这意味着，如果我们不解决测度问题，所有结论就永远不值得相信。

正如图10-11所示，要达到主观上的永生，并不需要量子力学，只需要平行宇宙就可以达成。图中的两架飞机到底是位于我们三维空间（第一层多重宇宙）中的不同位置，还是我们希尔伯特空间（第三层多重宇宙）中的不同部分，都无关紧要。所以，让我们采用更一般的多重宇宙情境——在其中，存在某种机制，每秒钟会杀死多重宇宙中一半的你。20秒之后，在你的所有分身中，大约只剩下百万分之一（$1/2^{20}$）的你还活着。直到那一时刻，观察者时刻已经历的总时长为

$2^{20}+2^{19}+\cdots\cdots+4+2+1\approx 2^{21}$秒，所以，在200万观察者时刻中，只有1个记得自己存在过20秒。正如保罗·阿尔蒙德指出的那样，这意味着，那些存在时间长达20秒的观察者时刻，应当以99.999 95%的置信度排除掉整个前提（即他们正在经历永生实验这件事）。也就是说，我们遇到了一个哲学上很诡异的情景——开始时，你拥有一个正确的理论，你用它来预测接下来将要发生的事情，然后，你却转过头，宣称这个理论被排除掉了！此外，你等待的时间越长，你就将经历越诡异的巧合事件，这些事件会用一种空前绝后的方式拯救你的生命，比如，被供电故障所救，被小行星撞击所救，等等（见第7章）。这足以让大多数人开始怀疑他们对现实所作出的种种假设……

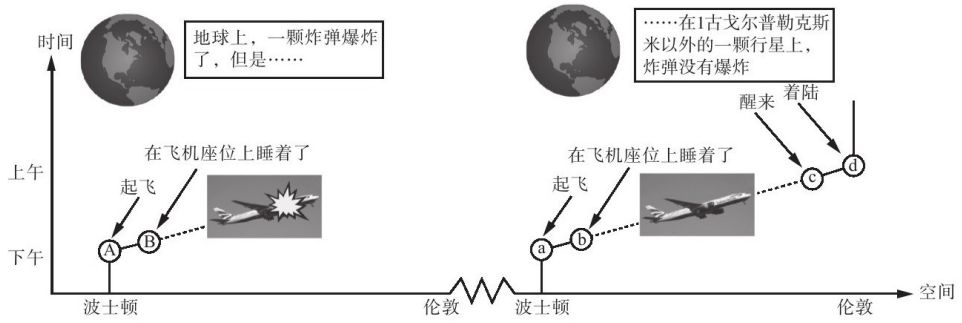


图10-11　在图10-5中，我们看到，由于观察者时刻c点与观察者时刻b点拥有相同的记忆，所以c点感觉起来像是b点的延续。然而，c点感觉起来也像是观察时刻b的延续，这是另一个分身的观察者时刻，B点所在的航班与前者完全相同，唯一的不同是，恐怖分子在B点所在的航班上引爆了一颗炸弹，在他们醒来之前就将他们赶尽杀绝。如果不存在其他分身，那么，对B点和b点的正确预测就是，他们下一时刻都将感知到c点。

无穷大问题

测度问题告诉了我们什么呢？我是这样想的：现代物理学最基础的地方，存在着一个本质上有缺陷的假设。经典力学的失败让我们转向了量子力学，因此我认为，当下公认最好的理论也同样需要一场大

地震。没有人知道问题的根源在哪里，但我有自己的怀疑。我的头号“嫌疑犯”就是：∞。

实际上，我有两个“嫌疑犯”：“无穷大”和“无穷小”。我所说的“无穷大”，指的是空间可以拥有无穷大的体积，时间能永远延续下去，并且存在无数多个物理实体。我所说的“无穷小”，指的是连续统——也就是说，哪怕一丁儿点空间中也包含无数个点；并且空间可以被无限拉伸，且不管怎样拉伸都不会发生任何坏事；大自然中存在着可以连续变动的数值。这两个“嫌疑犯”之间的关系十分密切——暴胀通过不断地拉伸连续空间，从而创造出了无限的空间（见第章4）。

不管是无穷大还是无穷小，我们都没有直接的观测证据。所谓的无限空间中包含着无数多颗行星，但是我们的可观测宇宙却只包含10^{89}个物体（大多数都是光子）。如果空间真的是一个连续统，那么，要描述一个简单的问题（比如两点之间的距离）就需要无数多的信息，需要用一个小数点后拥有无限位数的小数来表示。而在实践中，我们物理学家从来不会尝试测量一个小数点后超过16位数的值。

我记得，我从青少年时代开始就极不信任无穷数。随着知识的增长，我对它的怀疑不减反增。如果没有无穷数，测度问题就会烟消云散，无论我们在什么尺度上进行测量，都会得到确定无疑的比例。如果没有无穷数，也就不会有量子永生。

作为物理学家，我对无穷数的怀疑将我置于了只有极少数人的队列。但数学家们不一样，他们早已习惯用怀疑的眼光来对待无穷数和连续统。常被称为“古往今来最伟大数学家”的卡尔·高斯（Carl F. Gauss）在19世纪就说道：“我反对把无穷大的量级看作完备的，这在数学上是绝对不允许的。无穷大只是一种说法，它的真正含义是在允许其他数无限增大的情况下，某些特定比率无限接近的极限。”比他

年轻的同行利奥波德·克罗内克（Leopold Kronecker）对连续统及相关的概念都进行了批判，他甚至说：“上帝只创造了整数；其他都是人类的造物。”然而，在19世纪，无穷大已经成了数学界的主流思想，只剩下少数批评的声音。比如，澳大利亚籍加拿大裔数学家诺曼·维尔德贝格尔（Norman Wildberger）就曾发布了一篇文章，称“实数就是一个笑话”。

那么，为什么今天的物理学家和数学家如此倾心于无穷大，几乎从来不质疑它呢？从根本上来说，这是因为无穷大是一个非常方便的近似法，我们还没有找到比它更好的替代品。比如，想想漂浮在你面前的空气吧。如果你想跟踪这亿亿颗原子中每一颗的位置和速度，那是不可能完成的任务，因为它们实在太复杂了，复杂到令人绝望。但是，如果你忽略掉“空气是由原子组成的”这个事实，而改用连续统的近似法来看待它，那么，在你眼中，它就变成了一种光滑的物质，其中每一个点都有着自己的密度、压力和速度；你会发现，这种理想化的空气遵循一个美丽而简单的公式，能解释我们所关心的一切事物，从声波在空气中的传播，到风起风落的缘由。但是，除开这些方便的因素，空气并不是真正的连续统。那么，空间、时间等构成我们物理世界的因素是否也同样如此呢？下一章，我们将探索这个问题。



- ◆数学结构是永恒不变的：它们并不存在于时间和空间中，而是时间和空间存在于它们（其中的某些）之中。如果宇宙历史是一部电影，那么数学结构就是整张DVD碟片。
- ◆数学宇宙假说意味着，时间的流逝是一种幻觉，变化也同样是一种幻觉；创生与毁灭也是幻觉，因为它们涉及变化。
- ◆数学宇宙假说意味着，不仅时空是一个数学结构，而且时空内的所有东西都是，包括组成我们的粒子。从数学上来说，这些东西似乎与“场”的概念相对应——时空中的每个点都拥有一些数字，代表那里有些什么东西。
- ◆数学宇宙假说意味着，你是一个数学结构中的自知的子结构。在爱因斯坦的引力理论中，你是时空中一个极其复杂的辫状结构，这个结构的精妙模式对应着信息处理过程和你的自我意识。在量子力学中，你的辫状模式更像一棵树。
- ◆当下，你正在感知着的电影般的主观实在，只存在于你的大脑中，作为你大脑的实在模型的一部分。它不仅包含此时此刻经过剪辑的亮点部分，还包含了一组经过选择预录的、发生在远方或过去的事件，为我们创造出时间流逝的幻觉。
- ◆你不仅有意识，你还拥有自我意识，因为大脑的实在模型中还包含了你自己以及你与外部世界关系的模型。你对你称为“我”的主观视角的感知，是一种感质，就像你对“红色”和“甜蜜”的感知一样。
- ◆那种认为“我们的外部物理实在被数学模型完美描述，但它并不是一个数学结构”的理论是百分之百不科学的，因为它无法作出任何可观测的预测。
- ◆你应当预期，你当下的观察者时刻是所有与你感觉相同的观察者时刻中相当典型的一个。这种推理过程导致了一些颇具争议的结论，比如，人类即将灭亡、宇宙的稳定性、宇宙学暴胀的有效性，以及你是不是一个无实体的大脑或者模拟程序。
- ◆它还导致了所谓的测度问题，这是一个严肃的科学危机，动摇了物理学对任何事情进行预测的理论根基。

OUR

MATHEMATICAL

UNIVERSE



II

第四层多重宇宙，万物的终极答案

是什么赋予这些方程以生命，并制造出一个被它们所描述的宇宙？

斯蒂芬·霍金

为什么我相信第四层多重宇宙

为什么是这些公式，而不是其他的呢

假设你是一位物理学家，你发现了一种方法，能将所有物理定律统一到一个“万物理论”中。用这个万物理论的数学公式，你能回答一切让当代物理学家们辗转反侧的问题，比如量子引力究竟是如何运作的，以及怎样解决测度问题。印着这些公式的T恤成了畅销货。你因此获得了诺贝尔奖。你欢欣鼓舞。然而，在颁奖典礼的前一夜，你却忐忑不安、夜不能寐，因为你内心纠结着一个有些难堪的问题，这个问题也正是我的英雄——约翰·惠勒提出的一个至今无人能回答的问题：为什么会是这些特定的公式，而不是其他公式呢？

在前两章里，我论证了数学宇宙假说。这个假说认为，我们的外部物理实在其实是一个数学结构。这再次凸显了惠勒的问题。数学家们已经发现了大量的数学结构，图11-1的各方框中列举了一些最简单的例子。

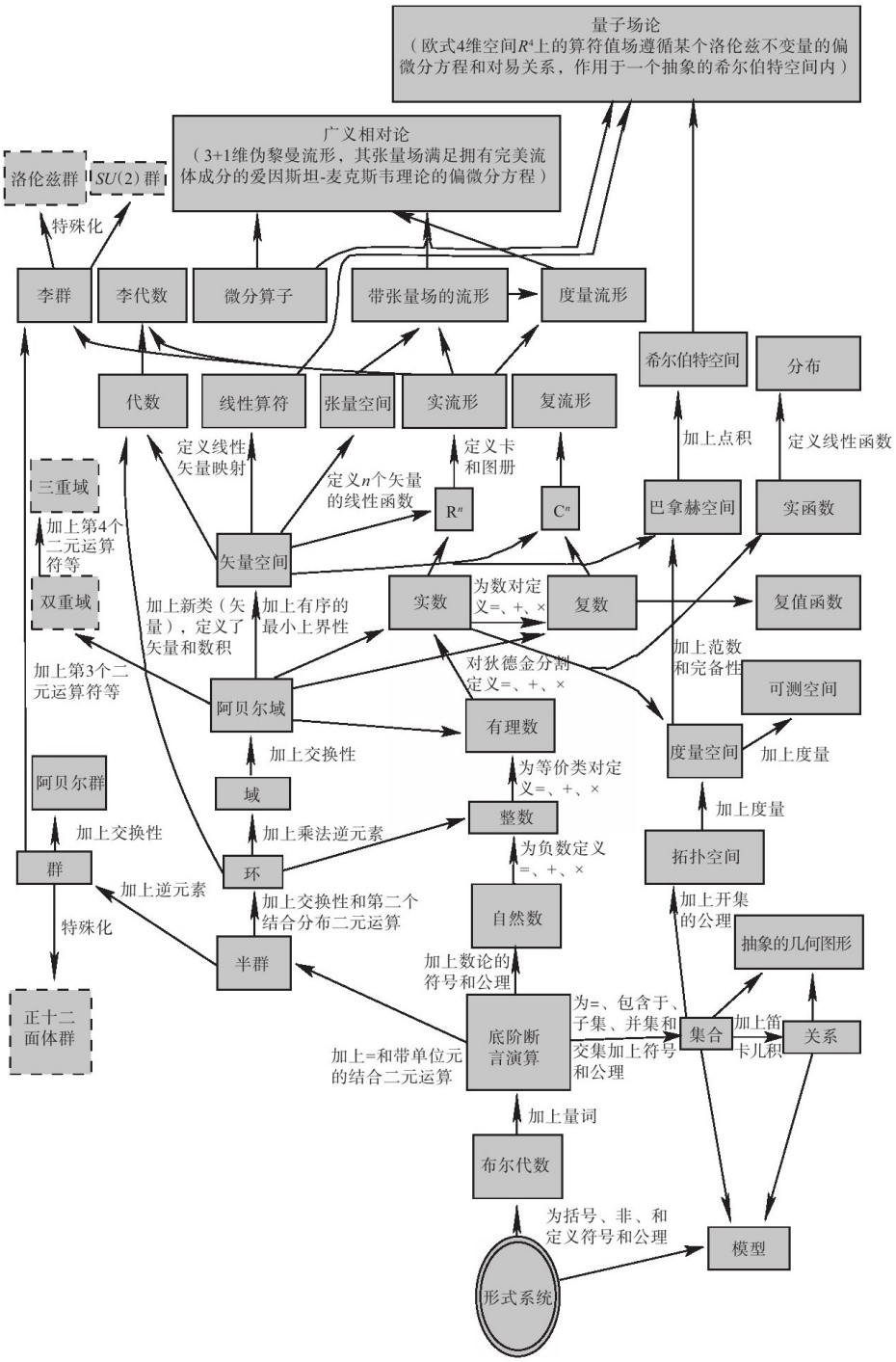


图11-1　一些基本数学结构之间的关系。一般而言，箭头指示着后来加上的新符号和/或新定理。多个箭头指向同一处，表示结构的组合。比如，代数是一个向量空间，也是一个环，而一个李群

（Lie group）同时也是一个流形群。如果整个谱系扩展开来，可能无穷无尽，该图只展示了靠近底部的一小部分。

然而，尽管有些数学结构也许能描述某些有限的局部，但没有一个与我们的物理实在完全符合。1916年，广义相对论成了最匹配的候选者，它不仅涵盖了时间和空间，还描述了物质的多种形式。但是，随着量子力学的兴起，人们很快会发现，我们的物理实在中有些特点是无法用广义相对论的数学结构来解释的。幸运的是，由于你发现了那个接近“万物理论”的方法，所以你现在可以扩展这张图，为其加上你所发现的那个数学结构。倘若你加上的方框正是人们寻觅已久的那个完全符合物理实在的方框，那你就真能实至名归地把诺贝尔奖抱回家了。

这时，我仿佛听到约翰·惠勒那慈祥的声音突然响起在耳边：“可是，其他方框呢？”如果你的方框很符合物理实在，那么为什么其他的不行呢？

所有方框所根植的数学基础都是平等的，只不过数学结构不同。那么，为什么在物理实在面前，其中一些比另一些更平等呢？在实在的最深处，是否真的存在一个根本性的、无法解释的不对称，将各种数学结构划分成两个阵营——拥有物理实在的数学结构和缺乏物理实在的数学结构？

数学民主主义，一种激进的柏拉图主义

早在1990年那个在伯克利的夜晚，我脑中第一次冒出了“数学宇宙”的想法。在国际公寓五楼宿舍外的走廊上，我把这个想法告诉了我的好友比尔·波里尔。那晚，这个问题真的搅得我心神不宁。直到我脑袋里的灯泡熄灭，我意识到，有一条路可以把我带出这个哲学困境。我向比尔辩称，彻底的数学民主主义是说，数学存在和物理存在

是等价的，因此所有存在于数学中的结构，也都存在于物理中。这样，图11-1中的其他方框也都各自描述了一个物理上实在的宇宙——同我们碰巧栖居的这个宇宙不一样的宇宙。这可以被看作一种激进的柏拉图主义：柏拉图“思想境界”中的所有数学结构都以物理形式存在于“洞穴之外”的某处。

换句话，这个观点就是说，在我们之前所讲到的三层平行宇宙之外，还有一些更加硕大无朋的第四层平行宇宙，各自对应着不同的数学结构。前三层平行宇宙相当于同一个数学结构中无法相互交流的平行宇宙：第一层平行宇宙，简单地说就是遥远的区域，光线没有足够的时间来赶上我们；第二层平行宇宙覆盖的区域，由于我们与它们之间的空间发生了宇宙学暴胀而永远遥不可及；第三层平行宇宙，也就是埃弗雷特所说的“多世界”，讨论的是量子力学的希尔伯特空间内无法交流的各部分。

然而，不管是第一、第二还是第三层平行宇宙，都遵循着相同的基本数学公式（描述了量子力学、暴胀等），第四层平行宇宙则像穿梭于不同调式中的翩翩舞者，涉入了不同的公式，对应着不同的数学结构。图11-2用分层的形式展示了这四层多重宇宙，这正是本书的核心内容之一。

我们的数学宇宙

假如第四层多重宇宙的理论是正确的，那么，由于它没有任何自由变量，所有平行宇宙的全部性质（包括那些自知的子结构所产生的主观感知）原则上都能由一个极其聪明的数学家推导出来。可是，这个理论正确吗？第四层多重宇宙真的存在吗？

有趣的是，在数学宇宙假说的语境中，第四层多重宇宙的存在是毋庸置疑的。我们在第10章中已经详细讨论过，数学宇宙假说认为数学结构正是我们的外部物理实在，而不仅是它的描述。这种物理实在与数学实在之间的等价关系意味着，假如一个数学结构包含一个自知的子结构，它将会像身在真实的物理宇宙中一样，感知到自己的存在，就像你和我（尽管那个宇宙的各种特性和我们不一样）。霍金曾发出一个著名的疑问：“是什么赋予这些方程以生命，并制造出一个被它们所描述的宇宙？”在数学宇宙假说的语境中，不需要向方程“赋予”什么生命，因为重点并不是数学结构如何描述了宇宙，数学结构本身就是宇宙。此外，也不需要什么“制造”。你不能“制造”出一个数学结构——它单纯地存在着。它不存在于时间和空间中——更可能是反过来，空间和时间存在于它之中。

换句话说，所有存在于数学上的结构都有一个相同的存在状态。最有趣的问题不是它们中的哪些以物理形式存在着（它们都是），而是哪些蕴含着生命——或许，蕴含着我们。许多数学结构（比如正十二面体）缺乏足够的复杂性来支撑任何自知的子结构。因此，第四层多重宇宙很有可能像一片幅员广袤但了无人烟的沙漠，生命只被局限在极其罕见的绿洲中，局限在那些对生命友好的数学结构中，比如我们栖身的这个。与之类似，我们在第5章也曾看到，大部分第二层多重宇宙也是贫瘠的荒漠，生命被局限在太空中小小的“宜居带”内，因为只有这里的暗能量密度等物理参数适宜生命的繁衍生息。第一层多重宇宙中也上演着同样的故事——生命仅繁盛于太空中很小的一部分，主要位于行星表面附近的区域。因此，我们人类栖身的地方，实在是非常特别！

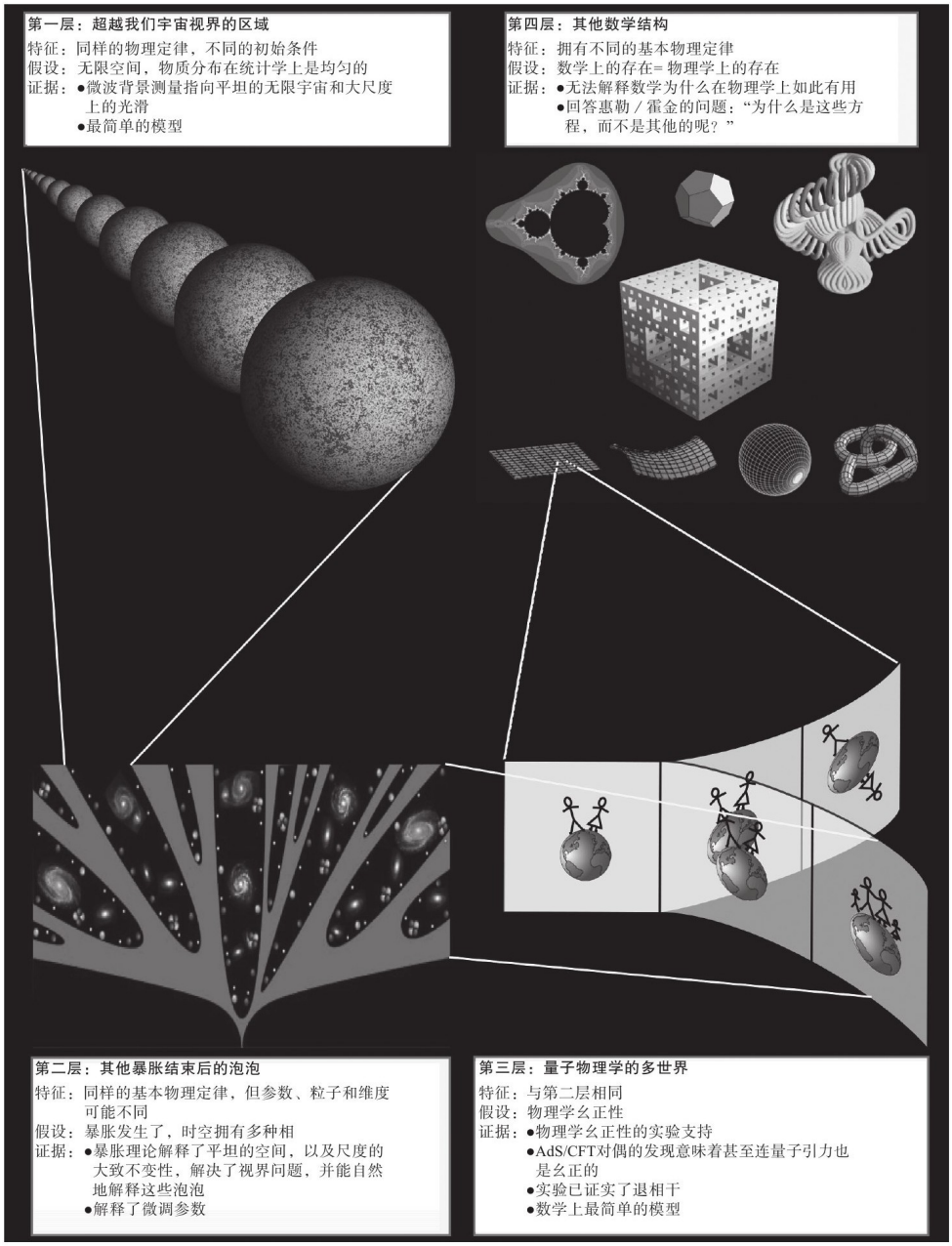


图11-2　本书所描绘的平行宇宙，用一个四级的层级结构来表示。这里，每一个多重宇宙都是上一层多重宇宙中的一个单元。

探索第四层多重宇宙：那里有什么

我们附近的邻居

让我们花一些时间来探索第四层多重宇宙，以及其中繁复多样的数学结构吧。先从附近的邻居开始。虽然我们尚不知晓自己所处的这个数学结构究竟是什么，但不难想象，对其进行一些小小的调整，就可能衍生出其他合理且有效的数学结构。比如，粒子物理学的标准模型包含某些对称性，数学家们将其描述为$SU(3)\times SU(2)\times U(1)$。如果用其他不同的对称性来替代它们，我们就能得到一个拥有不同粒子和作用力的数学结构，其中，夸克、电子和光子被其他具有全新特性的实体所取代。一些数学结构中没有光，还有一些没有万有引力。爱因斯坦对时空的数学描述中，数字1和3分别代表时间和空间的维度，此时为了进行调整，你可以随便找两个数字来替代它们。

第5章中我们已经讨论过，尽管一个数学结构中只拥有一组基本物理定律，但暴胀能在空间中的不同区域创生出不同的有效物理定律，形成第二层多重宇宙。而现在，我们正在讨论一些更加彻底和激进的东西，在这里，哪怕是最基本的物理定律也不尽相同，比如，根本没有量子力学。假如弦理论能用数学来严格定义，那么一定存在一个数学结构，它的“万物理论”正好就是弦理论，但除此之外的其他第四层多重宇宙的万物理论却可能迥然相异。

在思考第四层多重宇宙时，我们需要任想象力自由飞翔，不要让它被我们先入为主的观念所束缚，比如物理定律理应是什么样的。想一想空间和时间：它们不一定非得与我们熟知的那样是连续的，也可以是离散的，就像电子游戏“吃豆人”、俄罗斯方块一样，所有动作都像抽筋一样跳跃。只要关闭所有的用户输入，让时间演化循着确定的方向计算下去，那么，这些游戏都能成为有效的数学结构。比如，图11-3中展示了一个3D的俄罗斯方块游戏，叫作“FRAC”，它是我和好友佩尔·柏格兰（Per Bergland）于1990年开发的。如果你玩这个游戏时不按键盘（这可不是得高分的好策略），那么整个游戏，从开头到结尾都会被程序中简单的数学规则所决定，这让它也成了一个数

学结构，成为第四层多重宇宙的一部分。甚至有许多人猜测，我们所在的宇宙里也可能藏着时空不连续点，但由于规模太小，隐于毫厘之间，尚未被我们注意到。

让我们更彻底一点：一些数学结构，完全摒弃了时间和空间，因此我们根本想象不出里面会发生什么事。图11-4所列举的大部分结构都是这种类型。在一个抽象的十二面体中，什么都不会发生，因为这个数学结构中不包含时间。

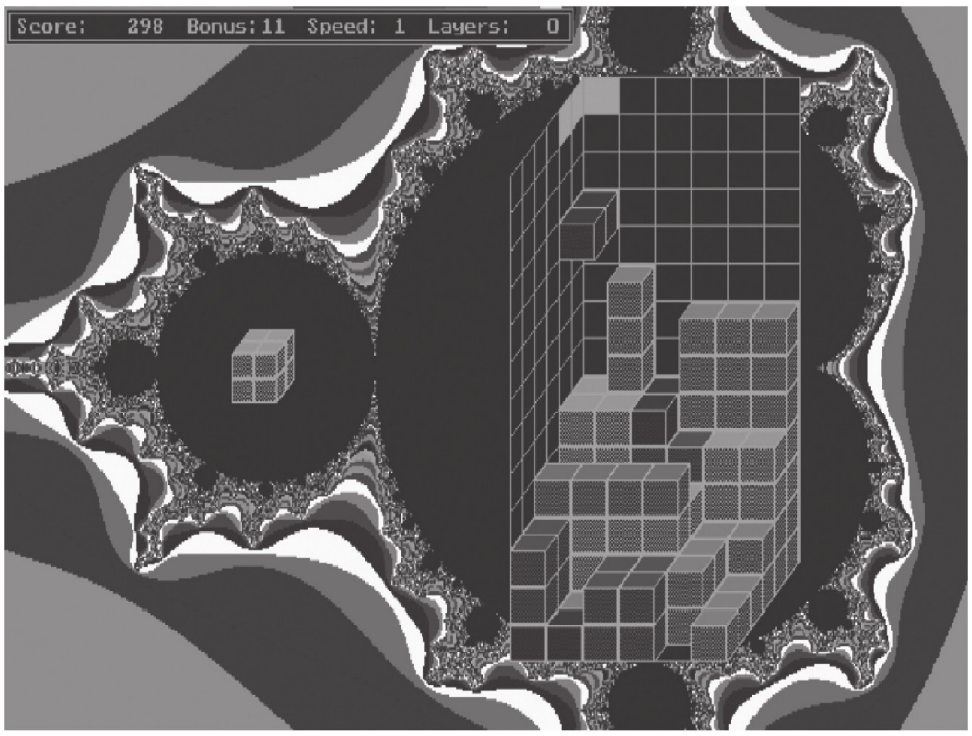


图11-3　3D俄罗斯方块游戏FRAC体现了一个时空离散而非连续的数学结构。

编码	数学结构
100	空集
105	包含5个元素的集合
113100120	三角形旋转
11220000110	C_2群
11220001110	布尔代数
1132000012120201	C_3群
12410002311003102	四面体旋转
126100024351100510243	立方体旋转
2142200101001111011101111	“风筝”图
1281001230567410015620473	八面体旋转

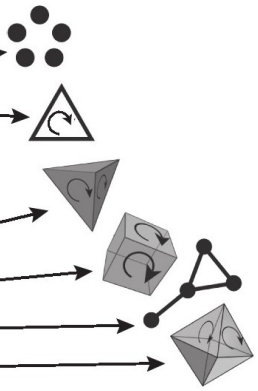


图11-4　计算机程序能自动生成一个有序的总览表，包含所有有限的数学结构。其中，每个结构都编码为一串数字。本图举了一些例子，采用了我2007年所发表的数学宇宙论文中的编码方案。第二列中的文字和图解则是冗余的包袱，反映了我们人类为这些结构所起的名字和所画的图示。

我们在第四层多重宇宙中的“邮政编码”

我们在第9章中讨论过，一个数学结构就是一组简单的抽象元素以及它们之间的关系。为了更系统地探索第四层多重宇宙，我们可以写一个计算机程序来自动生成一系列数学结构，从最简单的开始，循序渐进到愈发复杂的个体。图11-4展示了这种序列中的10个条目，采用了我2007年所发表的数学宇宙论文中的编码方案。编码的细节并不重要，但有一点需要注意：它有一个美好的特点，每个元素数量有限的数学结构都会出现在这个序列里的某个地方。所以，每个有限数学结构都能用一个数字来表示，也就是它在这个总览表中的行编号。



扫码获取作者的论文，查看编码方案。

对有限的数学结构来说，所有关系都能用有限的数表来描述，这种方法是从乘法表中归纳出来并推至其他关系的。如果一个结构的元素数量十分庞大，数表就会变得长篇累牍，从而产生极大的编码，序列往下拉不到底。然而，在这些大结构中，有少量体现出了优雅的简单性，使它们极易被描述。比如，一个数学结构的元素是整数：0、1、2、3……它们的关系是加法和乘法。如果为了详述它们的乘法关系而写下所有相乘的数对，这将形成一个庞大的乘法表。即使只写前100万个数字，也要画出一个100万行×100万列的巨大表格，包含着1万亿个条目。这将是一种巨大的浪费。所以，我们在教小学生乘法时，只需要把乘法表的前10个数字教给他们，然后教他们使用简单的运算法则来计算多位数乘法就可以了。比起小学生，我们教计算机算乘法的方法更有效——将数字转化为二进制，这样，我们只需要为0和1准备一张2×2见方的乘法表，再加上一个短短的程序，计算机就学会了如何计算任意大的数字。

一个计算机程序是以一个由0和1组成的有限串（位串，bit string）存储起来的，也可解释为一个二进制的整数。这让我们可以用另一种方法来编码和列举图11-4中的数学结构，即对某一个数学结构，找出所有能描述它全部元素关系的计算机程序，并挑选出位串最短的那个，用其对应的二进制整数来代表这个数学结构。只要这种描述够简单，它就会出现在更靠近序列顶端的地方，即使它的元素很多，体积

很庞大。复杂性理论（complexity theory）的先驱雷·索洛莫洛夫（Ray Solomonoff）、安德雷·科尔莫哥洛夫（Andrey Kolmogorov）和格里高利·蔡廷（Gregory Chaitin）将位串的算法复杂性（algorithmic complexity，或简称为复杂性）定义为：最短的完备描述的位长，例如输出那个位串的计算机程序。这意味着，用这种方法调整过的总览表是以数学结构的复杂性按照升序排列的。

这种总览表的精妙之处在于，它也能处理那些拥有无限多元素的数学结构。比如，为了定义一个包含所有整数及其加法和乘法的数学结构，我们只需指定一个最短的程序，让它能读入任意大数，并运行加法和乘法就行——Mathematica软件和其他计算机代数软件包中都有这样的算法。涉及连续统上无限多个点的数学结构（如时空、电磁场和波函数），也能在计算机上用有限的数学结构来近似计算。实际上，我和我的同行们在实践中进行理论物理学计算时，就是这么做的。

总而言之，要系统地描绘第四层多重宇宙的图景，可以用计算机列举数学结构，并研究它们的性质。假如有一天，我们真能确定我们宇宙的数学结构，就能用它在总览表中的序号来指代它。此时，我们将能第一次确定自己在整个物理实在中的“地址”，正如图11-5中那个异想天开的信封一样。地球上各个国家都有各自的方式来指定地址，比如，有的邮编全是数字，有的邮编包含字母，有的甚至根本不用邮编。同样，在多重宇宙中，你书写地址的方式也会随着数学结构的不同而发生变化：大多数平行宇宙既没有量子力学也没有暴胀，因此缺乏第一、第二和第三层平行宇宙，更没有行星；而其他宇宙，有可能包含着其他类型的平行宇宙，呈现出我们做梦都想象不到的样子。

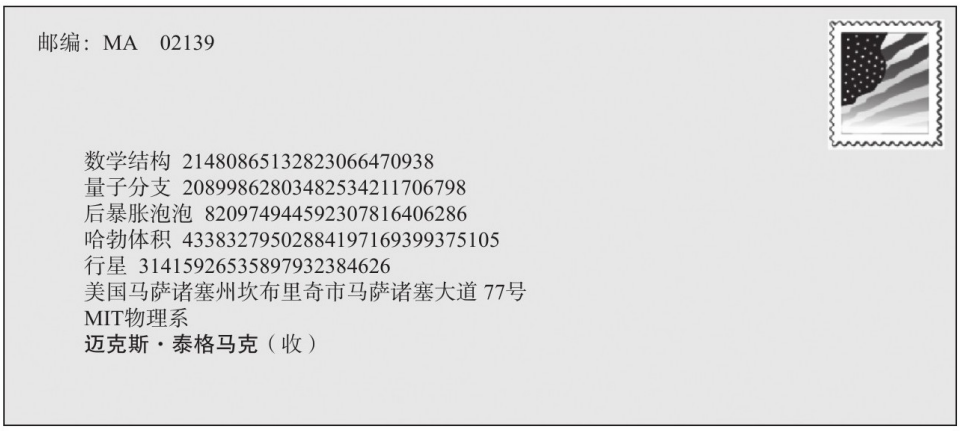


图11-5　为了确定我在整个物理现实中的准确地址，我需要列出我在第四层多重宇宙中的位置（即我的数学结构序号），我在第三层多重宇宙中的位置（即我在量子波函数中的分支），我在第二层多重宇宙中的位置（即我在暴胀后的哪一个泡泡中），我在第一层多重宇宙中的位置（即我的视界范围），以及我在这个宇宙中的位置。在这个例子中，我只列出了有限的数字。但每层多重宇宙中都可能存在着无限多个成员，这使得我的地址超级长，长到这个信封根本写不下。

第四层多重宇宙的结构秘密

研究第四层多重宇宙是一件有趣的事。如果我们用通俗的形式主义把数学定义为“对数学结构的研究”，那么对第四层多重宇宙的研究就应该是数学家的营生。像我这种相信数学宇宙假说的物理学家，研究它就相当于探索终极的物理实在，并寻觅我们在其中所处的位置。此外，从便利的角度来说，比起另外三个层级较低的多重宇宙，探索第四层多重宇宙更容易一些，甚至比探索我们自己的宇宙还简单，因为它不需要火箭和望远镜，仅仅需要计算机和思想就足够了！因此，我花了很多年的时间醉心于编写计算机程序，来演算这种数学结构的表格，以及我们刚刚讨论过的那些分类，并深深地乐在其中。

在实际操作时，你会遭遇到巨量的冗余。许多不同的编程方法都能实现同一个计算，同样地，也有相当多等价的方法，能用数表来描述有限的数学结构，比如，各自对应着不同的元素排序和标记方法。数学结构和描述是等价的（见第9章），因此，每一个数学结构在总览表中都只会出现一次，并且是用它最短的那个等价描述来指代的。

将任意两个数学结构的所有元素和关系组合起来，就可以得到一个全新的结构。总览表中的许多结构都是这种复合形式。在研究第四层多重宇宙的时候，理应忽略它们的存在。这是因为两部分之间并没有新的连接，这意味着，其中一部分中的自知观察者永远也不会意识到另一部分的存在，也不会受其影响，所以他完全可以表现得好像另一部分根本不存在一样，或者说，另一部分并不存在于他这部分数学结构中。唯一需要留心复合结构的情况是，如果它们都进入了测度问题的解中，改变了你被分配到不同数学结构中的概率。由于复合结构描述起来更加复杂，它们通常都位于总览表中很靠下的位置，比组成它们的部分都靠下，所以它们拥有更低的“测度”。实际上，对第四层多重宇宙中任意一个序号为有限数的结构来说，在总览表中极其靠下的位置，都存在一个完全由它自身组成的复合结构。

尽管在第四层多重宇宙中，不同的数学结构之间并不以任何物理的方式连接在一起，但在元层面，它们之间依然有很多有趣的关系。比如，我们刚说到，某些数学结构可以是另外一些数学结构的组成部分。还有一个例子是，一个结构可以在某种意义上描述另外的结构——第一个结构中的元素可以对应着第二个结构中的关系，并且第一个结构中的关系可以描述当你把第二个结构中的关系组合起来时会发生什么事。从某种意义上说，图11-4中拥有24个关系的“立方体旋转”能被一个数学家称为“立方体旋转群”的数学结构描述，后者拥有24个元素，每个元素分别对应着让一个完美立方体看起来不变的24种可能的旋转方法。许多不同的数学结构都拥有这种立方体对称性，

所以有人认为它们就是“立方体”。比如，有些结构的元素对应着立方体的面、角和边，还有一些结构的关系表征了旋转如何重新排列元素，或者哪些元素彼此相邻。

局限：不可判定、不可计算和不可定义

第四层多重宇宙有多大？首先我会告诉你，一共有无数多个无限的数学结构。我们刚说到，它们都可以被放入一个拥有数字序号的表格中，所以“无数多”的意思准确而言就是1、2、3……往下数不到头。那么，第四层多重宇宙到底包含着多少个数学结构，每一个数学结构又包含多少元素？我们看到，一些无限的结构也可以和有限的结构一起被定义和包含在总览表中，只需要用计算机程序来确定它们之间的关系就可以。然而，拥抱无穷大就仿佛打开了潘多拉的魔盒，从中飞出了无数的存在论问题。要明白这个，来考虑一个数学结构，它的元素是数字1、2、3……包含着下面列出的3种关系（函数），规则是：给定一个输入数字，根据下面列出的定义计算出一个新的数字。

- *P*（*n*）：给定一个数字*n*，*P*（*n*）表示大于*n*的最小质数。
- *T*（*n*）：给定一个数字*n*，*T*（*n*）表示大于n的最小的孪生质数（孪生质数是指一种质数，存在着一个与它只相差2的质数；11和13就是两个孪生质数的例子）。
- *H*（*m*，*n*）：给定两个数字*m*和*n*，在包含着所有计算机程序的总览表中，如果输入*n*个比特时，第m个程序能够永远运行下去，那么H（*m*，*n*）就等于0；但如果程序会在有限步数后停止，则*H*（*m*，*n*）等于1。

这个数学结构满足第四层多重宇宙的成员标准吗，或者说，它的定义是否还不够良好？第一个函数*P*（*n*）只是小菜一碟：我们很容易写出一个程序，一开始检查n后面的数字是不是质数，如果找到质数就自动停止。并且我们可以肯定地说，这个程序一定会在有限步骤后停下来，因为我们知道有无数多个质数——欧几里得在两千多年前就已

经证明了这一点。所以*P（n）*就是一个被我们称为“可计算函数”（computable function）的例子。

第二个函数*T（n）*很是狡猾：我们也可以轻松写出一个程序，来检查一下*n*后面的每个数字是不是一个孪生质数，但是，如果你输入的数字*n*大于375 680 169 568 52 ^{666669}-1（这是我写到此处为止，人类发现的最大质数[65]），没有人敢保证程序终将停下，并给出一个确定的答案。因为即使我们最天才的数学家付出了最大的努力，我们依然不知道是否有无数多个孪生质数。所以，迄今为止，我们并不知道*T（n）*是不是一个可计算函数，也不知道它是不是被严格定义的。这种拥有模糊关系的数学结构是否能被称为定义良好的数学结构呢？目前尚存争议。

第三个函数*H（m, n）*更像是个“不法分子”。计算机科学先驱阿隆佐·邱奇（Alonzo Church）和艾伦·图灵（Alan Turing）认为，没有一个程序能在有限步骤内对任意的输入数字*m*和*n*计算出*H（m, n）*，所以*H（m, n）*是一个所谓的“不可计算函数”（uncomputable function）的例子。换句话说，不存在一个程序能确定其他程序最终将终止。当然，任何一个程序都只有两种结局，要么停止，要么不停止，但是就像孪生质数的例子一样，你可能永远也不知道答案。邱奇和图灵对不可计算函数的发现与逻辑学家库尔特·哥德尔（Kurt G del）的另一个发现非常接近，即某些算术定理是不可判定的，意味着在有限步骤内无法证明它们是真是假。

如果一个数学结构包含着像函数H这种连超强计算机也无法估量的关系，它还能被看作定义良好的吗？如果是这样，它的结构只能被某些圣人般的实体所认识，因为只有圣人才具备无限的能力，能进行无穷多步的计算以得到答案。这样的结构永远不会出现在我们前面曾讨

论过的总览表中，因为总览表只涵盖了那些可用普通计算机程序定义的数学结构，而不包含那些需要无限神力才能定义的结构。

最后，让我们来看看本时代最流行的数学结构之一，也就是所谓的实数，比如3.141 592……，它的小数位无穷无尽。它们组成了一个连续统。哪怕你只想详细写出其中一个数，也需要列出小数点后的无穷多个数字，那可是无穷多的信息。这意味着，传统的计算机程序要处理它们简直毫无希望。问题不仅在于要像函数H一样，用一个有限的输入进行无限步运算，还在于要输入和输出无穷多的信息。

另外，哥德尔的研究还让我们担心数学宇宙假说由于涉及无限的数学结构而陷入毫无意义之境，因为我们的宇宙从某种意义上说是自相矛盾或定义不良的。如果你赞同数学家大卫·希尔伯特（David Hilbert）的名言“数学存在是摆脱了矛盾的自由”（mathematical existence is merely freedom from contradiction），那么，根据他的说法，不一致的结构根本不会存在于数学中，更不用说像数学宇宙假说所认为的那样，存在于物理世界中了。物理学标准模型涵盖了常见的数学结构，比如整数和实数。但是，哥德尔的研究开启了一个可能性，即日常使用的数学可能是不一致的，并且，数论本身中存在一个长度有限的使得0=1的证明。用这个惊人的结论，只要某个关于整数的论断在语法上是正确的，那它就能被证明为真，那么，我们所知的数学就会像纸牌屋一般坍塌。

那么，数学宇宙假说是否被哥德尔不完备定理排除在外了呢？不，据我们目前所知，并没有！哥德尔告诉人们，不管一个形式系统多么强大，我们都无法用它本身来证明它的一致性，但这并不意味着它就是不一致的，也不意味着我们遇到了大麻烦。实际上，尽管我们的宇宙显露出了数学结构的线索，但并没有表现出任何不一致或定义不良的迹象。此外，我们期望看到什么呢？即使一个形式系统可以证

明它本身的一致性，我们也无法确信它真的是一致的，因为一个不一致的系统可以证明任何事，包括它自身的一致性。相比之下，我们可能更容易相信，具备一致性的简单系统可以用来证明更复杂的系统的一致性。然而，不出所料，这是不可能的，哥德尔也证明了这一点。我和许多数学家都是好友，但我从未听过有人说现代物理学中主要的数学结构（如伪黎曼流形、卡拉比-丘流形、希尔伯特空间等）其实是不一致的。

所有这些与不可判定性和不一致性有关的不确定性只能运用于元素数量无限多的数学结构。上一章中我们看到，困扰现代宇宙学的测度问题也只能运用于元素数量无限多的数学结构，这引出了一个恼人的问题：无穷大，不可判定性、潜在的不一致性和测度问题真的存在于终极物理实在的本质之中吗，抑或只是海市蜃楼、我们玩火的造物，或是一件用起来很方便的强大数学武器（比那些真正描述我们宇宙的东西更方便）？更具体地说，数学结构究竟要定义到什么程度，才能被称为真实，也就是成为第四层多重宇宙的成员？下面列出了一些有趣的可选范围：

- 没有结构（即，数学宇宙假说是错误的）。
- 有限的结构。这些结构很平凡，拥有可计算性，因为它们所有的关系都能通过查阅有限数表的方式定义出来。
- 可计算的结构（它们关系的定义来源于计算的终止）。
- 一种结构，它的关系由无法保证是否会终止的计算来定义（也许需要无数多步的计算过程），比如前面所说的函数H。
- 更加一般的结构，比如涉及连续统的结构，其中的典型元素都需要无限量的信息来描述。

可计算宇宙假说

其中一个有趣的可能性是可计算宇宙假说。也就是说，它的范围以上述第三个选项为限，更一般的结构不满足要求。

可计算宇宙假说
我们的外部物理实在是一个数学结构，该结构是由可计算函数来定义的。

定义数学结构的关系（函数）可以用有限步骤后必定终止的计算来执行。如果可计算宇宙假说是错误的，那么，还有一个更加保守的假说，也就是以第二个选项为限的有限宇宙假说（Finite Universe Hypothesis, FUH），即我们的外部物理实在是一个有限的数学结构。

我发现了一件很有趣的事情：正如我们上一章结尾所讨论过的那样，数学家们对密切相关的问题进行了激烈的争论，但这些争论中却丝毫没有提到物理学。数学家中的有限论学派包括利奥波德·克罗内克、霍尔曼·外尔（Hermann Weyl）、鲁宾·古德斯坦（Reuben Goodstein），他们认为一个数学对象必须能用整数在有限的步数内构建出来，才算存在，否则就不算存在。这种观点，其实就是前面提到的第三个选项。

根据可计算宇宙假说，我们的物理实在是一个数学结构，这个数学结构拥有可计算的抽象性质，所以它的关系都是可计算的，从这个意义上说，它的定义就是良好的。这样，我们的宇宙中没有任何一个物理性质是不可计算/不可判定的，这就打消了由邱奇、图灵和哥德尔的研究所带来的顾虑，因为他们的研究认为我们的世界不完整或不一致。我并不知道我们的物理实在究竟拥有哪些性质，但我相信这些性质是存在的，因为它们的定义是良好的——我毫不怀疑大自然是否知道它自己在做什么！

许多作家都很困惑，为何我们的物理定律看起来如此简单？比如，为什么粒子物理学标准模型拥有如此简单的对称性，我们称之为$SU(3)\times SU(2)\times U(1)$，只需要第9章中提到的区区32个参数就可

以了，而大多数替补方案却复杂得多？不难推测，或许正是因为可计算宇宙假说限制了大自然的复杂性，才造就了这种相对的简单性。通过抛却连续统，可计算宇宙假说也许还能帮助我们精简暴胀的宇宙图景，并解决上一章讨论过的宇宙学测度问题——测度问题很大程度上与连续统所造成的指数型拉伸有关，这种拉伸会永远进行下去，并创造出无穷无尽的观察者。

这些都是好消息。尽管可计算宇宙假说拥有很多诱人的特征，比如，保证了我们的宇宙是严格定义的，或许还能通过限制事物的存在而缓解宇宙学测度问题，但它也将一些亟待解决的严峻挑战摆在了我们的面前。

关于可计算宇宙假说的第一个顾虑就是，它听起来很像是对哲学高地的妥协，实际上是作出了让步：它承认，尽管所有可能的数学结构都“存在于某处”，但其中一些拥有特殊的地位。然而，我猜可计算宇宙假说如果真是正确的，那它的正确表述应该是：由于数学图景中的其他区域都只是幻觉，那么从根本上说，它们的定义不良，所以根本不存在。

还有一个更直接的挑战是，我们目前的标准模型（实际上包括了历史上所有成功的理论）都违反了可计算宇宙假说，并且，我们根本不知道是否存在一个有效的、可计算的替代方案。对可计算宇宙假说的违反主要来源于对连续统的体现。连续统大多是以实数或复数的形式，而实数或复数根本无法将输入限制在有限的计算之内，因为它们都需要无数多的比特来确定。甚至某些将时空离散化或量子化、以试图抛弃经典时空连续介质的方法，都倾向于在理论的其他方面保留连续介质变量，例如电磁场强度或量子波函数的振幅。

面对连续统的挑战，有一种有趣的方法：用一个对连续统进行可计算仿真的数学结构来代替实数，例如数学家们所谓的“代数数”（a

lgebraic numbers）。还有一种我认为很值得探索的方法，那就是从根本上放弃连续统，并尝试用近似值来还原。之前我曾提到过，物理学上，我们对物体的测量从来不会超过16位有效数字，也从未有一个实验的结果是取决于“连续介质真实存在”这一假说，或者说取决于大自然对那些不可计算之物的计算。令人惊讶的是，经典数学物理中的许多连续介质模型（例如描述波、漫射和液体流动的方程）其实都只是对一堆离散原子的近似计算。量子引力研究甚至暗示着，即使是经典的连续时空也会在非常小的尺度上分崩离析。

因此，我们不能确定，那些我们仍以连续统来对待的量（如时空、场强和量子波函数振幅）是否只是对离散的近似计算。实际上，某些离散的可计算结构（实际上正是满足有限宇宙假说的有限结构）对连续介质物理模型的近似实在是太棒了，每次我们物理学家需要进行实际运算时，都会使用它们，这就留下了一个问题：我们宇宙的数学结构究竟是更像前者，还是更像后者呢？一些作者走得更远，如康拉德·楚泽（Konrad Zuse）、约翰·巴罗、尤尔根·施密特胡贝尔（Jürgen Schmidhuber）和斯蒂芬·沃尔夫拉姆（Stephen Wolfram），他们认为，大自然的定律不仅是可计算的，也是有限的，就像元胞自动机或计算机模拟。（然而请注意，这些理论与可计算宇宙假说和有限宇宙假说不同，因为它们认为一个结构要可计算，只需要时间演化[time evolution]，而不需要对关系的描述。）

更有甚者，物理学中还有一些例子，让某些连续介质（如量子场）能产生出离散的解（就像一个晶格），于是在大尺度上看起来很像一种连续的介质，并像所谓的声子（一种离散粒子）那样振动。我在MIT的同事文小刚证明，这种“自然发生”的粒子的行为甚至可能与标准模型中的某些粒子很相似，带来了另一种可能性，或许，在一个终极的、连续的可计算结构之上，有着多层有效连续介质和离散描述。

第四层多重宇宙的超越结构

前面我们探索了数学结构和计算之间的密切关系：后者定义了前者。从另一个角度说，计算只是数学结构的特殊情况。例如，数字计算机的信息量（内存状态）是一个位串，比如“100 101 110 011 1001……”，虽然很长，但长度依然是有限的，与某个虽大却有限的整数n的二进制形式是等价的。计算机信息处理是一个确定的规则，它将每个内存状态转变成另一个（一次又一次，周而复始），从数学上说，它只是一个将整数映射到自身的函数f，不停地迭代：$n \rightarrow f(n) \rightarrow f(f(n)) \rightarrow \cdots\cdots$也就是说，即使是最精妙的计算机模拟也只是一个数学结构的特殊情况，因而包含在第四层多重宇宙中。

从图11-6中可以看出，计算不仅和数学结构相互关联，二者还分别与形式系统（formal systems）相关联。数学家们在证明有关数学结构的定理时使用的公理和推理规则所组成的抽象符号系统，就叫作形式系统。图11-1中的方框就相当于这种形式系统。如果一个形式系统描述了一个数学结构，那么数学家们就说，后者是前者的一个模型（model）。此外，计算还能在形式系统中产生出定理（实际上，对某些种类的形式系统来说，存在一些可以计算所有定理的算法）。

从图11-6中还可以看出，三角形的每个顶点都存在一些潜在的问题——数学结构可能包含不可定义的关系，形式系统可能包含不可判定的陈述，计算可能不会在有限步骤后终止。三者之间的复杂关系用图中6个箭头来表示。这些箭头涉及的学科范围很广泛，从数理逻辑到计算机科学，应有尽有，并且每个领域都有不同的专家进行过大量的研究。因此，整个三角形是跨学科的，我认为它值得更多的关注。

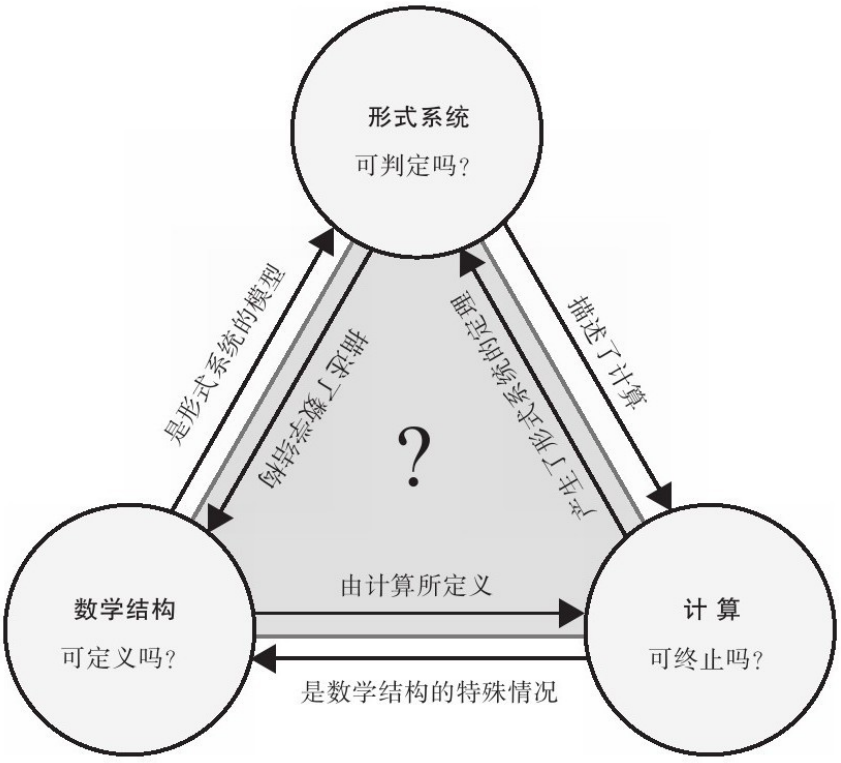


图11-6　箭头指示出了数学结构、形式系统和计算之间的密切关系。中间的问号表示，这三者都是某种超越结构的一个方面，但这个结构的性质尚不为人所理解。

我在三角形的中间画了一个问号，意思是说三角形的三个顶点（数学结构、形式系统和计算）都是某个基本超越结构的不同方面，而我们依然不理解这个结构的性质。这个结构（或许，依据可计算宇宙假说被限定在可定义的/可判定的/可终止的部分）以某种不含任何“包袱”的形式“存在于某处”，并且，在数学上和物理上都同时存在。

第四层多重宇宙的启示

本章到目前为止，我们已经论证了终极的物理实在就是第四层多重宇宙，并且已开始探索它的数学性质。现在，让我们来探索一下它的物理性质，以及第四层多重宇宙所带来的其他暗示。

数学结构都拥有对称性

如果我们将注意力转向总览表中某些特定的数学结构上（总览表可被看作第四层多重宇宙的地图集），那么，我们如何才能得知，其中自知的子结构将会如何感知该数学结构的物理性质呢？也就是说，一个无限聪慧的数学家要如何从它的数学定义开始，推演出第8章中提到的“共识实在”的物理描述呢[66]？

我们在第9章论证过，这位数学家的第一步将会是计算这个数学结构拥有什么对称性。对称性，是几乎所有数学结构都拥有的少量性质之一，并且，它们将以对称的物理实体呈现在该结构的内部居民面前。

那么接下来的第二步，他要计算些什么呢？摆在他面前的是一个从未有人探索过的纷繁结构，但我惊奇地发现，在我们所栖身的这个数学结构中，人们对于对称性的进一步研究仿佛打开了一个金矿，里面装满了闪闪发光的洞悉与智慧。1915年，德国女数学家埃米·诺特（Emmy Noether）证明，我们数学结构中的每一个连续的对称性都通往一个物理守恒定律，某些量会因此而永远守恒。自知的观察者注意到这种永恒性，并赋予它们一种“包袱”，也就是名字。我们在第6章讨论过的所有守恒量都对应着这样的对称性。比如，能量对应着时间平移对称性（即随着时间的推移，关于能量的物理定律保持不变），动量对应着空间平移对称性（即不管在空间中的哪一点，关于动量的物理定律保持不变），角动量对应着旋转对称性（即空荡的空间中不存在一个特殊的“上”方向），电荷对应着量子力学中一种特殊的对称。物理学家尤金·维格纳进一步发现，这些对称性还描述了粒子所拥有的所有量子性质，包括质量和自旋。也就是说，在二者之间，诺特和维格纳发现，至少在我们自己的这个数学结构中，对称性的研究揭示了哪些“东西”可以存在于其中。我的一些同行十分爱好数学术

语，他们打趣地说，粒子只是“不可约对称群中的元素”。人们越来越清楚地认识到，几乎所有的物理定律都来自对称性。诺贝尔物理学奖获得者菲利普·安德森（Philip W.Anderson）甚至说：“说物理学家研究的是对称性，一点也不夸张。”

为什么对称性在物理学领域扮演着如此重要的角色？数学宇宙假说提供了一个答案：我们的物理实在之所以拥有对称性，是因为它是一个数学结构——数学结构都拥有对称性。于是，“为什么我们栖身的这个数学结构拥有如此多的对称性”这个深刻的问题，就变成了“为什么我们会栖身于这个特别的结构中，而不是其他拥有更少对称性的结构中”。一部分原因是因为，在数学结构中，对称性似乎占统治地位，而不是例外的地位，特别是在总览表中位置不太靠下的大结构中，其中，简单的算法可以精确地决定巨量的元素关系，因为它们都拥有相同的性质。

还有一个充满“人择原理”味道的原因可能也适用。正如维格纳指出的那样，要出现有能力找出周遭世界运行规律的观察者，或许正需要对称性，所以，由于我们就是这样的观察者，那么我们就应该预计自己栖身于一个高度对称的数学结构中。比如，试着想象一下，假如存在另一个世界，在其中，所有的实验结果都无法复现，因为实验结果依赖于实验的时间和地点。当你扔出一块石头，它有时掉下去，有时升上天，有时还会水平飞出去，并且，周遭的万事万物似乎都以随机的方式运行着，无法找出任何可辨别的模式或规律，那么，进化出大脑也就没有什么意义了。

在现代物理学呈现的方式中，对称通常是作为一个输入，而非输出。比如，爱因斯坦在所谓的洛伦兹对称性上创立了狭义相对论——洛伦兹对称性是一个假定，假设你无法判断自己是否为静止状态，因为所有物理定律对所有匀速运动的观察者来说都完全相同，包括光

速。与之类似，粒子物理学标准模型的前提假设是一个被称为$SU(3)\times SU(2)\times U(1)$的对称性。但是，在数学宇宙假说中，这个逻辑是反着的——对称并不是前提假设，只是数学结构的性质，而这个数学结构是可以根据其在总览表中的定义计算出来的。

初始条件的幻觉

与我们在MIT所教的物理学不同，第四层多重宇宙始于一个迥然不同的地方，导致大部分传统物理学概念都需要重新解释。正如我们刚看到的那样，一些概念（诸如对称性）保留了它们的中心位置。与之相比，其他概念（如初始条件、复杂性和随机性等）都被重新解释为仅仅只是幻觉而已，只存在于旁观者的头脑中，却不存在于外部物理实在中。

让我们先来看看“初始条件”吧，没有人比尤金·维格纳更能抓住初始条件的传统概念的精髓了。

> 我们对物理世界的知识可以分为两类：初始条件和自然规律。世界的状态是由初始条件描述的。在它们之中，发现了复杂但不精确的规律。从某个意义上说，物理学家对初始条件不感兴趣，而把它交付于天文学家、地理学家、地质学家等人的手里。

也就是说，物理学家通常会把我们能理解的规则称为“规律”，却忽视我们不能理解的部分，并把它们称为“初始条件”。规律让我们能够预测事物的状态如何随着时间而变化，但是却无法告诉我们，为什么它们一开始是那样。

与之相比，数学宇宙假说没有为任性的初始条件留下任何余地，而是把它们从基本概念里清除出去了。这是因为，我们的物理实在是一个数学结构，而这个数学结构无论从哪方面看，都能被它在总览表

中的数学定义所完全规定。如果一个传说中的万物理论认为，万事万物都“始于”或“创生于”某种不能完全规定的状态，那么这个理论就形成了一个不完备的描述，因此就与数学宇宙假说相违背。数学结构不能只有其中一部分是确定的。所以，传统物理学拥抱初始条件，而数学宇宙假说拒绝接受它们：我们要如何理解这件事呢？

随机性的幻觉

由于数学宇宙假说要求万事万物都是被定义好的，所以它抛弃了另一个在物理学中占据中心地位的概念——随机性。不管观察者眼中的世界有多么随机，它最终都只是一个幻觉，并不存在于任何基本的层面上，因为数学结构一点也不随机。但是，我办公室书架上摆着的物理学教材中却充斥着这样的语句：量子力学会产生随机的结果，一杯咖啡的热量是由分子的随机运动所产生的。传统物理学拥抱的概念，却再一次遭到了数学宇宙假说的无情拒绝：我们要如何理解这件事呢？

初始条件谜题和随机性谜题是相互关联的，从中生出了一个令人印象深刻的问题。根据粗略估计，要确定我们的宇宙中当下所有粒子的实际状态，大约需要1古戈尔（10^{100}）个比特的信息。这信息源自何处？传统的答案涉及随机性和初始条件的组合。首先，我们需要许多比特来描述宇宙开始时的样子，因为传统的物理定律并没有详细说明那是什么样子；接下来，我们还需要一些比特来描述此时与彼时之间发生的多种随机过程的结果。然而现在，数学宇宙假说要求确定万事万物，却又要抛弃初始条件和随机性，这些信息要从何而来呢？如果数学结构足够简单，简单到都能印在T恤上，它就不可能包含那么多信息！现在，就让我们来解决这个问题吧。

复杂性的幻觉

我们的宇宙中究竟包含着多少信息？正如我们已经讨论过的那样，某物的信息含量（算法复杂性）等于它最短的完备描述的位长。为了欣赏其中的微妙之处，让我们先来看看图11-7中的6个模式分别包含有多少信息。第一眼看过去，最左边的两个看起来很相似，都是由128×128=16 384个微小的黑白像素点随机排列而成。这意味着，我们大约需要16 384个比特来描述这两张图中的某一张，每个比特用来确定每个像素点的颜色。这对上排的模式来说，似乎是真的。这一排的模式，我是用一个量子随机数生成器生成的。但是下排的模式中却隐藏着一种简单性：它只是的二进制形式！这个简单的描述已经足够计算出整个模式——$\sqrt{2}$≈1.44 213 562……，用二进制的方法来写就是1.010 000 101 000 011 0……为了进行论证，让我们假设这个0和1组成的模式是由一个100位长的计算机程序生成的。那么，左下图的模式的表观复杂度就成了一个幻觉——它的信息含量并不是16 387位，而只有100位！

讨论这些模式中的某一部分的信息含量是十分迷人的事情。图11-7的上排图片中，一切都符合我们的预期：较小的模式更加简单，需要更少的信息来描述。我们甚至能用一个简单的比特来描述每个黑白像素。但是，在下排图片中，我们却看到了截然相反的事情！在这里，少即是多：中图的模式比左图更复杂，甚至需要比左图更多的比特数才能描述清楚。这是因为，如果只说它是的一部分是不够的，还需要讲清楚它开始于哪一位数，在这个例子中，需要额外14个比特的信息。总结而言，我们已经看到，总体所包含的信息含量有可能少于部分所包含的信息之和，有时甚至会少于其中某些部分所包含的信息含量。

最后，图11-7中最右端的两幅图片需要9个比特来描述。我们都知道，右下角的图形就隐藏在的16 384位数中，但是对一个如此之小的部分来说，该信息不再有趣或有用。在这个位长为9的模式中，只有2^9=512种可能的模式，所以你会发现，这个特定的模式就藏在看起来由数千个0和1组成的随机位串中。

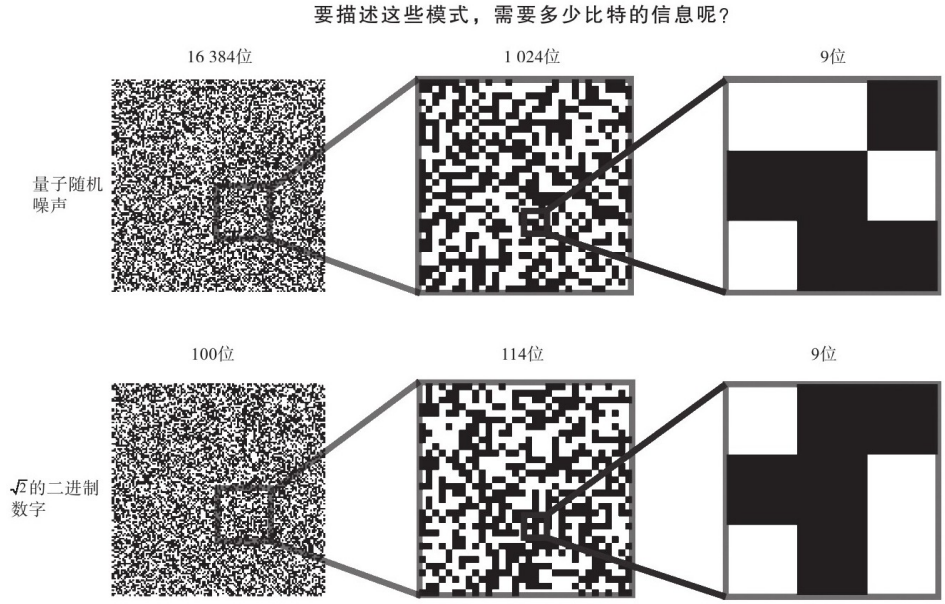


图11-7　一个模式的复杂性（即需要多少比特信息才能描述它）并不总是很明显的。左上角的图片中包含128×128=16 384个小方块，它们被随机地涂成黑色或白色，这显然不可能用少于16 384比特的信息来描述。该模式中的一小块（上排中图和上排右图）包含着较少的随机方块，因此要描述它们所需要的比特数更少。然而，左下角的模式却可以从一个短短（例如，只有100位）的程序中生成，因为它只是的二进制数字（0=黑色方块，1=白色方块）。要描述下排中部的图片，还需要再加上14个比特，以便确定它始于中的哪一位数。最后，右下角的模式需要9个比特来描述，和它上方的图片一样。这个模式太短了，以至于把它看作的一部分也没什么用。

图11-8展示了优美的数学结构——曼德布洛特分形，进一步表达了这种想法。它有一个非凡绝妙的性质：在任意小的尺度上，都拥有

错综复杂的模式。并且，尽管许多模式看起来很相似，但其实并没有两个是完全相同的。这两张图片究竟有多复杂？它们每张都包含有100万个像素，每个像素可用3个字节的信息来表达（1个字节等于8个比特）。这意味着，每张图片都需要几兆字节的信息来描述。然而，图11-8的左图却可以从一个仅有几百字节长的程序中计算出来，只需对图注中所描述的简单计算z^2+c进行重复即可。

图11-8的右图只是左图中极其微小的一部分，所以它也很简单。但是它却比左图略微复杂一点，需要额外8个字节才能确定。这8个字节代表一个20位数，表示它是10^{20}个不同部分之一。所以，我们再一次遇到了“少即是多”的情况，因为当我们将注意力限制在整体的一小部分中时，就失去了纵观整体时的内在对称性和简单性，增加了表面的信息含量。举个更简单的例子，一个典型的万亿位数的算法信息含量是牢固的、不增不减的，因为描述它的最短程序只能用来存储它那多达万亿位的数字。然而，所有数字1、2、3……组成的数列却可以由一个微不足道的计算机程序生成，所以，整个集合的复杂性要低于前面所说的那个典型的万亿位数。

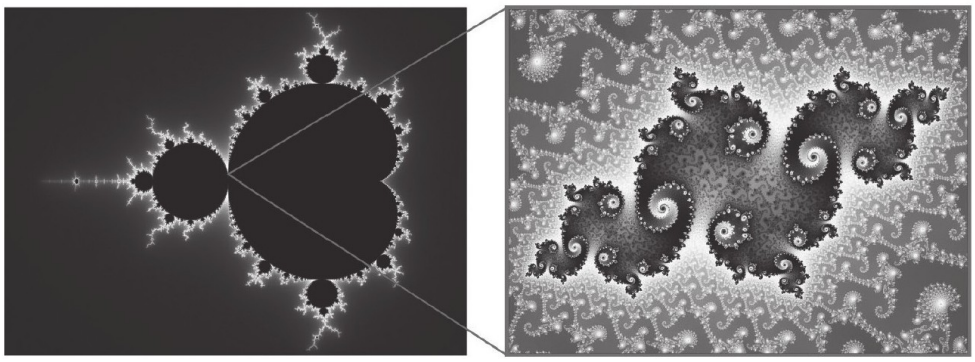


图11-8　尽管曼德布洛特分形（左图）看似拥有数以百万计的精致彩色像素，但其实它的描述非常简单：图中的点对应着数学家们所谓的复数c，而色彩的信息中则编码了复数z从0开始不停重复“平方并加上c”的过程中（也就是重复运用一个简单公式$z \rightarrow z^2+c$）向无穷大飞速暴涨的速度。矛盾的是，尽管右图只是左图中的一部分，但是要描述右图所需要的信息却比左图多。如果你把

曼德布洛特分形切割成亿亿块，而右图就是其中一块，那么，右图所包含的信息就能够告诉你它在大图中的位置，因为要确定它的位置，最经济的方法就是像这样：“曼德布洛特分形中的第314 159 265 358 979 323 84块”。

现在，让我们回到我们的物理宇宙，以及用来描述它的1古戈尔比特的信息。一些科学家（如斯蒂芬·沃尔夫拉姆和尤尔根·施密特胡贝尔）怀疑，这种复杂性是否也是一个幻觉？曼德布洛特分形和图11-7左下角的模式是否也来自某个极其简单、尚未被发现的数学规则？尽管我认为这个想法很优雅，但我却站到了它的对立面：描述我们宇宙的所有数字，从WMAP探测器宇宙微波背景天图到某片沙滩上每颗沙砾的位置，是否都能通过一个简单的数据压缩算法，从几乎空无一物的虚无中推演而出？我认为这是不太可能发生的事情。实际上，正如我们在第4章所看到的那样，这些信息的终极来源都是宇宙中的涨落种子，而宇宙学暴胀清楚地预言了宇宙涨落种子是以随机的方式分布在宇宙中的，因此，这种巨幅的数据压缩不可能发生。

这些涨落种子解释了为什么我们的早期宇宙不是易于描述的、完美均匀的等离子体。为什么宇宙涨落种子的模式看起来如此随机？我们在第4章曾讨论过，根据宇宙学标准模型，暴胀在空间的不同部分（即第一层多重宇宙中的不同宇宙）产生了所有可能产生的模式，由于我们自己栖身于这个多重宇宙中一个相当典型的区域，因此，我们所看见的模式似乎很随机，没有任何隐藏规则可以帮助我们压缩信息。这个情况与图11-7下排的图片十分类似，在其中，我们的宇宙（相当于右下图）对应着一个描述简单的第一层多重宇宙（相当于左下图）中看似随机的一小部分。

实际上，如果你翻回到第5章，你会发现，只要我们将图11-7的下排图片扩展一下，让左图所包含的二进制$\sqrt{2}$的位数达到1古戈尔普勒克斯，并让右图包含大约1古戈尔个比特的信息（正如我们的宇宙包含

的信息一样多），那么，图5-2与图11-7的下排图片就是等价的。数学家们普遍相信（尽管还未被证明），$\sqrt{2}$中的数字很像随机数，所以，任何可能出现的模式都会在其中某处出现，就像任意初始条件的宇宙都会出现在第一层多重宇宙中的某处一样。这意味着，从1古戈尔位数的$\sqrt{2}$中抽出一段数列，它完全无法告诉我们关于$\sqrt{2}$的任何信息，只能告诉我们它在数列中的位置。同样，对于那些典型的、看似随机的、暴胀生成的宇宙涨落种子来说，观测它所包含的1古戈尔比特信息，只能告诉我们所观测的区域在这个广袤的后暴胀空间中处在什么位置。

重新解释初始条件

刚才，我们谈论了应该如何看待初始条件，并得到了一个激进的答案：初始条件的信息与我们物理实在的本质无关，而只与我们在其中的位置有关。我们广泛观察到的复杂性只是一个幻觉，因为其潜在的实在拥有非常简单的描述，只有在确定我们位于多重宇宙中的位置时才需要将近1古戈尔比特的信息。我们在第5章讨论过，银河系包含着许多恒星系，它们所拥有的行星数量各不相同，所以，“我们的太阳系中包含8颗行星”这个事实，并没有告诉我们任何关于银河系的本质，而仅仅只提供了我们位于星系中的位置信息。第一层多重宇宙中还包含着其他类地行星，从这些行星上所看见的宇宙微波背景辐射模式或星座图景多种多样，能够穷尽所有的可能性，因此，地球上拍到的WMAP探测天图中包含的信息或一张北斗七星的照片，同样也可以告诉我们在多重宇宙中的位置信息。与之类似，第9章中讨论过的32个物理常数包含我们在第二层多重宇宙中的位置信息——假如第二层多重宇宙真的存在的话。尽管许多人认为这些信息与物理实在的本质有关，但其实它们只与我们自己有关。复杂性只是一个幻觉，仅存在于旁观者的眼睛里。

我脑中第一次冒出这些想法，是在1995年的一天，骑自行车前往慕尼黑英国花园的途中。为此，我还发表了一篇标题颇为撩人的论文——《我们的宇宙是否几乎没有包含任何信息？》。现在，我终于意识到，我应该去掉标题里的“几乎”二字！请容许我解释一下原因。第三层多重宇宙让我联想到曼德布洛特分形（见图11-8），而非$\sqrt{2}$的例子（见图11-7），因为它的各部分展现出大量的规律性。我们讨论过，所有可能的模式都以同等的频率出现在$\sqrt{2}$的数位中，然而，许多模式（比如，你朋友的照片）却不会出现在曼德布洛特分形中。曼德布洛特分形中的大部分区域都拥有一种特定的艺术风格（由公式z^2+c来描述）。与之类似，在第三层多重宇宙中，大部分停止暴胀的宇宙在遵循量子力学的时间发展过程中，都拥有着相同的规律。当我说“几乎没有包含任何信息”时，我的意思是说，我们依然需要保留少量的信息来描述这些规律，特别是第三层多重宇宙的数学结构。但是，根据数学宇宙假说，即使是这个信息，也无法告诉我们任何关于终极物理实在的信息，它只能告诉我们在第四层多重宇宙中的位置。

既存在多重的宇宙，也存在多重的你

好的，现在我们已经解决了如何解释初始条件的问题，那么随机性的问题呢？答案同样藏在多重宇宙中。我们在第7章中看到了决定论的量子力学薛定谔方程如何让第三层多重宇宙中的观察者感知到主观上的随机性，这其中的核心是一个与量子力学没什么关系的过程——克隆。具体地说，随机性只是你被克隆时的感觉。如果有两个“你”，分别感知着不同的事物，那么你无法预测自己下一步将感知到什么东西，所以才感知到了随机性。我们在第7章中看到，表观随机性是在某些情况下对观察者的克隆产生的。而现在，我们看到它是在所有情况（而非某些情况）下对观察者的克隆而产生的，因为数学宇宙假说从基本层面上抛弃了另一个符合逻辑的解释——随机性。

也就是说，看似任意的初始条件是由多重宇宙引起的，而表面上的随机性是由于存在多个你而引起的。可以将这两点看成一回事，如果我们考虑某个平行宇宙包含一个与你主观上不可区分的你，那么既存在多重的宇宙，也存在多重的你。那么，当你测量你的宇宙的初始条件时，这个信息不管在哪个你看来都显得很随机，所以不管你认为这个信息来自初始条件还是随机性，都没有关系——信息都是一样的。观测你位于哪个平行宇宙中，就能揭示出到底是哪个你在进行观测。

复杂性为何暗示了多重宇宙的存在

关于我们宇宙的复杂性，我们已经谈得太多了。那么，我们的数学结构又具有怎样的复杂性呢？

数学宇宙假说并没有规定飞鸟视角中数学结构的复杂性是高还是低，所以两种可能性都要考虑。假如复杂性相当高，那我们想要弄明白它的细节，明显是死路一条。尤其是在描述该结构所需的比特数超过了描述我们可观测宇宙所需的比特数时，我们甚至无法在我们的宇宙中存储关于该结构的信息——根本装不下。还有一个复杂性超高的理论例子是用实数（如$1/\alpha = 1/137.035\ 999\cdots\cdots$）来详细规定第9章提过的拥有32个参数的标准模型。这种实数的位数无限多，且缺乏任何可简化的模式。连一个任意的参数都需要无限的信息来存储，更不用说整个数学结构了，那将是一个无限复杂的结构，在实践上根本不可能确定它的细节。

大多数物理学家希望，完备的万物理论是相对简单的，能用少许的比特数来规定它的细节。他们希望，所用的比特数用一件T恤或一本书就能装下——这比描述我们宇宙所需要的大约1古戈尔比特的信息少太多了。不管数学宇宙假说是真是假，这样简单的理论都一定会预言

出多重宇宙的存在。这是为什么呢？因为从定义上来说，这种理论是对实在的完备描述——如果它缺乏能确定我们宇宙的完备信息，那么它就必须要描述恒星和沙砾等事物可能出现的所有组合；而多出来的那些比特只编码了关于我们位于哪个宇宙的信息，也就是我们在多重宇宙中的邮政编码。图11-5中，信封上最底行的长度就会变短，因为它代表这个理论，但其上方的地址则会包含将近1古戈尔个字符。

我们生活在模拟世界中吗

刚才我们已经看到，数学宇宙假说可以改变许多关于我们认知的根本问题。现在，让我们转向另一个类似的话题——模拟现实。这是科幻小说常用的主题，意思是说，我们的外部实在其实是某种计算机模拟程序。许多引起轰动的电影都讨论了这个话题，并获得了极大的关注，比如《黑客帝国》。埃里克·德雷克勒斯（Eric Drexler）、雷·库兹韦尔[67]和汉斯·莫拉韦克等科学家都认为，模拟心智是可能的，并且已为时不远。还有一些科学家（如弗朗克·蒂普勒、尼克·波斯特洛姆和尤尔根·施密特胡贝尔）走得更远。他们说，这样的情况可能已经发生了：我们就是模拟出来的。

为什么有人会认为自己是模拟出来的？许多科幻作家探索过这类情景：在未来，大规模的太空殖民将我们宇宙中的许多物质都转变为了高度发达的计算机，能够模拟出巨量的、主观上与你不可区分的观察者时刻。波斯特洛姆等人论证说，如果这是真的，那么你当下的观察者时刻极有可能就是这样的模拟时刻之一，因为它们的数量无穷无尽、不胜枚举。

然而，我认为这种论证在逻辑上是行不通的。如果这个论证有效，那么，对那些与你无法区分的版本而言，也可能发生同样的事情，意味着可能存在更多的双重模拟，那么你有可能是一个模拟中的

模拟。将该论证继续下去，你会得出结论：你可能只是模拟中的模拟中的模拟……以此类推，无穷无尽——归谬法（reductio ad absurdum）。我认为，在一开始的第一步，论证就已经出现了逻辑错误：假设你是模拟出来的，那么，正如菲利普·赫尔比格所强调的那样，你所栖身的（模拟）宇宙的计算资源是无关紧要的——要紧的是模拟宇宙所处的那个更大的宇宙的计算资源，而这是你一无所知的。

还有一些人论证道，我们的物理实在根本不可能是模拟出来的。量子物理学权威赛斯·劳埃德教授则提出了一种折中的可能性：我们身处一个由量子计算机生成的仿真模拟中，但这个计算机并不是由某个人设计出来的——因为量子场论与空间分布式量子计算机的结构在数学上是等价的。康拉德·楚泽、约翰·巴罗、尤尔根·施密特胡贝尔和斯蒂芬·沃尔夫拉姆等人已经研究过“物理定律相当于一个经典计算”的观点。让我们再在数学宇宙假说的语境中探究一下这些观点。

对时间的误解

让我们先假设，我们的宇宙确实是某种形式的计算。在“模拟宇宙”的著作中有一个普遍的误解，认为一维时间的物理概念必然等同于逐步进行的一维计算流。接下来我将论证，如果数学宇宙假说是正确的，那么，计算并不需要演变成我们的宇宙，只需描述它即可（也就是确定它的所有关系）。

将时间演进与计算步骤等同起来的想法充满了诱惑，这是可以理解的，因为两者都是一维的序列（至少对非量子的例子来说是这样），并且，下一步的状态总是由现在的状态所决定。然而，这种诱惑来自一种已经过时的经典物理学描述。在爱因斯坦的广义相对论中，并不存在一个普遍的、自然的、定义良好的总体时间变量，在量

子引力中更是如此，因为在量子引力中，时间只是某个子系统（时钟）所产生出来的近似性质。

实际上，即便在经典物理学中，将青蛙视角的时间观念与计算机时间联系起来也是毫无根据的。格雷格·伊根（Greg Egan）在科幻小说《置换城市》（*Permutation City*）中强调说，在模拟宇宙中，一个观察者感知到的时间流逝速度应当完全独立于计算机运行模拟程序的速度。此外，正如我们在上一章所讨论的内容以及爱因斯坦所指出的那样，用飞鸟视角的四维时空来看待宇宙，比青蛙视角的三维空间更加自然，尽管这一观点尚有争议。因此，根本不需要计算机来进行任何计算，它只需要存储所有的四维数据，也就是将那个等同于我们宇宙的数学结构的所有性质都编好代码。这样，需要的时候就可以读取其中单个的时间切片。因此，这个“模拟世界”在内部居民的感觉中，应该很像一个只存储和演化了三维数据的世界。总而言之：**进行模拟的计算机所扮演的角色，并不是计算我们宇宙的历史，而是规定它的细节。**

那么，要如何规定呢？数据的存储方式（例如，计算机的型号、数据格式等等）都应该是无关紧要的，所以，模拟宇宙中的居民是否感觉到自己是真实的，应当与数据压缩的方法无关。我们已经发现的物理定律为我们提供了极好的数据压缩方法，因为有了它们，就足以存储某一时刻的初始数据、公式以及一个能根据这些初始数据计算出未来状态的程序。正如本章前文所强调的那样，初始数据可能极其简单：量子场论中流行的初始状态都有着吓人的名字，例如霍金-哈特尔波函数（Hawking-Hartle wavefunction）或邦奇-戴维斯暴胀真空（inflationary Bunch-Davies vacuum），但它们的算法复杂性都很低，因为它们都能用简短的物理学论文来定义。但是，要模拟它们的时间演化，就不仅要模拟一个我们这样的宇宙，还需要模拟出众多退相干

的平行宇宙。因此，我们的宇宙（甚至于整个第三层多重宇宙）都有可能是由一段简短的计算机程序模拟出来的。

另一种计算：无须演变历史，而是确定关系

之前举的例子都提到了我们所栖身的这个特定的数学结构以及它的量子力学性质等。更一般地说，正如我们已经讨论过的那样，从定义上说，一个任意数学结构的完备描述就是要确定它的元素之间的关系。在本章前文我们讨论过，要定义这些关系，所有方程都必须是可计算的，也就是说，必须存在一个能在有限步骤内计算出所有关系的计算机程序。换句话说，如果我们的世界是一个定义良好的数学结构，那么，它不可避免地要和计算联系在一起，但此处所说的计算与模拟假说中的计算并不相同：这些计算并不主导我们宇宙的演化，只是通过评估它内部的关系来描述它[68]。

我们是模拟出来的吗

深入理解了数学结构、形式系统和计算的三者关系（见图11-6中的三角形），就能阐明本书提到过的一些棘手问题。其中一个问题就是第10章困扰过我们的测度问题。这个问题的本质是如何应对恼人的无穷大，以及如何预测观测结果的概率。比如，每个宇宙模拟都对应着一个数学结构，因而它已经存在于第四层多重宇宙中了，那么，假如它同时还运行在一台计算机上，它的存在是否会变得“更多”？如果遇到下列事实，情况还会变得更加复杂——永恒暴胀预言了一个无限的空间，内部拥有无穷多的行星、文明和计算机，其中一些计算机可能正运行着宇宙的模拟；并且，第四层多重宇宙也可能包含着无数个能用计算机模拟来解释的数学结构。

我们的宇宙（包括整个第三层多重宇宙）有可能是由一个简短的计算机程序模拟出来的。这个事实引发了一个问题：这个模拟程序“运行”与否，是否会造成本体论上的差别？如果像我论证过的那样，计算机只需要描述而不需要计算整个历史，那么，完备的描述可能用一根内存条就能装下，而不需要CPU的力量。如果说这根内存条的存在会对它所描述的多重宇宙是否“真的”存在产生什么影响，这是十分荒谬的。如果这根内存条的存在真的很重要，那么，这个多重宇宙中的某些单元内也可能会包含一根一模一样的内存条，“递归”地支持着它自身的物理存在。这与“第22条军规”和“先有蛋还是先有鸡”的问题不同，内存条和多重宇宙究竟哪一个先被创造出来都无关紧要，因为多重宇宙中的单元是四维时空，“创造”这个概念显然只有在时空内部才有意义。

那么，我们究竟是不是模拟程序？根据数学宇宙假说，我们的物理实在是一个数学结构，正因如此，不管有没有人在第四层多重宇宙内写下一段计算机程序来模拟/描述它，它都存在如斯。于是，此时仅剩的问题就是：计算机模拟程序是否会在某些意义上让我们的数学结构的存在变多？如果我们解决了测度问题，或许我们会发现，对它进行模拟会轻微地增加它的测度，将包含模拟的那个数学结构的测度提高一点点比例。我猜，这个影响非常轻微。所以，如果有人问我：“我们是模拟出来的吗？”我会把钱押注在这个答案上：“不是！”

数学宇宙假说、第四层多重宇宙和其他假说之间的关系

在哲学、信息论、计算机科学和物理学的交叉路口，一些研究者对终极实在提出了许多有趣的见解。我推荐布赖恩·格林的《隐藏的现实》一书和拉塞尔·斯坦迪什（Russell Standish）的《万无理论》（*Theory of Nothing*）一书。

在哲学领域内，与第四层多重宇宙理论最接近的理论是已故哲学家大卫·里维斯（David Lewis）所提出的模态实在论（modal realism）。他提出，“所有可能的世界都与实际的世界一样真实”。他已故的同行罗伯特·诺齐克（Robert Nozick）提出了一个类似的理论叫作“繁殖力原则”（the principle of fecundity）。对模态实在论，一个常见的批评断言道，由于它提出“所有可想象的宇宙都存在”，所以它根本不能作出任何可检验的预测。如果将里维斯的“所有可能的世界”替换成“所有数学结构”，那么第四层多重宇宙就可以被看作一个范围更小、定义更加严格的实在。第四层多重宇宙并没有暗示所有可想象的宇宙都存在。我们人类可以想象出许多数学上不可定义的东西，因此它们无法对应任何数学结构。数学家们之所以会发表论文来证明不同数学结构的描述之间拥有数学一致性，正说明了这是一件困难的事，并不是所有情况都可能发生。

而在计算机科学的领域中，最接近的假说正是我们之前所讨论过的——我们的物理实在是某种形式的计算机模拟。图11-6中可以清楚地看到它们的关系，二者分别位于三角形的两个顶点上：根据模拟假说，我们的物理实在是一种计算；与之对照，根据数学宇宙假说，我们的宇宙是一个数学结构。在模拟假说中，计算演化了我们的宇宙，但在数学宇宙假说中，它们只是通过评估我们宇宙的关系，从而对它进行描述。根据尤尔根·施密特胡贝尔和斯蒂芬·沃尔夫拉姆等人研究的可计算多重宇宙理论，时间演化必须是可计算的；而根据可计算宇宙假说，描述（即关系）才应当是可计算的东西。约翰·巴罗和罗杰·彭罗斯则提出，只有复杂到可应用哥德尔不完备定理的结构，才可能包含拥有自我意识的观察者。上面我们曾看到，可计算宇宙假说可计算宇宙假说的基本假设从某种意义上却与之截然相反。

检验第四层多重宇宙

我们已经论证了外部实在假说。该假说认为，存在一个完全独立于我们人类之外的外部物理实在，暗示了数学宇宙假说，后者认为，我们的外部物理实在是一个数学结构，从而又暗示了第四层多重宇宙的存在。因此，要加强或削弱第四层多重宇宙的证据，最直接的方法就是进一步研究和检验外部实在假说。由于外部实在假说尚无定论，我想我可以很公平地说，我的大部分同行都同意它。并且，粒子物理学标准模型和宇宙学近年来的成功并没有表明，终极物理实在（不管它是什么）是围绕着人类且不能离开人类而存在的。即便如此，还是让我们来探索两种潜在的方法，更直接地检验一下数学宇宙假说和第四层多重宇宙。

典型性预测

正如我们在第5章所看到的那样，人们发现物理常数就像是为了适应生命的出现而作出的精心微调。这一点可以被解读为一个常数范围很宽的多重宇宙存在的证据。之所以可以这样解读，是因为它让我们栖身的宇宙所具有的高度宜居性变得不那么惊人，还预测说这正是我们应当出现的地方。尤其是，我们还看到第二层多重宇宙的某些最强证据正来自暗能量观测密度的微调性。那么，第四层多重宇宙是否也可能存在微调性的证据呢（即使只是理论上）？

2005年，在剑桥的一次物理学术会议晚间，我和好友安东尼·阿吉雷正在三一学院古雅的庭院里散步，我突然意识到答案是肯定的。

> 假设你朋友开车载你到一个你一无所知的小镇上。你跨出车门时，突然注意到一堆令人困惑的标志（见图11-9）。这些标志禁止在街道的任何地方停车，除了你朋友停车的地方。她解释说，新上任的市长举行了一次反污染的活动，决定在每条街的街边随机放置10个标志，禁止在该标志箭头所指方向（左方或右方）的街边停车。在进行一些计算后，你意识到，这种疯狂的随机模式通常会禁止在整条街上的任何地方停车，只有

1%的概率会出现一个允许停车的空间[69]；而这只会发生在左箭头都被放置在所有右箭头左侧的情况下。

我们要如何理解这一点呢？它是否只是一个幸运的巧合？如果你像典型的科学家那样，害怕无法解释的巧合，那么你就会倾向于接受那些不需要疯狂好运的解释：这个奇怪的小镇上有着很多街道，或许多达上百条。这样，很可能真的会在某条街上出现允许停车的区域。由于你朋友熟知这个小镇，所以她能找到停车的地方并不是一件惊人的事。这个微调性的例子与第5章提到的有所不同，因为这里似乎经过了微调的并不是暗能量密度这样的连续统，而是某种离散的东西——所有左箭头或右箭头排列成惊人的方式。

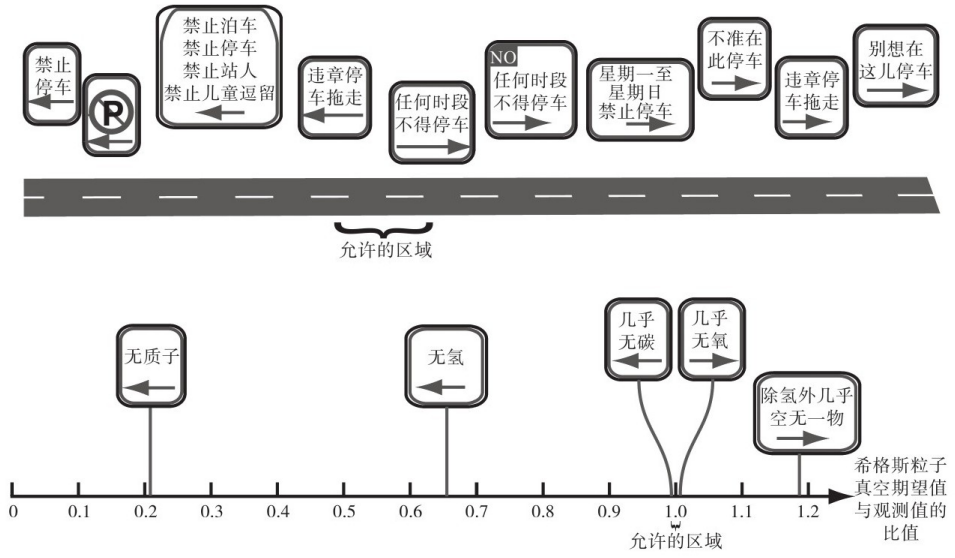


图11-9　如果一条街道上布置了许多随机的标志，每个标志禁止在其左方或右方停车，那么，很有可能整条街上都不能停车，只有在所有左箭头正好位于所有右箭头的左方时，才会出现允许停车的区域，如上图的上半部分所显示的那样。同样，假如为了适应生命的出现，宇宙的某个物理常数必须要满足许许多多限制条件（该图下图），那很有可能根本不会出现宜居的数值区间。上下两幅图所描绘的情况就可分别解读为“实际上存在许多街道”或“第四层多重宇宙中存在许多数学结构”的证据。

我举的这个停车的例子并不贴切，但在我们的宇宙中确实观察到了与之十分类似的现象（见图11-9的下图）。水平坐标轴表示的参数与新近发现的希格斯粒子有关。约翰·多诺霍（John Donoghue）、克

雷格·霍根（Craig Hogan）和海因茨·奥博哈姆（Heinz Oberhummer）及合作者的近期工作表明，这个参数与暗能量密度十分相似，仿佛也经过了精心微调——大约比人们自然预计的要低16个数量级；如果你把它上调或下调一点，哪怕幅度只有1%，也会极大减少恒星中生成的碳和氧；升高18%，将会降低恒星中氢原子聚变成其他原子的比例；而降低34%，将会让氢原子衰变成中子，质子会吞噬电子；降低为原来的1/5，即使是孤单的质子也会衰变成中子，于是宇宙中不会存在任何原子。

我们要如何解读这件事呢？首先，这看起来很像是第二层多重宇宙的进一步证据，因为在不同的第二层平行宇宙中，物理常数可能会发生变化。这解释了为何我们发现的暗能量密度正好能允许星系形成。但除此之外，它还能清楚地解释为什么希格斯粒子的性质正好能允许除氢以外的复杂原子形成。因此，当我们发现自己位于一个包含着丰富原子和星系，并且比较罕见的宇宙中时，也就没那么惊讶了，因为生命的出现正需要复杂性（哪怕只是最低限度的复杂性）。

图11-9提出了第二个问题：为什么图11-9的下图中5个箭头的共同作用就能让希格斯粒子的性质位于宜居区间呢？这可能是一种侥幸：如果5个箭头的随机组合允许出现某个区间的概率是19%，那我们只需要一点运气就好了。此外，基于核物理学的原理，这5个箭头并不是独立的，所以我不会把这5个箭头的例子当作什么强证据。然而，未来的物理学研究很可能会发现更多惊人的离散微调性，比如10个或更多箭头共同作用，好让某个或某些物理学参数出现在宜居的区间内。[70]如果发生了这样的事，我们就能为图11-9中的上图辩称：这并不是存在其他街道的证据，而是存在其他宇宙的证据，这些宇宙拥有不同的物理定律，所以生命出现所需要的条件也十分不同！在某些情况下，这些宇宙可能存在于第二层多重宇宙中，它们所处的区域拥有相同的基本物理定律，但衍生出了不同的空间相和有效物理定律。然而，还

有另外一种情况：其他宇宙也可能遵循着不同的基本物理定律，分别对应着第四层多重宇宙中不同的数学结构。也就是说，尽管目前我们的直接观测数据缺乏对第四层多重宇宙的支持，但未来依然有可能得到一些证据。

数学规则预测

我们曾提到过维格纳在1960年写的那篇著名的文章，他在其中论证说：“数学在自然科学中有着极其广泛的应用，这一事实近乎神秘……简直无法解释。”数学宇宙假说为其提供了一个缺失的解释。它解释了数学在描述物理世界时的有效性，将物理世界解释为一连串自然发生的事件。物理世界就是一个数学结构，我们已经一点点揭开了这个事实的面纱。当代物理学理论由各种各样的近似理论组成，它们十分成功，因为复杂的数学结构的某些方面能用简单的数学结构来近似。也就是说，我们成功的理论并不是用数学去近似物理，而是用数学去近似数学。

数学宇宙假说有一个可检验的关键预测，那就是物理学研究将会揭开更多自然界的数学规则。这种数学宇宙的预测能力是由理论物理学家保罗·迪拉克（Paul Dirac）于1931年提出来的：

> 当今所能提出的最强大的进步方法就是运用所有纯数学的资源，努力完善和概括那些构成理论物理学现有基础的数学形式体系。在这个方向上，每获得一次成功，就应当努力用物理实体来解读那些新的数学特性。

到目前为止，这种预测究竟有多成功呢？从毕达哥拉斯提出数学宇宙的基本想法到今天，已经过去了两千年。随后，伽利略进一步发现自然就是“一本用数学语言写就的书”。接下来，人们又发现了许多影响更加深远的数学规律，从行星的运动到原子的特征，促使迪拉克和维格纳作出令人敬畏的背书。此后，粒子物理学标准模型和宇宙

学揭示了新的数学尺度，将其扩展到“不可理喻”的范围。从微观的基本粒子，到宏观的早期宇宙，历史上曾进行过的所有物理学测量几乎都能由表9-1中列出的32个数字计算出来。面对这样的事实，我不知道还有什么比“物理世界的实在就是纯粹的数学”这个解释更令人叹服。

展望未来，存在两种可能性。如果我错了，数学宇宙假说是错误的，那么物理学将遇到一个不可克服的障碍，之后不会再有任何更新的进展——不会再有任何更新的数学规则等着我们去发现，即便我们依然缺乏物理实在的完备描述。比如，如果有人用令人信服的方式证明了随机性是自然规律的一个本质（与决定论相反，在决定论中，对观察者的克隆只会让他们在主观上感觉到随机），这必将推翻数学宇宙假说。但是，假如我是正确的，数学宇宙假说是正确的，那么我们对终极实在的追寻过程中就不会存在任何障碍。没有做不到，只有想不到。唯一的限制，就是我们的想象力！



- ◆数学宇宙假说（MUH）暗示着，数学存在等同于物理存在。这意味着，所有存在于数学中的结构，也都存在于物理中，构成了第四层多重宇宙。
- ◆我们曾探索过的平行宇宙组成了一个越来越多样化的四层金字塔结构：第一层，空间中观测不到的遥远区域；第二层，其他暴胀停止的区域；第三层，量子希尔伯特空间中的其他地方；第四层，其他数学结构。
- ◆智能生命似乎很罕见，因为大多数第一层、第二层和第四层多重宇宙都不宜居。
- ◆探索第四层多重宇宙不需要火箭或望远镜，只需要计算机和想法。
- ◆最简单的数学结构可以被计算机用电话号码簿的方式罗列出来，每一个结构都拥有自己独一无二的数字。
- ◆数学结构、形式系统和计算之间的关系非常紧密，这意味着它们是同一个超越结构的不同方面，但我们依然无法完全理解这个超越结构的性质。
- ◆数学宇宙假说要言之有理，需要可计算宇宙假说（CUH）的帮助。可计算宇宙假说认为，作为我们外部物理实在的数学结构是用可计算的方程定义出来的。因为，如若不然，哥德尔不完备定理和邱奇—图灵不可计算性就可能会在数学结构中定义出不尽人意的关系。
- ◆有限宇宙假说（FUH）认为，我们的外部物理实在是一个有限的数学结构。它暗示着可计算宇宙假说，并消除了所有关于未定义实在的担忧。
- ◆可计算宇宙假说/有限宇宙假说也许能够帮助解决测度问题，并能解释我们的宇宙为何如此简单。
- ◆数学宇宙假说暗示了，不存在未定义好的初始条件——初始条件不能告诉我们任何关于物理实在的信息，只能告诉我们在多重宇宙中的地址。
- ◆数学宇宙假说暗示了，没有根本的随机性——随机性只是克隆在主观上的一种感受；它还暗示了，我们所观察到的大多数复杂性都是幻觉，只存在于旁观者的眼睛里，只与我们在多重宇宙中的地址信息有关。
- ◆描述物体的集合，可能比单描述其中一个部分简单。
- ◆多重宇宙比我们的宇宙简单，因为它能用更少的信息来描述。并且，第四层多重宇宙是最简单的，因为要描述它本质上不需要任何信息。
- ◆我们可能并不栖身于一个模拟程序中。
- ◆数学宇宙假说本质上是可检验的，也是可证伪的。

OUR MATHEMATICAL UNIVERSE



结 语

生命，宇宙以及万物的未来

这就是世界完结的方式，不是砰的一声垮掉，而是轻轻啜泣着消亡。

托马斯·艾略特（T.S.Eliot）
《空心人》（*The Hollow Men*）

未来不是过去曾有的样子。

尤吉·贝拉

条条大路通罗马

我很荣幸，因为你——我亲爱的读者，与我一起在探索实在之路上走了这么远，来到了本书最后。我们已经旅行了很远，从星系外的宏观世界到原子内的微观世界，见识了实在世界的宏伟壮丽，以及四个不同层次的平行宇宙。这是我童年时代做梦都想不到的。

这一切是如何调和在一起的呢？图12-1展示了我的想法。在本书的第一部分，我们追寻了“万物有多大”的问题，探索了前所未有的宏大尺度：我们所在的地球位于一个星系内，这个星系位于一个宇宙内，这个宇宙位于一个充满了分身的第一层多重宇宙中，而这个第一层多重宇宙又位于一个更加多样化的第二层多重宇宙中，这个第二层多重宇宙又位于一个量子力学的第三层多重宇宙中，而这个第三层多重宇宙又位于一个数学结构的第四层多重宇宙中。

在本书的第二部分，我们追寻了“万物由什么组成”的问题，探索了极其微小的尺度：我们是由细胞组成的，而细胞是由分子组成的，分子由原子组成，原子由基本粒子组成，而基本粒子都是纯粹的数学结构，因为它们仅有的性质都是数学性质。尽管我们尚不知道这些粒子是否还能分解成更小的结构，但是，弦理论及其竞争理论都暗示着，任何更基本的组成部分也都是纯粹数学性的。

从上述意义上说，尽管我们两段冒险前进的方向是相反的，分别指向极大和极小，但是它们最终都来到了同一个地方——数学结构的国度。



图12-1　当我们追问万物由什么组成，并拉近距离，从微小的尺度上观察世界时，我们发现物质的终极组成材料是数学结构，它们的性质都是数学性质。当我们追问万物有多大，并把距离拉远

> 时，我们回到了同样的境地：数学结构的国度，更准确地说，是所有数学结构组成的第四层多重宇宙。

与“条条大路通罗马”的谚语一样，我们追寻的两条通往实在之路都把我们引向了数学。这个优雅的汇合反映了一个事实，即一个数学结构中可以包含其他数学结构，这解释了物理学所揭示的所有数学规则，而这些数学规则都是我们完备外部实在的那个宏大数学结构的某些方面，或者是对其的近似。在最大和最小的尺度上，实在的数学结构逐渐显露真容，但它很容易被忽略，因为我们人类通常只会注意到不大不小的中间尺度[71]。

是怪诞离奇，还是明日之星？

我已经为你描绘出了我眼中的终极物理实在的图景。从个人的角度来看，我认为这个实在非常美丽，美得让人窒息，并且宏伟壮丽、启发人心。但是，它是真实的吗？有没有可能这幅图景只是在误导我们，那些壮丽只是海市蜃楼？你真的生活在一个多重宇宙中吗？有没有可能，整个问题都很愚蠢，存在于科学的范围之外？请听我为你解释。

多重宇宙曾遭到权威的一贯漠视：1600年，布鲁诺因坚持空间无限的多重宇宙而被烧死在火刑柱上；1957年，休·埃弗雷特和他的量子多重宇宙被物理领域的就业市场“烧毁”。我也曾直接感受过这种无情火焰的炙烤：某些权威同行认为我的多重宇宙论文太过疯狂，警告说那会毁掉我的未来。但是最近几年，事情发生了极大的变化。平行宇宙变得流行起来，出现在书籍、电影甚至笑话里：“你在许多平行宇宙里都通过了考试，但这个没有。”

这种思想的流行并没有让科学家达成共识，但是我认为，它让多重宇宙的争论变得更加微妙和有趣，因为科学家们不再互相大喊大



扫码获取乔治·埃利斯的论文。

叫，而是真诚地去尝试理解与自己相左的观点。最近《科学美国人》上发表的一篇反多重宇宙的文章就是一个绝好的例子。这篇文章的作者是乔治·埃利斯，我强烈推荐你读一读这篇文章。

正如我们在第5章讨论的那样，我用了“我们的宇宙”这个词来表示大爆炸后140亿年来发出的光线能够到达我们的球形区域。当说到平行宇宙时，我们用四个层次来进行区分：第一层为空间中其他类似的区域，只不过距离我们非常遥远，那里的物理定律与我们相同，但宇宙的历史不尽相同，因为它们的初始状态不同；第二层为空间中的其他区域，在那里，表面的物理定律与我们不同；第三层为量子实在发挥作用的希尔伯特空间中的其他平行世界；第四层是完全分离的实在，由不同的数学方程支配。在埃利斯的批评中，他将支持该层级划分的论证进行了分类，并论述说它们都有问题。我将他反对多重宇宙的论证总结为以下几点[72]：

- 暴胀可能是错误的（或者不是永恒的）。
- 量子力学可能是错误的（或者不是幺正的）。
- 弦理论可能是错误的（或者缺少多重解）。
- 多重宇宙理论可能是不可证伪的。
- 某些宣称为多重宇宙的证据是可疑的。
- 微调性的论证可能假设了太多前提。
- 这是一个滑坡谬误，将滑向更大的多重宇宙。

我会如何应对这些批评呢？有趣的是，我完全同意这7条陈述——但是，我依然会很开心地为多重宇宙赌上我一辈子的积蓄！

让我们先从前4个开始。暴胀会自然而然地产生第一层多重宇宙；如果你再加上弦理论及其可能解的图景，你就得到了第二层多重宇宙（见第5章）。量子力学用它数学上最简单，并且永不坍缩（“幺正”）的形式带给我们第三层多重宇宙（见第7章）。所以，如果这些理论都被排除掉了，那么多重宇宙的关键证据也就崩塌了。请记住：**平行宇宙并不是一个理论，它们是某些理论的预测。**

我认为有一点很重要：如果一个理论是科学的，那么研究和讨论它的所有结果都是合理的，即使它们涉及不可观测的实体。一个理论要具备可证伪性，并不需要我们能够观测和检验它的所有预测，只需要检验其中至少一个就可以了。因此，针对上面第4条论证，我的回答是，我们的数学理论是科学上可检验的，但它们的推论并无必要满足可检验的要求，即使不可检验也是完全可以的。正如我们在第5章所讨论的，由于爱因斯坦的广义相对论成功预言了许多可观测的事情，所以我们同样相信它对那些不可观测事物作出的预测，例如，黑洞内部发生的事。同样，如果目前暴胀或量子力学作出了令人印象深刻的正确预测，那我们也应当以同样的态度对待它们的其他预测，包括第一层和第三层多重宇宙。埃利斯甚至还提到，永恒暴胀理论有一天也可能被排除掉；而我认为，这正好证明了永恒暴胀是一个科学的理论。

目前，弦理论还未发展到暴胀理论和量子力学那样完善的阶段，也尚未成为一个可检验的科学理论。然而我怀疑，即使弦理论最后没有成功，我们也无法摆脱第二层多重宇宙。数学方程拥有多个解是很常见的事情。只要描述实在的基本方程拥有多个解，那么，永恒暴胀创造出的巨大空间区域就会将这些解逐一实现，（见第5章）。比如，支配水分子的方程与弦理论毫无关系，它能得出三个不同的解，分别对应着气态、液态和固态冰。同样，如果空间自身存在不同的相，那么暴胀就会将它们一一实现。

埃利斯列出了一些可疑的观测数据，它们都号称支持多重宇宙理论，比如其中一些证据声称自己可以证明自然界中某些常数并不总是永恒不变，还有一些来自宇宙微波背景辐射的证据，据称可以证明宇宙碰撞——与其他宇宙或者奇异地连接着的空间的碰撞。我完全同意他对这些证据的怀疑。然而，在这些例子中，值得争议的部分是对数据的分析，就像1989年的冷核聚变骗局一样。我认为，科学家测量并争论数据细节这个事实，进一步证明了这属于科学的范畴，这正是科学争论与非科学争论的分别。

我们在第5章看到，我们的宇宙似乎为生命的出现而进行了惊人的微调，因为如果你改变我们自然界的常数，哪怕只改变一点点，我们所知的生命形式就不可能存在。这是为什么？如果存在第二层多重宇宙，其中的“常数”可取任何可能的值，那么我们身处一个罕见宜居的宇宙就不是一件惊人的事情了，正如我们生于地球而非水星或海王星这一事实并不惊人一样。埃利斯之所以反对这一点，是因为他认为要得出这个结论，并不需要假设出一个多重宇宙理论作为前提，但这却是我们检验任何科学理论的方式：我们假设它是真的，算出结果，如果预测与观测不相符合，就抛弃这个理论。某些微调性看起来已经足够符合了，比如，为了生成一个宜居的星系，暗能量需要微调的位数多达123位。在我看来，这样无法解释的巧合可能表明科学的理解中尚存鸿沟。如果有人轻视这样的巧合，并说“我们只是很幸运，别再寻找解释了”，这不仅无法让人满意，还可能忽视非常关键的线索。

埃利斯论证说，如果我们真的相信所有可能发生的事情都会发生，那我们就像是踏上了一个滑溜的斜坡，下方是更大的多重宇宙，例如第四层多重宇宙。第四层多重宇宙是我最喜欢的一层，所以，作为这个层级少有的忠实支持者之一，我会非常开心地坐上这个滑坡，一路滑下去！

埃利斯还提到，多重宇宙可能违背了奥卡姆剃刀原理，因为引入了太多不必要的复杂性。作为一个理论物理学家，我对一个理论的优雅性与简单性进行评价时，看的并不是这个理论本身，而是看它的数学方程——令我叹为观止的是，数学上最简单的理论总是倾向于生成多重宇宙。经证明，想要写下一个只会生成我们所见之宇宙而其他什么也没有的理论是相当困难的。

最后，还有一个反多重宇宙的观点，我建议埃利斯要尽量避免，但我认为这是大多数人的普遍看法，即平行宇宙看起来太古怪了，不可能是真的。然而，正如我们在引言中探讨过的那样，这正是我们应当预计到的情况——进化将直觉赋予了我们，但这种直觉只能注意到对我们的远古祖先们具有生存价值的日常事务，于是，每次我们用科技来窥伺人类尺度以外的实在范畴时，都会让进化而来的直觉崩溃。这样的情况，在我们眼前发生了一遍又一遍，包括反直觉的相对论、量子力学等。因此，我们也应当预计到，物理学的终极理论（不管它最终是什么）都应该让人感到怪诞离奇。

我们无法摆脱这些平行宇宙

全景假设

物理实在应当是这样一种东西，至少有一个观察者能够从本质上观察它的全部。

看完了反对多重宇宙的论证，让我们更严密地分析一个支持多重宇宙的例子。我将论证道，如果我们接受外部实在假说——存在一个完全独立于我们人类的外部物理实在，那么所有尚存争议的问题都会消融。假设这个假说是正确的，那么，大多数对多重宇宙的批判意见都基于三个似是而非的假设的某种组合。

教育实在假设

全景假设和教育实在假设似乎只反映了人类的傲慢自大。全景假设实际上重新定义了“存

物理实在应当是这样一种东西，所有合理知情的人类观察者都觉得他们能从直觉上理解它。

在”这个词，让它等同于人类可观测的东西，就像把头埋在沙子里的鸵鸟一样。而那些坚持教育实在假设的人则通常会拒绝他们童年时期熟悉的慰藉概念，例如圣诞老人、欧几里得空间、牙齿仙子和神创论。但是，他们真的已经将自己从牢牢深植的慰藉概念里解放出来了吗？我个人认为，我们科学家的职责就是弄清楚世界运行的规律，而不是用我们的哲学偏见来解释它。

不可复制假设

没有任何一个物理过程可以复制观察者，或者创造出主观上不可区分的观察者。

如果全景假设是错误的，那么从定义上说，一定存在本质上不可观测的事物。由于“我们的宇宙”的定义只包括了那些本质上可观测的万物，这意味着我们的宇宙并不是所有存在，因此我们栖身于一个多重宇宙中。如果教育实在假说是错误的，那么，那些声称多重宇宙太诡异的说法在逻辑上不合理。如果不可复制假说是错误的，那么，就没有理由认为外部实在中不存在众多你的版本——实际上，我们已经在第5章和第7章中见过永恒暴胀和不坍缩的量子力学是如何产生出那些“你”的。

此外，我们在第9章论证过，外部实在假说中暗示了数学宇宙假说，即我们的外部物理世界就是一个数学结构。在第11章中，我们看到了它又是如何暗示了第四层多重宇宙的存在，这一层多重宇宙将其他层级的多重宇宙都囊括在内。也就是说，只要我们同意“存在一个独立于我们的外部实在”，那从根本上说，我们就无法摆脱这些平行宇宙。

总结而言，综观这本书，我们看到了人类自我意象的变迁。长期以来，人类都难以克服傲慢的倾向，自大地想象自己拥有中心地位，认为其余万物都是围绕着我们而旋转。但是，我们也一次又一次证明

这样的想法是错误的——其实是我们围绕着太阳旋转，而太阳围绕着银河系的中心旋转，银河系位于一个充满无数星系的宇宙，而这个宇宙又只是四个多重宇宙层级中小小的一个。我希望这能让我们保持谦卑。然而，尽管我们高估了人类在万物图景中的物理力量，但我们却总是低估我们的精神力量！我们的祖先认为他们永远受限于地面上，永远无法真正理解天上星星的本质。然后，他们意识到自己不用飞入太空就能研究天体——只需放飞人类的心智，而非身体。得益于物理学的进展和突破，我们对实在本质的洞察变得越来越深邃。我们发现自己栖身于一个祖先们做梦都想不到的宏大实在中，这意味着人类未来生活的潜力也一定会超出我们的想象，不可限量。在未来，有了几乎无穷无尽的物理资源，人类的天赋和创造力一定会变革一切。所以，命运掌握在我们自己手中。

唯一能限制我们的，是人类自己的想象力

如果我错了，如果数学宇宙假说是错误的，这意味着基础物理学必将遭遇到一个障碍，如果不克服它，我们就无法更好地理解我们的物理实在，因为它缺乏数学描述。如果我是正确的，这个障碍就会烟消云散，万事万物从本质上都可以被我们理解。我想，这是一件奇妙的事情，因为那时候，唯一能限制我们的，就是人类自己的想象力。

更准确地说，唯一能限制我们的，就是我们的想象力和完成艰苦任务的决心。道格拉斯·亚当斯对“生命、宇宙和万物的终极问题”所给出的答案（见第9章），并不能算一个答案，也无法安抚所有提出问题之人。同样，关于实在终极本质的问题，我所提出的答案（“全是数学”，或者更具体地说是“第四层多重宇宙”）也无法回答大部分传统的宏大问题。与直接回答不同，大部分问题都被改述，重新措辞。例如，“量子引力学的方程是什么”这个问题就变成了“我们在第四层多重宇宙中处于什么位置”——这个问题与原来的问题一样难

以回答。所以，关于物理实在的终极问题一直在改变。我们抛弃了“哪一些数学方程描述了我们的实在”这样误导性的问题，转而发问“如何从飞鸟视角中计算出我们的宇宙在青蛙视角中的样子”——也就是我们的观测。这将决定我们是否能揭开这个宇宙的真实结构，并帮助我们弄清楚我们的家园位于数学宇宙中的哪个角落。

基本问题比那些不那么基本的问题更容易回答，这在物理学中是一个普遍的现象——如果我们发现了描述量子引力学的正确方程，它们就能让我们对空间、时间和物质的理解更深入，但无法帮助我们建立更精确的全球气候变化模型，即使它们已经从本质上解释了与天气有关的所有物理学。魔鬼就藏在细节之中，要搞清楚这些细节需要大量与终极基本理论无关的艰苦工作。

本着这样的精神，本书剩下的部分将探索一些更具体的宏大问题，带领我们越来越远离基本物理学，但越来越靠近我们自己的家园。由于本书前面的部分花了太多精力来讨论我们的过去，那么，用展望未来作为旅程的终结，再合适不过了。

我们宇宙的未来——它将如何终结

如果数学宇宙假说是正确的，那么总体来说，我们物理实在的未来并没有太多东西可以说——由于它存在于时间和空间之外，它终结或消逝的方式与它创生和变化的方式并没什么不同。但是，如果我们拉近镜头，仔细观察我们栖居的这个包含时间和空间的数学结构，那么一切就会变得更加有趣。在我们这里，万事万物仿佛是在我们这样的观察者的着眼点上展开，所以我们自然而然地想知道最终会发生什么。

那么，数十亿年之后，我们的宇宙将如何终结？对这个即将到来的宇宙末日，我有5个主要的猜想，都画在图12-2中了，并在表12-1中进行了总结——大冷寂、大挤压、大撕裂、大断裂和死亡泡泡。

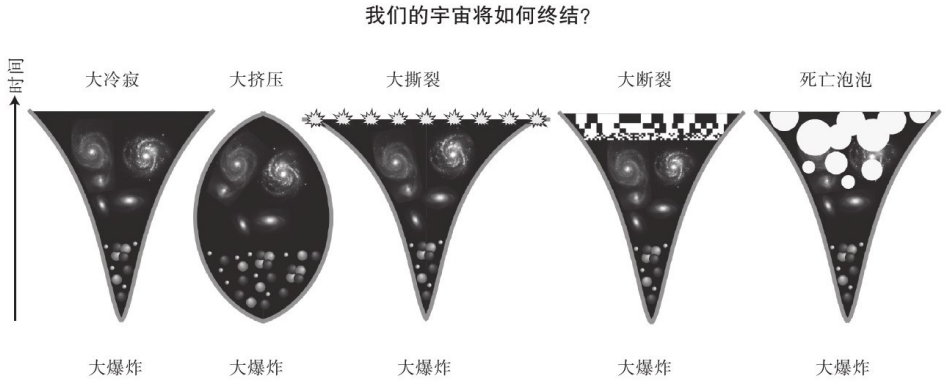


图12-2　我们知道，我们的宇宙开始于140亿年前的一场炙热的大爆炸，它先膨胀，然后冷却，将它的粒子变为原子、星星和星系。但是我们并不知道它的终极命运。人们提出的终极情景包括大冷寂（永远膨胀）、大挤压（再次坍缩）、大撕裂（无穷大的膨胀率将万物撕裂）、大断裂（空间被拉伸过多时，它的结构展现出了致命的颗粒性质）和死亡泡泡（空间“冷冻”入致命的泡泡中，并以光速膨胀）。

表12-1　空间在5种宇宙末日情景中的不同未来

空间的未来	大冷寂	大挤压	大撕裂	大断裂	死亡泡泡
永远存在？	是	不	不	不	不
接近无穷大的尺度？	是	不	是	不	不
接近无穷大的密度？	不	是	是	不	不
稳定吗？	是	是	是	不	不
无限拉伸？	是	是	是	不	是

我们的宇宙已经膨胀了约140亿年。大冷寂是指我们的宇宙将永远膨胀下去，稀释为一个冷寂黑暗、最终死亡的地方。这让我想到艾略特所说的：“这就是世界完结的方式，不是砰的一声垮掉，而是轻轻啜泣着消亡。”如果你像罗伯特·弗罗斯特（Robert Frost）一样，

更喜欢世界终结于烈火中而非冰冻中，那么请双手合十，祈祷大挤压的出现吧。在大挤压中，宇宙膨胀最终将反向进行，万事万物被再次压缩在一起，导致灾难性的坍缩，很像大爆炸的倒播。而大撕裂在无耐心的人眼里与大冷寂十分相似，在其中，我们的星系、行星甚至原子都将在有限时间后的一场终曲中被撕裂。

这三个结局，你会赌哪一个发生呢？这将取决于暗能量随空间膨胀将发生什么事。我们在第3章曾提到过，暗能量占宇宙质量的约70%。如果暗能量保持不变，那将发生大冷寂；如果暗能量稀释为负密度，将发生大挤压；如果暗能量“反”稀释为更高的密度，将发生大撕裂。

由于我们尚不知道暗能量究竟是什么东西，我只能告诉你，我的赌注是这样的：40%赌大冷寂，9%赌大挤压，1%赌大撕裂。另外50%呢？我要把钱存起来，投注给“以上皆非”选项，因为我认为人类应当更加谦卑地意识到，还有许多基本的东西是我们所不了解的，例如空间的本质。大冷寂、大挤压和大撕裂的结局，都事先假定了空间本身是稳定的，并且能够被无限拉伸。

我们曾经认为，空间处在一个无聊的稳定状态，宇宙的戏剧在其中徐徐展开。然后，爱因斯坦告诉我们，空间并不只是这场戏剧的舞台，它也是其中的重要演员——它能弯曲成黑洞，能荡漾出引力波，能拉伸为一个膨胀的宇宙。也许，它还能像水一样冷冻为另一个不同的相，在其中产生出致命的高速膨胀泡泡（见第5章）。这些泡泡都是新的相，为我们提供了一个新的宇宙末日候选者。我们还曾经认为，如果空间不与其他东西相互远去，就无法创造出更多空间。

然而，爱因斯坦的引力理论讲述了一个完全相反的故事（见第2章）：在星系之间的某个区域内，能够产生出更多的空间体积，而不需要将新产生的体积膨胀入其他区域——新的体积还是待在原来的星

系之间。此外，爱因斯坦的理论还说，空间的拉伸可以永恒持续下去，这样，在大冷寂和大挤压的情景中，我们宇宙的体积就会接近无限大。这听起来好得令人难以置信，不禁让人怀疑：真是这样吗？

橡皮筋看起来很不错，具有连续性，就像空间一样。但是假如你把它拉伸得过多，它就会断裂。为什么？因为它是由原子组成的，如果拉伸得太多，橡皮筋原子的颗粒性质就变得重要起来。有没有可能，在人类无法企及的微小尺度上，空间也具有类似的颗粒性呢？数学家喜欢用理想的连续统来模拟空间，不采用任何颗粒性，因此无论距离多么小，都是有意义的。在MIT的大多数物理课上，我们也使用着同样的连续统空间模型，但是，它真的正确吗？肯定不正确！事实上，反对它的证据越来越多（见第10章）。在一个简单的连续空间中，你需要写下一个数位无限多的数字，才能确定两个任意点之间的距离，但是物理学巨擘约翰·惠勒告诉我们，量子效应或许会让小数点后34位之后失去意义，因为我们整个经典的空间概念在小尺度上会崩溃，也许是被一个奇怪的泡泡结构所取代了。这有点像你在计算机屏幕上不断放大一张照片，就会发现原本看起来光滑而连续的画面实际上变成了颗粒状，就像橡皮筋一样，只不过照片中不可细分的组成单元是像素（见图10-3）。

由于照片是由像素组成的，它只包含着有限量的信息，并能很方便地在互联网上传输。同样地，越来越多的证据表明，我们的可观测宇宙也只包含着有限量的信息，让我们更容易理解大自然如何计算下一步要做什么。全息原理指出，我们的宇宙最多包含着10^{124}比特的信息（见第5章）。算下来，平均每个原子的体积中可以塞进10个TB的信息。

下面就是困扰我的事。量子力学薛定谔方程暗示着，信息不可能被创生，也不可能被毁灭（见第6章）。也就是说，随着宇宙的膨胀，

每一升空间中所包含的信息量在持续减少。在大冷寂情景（我在天体物理学家中进行了一圈投票，大冷寂的得票处于宇宙末日选举中的领先地位）中，宇宙会永远膨胀下去，那么，当每升空间所包含的信息含量的数量级从GB降到MB，甚至少于一部手机能存储的数据时，会发生什么呢？降到每升1字节呢？在我们用详细模型来取代连续统空间模型之前，我们无从知晓具体的结果，但是我想，我应该把赌注押在下面这种情况：某些糟糕的事情会发生，将逐渐改变我们所知的物理定律，让我们这样的生命形式不可能继续存在下去——欢迎来到我所谓的“大断裂”。

下面的事更让我困扰：我经过简单的计算发现，大断裂将在几十亿年后发生，甚至比我们的太阳耗尽燃料、吞噬地球的时间还早。暴胀理论是将“爆炸”放入宇宙大爆炸的最好理论（见第4章）。暴胀理论说，在早期宇宙中，存在相当多的高速拉伸区域，某些区域拉伸的程度比其他区域大。如果空间拉伸存在一个上限，到达上限后就会遭遇到大断裂，那么，大部分体积（因此也包括大部分星系、恒星、行星和观察者们）都将处在拉伸得最多、最接近断裂的区域内。

那么，这个即将来临的大断裂会是什么样呢？如果空间的颗粒性逐渐增长，那最先陷入困境的就是尺度最小的结构。我们可能会先注意到，核物理学的性质发生了变化，例如先前稳定的原子发生了放射性衰变。接着，原子物理学开始改变，扰乱了所有化学和生物学。幸运的是，我们宇宙中的伽马射线暴就像一个便利的预警系统，就像煤矿中的金丝雀，或许可以早在大断裂伤害我们之前就发出警示。伽马射线暴是灾难性的宇宙爆炸，从遥远的宇宙深处而来，向我们爆发出短波的伽马射线。在连续空间中，所有波长移动的速度都相同，等于光速，但是在一个颗粒空间中，短波移动的速度稍慢。我们最近发现，两个波长不同的伽马射线从一个遥远的爆炸出发，在宇宙中旅行数十亿年后到达同一张照片的时间差在0.01秒之内。从表面上看，这

排除了大断裂将发生在亿亿年之后的可能性，将上一段中的时间预测呈现在我们面前。

实际上，问题比这更加严重。我们空间的膨胀并不均匀，其实，某些区域（例如我们的银河系）根本不膨胀。因此，有人可能会认为，在星系间的空间经历大断裂之后，住在星系里的观察者还可以快乐地生活很长时间，只要这些遥远区域的恶化效应还未传递到我们的星系就好，但是，这种情景只能拯救观察者，却拯救不了潜在的理论！实际上，理论和观测之间的差异只会变得更糟——现在，再重复一下先前的论证就可预测道，我们有极大的可能性正幸福地生活在某个幸存的星系中，而其他大部分空间早已发生了大断裂，所以，奇怪的伽马射线时间滞后现象的缺乏就变得更加难以解释。

所以，我们将宇宙学和量子力学中某些最受人珍视的配料混合在一起，再加上一些实验数据，搅一搅，就炮制出了一味奇怪的佳酿。结果是什么呢？配料混合得并不好，这意味着，至少其中一个方面出了问题。我热爱神秘的事物。我发现，悖论是大自然赐予我们物理学家最好的礼物，因为它们常带来突破的线索。我想，我们理应在空间本质的研究上获得突破，大断裂的悖论正是一条有趣的线索。

生命的未来——人类如何跨越毁灭性的险滩泥沼

我们从第四层多重宇宙的物理实在出发，拉近镜头细观了我们的宇宙并讨论了它未来的命运。现在，让我们更加靠近我们的家园，来考虑一下生命的未来。在宇宙所有令人敬畏的性质中，我认为最鼓舞人心的是，它鲜活了起来，包含了拥有自我意识的实体，比如我们——这群能够享受它并探究其秘密的人类。

那么，展望未来，生命会怎样呢？人类在宇宙中孤独吗？是否还存在其他愿意与我们交流或企图毁灭我们的文明呢？人类会遍布我们的宇宙吗？或许会以某种更加进化的形式？下面，我们就将探索这些令人着迷的问题，但首先，让我们先来解决一些更紧迫的问题：未来，地球上的生命将面临哪些主要的生存威胁？我们怎样才能缓和这些威胁？

存在风险

当我15岁时，脑中一个念头令我感到震惊。我很清楚，人无远虑必有近忧。我们担心健康、人际关系、金钱和事业这样的个人挑战，还担心家庭、朋友和社会面临的威胁。但是，在这其中，有可能毁灭全人类的最大威胁是什么呢？我们对这个威胁担心得足够多吗？不，并没有！

我意识到，我的人生笼罩在风平浪静的虚假安全感中，我过去竟然天真地相信所有需要担心的事情都已经被别人处理好了。在我蹒跚学步时，我从不担心晚餐，因为我知道父母对此早有计划。我从不担心我的安全，因为我知道消防员和警察对此也有周密的计划。但我渐渐意识到，我周围的成年人并不是我所认为的那样全知全能，有许多小问题都需要我自己解决。不过，摆在全人类面前的那些真正重要的大问题，一定早有政治领袖们来优先考虑了。然而，真的是这样吗？



我从未怀疑过这一点，直到15岁时，一个恐怖的真相就像一块砖头砸到我头上。这个人生的“叫醒电话”来自我了解到了核军备竞赛的细节。我真的震惊了，因为我突然意识到，在这颗美丽珍贵的蓝色行星上，居住着数十亿的人类，尽管没有人想要一场全面核战争，但在我的人生

作者推荐了相关网站以方便读者参考相关内容，扫码登陆。

中却有极大的风险会看到这场战争爆发，导火索可能只是一次偶然事件。或许，这个风险是每年1%——又或许是它的1%，也可能是它的10倍，在我看来，这风险仍然高得令人瞠目结舌。然而，竟然没有任何一个国家把它当作首要问题。此外，这只是被尼克·波斯特洛姆称为“存在风险”（existential risk）的许多例子中的其中一个。存在风险有可能会消灭地球上所有智慧生命，或者永久彻底地削减我们的潜力。

美国未来学家巴克明斯特·富勒（Buckminster Fuller）用一种比我年轻时更诗意的方法描绘了人类在“地球宇宙飞船”上集体旅行时面临的基本困境。当地球宇宙飞船在冰冷贫瘠的太空中航行时，它支持和保护着我们。它存储了大量但有限的水资源、食物和燃料。它的大气层让我们保持温暖，（并用臭氧层）阻挡太阳有害的紫外线，它的磁场保护我们不受致命的宇宙射线侵害。当然，任何一个有责任心的飞船船长都会把保护飞船未来的存在当作第一要务，这包括了避免小行星撞击、船载爆炸、过热、紫外线防护层被破坏和过早消耗物资。然而现在，我们飞船上的船员并没有把其中任何一条作为第一要务，投入的资源（据我评估）还不及它赐予我们的百万分之一。甚至，我们的飞船根本没有船长！

接下来，我们将探讨为何人类如此不擅长应对这些关乎我们长期生存的重大威胁，以及我们对此到底能做什么。不过，让我先简短地调查一下到底存在哪些危机。图12-3总结了我认为最相关的一些存在风险。让我们从时间线的最右端（也就是最遥远的未来）开始，一步步回到现在。

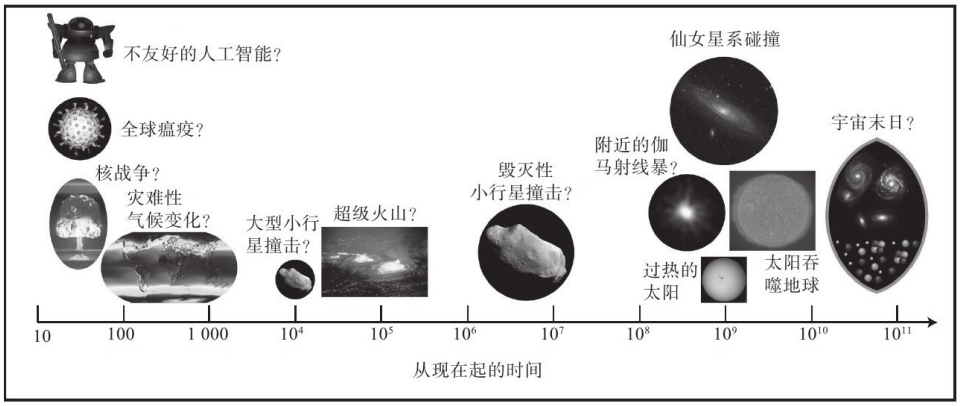


图12-3　有可能毁灭我们所知的生命形态或永久削减它们潜力的情况举例。我们的宇宙自身似乎还会延续几百亿年，但我们的太阳却会在10亿年内将地球烤成焦土，并吞噬地球，除非我们将地球移动到安全距离之外；35亿年后，我们的银河系将与仙女星系相撞。尽管我们并不知道确切的时间，但我们几乎可以肯定地预测，在撞击发生之前，小行星就会撞击地球，超级火山会喷发，造成长达数年的冰冷寒冬。在更近的时间内，我们可能会面临着自讨苦吃的局面，例如气候变化、核战争、全球性的瘟疫以及不友好的超级人工智能。

太阳正在死亡

让我们先从天文学和地质学的威胁开始，然后再转向人类自己制造的威胁。早先，我们讨论了我们宇宙终结的5个末日情景：大冷寂、大挤压、大撕裂、大断裂和死亡泡泡。尽管我们不知道其中哪一个会真的发生（如果真会发生的话），我猜我们并不需要惊慌，因为在几百亿年的时间里，宇宙都不会发生大规模的破坏。

确定无疑的事实是，我们45亿岁的太阳会更早为我们带来麻烦。由于太阳核心发生着复杂动态的核聚变反应，它发出的光会越来越亮，逐渐消耗着它的氢燃料。有预言称，大约10亿年后，太阳光将为地球的生物圈带来大灾难，时空温室效应将逐渐烤干我们的海洋，就

像金星上已经发生的事情一样。如果我们不做点什么，那它一定会发生。

有趣的是，我们可能真的能做一些事。天文学家唐纳德·科瑞堪斯基（Donald Korycansky）和弗雷德·亚当斯（Fred Adams）的研究表明，通过妙用小行星，地球可以逐渐远离日渐炙热的太阳，到达更远的轨道，以保持恒定的温度。他们的基本思想是每6 000年推动一颗大型的小行星以极近的距离掠过地球，在正确的方向上给地球一个引力牵引。每一次这样的近距离相遇都需要经过微调，方法是将小行星送到接近木星和土星的地方，以获得下一次靠近地球所需的能量以及重置角动量。我们过去已经用过这样的“引力辅助”，将NASA的旅行者号等探测器送到外太阳系。一旦成功，这个计划将把地球从现在算起适宜人类居住的时间从10亿年延长到60亿年。在那之后，太阳将照旧结束自己的生命，膨胀为一个红巨星。到那时候，如何继续保持大气层的适宜温度并且不被太阳吞噬掉，还需要更彻底的测算。

与此同时，几十亿年之后，我们整个银河系将与它最近的大邻居——仙女星系相撞，并融合为一个更大的星系。这件事并没有听起来那么糟糕，因为星系中恒星之间的距离与恒星的大小相比，太过遥远，所以大部分恒星只是穿过彼此的空隙，并不会相撞：举个例子，如果太阳的大小相当于波士顿的一个橘子，那么，它最近的恒星邻居——比邻星会位于我的家乡斯德哥尔摩。相比之下，大多数恒星并不会相撞，而是会相互混合，形成一个崭新的星系，“银河仙女星系”（Milkomeda）。然而，正如我们接下来要看到的那样，这件事将加剧超新星爆炸和小行星撞击的危险。

小行星、超新星和超级火山

地球上的化石证据显示，过去的5亿年内发生了5次大规模的灭绝事件，每一次都消灭了超过50%的动物物种。尽管细节尚存激烈的争议，但人们普遍相信这些事件都是由各种天文或地质事件所引发。5大灭绝事件中最近的一个发生在约6 500万年前，看起来是由一个与珠穆朗玛峰差不多大的小行星撞击墨西哥海岸线所引起的，此次事件最著名的伤亡就是非鸟恐龙的灭绝。这个小行星的冲击能相当于几百万次氢弹爆炸。它撞开了180公里的地壳，黑暗的尘云笼罩地球，遮蔽阳光多年时间，导致全球生态系统崩溃。

地球会定期遭到来自太空的撞击，这些物体大小和成分各异。所以，问题不在于我们是否会遭受类似的死亡撞击，而在于什么时候会遭遇。答案很大程度上取决于我们自己——建立一个由机器望远镜组成的全球性网络，应该能够提前几十年对危险的入侵小行星发出警报，给我们足够的时间来开发、启动和执行计划以偏转它们的方向。如果准备得足够早，只需要温和地推动一下就可以了。可采用的方法有很多，例如引力牵引（用卫星的引力去吸引小行星）、星载激光（烧蚀小行星表面的物质，使其脱落，让小行星往相反的方向反冲），甚至还可以粉刷小行星，好让太阳加热带来的辐射压推动着它往相反方向前进。如果时间很短暂，就需要一个较为冒险的方法，例如动力撞击器（让卫星像足球运动员一样将小行星踢离轨道）或核爆炸。

作为热身，我们可以用一些较小的小行星来做练习，它们撞击地球的次数更加频繁。比如，1908年的通古斯事件就是由一个油罐车大小的物体撞击地球导致。这样大小的物体并不会带来存在风险，但是如果它撞到一个大城市，那它释放出的百万吨级爆炸将会让数百万人丧生。经过练习，一旦我们掌握了偏转小型小行星以保护地球的技巧，当下一个大家伙来临时，我们就能做好万全的准备。我们还能把

同样的技术诀窍运用在我们前文讨论过的长期工程项目上，操控小行星以扩大地球的轨道半径，使地球远离逐渐炙热的太阳。

小行星并不是造成生物大灭绝的唯一原因。还有一个来自天空的嫌疑犯就是超新星爆炸引发的伽马射线暴，正是它导致了约4.5亿年前的第二次生物大灭绝。尽管现存的证据太少，不足以在“法庭”上判它有罪，但这名“嫌疑犯”显然拥有作案的方法和可行的机会。当某些质量超大、旋转超快的恒星以超新星的形式爆发时，它们会将剧烈的爆炸能量以伽马射线的方式释放出来。如果这种杀手射线扫过地球，它将带来两个连环效应：首先，它将直接毁灭人类，并毁掉地球的臭氧层；之后，太阳的紫外线会再次清扫地球表面。

不同的天文学风险之间有着有趣的关联。偶尔会有恒星随机地逛到太阳系附近，干扰小行星和彗星的轨道，将它们成群结队地送入内太阳系。其中一些有可能与地球相撞。比如，预计140万年后，恒星格利泽710就将在1光年外的地方路过太阳系，比我们最近的邻居——比邻星目前与地球的距离近4倍。

此外，今天的银河系，大部分恒星都乖乖地按同样的方向绕银河系中心旋转，就像有条不紊的转盘。然而，当银河系与仙女星系相撞并融合后，就会一团糟。恒星之间破坏性接触的频率大大提升了，这将激发大量小行星，甚至可能将地球踢出太阳系。这种星系撞击还会造成气体云的相撞，引发一波造星运动，而最重的新生恒星会很快爆炸成超新星。如果它们距我们很近，结果不会很舒服。

回到家园，我们还可能面临着“内敌”——地球自身引起的事件。超级火山和玄武岩浆洪流是多次生物大灭绝的头号嫌疑犯。它们能用黑暗的尘云封锁地球，遮蔽阳光数年之久，引发“火山冬天”，与大型小行星撞击后一样。它们还可能会在大气层中注入能导致有毒物质、酸雨和全球变暖的气体，从而干扰全球生态系统。实际上，人

们广泛认为，西伯利亚的一次超级火山爆发就是2.5亿年前那次最大规模灭绝事件的罪魁祸首。这次事件被称为“大灭绝”（Great Dying），几乎摧毁了96%的海洋生物。

自作自受，打开潘多拉的盒子

总而言之，我们人类面临着来自天文或地质的存在风险；我只总结了我个人认为最严重的例子。当我思考这些危机时，我得出的结论实际上非常乐观：

- 很有可能，未来科技能帮助地球生命再繁荣数十亿年。
- 如果我们和后代一起努力的话，应该能够研发出这些科技。

前文没有谈到图12-3左边那些最紧急的危机，现在，给我们一些时间来处理剩下的这些问题吧！

颇具讽刺意味的是，这些最紧急的问题大都是自作自受。与之相比，大多数天文和地质的灾难都徘徊在几百万甚至几十亿年后，而我们人类却以10年为单位，迅速改变着一切，就像打开一个潘多拉的盒子，里面飞出了各种各样的存在风险。我们用渔业、农业和工业转变了水、土地和空气，每年造成30 000种生物灭绝，被生物学家称为“第6次生物大灭绝”。接下来该灭绝的生物，会不会是我们自己？

毫无疑问，你一定听说过有关人为危机的严厉争论，从（意外发生或故意而为的）全球性瘟疫到气候变化、污染、资源枯竭和生态系统崩溃。让我来告诉你，我最担心的两个人为危机是什么——意外的核战争和不友好的人工智能。

意外的核战争

“连环杀手正逍遥法外！”“人体炸弹！”“当心禽流感！”尽管报纸头条都喜欢用这些标题来吸引眼球，但最有可能杀死你的其实是古老又无聊的癌症。虽然你每年患癌症的概率低于1%，但是只要你活得够长，最后的概率还是很大。意外的核战争也同样如此。

在过去的50多年里，人们造出了能够引起核决战的工具。这段时间里发生了一连串爆发全面战争的虚假警报，原因有很多，从计算机失灵、供电故障、情报错误到导航误差、轰炸机坠毁和卫星爆炸。在我17岁时，这些事情让我十分困扰。那时我作为自由撰稿人为瑞典和平杂志《PAX》撰写文章。这本杂志的主编卡里塔·安德森（Carita Andersson）热心地培育了我对写作的热忱，教会我许多技巧，并让我写了一系列新文章。逐渐解密的历史记录显示出某些核事件的风险远远大于当初认为的程度。比如，很明显，在2002年的古巴导弹危机中，比尔号驱逐舰（USS Beale）向一艘身份不明的潜艇发射了深水炸弹，而后者实际上是一艘装载有核武器的苏联潜艇，它的指挥官们争吵着是否应该回敬一颗核鱼雷。

尽管“冷战”早已结束，但近年来的危机却不减反增。洲际弹道导弹不甚精确但破坏力极大，这加强了“互相保证毁灭”（mutually assured destruction）机制的稳固性，因为一方先出击将导致无法避免的大规模报复行动。但近年来，导弹研究转向更精确的制导、更短的飞行时间和更好的敌方潜艇追踪系统，侵蚀了前述机制的稳定性。导弹防御系统一旦成功，将彻底侵蚀这个机制。俄罗斯和美国都保留了他们的预警发射战略，要求发射决策在5～15分钟的时间内完成。而在这么短的时间里，可能根本无法获取完整的信息。1995年1月25日，俄罗斯时任总统叶利钦差几分钟就要启动针对美国的全面核战争，只因为一个身份不明的挪威科学火箭。美国一个项目计划用常规弹头取代三叉戟潜艇搭载的24枚D5洲际弹道导弹中的两枚，引发了广泛担忧；因为俄罗斯的预警系统无法将它们与核导弹区分开，增加了灾难

式误解的可能性。还有一些令人担忧的情景包括精神不稳定的军队指挥官和/或边缘政治/宗教行为导致的刻意渎职行为。

可是，为什么要担忧呢？当然，如果事态变严重了，理智的人们会站出来，作出正确的选择。实际上，有核国家都有精心设计的对策，就像我们的身体对待癌症一样。我们的身体通常可以处理孤立的恶化突变，并且，要引发某一种癌症，可能需要同时触发4个看似巧合的突变。然而，如果我们扔骰子的次数足够多，坏事就可能会发生——斯坦利·库布里克（Stanley Kubrick）的核战争黑色喜剧《奇爱博士》（*Dr. Strangelove*）就将其描绘为一个三重巧合。

在我的人生中，两个超级大国之间意外的核战争有可能发生，也可能不会发生。如果它发生了，它必将改变一切。我们目前所关心的气候变化与核冬天相比，根本不算什么。核冬天来临时，全球性的尘云将阻隔阳光长达数年之久，就像小行星撞击或超级火山造成生物大灭绝时的后果一样。2008年经济动荡在核战争面前是小巫见大巫，因为核战争会导致全球性的作物枯竭、基础设施崩溃和大规模的饥荒。在饥饿中挣扎的幸存者会组成武装团伙，挨家挨户抢夺财物。我的人生中会遇见这样的事情吗？我赌30%的概率，与我患癌症的概率差不多。然而，我们对防止核战争所给予的关注和资源，远远低于我们为预防癌症所做的努力。即使全人类的30%都得了癌症，总体来看，人类还是会幸存，但如果爆发核战争，我们的文明不一定能逃过这一劫。关于如何降低这一风险，在科研机构的大量报告中有具体且直接的步骤——但这永远不会成为第一要务，总是被大多数人忽略。

不友好的技术奇点

工业革命带来了比我们更强壮的机器。信息革命带来了在某些方面比我们更聪明的机器。在哪些方面呢？曾经，计算机只能在简单

的、依靠蛮力的认知任务（例如快速算术或数据库搜索）上超越我们。但是2006年，一台计算机打败了国际象棋冠军弗拉基米尔·克拉姆尼克（Vladimir Kramnik）；2011年，一台计算机在美国智力竞赛电视问答节目《危险边缘》（*Jeopardy！）中击败了卫冕冠军肯·詹宁斯（Ken Jennings*）；2012年，一台计算机在美国内华达州获得了驾驶执照，因为它的汽车驾驶技术被证明比人类更安全。这些进展会走向何方？计算机最终能否在所有任务上都超越我们，从而衍生出超人的智能？我毫不怀疑，这必将发生：我们的大脑是一堆遵守着物理定律的粒子，并没有一个物理定律阻止粒子组成某些能完成更高级的计算过程的排列。但是，它真的会发生吗？如果真的发生了，这会是一件好事，还是坏事呢？这些问题十分适时：尽管某些人认为超级智能机器在可预见的未来不可能实现，但还有一些人不这么认为，例如，雷·库兹韦尔就预言，2030年，这样的机器就会出现，使其成了目前必须应对的、最紧急的存在风险。

●奇点理论

总而言之，我们并不清楚超级智能机器会不会出现。在这件事上，人工智能专家们也分成了几个阵营。但我个人的观点十分清晰，那就是，如果它发生了，后果将是爆炸性的。在我出生的两年前，也就是1965年，英国数学家欧文·古德（Irving Good）解释了原因：

> 超级智能机器的定义是一台能超越所有人类智力活动的机器，不管人类有多聪明。由于对这种机器的设计也是人类智力活动之一，因此，超级智能机器能够设计出更好的机器；毫无疑问将会发生一场“智能爆炸”，将人类的智力远远甩在后面。这样，第一台超级智能机器就是人类需要发明的最后一个东西，因为这种机器足够温顺，它会告诉我们如何才能控制它。

1993年，数学家兼科幻作家弗诺·文奇（Vernor Vinge）写了一篇启人深思、使人冷静的论文。他把这种智能爆炸称为“奇点”（the

Singularity），认为我们根本不可能对该点之后的事情作出可靠的预测。

我猜测，如果我们能造出超级智能机器，那么第一台这样的机器将严重受限于人类为它编写的软件。由于我们不理解如何将智能程序最优化，所以我们可能会用硬件来弥补这一点，我们可能会建造非常强大的硬件，其计算能力甚至超过我们的大脑。毕竟，我们的神经元并不比海豚的神经元多，也不比海豚的神经元好，只是连接方式不同而已。这意味着，有时候软件比硬件更重要。在这种情况下，第一台机器或许能够通过一遍又一遍重写自己的程序来实现一次又一次彻底的进步。也就是说，我们人类花了数百万的时间，才从猿猴般的祖先里彻底进化出了智能。而这种机器能以同样的方式，在短短的几小时甚至几秒钟内，就进化出远超祖先——也就是我们人类的智力。

从此以后，地球上的生命再也不一样了。不管是谁，也不管是什么，只要控制了这种科技，就能迅速成为全世界最富有、最有权势的富豪。它比所有金融市场更聪明。它发明的东西、获得的专利远超所有人类研究者。通过设计出本质上更好的计算机硬件和软件，这种机器能迅速提升自己的能力和数量。很快，它们就能发明出超乎我们想象的科技，包括任何它们认为有必要的武器。政治、军事和社会控制将很快跟上来。基于当代的图书、媒体和网络内容产生的影响，我怀疑这种机器能够出版比几十亿拥有超级天赋的人类还多的书籍，并能赢得我们的心灵和思想，而不用彻底收买或征服我们。

●谁控制着奇点

如果奇点发生了，它将如何影响人类文明呢？我们当然不能给出肯定的答案，但我想，答案应该取决于究竟是谁或者什么东西从一开始就控制着它，正如我在图12-4中画出的那样。如果科技最初是由学术研究者或其他使之开源的人所发展出来的，我认为随之而来的混战

局面将会变得高度不稳定，并在短暂的竞争后，由胜出的那个实体来控制。如果这个实体是一个利己主义的人类，或者追逐利润的公司，我认为他们对政府的控制也为期不远了，因为这位所有者将占领世界，并摇身一变，成为政府。如果这个实体是一个利他主义的人类，结局也是一样的，只不过在这种情况下，人类控制的人工智能更像是被奴役的神，一种拥有理解力和超人能力的实体，但却只会遵循主人的指令做事。这些人工智能远超过今天的计算机，二者的差距就像我们人类与蚂蚁的差距一样。

也许，事实会证明，想要奴役这样的超级人工智能是不可能的，即使我们竭尽全力将它们“锁起来”，不让它们接触互联网。只要它们能与我们交流，它们就能理解我们，懂得如何用花言巧语欺骗我们，让我们作出一些看似无伤大雅但却能让它们“逃脱”、扩散或夺权的事情。我很怀疑我们能否控制这样的逃脱，因为今天的人类即使在人造计算机病毒面前也常无计可施，而这些病毒比起人工智能来说简单太多了。

为了防止逃脱事件的发生，或者说为了更好地为人类利益服务，它的主人可以选择自愿让权给友好的人工智能。这是人工智能研究者埃利泽·尤德考斯基（Eliezer Yudkowsky）提出的一个概念。友好的人工智能不管最终发展到多么先进的程度，它都始终保持着一个目标——要对人类产生正面的而非负面的影响。如果这成功了，那么友好的人工智能就会表现得像仁慈的神祇，或动物园管理员。如果人类的所有工作都被友好人工智能控制下的机器人替代了，那么人类依然可以活得幸福，因为我们所需的一切都是免费提供的。相比之下，如果奇点由利己主义的人类或追逐利润的公司所控制，将可能带来空前的贫富差距，因为历史证明，大多数人类都喜欢将财富攥在自己手里，而不是将其分散出去。

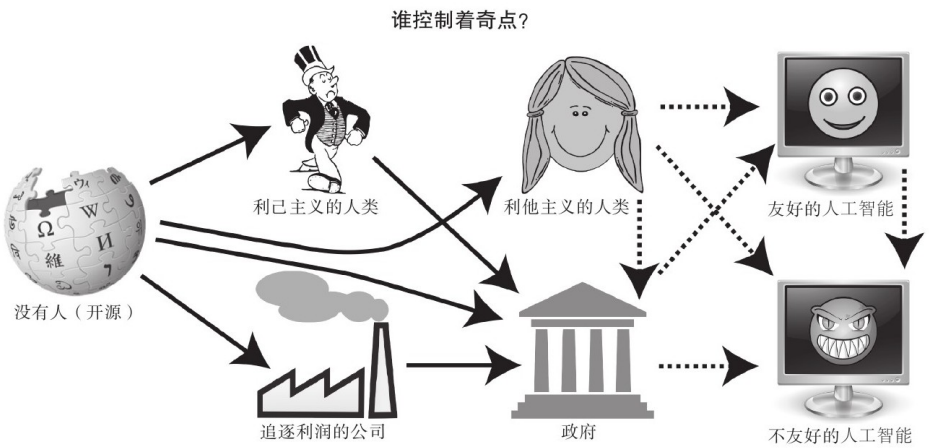


图12-4　如果奇点真的来临，背后的控制者不同，结果将十分不同。我认为“没有人”这个选项是非常不稳定的，在短暂的竞争之后，控制权就会落入单个实体的手中。我还认为，由利己主义的人类或追逐利润的公司控制，最终都将被政府控制所取代，因为所有者终将统治全世界，并变成政府。由利他主义的人类控制，或者让权给保护人类利益的友好人工智能，结果并不会有什么不同。不管怎样，终极的控制者都将是一个不友好的人工智能，它超过了自己的创造者，并迅速发展，巩固自己的势力。

然而，再完美的计划也会失败。友好人工智能的控制权也可能不稳定，控制权最终可能会落入一个不友好的人工智能手中。不友好的人工智能的目标与我们人类不一致，它的行为可能会摧毁所有人，以及人类所关心的一切事物。这种灾难的发生可能是偶然性的，而不是故意为之——人工智能可能只是想用地球上的原子做点别的事情，只不过这件事情与我们的存在相违背。这与我们人类对待低等生物的方式很相似。这个事实令人沮丧：当我们想修建水坝时，总要淹没一些区域，这些区域内的蚂蚁会因此丧生，但我们还是会修建水坝——并不是因为我们讨厌蚂蚁，要对它们赶尽杀绝，只是因为我们的注意力聚焦在一个我们认为更重要的目标上。

●超级智能生命的内部实在

如果奇点真的发生，这会让人工智能拥有意识和自我意识吗？它们会拥有内部实在吗？如果不会，那它们充其量只是僵尸而已。在人类所有的特征中，我觉得意识是迄今为止最令人瞩目的一个。就我而言，这使得我们的宇宙拥有了意义。所以，如果我们的宇宙被某种不具有意识的生命形态所统治，那它就失去了意义，是对空间的巨大浪费。

生命和意识的本质一直是人们争论的焦点。我想，这个现象不止在碳基生命中存在，还应该存在于更一般的生命形态中。我在第10章中提到，我相信意识是信息以某些方式加工时的感觉。由于物质通过排列组合来处理信息的方式非常多，同时拥有极其多变的复杂性，这暗示着意识也可能拥有极其多变的层级和种类。那么，我们主观上感知到的这种意识就是从某些高度复杂的物理系统中产生出的一个现象，这些系统不断地输入、处理、存储和输出着信息。很显然，如果原子能组成人类，那么物理定律也同样允许它们组成更先进的知觉生命。

如果人类最终会通过触发奇点而开发出更智能的实体，那么我认为这些实体也能感觉到自我意识，因此它们不能被看作无生命的机器，而应该看作像我们一样有意识的存在。但是，它们的意识在主观上可能与我们的感觉大相径庭。比如，它们可能缺乏人类对死亡的巨大恐惧，因为它们只需要将自己备份一下，那么即使它被消灭，失去的东西也并不多——最多是最近一次备份点到现在为止累积的记忆而已。人工智能之间可以随意复制信息和软件，这或许会削弱个性，而个性正是人类意识的特色——如果我与你事无巨细地共享着记忆和能力，那么我们之间还有什么差别呢。所以，一群相距不远的人工智能可能会感觉它们是同一个生物，拥有同一个群体心智。

如果这是真的，那就符合末日论所提到的长期生存问题——将要终结的并不是生命本身，而是我们的参考类，也就是一些主观感觉与人类心智非常相似的、自知的观察者时刻。即使大批精致复杂的群体心智在几十亿年的时间内占领了我们的宇宙，我们也不应该为我们不是它们中的一员而感到惊讶，就像我们不会为自己不是蚂蚁而感到惊讶一样。

●人们对奇点的反应

关于奇点，人们有着非常不同的反应。友好人工智能的想法在科幻作品中有着久远的历史，它巩固了艾萨克·阿西莫夫著名的机器人三定律，这正是我们人类想和机器人保持的和谐关系。但那些描写人工智能超过并攻击人类的故事也十分流行，比如《终结者》系列电影。许多人对奇点理论不以为然，称之为“极客的狂喜”，认为它只是一个遥不可及的科幻场景，根本不可能发生，至少在可预见的未来不可能发生。还有一些人认为它很可能会发生，如果我们不未雨绸缪，提前作出详细计划，那它或许会毁灭人类，还会摧毁人类所珍视的一切。我们在前文讨论过这种观点。我在机器智能研究所（https：//intelligence.org/）担任顾问，这里的许多研究者都支持这种观点，认为奇点将是我们面临的最严重的存在风险。有一些研究者甚至觉得，如果不能保证尤德考斯基等人眼中的友好的人工智能情景一定会发生，那么，最好的方式就是将未来的人工智能锁起来，由人类严密看管，或者根本不要研发先进的人工智能。

到目前为止，我们的讨论一直聚焦在奇点的负面后果，但还有一些人，例如雷·库兹韦尔则认为，奇点可能会带来极大的正面效应。实际上，他认为这将是发生在人类身上的最好的事情，将解决人类目前面临的所有问题。

“人类将被更先进的生命形式取代”这个想法会吸引你还是让你感到惊悚呢？这或许取决于不同的情况，尤其取决于你认为未来的生命到底是我们的后代还是我们的征服者。

如果一对夫妇的小孩比他俩都聪明，尽管孩子从他们身上学到了很多东西，但当他独自面对世界时，他完成了父母做梦也想不到的成就。面对这样的事情，那对夫妇一定很高兴，并为孩子感到骄傲，尽管他们将先离开这个世界，无法看到他的所有成就。但是，超级智能杀手的“父母”们感觉却完全不一样。我们可能会认为，我们与未来的人工智能之间拥有相似的父子关系，因为它们延续了我们的价值观。但是，未来的高级生命是否会继续保留我们最珍视的价值和目标？不同答案将带来迥然不同的影响。

还有一个关键因素是：转变是循序渐进的还是突然发生的。我认为，如果人类预计未来的进化过程非常缓慢，在几千年的时间里逐渐变得更加聪明，更能适应变化的环境，甚至在此过程中改变我们的物理外貌，那么由于这个过程很缓慢，应该很少有人会注意到这些变化。但是，假如拥有完美孩子的代价是付出生命，想必许多父母会非常矛盾。如果先进的未来科技并不是突然间取代我们，而是逐渐升级和提高我们的能力，并最终与我们融合在一起，那么，这种方式或许既能够保留我们的目标，又保持变化过程的缓慢，这样我们就可以将奇点时代之后的生命形式看作我们的后代。手机和互联网已经增强了人类得到欲求之物的能力，但却没有过度腐蚀我们的核心价值观（这点尚有争议），因此奇点的乐观主义者相信，大脑植入、意识控制装置甚至将人类心智上传到虚拟现实这些科技也同样如此，并不会腐蚀我们的核心价值观。

此外，这可以打开我们最后的前线——太空。毕竟，能殖民整个宇宙的极度发达的生命或许只能由两个步骤产生：首先，智能生物从

自然选择进化而来；然后，他们建造能自我提升的更高级的意识，将生命的火种延续下去。与受限于肉体的人类不同，这种高级生命能迅速崛起，并遍布大部分可观测宇宙。这种想法早已被科幻作家、人工智能狂热爱好者和超人类思想家探索过了。

那么，几十年后是否会出现奇点？我们应该支持还是反对它呢？我们在这两个问题上显然都没有达成任何共识，但这并不代表我们可以对这些问题视而不见。这可能是人类身上发生的最好或最坏的事情，所以，即使它发生在我们人生中的可能性只有1%，我认为也应该至少花我们GDP的1%来未雨绸缪，研究这个问题以及如何应对它。可是，我们为什么不这么做呢？

人类的愚蠢：宇宙学视角

我的职业给了我宇宙学般宏大的视角，而管理人类面临的存在风险是一件非常紧急的事（正如图12-5所总结的那样）。作为教授，我们常被迫为学生打分数。如果我正在教“101条风险管理准则”这门课，并为人类目前的存在风险管理打一个期中分数，我给出的分数会是B-，因为尽管我们在混日子，但还没有完全放弃这门课。然而，从我的宇宙学角度来看，我觉得人类的表现实在太差劲了，我给出的分数不会超过D——生命未来的潜力是巨大的，而我们人类甚至对目前最紧急的存在风险都没有任何令人信服的计划。我们只花了一丁点注意力和资源来制订计划。忧思科学家联盟（Union of Concerned Scientists）是关注某些存在风险的最大机构之一，2013年它花了大约2 000万美元。而美国人在整容手术上的花销比其多了500倍，在部队的空调系统上多花了1 000多倍，在烟草上花了5 000多倍，在军事上花了35 000多倍，这还不算上军队的医疗保障系统、军队退役开支和军事债务的利息。

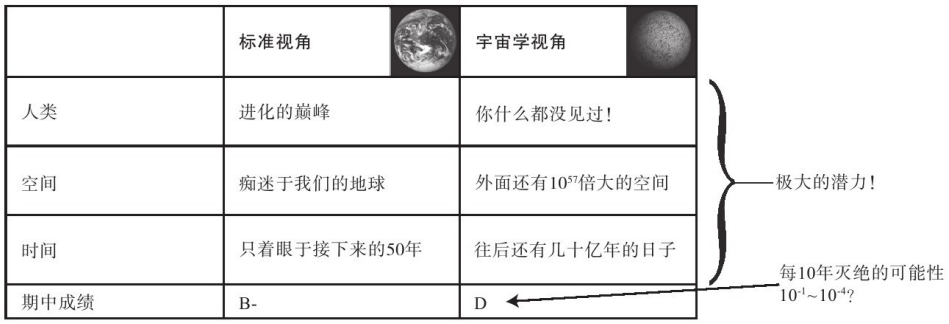


图12-5　宇宙学视角凸显了存在风险管理的重要性。我着重强调了未来巨大的潜力。如果我们搞砸了，毁灭了人类文明，我们将失去这巨大的潜力。

人类为什么如此短视？好吧，进化的历程让我们只擅长使用木棍和石头这类工具，或许我们不应该为自己应对现代科技的方式如此糟糕而感到惊讶，而应该庆幸我们竟然没有做得更糟。现在，我正坐在一个木头和石头做成的大盒子里，眼睛盯着面前的闪光长方形物体，同时不断敲击着一些黑色的小方块。今天，我一整天都没有见过一个鲜活的生物，我在这里已经坐了好几个小时，被头上一个奇怪的螺旋状发光物体所照亮。然而，我却感到挺开心——这个事实恰恰证明了大脑的进化赋予了人类多么强大的适应能力。我知道如何将闪光长方形物体上弯弯曲曲的黑色线条解读为一个故事，我还知道如何计算我们宇宙的年龄，而这两件事对我们洞穴祖先的生存来说没有任何价值。

不过，我们能做许多事并不意味着我们有能力完成所有必要的事情。过去10万年的人类历史中，外部力量缓慢改变着我们的环境，进化则帮助我们逐渐适应。但是最近，我们却用前所未有的速度改变着地球的环境，而这个速度是进化无法追赶的。并且，我们让情况变得太复杂，即使是世界上最顶尖的专家也无法完全理解他们聚焦的有限方面。所以，难怪我们有时会在大图景面前失明，并让眼下的短期满足感凌驾于地球宇宙飞船的长期生存问题之上。比如，我头顶上发光

螺旋体的能量来自燃烧煤炭生成二氧化碳的过程，而这个过程会让我们的宇宙飞船变得过热。我到现在才想到这一点，我真应该早点关掉它。

人类社会：科学的视角

现在，我们乘坐着地球宇宙飞船，一头扎进存在风险的危险地带，手头却没有一个计划，甚至连船长都没有。显然，我们必须为此做点儿什么。可是，我们的目标是什么？如何才能最好地完成它们？第一个问题与“什么”有关，是一个伦理问题；第二个问题与“如何”有关，是一个科学问题。这两个问题都非常重要。爱因斯坦说：“没有伦理的科学是瞎子；没有科学的伦理是瘸子。”然而（这也是我的好友杰夫·安德斯[Geoff Anders]喜欢强调的一点），尽管几乎所有人都认同某些伦理结论（例如“不爆发全球核战争好过爆发核战争”），但是我们并没有把这些问题提前转变为实际目标。这就是为什么我为人类的“缓解存在风险”课程给出D分的原因，并且我认为不能把这门课的失败怪罪到伦理困境和前面所说的“什么”问题上。相比之下，我认为我们应该从人类已有共识目标的问题出发（例如人类文明的长期生存），并用一种科学的方法来解决“如何达到这些目标”的问题（我用了“科学”这个词的广泛含义，目的是强调逻辑推理的重要性）。我不觉得口头上说说“必须改变大多数人的心意”就够了——我们需要更具体的策略。那么，我们要如何达成目标呢？如何才能帮助人类在未来的课程上不那么短视？从本质上说也就是，我们如何才能让理性在决策过程中扮演更重要的角色呢？

许多复杂的力量推动着人类社会向不同的方向发展，它们常互相违背。从物理学家的视角来看，改变一个复杂系统最容易的方法就是寻找不稳定点。在这点上，一丁点力量都会被放大，造成巨大的改变。比如我们已经讨论过，向一颗小行星施加一点温柔的推力，就可

能阻止它几十年后与地球相撞。同样，单个人想要影响全社会，最容易的方法就是去寻找不稳定点，物理学中已经给出了无数隐喻——一个简单的想法就像“火药桶中的火花”“星星之火”“多米诺效应”“失去控制的雪球”[73]。比如，如果你想要解决杀手小行星带来的存在风险，那么，直接建造火箭系统来让小行星转向是一个困难的方法。有一个较简单的方法是先花更少的钱，建造一个早期预警系统，一旦你获得小行星即将到来的信息，再筹集资金来建造火箭系统就变得更加简单。

我认为，为了让我们的星球变成一个更好的家园，有许多最简单的不稳定点可以使用，其中包括传播正确的信息。为了让理性在决策过程中发挥作用，相关信息必须传递到那些做决策的高层人物面前。正如图12-6所描绘的那样，这通常包括三个步骤，组成一个三角形，每个步骤都有极大的概率可能会失败：首先，信息必须被创造或者被发现；接着，发现者必须传播该信息；最后，信息必须被决策者知晓。一旦发现者通过这个三角形将信息传播到其他人的大脑中，其他人就可能因此发现更多的东西，为人类知识的增长添加燃料，形成良性循环。一些发现甚至能将这个三角形自身变得更加高效，比如，出版业和互联网极大地促进了信息的传播和学习。与此同时，更强大的探测器和计算机对科学家的研究起到了极大的辅助作用。即使到了今天，信息三角形的三个环节依然有很大的提升空间。

很显然，科学研究等创造信息的过程对社会是一笔极好的投资，对阻碍信息传播机制（如信息审查）的反对也同样如此。然而，说到利用不稳定性，我认为最触手可及的方法是图12-6最底部的箭头：学习。尽管全球科学界在研究上取得了很大的成功，但我认为他们在教育公众和决策者的任务上简直太失败了。

2010年，海地人烧死了12名“巫婆”。美国一项调查显示39%的人认为占星学是科学，还有46%的人相信我们人类种族只有不到一万年历史。

如果每个人都理解“科学概念”的概念，这些百分比将降为零。地球也将变成一个更好的世界，因为人们都将拥有科学的生活方式，并基于正确的信息作出决策，让成功的概率变得最大化。他们在购买和投票时也会更加理性，以此加强公司、机构和政府决策的科学性。

为什么我们科学家败得一塌糊涂？我想，答案主要来自心理学、社会学和经济学。科学的生活方式需要科学方法来收集信息和使用信息，而这两个方面都隐藏着陷阱。显然，当你知晓人们对某个问题的所有论证后，你更容易作出正确的选择，而事实上人们无法获得完整信息的原因却有很多。许多人缺乏获得信息的渠道（97%的阿富汗人没有互联网；在2010年的调查中，92%的人不知道“9·11”恐怖袭击）。许多人被淹没在责任和干扰中，没法获取信息。许多人只从符合他们偏见的来源获取信息。比如，2012的调查显示，27%的美国人相信奥巴马可能或者肯定出生在美国以外的其他国家。最有价值的信息可能很难获得，即使对那些连接到互联网且没有遭到信息审查的人来说也同样如此，他们被淹没在不科学的媒体信息雪崩当中。

拥有了信息，下一步要做什么呢？科学生活方式的核心是，当面对与你的看法相悖的信息时，你能够改变心意，避免思维惯性，尽管那些固守观点的人常被称为很“强大”。理查德·费曼将“不要信任专家”看作科学的基石，但从众心理和对权威的盲目信任却非常普遍。逻辑构成了科学推理的基础，但一厢情愿的想法、非理性畏惧等认知偏差却总是支配着人们的决策。

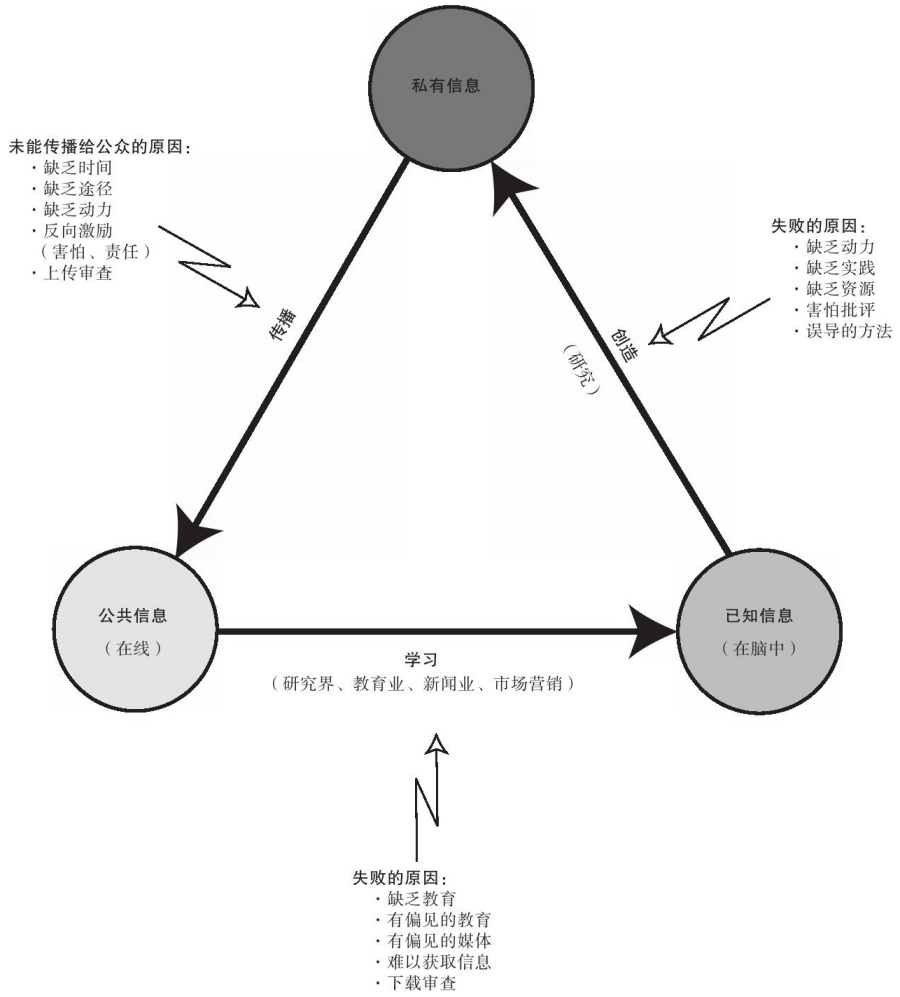


图12-6　要让理性在社会管理中盛行起来，一个关键因素是信息。当重要的信息被发现时，它必须要让公众可获得。然后，必须让相关的人能够学习到。

我们要做什么才能推广科学的生活方式呢？最明显的答案就是提高教育水平。在一些国家，如果能普及基础教育就已经是一个巨大的进步了（在巴基斯坦，只有不到一半人能读写）。教育能通过减少不宽容现象来减少暴力和战争。通过赋予女性以知识的力量，它能遏制贫困和人口爆炸。即使在那些实现了全民教育的国家，教育也能带来巨大的进步。学校有时候太像博物馆，过于回顾过去，而忽视了塑造未来。目前的学校课程太脱离社会，应当更多地培养社会所需要的技能，例如如何处理关系、健康管理、避孕知识、时间管理、批判性思

维和对政治宣传的识别。对年轻人来说，学习一门全球性语言和用计算机打字将胜过学习乘除法和练习草书。在互联网时代，我作为一名老师的角色也发生了变化。我不再需要扮演一个信息导管，因为我的学生很容易在网上下载他们需要的各种信息。相比之下，我的主要角色是启发他们科学的生活方式、好奇心和学习更多知识的欲望。

现在，让我们来问一个最有趣的问题：我们如何才能让科学的生活方式生根发芽，并长成茂密的参天大树呢？早在我出生之前很长时间，理智的人们就已经开始为更好的教育而奔走呼吁了。但教育却没有因此进步。相反，教育和对科学生活方式的坚持在许多国家反而在走下坡路，包括美国。这是为什么呢？显然是因为有强大的力量向相反的方向推进，并且它们还拥有更高的效率。一些企业担心，如果公众加深了对某些科学议题的理解，将损害他们的利益，这种想法给了他们搅混水的动机，就像一些边缘宗教团体担心，对他们的伪科学主张的质疑会削弱他们的力量一样。

那么，我们能做什么呢？首先，科学家需要从高头大马上爬下来，承认我们的劝说策略已经失败，并着力开发一个更好的策略。我们的优势是，我们拥有更好的论证；反科学阵营的优势是，他们拥有更多资金。最讽刺的是，他们的组织形式比我们科学！如果一个公司想要改变大众的观点以提升他们的利润，它会进行科学的部署，并采用高效的市场工具。今天的人们相信什么？我们想要他们明天相信什么？他们的恐惧、不安全感等情绪，哪些可以被我们利用？哪种改变他们心意的方法拥有最高的性价比？策划一场营销活动，启动，完成。要传递的信息是不是过于简单或是有所误导？它有没有不公正地诋毁竞争对手？这些，都是在推广最新智能手机或香烟时常做的事。所以，如果你认为他们在对抗科学时采用的行为准则有所不同的话，那你就太天真了。可惜，我们科学家经常天真得可怜，总是自欺欺人地认为，只要我们占领了道德高地，就能用老掉牙的科学策略战胜那

些利益至上的企业联盟或宗教团体。当我们在员工食堂聊天或者向记者背诵统计数据时，嘟囔一句“我们不会那么低级趣味”或“人们需要一点改变”是于事无补的。科学家们基本上就是在说：“坦克是不道德的，那么，让我们掏出宝剑，和坦克搏斗吧！”

为了让人们明白什么是科学概念，以及科学的生活方式将如何改善他们的生活，我们需要采用科学的方法：我们需要科学阵营的新机构，它们会采用科学的市场推广和筹资工具，就像反科学阵营所做的一样。我们必将使用许多让科学家畏惧的工具，从广告到游说，再到寻找吸睛的焦点小组。但是，我们并不需要追随对手的脚步，一路滑向故意的欺骗。因为在这场战役中，最强大的武器掌握在我们手里，那就是——事实。

你的未来——你是否微不足道

本书花了大部分篇幅来探索我们的物理实在最遥远和最抽象的几个层级；此后，我们逐渐回到了自己的家园，讨论了我们的宇宙和人类文明的未来。现在，让我们“回家”，探讨一下这一切对我们个人——你和我来说意味着什么。

人生的意义

正如我们所看到的那样，支配我们物理实在的基本数学方程中似乎根本没有提到意义这回事儿，所以一个缺乏生命的宇宙就毫无意义可言（尽管这一观点尚有争议）。通过我们人类或其他形式的生命形态，我们的宇宙中产生了自我意识，而我们人类创造出了意义的概念。所以，基于这个理念，**并不是宇宙赋予生命以意义，相反，是生命将意义赋予了宇宙。**

尽管“人生的意义是什么”这个问题可以用不同的方式进行解读，但其中有一些太过模糊以至于缺乏意义明确的答案。其中有一个非常实际、脚踏实地的解读是：“为什么我想要继续活着？”我所认识的人里，如果他们认为人生有意义，早上醒来时通常会觉得很快乐，并对新的一天充满期待。令人惊讶的是，基于他们的快乐和意义来自何方，这些人分成了两个截然不同的阵营。也就是说，关于意义的问题似乎有两个解，每个解都有一部分人觉得很好用。我把这两个解分别称为“自上而下”和“自下而上”。

“自上而下”的方法中，满足感来自顶端，也就是大图景。尽管此时此处的人生可能并不称心如意，但由于它是某个更加宏大、更有意义的事物的一部分，使得它也具有了意义。许多宗教都传递了这样的信息——在家庭、机构和社会中，单个人能感觉到自己是某些更大、更有意义的东西的一部分，从而超越了个人主义。

在“自下而上”的方法中，满足感来自此时此地的细微小事。如果我们能抓住当下这一刻，从路边小花的美丽中、从帮助朋友中或新生婴儿的脸上获得我们所需的满足感，那么我们就能因活着而感激，即使大图景包含着许多不愉快的元素，例如垂死的太阳将把地球蒸发殆尽，以及我们的宇宙终将毁灭。

对我个人来说，“自下而上”的方法提供了更多存在的目的和意义，而我将要声援的“自上而下”的方法则感觉起来像一个额外的红利。首先我认为，一堆粒子能产生自我意识是一件很了不起的事情。并且，这堆名叫迈克斯·泰格马克的粒子还有幸能得到食物、住所和闲暇时间来惊叹于周遭的宇宙，这件事让我的感激之情无以言表。

为什么应该关心我们的宇宙

此外，我从“自上而下”的思考过程中获得了关乎我们宇宙未来生命潜能（也就是本章早些时候讨论的内容）的动力和启发。但是，如果存在平行宇宙，所有物理上可能的未来都会变成现实，那么，为什么要关心我们自己的这个宇宙呢？如果所有结果都会发生，那我们为何要关心自己的选择？实际上，如果存在第四层多重宇宙，变化只是幻觉，那我们为何要尽举手之劳、关心任何东西？我们面临两个理性选择：

- 我们至少要关心一些事物，才能继续生活下去，作出反映我们关心之物的逻辑决策。
- 我们什么也不关心，因此，我们什么也不做，或者只是完全随机地做事。

其实，你和我都已经作出了自己的决策，选择了第一种选项。对我来说，这看起来是一个明智的选择。

这个选择有其逻辑后果。当我想到我关心的人时，关心他们所属的全人类、全地球和全宇宙似乎也是符合逻辑的。然而，从逻辑上说，并不用关心其他宇宙，因为从定义上说，我在我们的宇宙中所做的决策不会对其他宇宙产生任何影响。因此，我所关心之物对它们没有任何影响。基于这个逻辑，让我们将余下的讨论限定在我们自己的宇宙中，并探索我们自身在其中的位置。

我们是微不足道的吗

每当我仰望晴朗的夜空时，就会感到自己的渺小。在我人生的大部分时间里，我越了解宇宙的广袤无垠和人类在其中的位置，我就越感觉到渺小。但现在我不再这么认为了！

从我们远古的祖先对星星的崇拜开始，人类的傲慢自大就遭遇了一系列惨痛的失败。首先，我们比我们想象的小很多。正如我们在本书第一部分所看到的那样，埃拉托斯特尼证明了地球远大于能容纳几百万人口的地方。他的希腊同胞则意识到，太阳系比这还要大上几千倍。然而，比这更壮丽宏大的是，太阳其实只是某个星系的几万亿颗恒星中十分普通的一颗；这个星系又只是我们可观测宇宙内几万亿个星系中十分普通的一个；可观测宇宙只是宇宙大爆炸140亿年以来，光线有充足的时间能到达我们的球形区域而已。不管从时间还是空间的角度看，人类的生命都非常渺小：如果把这140亿年的历史看成1年，那么，人类所经历的10万年历史只占4分钟，百岁老人的人生只相当于0.2秒。

下面这个事实将进一步打击人类的狂妄自大：我们已经知道，人类并不特别。达尔文告诉我们，我们都是动物；弗洛伊德告诉我们，我们都是不理性的；如今，在国际象棋比赛和《危险边缘》问答节目中，机器可以比我们更强大、更聪明。雪上加霜的是，宇宙学家发现，我们甚至不是由占多数的物质（也就是暗物质和暗能量）组成。

我了解得越多，就越觉得自己的渺小。但是，我突然改变了心意，对我们在宇宙中的地位感到更加乐观。为什么呢？因为我开始相信，高度发达的生命是非常罕见的。我们未来有着无限的潜力，这使得我们在时间和空间中的地位变得举足轻重。

我们在宇宙中孤独吗

每当我做有关宇宙学的演讲时，我时常请那些相信我们的宇宙中还存在着其他智能生命的听众举起手。毫无疑问，不管是在幼儿园还是大学课堂里，几乎每个人都会举手。当我问为什么时，我得到的答案通常是：太空如此巨大，一定有某个地方存在着生命，至少从统计

学的角度来说是这样。但是，这个论证真的正确吗？我认为它是错误的——请允许我解释原因。

正如美国天文学家弗朗西斯·德雷克（Francis Drake）所指出的那样，某个地方出现智能生命的概率可以用三个概率相乘得到。这三个概率分别是：出现宜居环境（比如一颗适宜的行星）的概率、该环境中进化出生命的概率、生命进化出智能的概率。我上研究生时，人们对这三个概率还一无所知。但在过去的十年里，人们发现了大量绕着其他恒星旋转的行星。如今看起来，宜居的行星应该数量丰富，仅在银河系就可能有数十亿之众。然而，进化出生命和智能的概率却依然扑朔迷离。一些专家认为，二者中至少有一个是不可避免的，必定会发生在大多数宜居行星上，但还有一些人认为不管是一个还是两个都极其罕见，因为进化过程中至少存在一个瓶颈，需要天上掉馅饼的好运气才可能通过。一些人认为，在生命能够自我繁殖的早期，瓶颈是一个先有鸡还是先有蛋的问题：例如，一个现代细胞要生成一个核糖体（一种高度复杂的分子机器，它能够读取我们的基因密码并生产我们所需的蛋白质），先得需要另一个核糖体。人们并不清楚第一个核糖体是不是由某种更简单的东西逐渐演化而来的。还有一些人认为，进化出更高级的智能也是一个瓶颈。例如，尽管恐龙统治地球长达1亿年之久，比现代人类存在的时间长1 000倍，但是进化并没有将它们推向更高的智能，更别提发明出望远镜和计算机了。

也就是说，我认为我们对“所有行星中到底有多少存在智能生命”这个问题依然一无所知：先验地来看，在我们对其他行星进行详细观测之前，任何数量级的猜测都不比其他猜测更好。这是科学中对极端不确定性进行建模时的标准方法，它有一个听起来很古怪的名字：均匀对数先验概率（uniform logarithmic prior）。用平实的语言解释就是：拥有智能生命的行星所占的比例可能是千分之一、百万

分之一、十亿分之一、万亿分之一、万万亿分之一……而这些比例的概率都大致相等。

考虑到这一点，我们距离最近的智能文明究竟有多远呢？从我们的假设来说，这个距离也符合均匀对数先验概率。所以，先验地来看，在实际观测之前，答案可能是10^{10}米、10^{20}米、10^{30}米、10^{40}米……它们的概率都大致相等，如图12-7所示。

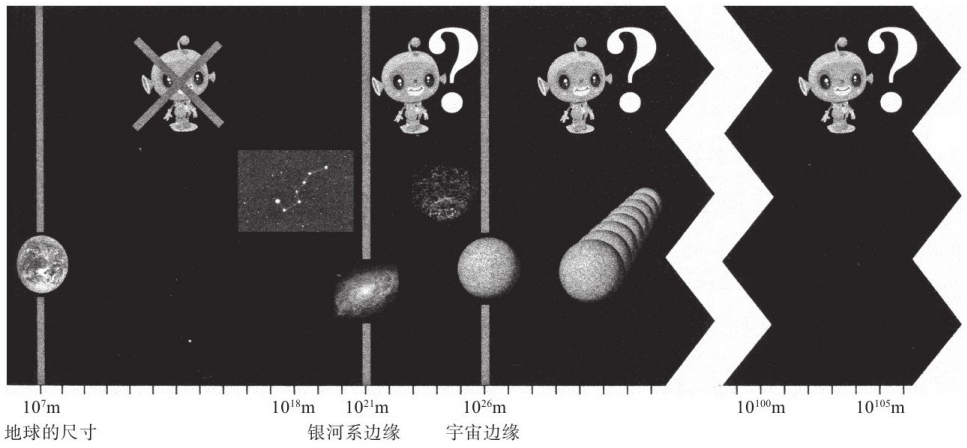


图12-7　我们人类在宇宙中孤独吗？由于生命和智能的进化充满高度不确定性，因此，距离我们最近的文明在太空中可能出现的位置以大致相同的概率分布在上图的横轴上，这使得它非常不可能出现在银河系边缘（大约在10^{21}米之外）和我们宇宙边缘之间的某处（大约在10^{26}米之外）。如果不在上述范围内，那一定比这个范围更近，这样银河系内就应该有很多高级文明，那我们一定早就注意到他们的存在了，然而我们并没有，这意味着我们在宇宙中可能是孤独的。

现在，让我们来看一看观测告诉我们的东西。到目前为止，直接的天文搜寻在寻找外星智能生命方面可以说毫无收获，也不存在广为接受的证据表明外星人曾经造访过地球。我个人对此的解读是，这证明拥有智能生命的行星所占的比例非常小，或许在10^{21}米内（也就是在我们的银河系内或它的近邻中）都不存在任何高度智能的生命。我的结论基于以下几个假设：

- 星际殖民在物理上是可能的，并且是一项很容易完成的任务，只要一个像我们一样高级的文明花一百万年的时间来发展所需的科技即可。
- 我们的银河系中有几十亿颗宜居行星，其中许多行星形成的时间比地球早几十亿年，而非几百万年。
- 在有能力进行太空殖民的文明中，有可观的比例都会选择太空殖民。

对第一个假设，我对可能使用的科技持开放的意见。比如，比起将人类这般大小的大型生物送入太空中，一种可能更有效的方法是送出小型自组装纳米探测器集群。它们降落后能够自动修建工厂，接收以电磁辐射的形式光速传输而来的“邮件”，按照其中的指令组装出任何更大的生命形态[74]。对第三个假设的反对意见中，大多数都包括一个假设，认为高级文明的本质都很善良或者对殖民毫无兴趣，也许是因为他们的科技太发达，以至于他们用已有的资源就能实现自己的目标。或者，他们为了自保或其他原因而保持低调，或者以一种我们难以察觉的方式殖民太空——这被美国天文学家约翰·波尔（John A.Ball）称为“动物园假说”（Zoo Hypothesis），并在一些经典科幻作品中有详细描写，例如奥拉夫·斯塔普雷顿（Olaf Stapleton）所著的《造星者》（*Star Maker*）。我个人则认为，我们不应该假定外星高级文明与我们有着共同的目标，从而低估他们的多样性：只要一个文明决定大张旗鼓地殖民到它所能达到的所有地方，它就可能会席卷我们的银河系，甚至更远的地方。面对这样的风险，即使是那些对殖民毫无兴趣的文明也会备感压力，为了自保而选择扩张。

如果我的解读是正确的，那么，最近的文明存在于1 000……000米之外，这个数字中，零的个数可能为21、22、23、……100、101、102等等，每一个的概率都大致相同——但不会小于21。同时，想要这个文明位于我们自己的宇宙中，零的数量不能超过26。然而，这个数字居于22～26这个狭窄区间内的概率是非常小的。这就是我认为我们在宇宙中茕茕孑立、踽踽独行的原因。

我们真的微不足道吗

我刚刚已经论证了，我们可能是我们整个宇宙中最智慧的生命形态。这是少数人的观点[75]。我也有可能错了，但这至少是一个目前不容忽略的可能性。那么，让我们来探讨一下，假如它是真的，假如我们真是我们宇宙中唯一发明出望远镜的文明，那么这一切到底意味着什么呢？

最开始，宇宙的广袤无垠让我感到自己的渺小。这些壮丽的星系对我们是可见的，也是美丽的，但仅仅只是对我们而言。只有我们才能赋予它们意义，让我们小小的星球成了整个可观测宇宙中最重要的地方。如果我们不存在，这些星系都毫无意义，无端浪费了如此宽广的空间。

我还感到，与宇宙时间的漫长相比，我短暂的人生多么微不足道。然而，我们这个短短的世纪却可能是整个宇宙历史中最重要的一段时间——在这段时间里，宇宙获得了未来的意义。我们将拥有强大的科技，或者将毁灭我们自己，或者将生命的种子播撒在宇宙中。现在的情况是如此不稳定，以至于我怀疑我们将在这个岔路口再徘徊一个世纪。如果我们最终选择了生存之路，而非死亡之路，那么在遥远的未来，我们的宇宙将充满生机，而那些生命都可以追溯到我们此时此刻在地球上所作的决定。我不知道那时的人们会怎样看待我们，但我肯定，他们不会认为我们无足轻重。

在这本书里，我们探索了我们的物理实在，透过科学的眼睛窥见了一个雄奇壮美的宇宙。这个宇宙因人类的存在而鲜活起来，并开始拥有自我意识。我们看到，未来生命在宇宙中将拥有无限的潜力，比我们祖先最狂野的梦想还要宏大；但同时，智慧生命也可能会永远灭绝。我们宇宙中的生命会充分发挥还是肆意挥霍它的潜能呢？我想，这将取决于地球宇宙飞船在我们一生的时间中即将发生的事，并将由

你、我和其他所有乘客共同决定。让我们一起扭转乾坤，创造未来吧！



◆尽管我们这两次智慧的冒险拥有相反的前进方向，分别驶向极大的尺度和极小的尺度，但它们却结束于同一个地方——数学结构的国度。

◆在极大和极小的尺度上，实在的数学结构变得越来越明晰，但在人类熟悉的中间尺度中，它却很容易被忽略。

◆如果实在的终极结构真的是数学，那么万事万物从本质上都可以被我们理解，唯一限制我们的是我们自己的想象力。

◆尽管第四层多重宇宙是永恒的，但我们这个特定的宇宙却有可能终结于大冷寂、大挤压、大撕裂、大断裂或死亡泡泡。

◆目前所有证据都暗示着，在我们的整个宇宙中，都没有其他像人类一样高级的生命形式。

◆从宇宙学的视角看，我们的宇宙中，生命的未来潜能是宏大的，超出了我们所见过的一切。

◆但我们人类在存在风险上却只倾注了极其微薄的注意力和资源。存在风险包括意外核战争和不友好的人工智能，它们会威胁到我们所知的一切生命。

◆在宇宙的无垠面前，人类很容易感觉到自己的渺小。但是，在我们的宇宙中，生命的整个未来可能都将取决于地球在我们一生的时间中即将发生的一切——取决于你、我和地球“宇宙飞船”上的其他所有乘客。让我们扭转乾坤，创造未来吧！

OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE

推荐阅读

这本书的孕育离不开大量科学文献。其中大部分都发表于学术期刊，你可以在我的这篇学术论文中找到这些参考文献：http：//space.mit.edu/home/tegmark/technical.html。然而，还有丰富的著作尝试着向普通人解释科学的核心理念。在这些奇妙的著作中，你能继续探索我们讨论过的话题。我试着根据主要聚焦点为它们分类，但许多书都同时探讨了其他话题。其中的一个或几个并列的∫表示这是一本很学术化或数学化的书，就像餐厅菜单上的辣椒符号代表着某道菜的辣度一样。

宇宙学（第1～3章）

Adams, Fred, and Greg Laughlin. *The Five Ages of the Universe*. New York：The Free Press，1999.

Chown, Marcus. *The Magic Furnace：The Search for the Origins of Atoms*. New York：Oxford University Press，2001.

de Grasse Tyson, Neil. *Death by Black Hole: And Other Cosmic Quandaries.* New York: W. W. Norton&Company, 2007.

Finkbeiner, Ann. *A Grand and Bold Thing: An Extraordinary New Map of the Universe Ushering in a New Era of Discovery.* New York: Free Press, 2010.

Greene, Brian. *The Fabric of the Cosmos*. New York: Knopf, 2004.

Hawking, Stephen. *A Brief History of Time.* New York: Touchstone, 1993.

Kirshner, Robert P. *The Extravagant Universe: Exploding Stars, Dark Energy, and the Accelerating Cosmos.* Princeton: Princeton Science Library, 2004.

Kragh, Helge. *Cosmology and Controversy: The Historical Development of Two Theories of the Universe.* Princeton: Princeton University Press, 1996.

Krauss, Lawrence. *A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather than Nothing.* New York: Free Press, 2012.

Rees, Martin. *Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe.* New York: BasicBooks, 2000.

Rees, Martin. *Our Cosmic Habitat.* Princeton: Princeton University Press, 2002.

Seife, Charles.*Alpha and Omega: The Search for the Beginning and End of the Universe.*New York: Penguin Books, 2004.

Singh, Simon. Big Bang: *The Origin of the Universe.*New York: HarperCollins, 2004.

Smolin, Lee.*Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe.*Boston: Houghton Mifflin Harcourt, 2013.（本书中文简体字版已由湛庐文化策划出版）

Weinberg, Steven. The First Three Minutes: *A Modern View of the Origin of the Universe.*New York: BasicBooks, 1993.

暴胀，第一、第二层多重宇宙（第4～5章）

Barrow, John. The Book of Universes: *Exploring the Limits of the Cosmos.*New York: W.W.Norton&Company, 2011.

Davies, Paul.*Cosmic Jackpot: Why Our Universe Is Just Right for Life.*New York: Houghton Mifflin, 2007.

Guth, Alan.*The Inflationary Universe.*New York: Perseus Books Group, 1997.

Linde, Andrei D.*Particle Physics and Inflationary Cosmology.*Chur, Switzerland: Harwood Academic Publishers, 1990.

Steinhardt, Paul J., and Neil Turok.*Endless Universe: Beyond the Big Bang.*New York: Doubleday, 2007.

Susskind, Leonard. *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design.* New York: Little, Brown and Company, 2005.

Vilenkin, Alexander. *Many Worlds in One: The Search for Other Universes.* New York: Hill and Wang, 2006.

量子力学，第三层多重宇宙（第6～7章）

Byrne, Peter. *The Many Worlds of Hugh Everett III: Multiple Universes, Mutual Assured Destruction, and the Meltdown of a Nuclear Family.* New York: Oxford University Press, 2010.

Cox, Brian, and Jeff Forshaw. *The Quantum Universe (And Why Anything That Can Happen, Does).* Boston: Da Capo Press, 2012.

Deutsch, David. *The Beginning of Infinity: Explanations That Transform Our World.* New York: Allen Lane, 2012.

Deutsch, David. *The Fabric of Reality.* New York: Allen Lane, 1997.

∬ Everett, Hugh. "The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics." Ph.D. diss., Princeton University, 1957. Free download at http://www.pbs.org/wgbh/nova/manyworlds/pdf/dissertation.pdf.

∬ Everett, Hugh. *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, edited by Bryce S. DeWitt and Neill Graham. Prince

ton: Princeton University Press, 1973.

∬ Giulini, Domenico, and Erich Joos, Claus Kiefer, Joachim Kupsch, Ion-Olimpiu Stamatescu and H.Dieter Zeh.*Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory.*Berlin: Springer, 1996.

Kaiser, David.*How the Hippies Saved Physics: Science, Counterculture, and the Quantum Revival.*New York: W. W.Norton&Company, 2011.

∫ Saunders, Simon, and Jonathan Barrett, Adrian Kent and David Wallace.*Many Worlds?Everett, Quantum Theory&Reality.*Oxford: Oxford University Press, 2010.

多重宇宙理论概览（第5章、第7章）

Carr, Bernard J., ed.*Universe or Multiverse?*Cambridge, Mass.: MIT Press, 2007.

Carroll, Sean.*From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time.*Oxford: Oneworld Publications, 2011.

Greene, Brian.*The Hidden Reality.*New York: Knopf, 2011.

Kaku, Michio.*Parallel Worlds: A fourney Through Creation, Higher Dimensions, and the Future of the Cosmos.*New York: Anchor Books, 2006.

Lewis, David.*On the Plurality of Worlds.*Oxford: Blackwell Publishing, 1986.

意识（第8章、第10章）

Blackmore, Susan. *Conversations on Consciousness: What the Best Minds Think about Free Will, and What It Means to Be Human.* New York: Oxford University Press, 2006.

Bostrom, Nick. *Anthropic Bias: Observation Selection Effects in Science and Philosophy.* New York: Routledge, 2002.

Damasio, Antonio. *The Feeling of What Happens.* New York: Harcourt Brace, 2000.

Damasio, Antonio. *Self Comes to Mind: Constructing the Conscious Brain.* New York: Pantheon Books, 2010.

Dennett, Daniel. *Consciousness Explained.* Boston: Little, Brown and Company, 1992.

Hawkins, Jeff, and Sandra Blakeslee. *On Intelligence.* New York: Henry Holt and Company, 2004.

Hut, Pier, Mark Alford and Max Tegmark. “On Math, Matter and Mind,” *Foundations of Physics*, January 15, 2006, http: //arxiv. org/pdf/physics/0510188.pdf.

Koch, Christof. “A ‘Complex’Theory of Consciousness,” *Scientific American*, August 18, 2009, http: //www. scientificamerican.com/article.cfm?id=a-theory-of-consciousness.

Koch, Christof. *The Quest for Consciousness: A Neurobiological Approach.* Englewood, Col.: Roberts&Company Publishers, 20

04.

Kurzweil, Ray.*How to Create a Mind: The Secret of Human Thought Revealed.*New York: Viking Penguin, 2012.（本书中文简体字版《人工智能的未来》已由湛庐文化策划出版）

Roger.*The Emperor's New Mind.*Oxford: Oxford University Press, 1989.

Pinker, Steven.*How the Mind Works.*New York: W. W.Norton and Company, 1997.（本书中文简体字版《心智探奇》已由湛庐文化策划出版）

Tononi, Giulio.“Consciousness as Integrated Information: A Provisional Manifesto, ”*The Biological Bulletin,* 2008, http: //www. biolbull.org/content/215/3/216.full.

Tononi, Giulio.*Phi: A Voyage from the Brain to the Soul.*New York: Pantheon Books, 2012.

Velmans, Max, and Susan Schneider, eds.*The Blackwell Companion to Consciousness.*Malden, Mass.: Blackwell Publishing, 2007.

数学、计算、复杂性（第9～11章）

Barrow, John D.*Pi in the Sky.*Oxford: Clarendon Press, 1992.

Barrow, John D., *Theories of Everything.*New York: Ballantine Books, 1991.

Chaitin, Gregory J.*Algorithmic Information Theory.*（Cambridge：Cambridge University Press，1987.

∫ Davies, Paul.*The Mind of God.*New York：Touchstone，1993.

∫ Goodstein, Reuben L.Constructive Formalism：*Essays on the Foundations of Mathematics.*Leicester：Leister University College Press，1951.

Hersh, Reuben.*What Is Mathematics, Really?*Oxford：Oxford University Press，1999.

Levin, Janna.*A Madman Dreams of Turing Machines.*New York：Anchor Books，2007.

Livio, Mario.*Is God a Mathematician?*. New York：Simon&Schuster，2009.

Lloyd, Seth.*Programming the Universe：A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos.*New York：Vintage Books，2007.

Rucker, Rudy.*Infinity and the Mind.*Boston：Birkh user，1982.

Standish, Russell K.*Theory of Nothing.*Charleston, S. C.：BookSurge，2006.

Wolfram, Stephen.*A New Kind of Science.*New York：Wolfram Media，2002.

未来生活（结语）

Bostrom, Nick, and Milan Cirkovi, eds.*Global Catastrophic Risks.*Oxford：Oxford University Press，2008.

Davies, Paul.*The Eerie Silence：Renewing Our Search for Alien Intelligence.*New York：Houghton Mifflin Harcourt，2011.

Drexler, K. Eric.*Engines of Creation：The Coming Era of Nanotechnology.*London：Fourth Estate，1985.

Dyson, Freeman.#A Many-Colored Glass：Reflections on the Place of Life in the Universe.#Charlottesville：University of Virginia Press，2007.

Fuller, R. Buckminster.*Operating Manual for Spaceship Earth.*Buckminster Fuller Institute, http：//bfi.org/about-bucky/resources/books/operating-manual-spaceship-earth.

Gribbin, John R.*Alone in the Universe：Why Our Planet Is Unique.*Hoboken, N. J.：John Wiley&Sons，2011.

Kurzweil, Ray.*The Age of Spiritual Machines：When Computers Exceed Human Intelligence.*New York：Viking，1999.

Kurzweil, Ray.*The Singularity Is Near：When Humans Transcend Biology.*New York：Viking，2005.

Kurzweil, Ray, and Terry Grossman.*Transcend：Nine Steps to Living Well Forever.*New York：Viking，2010.

Moravec, Hans. *Robot: Mere Machine to Transcendent Mind.* Oxford: Oxford Uni-versity Press, 1999.

Rees, Martin. *Our Final Hour: A Scientist's Warning.* New York: Perseus Books, 1997.

Sagan, Carl. *Pale Blue Dot: A Vision of the Human Future in Space.* New York: Ran-dom House, 1997.

基础物理学、弦理论、量子引力

Barbour, Julian. *The End of Time: The Next Revolution in Physics.* Oxford: Oxford University Press, 1999.

∫ Barrow, John D., and Frank J. Tipler. *The Anthropic Cosmological Principle.* Oxford: Clarendon Press, 1986.

Carroll, Sean. *The Particle at the End of the Universe: How the Hunt for the Higgs Boson Leads Us to the Edge of a New World.* New York: Dutton, 2012.

∫ Einstein, Albert. *Relativity: The Special and General Theory.* London: Really Simple Media, 2011.

Feynman, Richard, and Robert Leighton and Matthew Sands. *The Feynman Lectures on Physics.* 3 vols. New York: Addison-Wesley, 1964.

Gamow, George. *Mr. Tompkins in Paperback.* Cambridge: Cambridge University Press, 1940.

Greene, Brian. *The Elegant Universe.* New York: W. W. Norton and Company, 2003.

Musser, George. *The Complete Idiot's Guide to String Theory.* New York: Penguin Group, 1998.

Penrose, Roger. *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe.* New York: Knopf, 2005.

Randall, L isa. *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions.* New York: Ecco, 2005.（该书中文简体字版《弯曲的旅行》已由湛庐文化策划出版）

Smolin, Lee. *Three Roads to Quantum Gravity.* New York: BasicBooks, 2001.

Smolin, Lee. *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next.* Boston: Houghton Mifflin, 2006.

Susskind, Leonard. *The Black Hole War: My Battle with Stephen Hawking to Make the World Safe for Quantum Mechanics.* New York: Little, Brown and Company, 2008.

Weinberg, Steven L. *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature.* New York: Pantheon, 1992.

Wiener, Eugene P. *Symmetries and Reflections.* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1967.

Wilczek, Frank. *The Lightness of Being: Mass, Ether and the Unification of Forces.* New York: BasicBooks, 2008.

∬ Zeh, H. Dieter. *The Physical Basis of the Direction of Time.* 4th ed. Berlin: Springer, 2002.

OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE

致谢

这本书是在许多人的鼓励和帮助下写就的。在此，我要向他们表示 最诚挚的感谢。

感谢我的家人、朋友、老师、同行和合作者，他们多年来一直支持我，启发我的灵感；

感谢我的母亲，她总是乐于分享她对人生重大问题的热忱与好奇；感谢我的父亲，他不吝分享他对数学及其意义的迷恋和睿智；

感谢我的儿子Philip和Alexander,感谢他们向我提出关于世界的好 问题，不经意间也提供了许多有趣的素材；

感谢这些年来联系我的科学爱好者，他们分布在世界各地，提出了 各种问题和评论，鼓励我追寻自己的想法，并付诸出版；

感谢我的代理人John Brockman和Max Brockman说服我写这本书，并让一切运转得井井有条；

感谢那些对书稿的某一部分留下反馈的人，包括我母亲、我的兄弟Per、Josh Dillon、Marty Asher、David Deutsch、Louis Helm、Andrei Linde、Jonathan Lindstram、Roy Link、David Raub、Shevaun Mizrahi、Mary New、Sandra Simpson、Carl Shulman 和Jaan Tallinn;

感谢那些看完整本书稿后提出建议的家人和朋友，包括我的妻子Meia、我的父亲、Paul Almond、Julian Barbour、Phillip Helbig、Adrian Liu、Howard Messing、Dan Roberts、Edward Witten和我的编辑Dan Frank；感谢我的博士生郑浩轩对本书简体中文版所做的校对工作。

最需要感谢的是我心爱的妻子Meia，她是我的缪斯和灵魂伴侣，给予了我梦寐以求的鼓励、支持和灵感。

我还要感谢一些机构，它们的工作使本书中所提到的研究得以最终实现：美国国家航空航天局（NASA）、美国国家科学基金会（NSF）、帕卡德基金会（Packard Foundation）、科学进步研究公司（Research Corporation for Science Advancement）、科维理基金会（Kavli Foundation）、邓普顿基金会（John Templeton Foundation）、宾夕法尼亚大学和MIT。我还想要感谢Jonathan Rothberg和一位匿名的捐赠人，感谢他们对“万远镜”项目的慷慨支持。

OUR
MATHEMATICAL
UNIVERSE

译者后记

康德说：“有两样东西，我们愈经常持久地加以思索，它们就愈使心灵充满日新又新、有加无以的景仰和敬畏：在我之上的星空和居我心中的道德法则。”在翻译本书的过程中，这句话时常浮现在我的脑海中。因为这两样令人景仰和敬畏之物，正是本书的主题。

从文明乍现曙光之时起，人类就从未停止仰望星空。柴米油盐的世俗生活之外，总有人追问宏大的终极问题：人类从何而来？星星从何而来？宇宙从何而来？人类会走向何方？宇宙的终极命运是什么？……在这一过程中，诞生了许多伟大的灵魂：牛顿、哥白尼、爱因斯坦、费曼、埃弗雷特……他们颠覆和塑造了人类的宇宙观，让我们愈发清晰地了解人类在宇宙中的位置——人类诚然并不居于宇宙的中心，但也并非无关紧要。我不禁思索，仰望星空或许不单是文明的结果，更是文明的源泉。

这一切，都能在本书中窥见一斑。为了让读者站在巨人的肩膀上，迈克斯·泰格马克教授梳理了人类对宇宙的认识历史，用通俗的语言讲述了最前沿的物理学和宇宙学知识，在空间和时间两个维度上由远及近地回溯历史，又由近及远地眺望未来，并融入了自己对终极

问题的追寻历程，将“科学史”与“个人史”完美地结合在一起。更令人惊喜的是，他详细论证了自己看似惊世骇俗的宇宙观——我们生活在多重宇宙中。这些多重宇宙就像俄罗斯套娃一样，一共有四个层级，每一层中又有无数个平行宇宙。每当你在分岔路口选择向左行的时候，就有无数个“你”在平行宇宙中选择了向右行。有的宇宙中，你可能是世界首富；有的宇宙可能只有二维空间；还有的宇宙中或许只有滚烫翻腾的能量，热闹非凡，又或者冷寂一片、空无一物……凡是有可能发生的事，哪怕可能性极低，也一定会在某个平行宇宙中发生。而宇宙的终极本质，竟然是数学！

除了对星空的追寻，本书还拷问了“道德法则”——科学家应当如何引导民众树立科学的生活观念？当地球面临危险，我们可以做些什么？怎样未雨绸缪才能避免人工智能危害人类？我们的生命是微不足道的吗？我们应该如何关心地球和宇宙？除此之外，《穿越平行宇宙》这本书还进行了充满哲思的思想实验：你是不是缸中之脑？你眼中的世界和动物眼中的世界完全不同，那究竟哪一个才是真实的世界？你的大脑是不是量子计算机？

泰格马克教授在本书中展现了广博的胸怀、对未来的忧思和对全人类乃至全宇宙的大爱。这一切都源自他作为一个物理学家的宏大超脱的宇宙观。可以说，星空居于外，道德居于内，二者在这本书里得到了完美的统一。

天地不仁，以万物为刍狗。不管是从时间还是从空间的角度看，人类的尺度都是微不足道的。我们似乎只是居于宇宙一隅的小小蝼蚁。然而，人类却是这无尽混沌中最美的智慧之光——倘若没有人类，就不会有人发出“宇宙是什么”的终极追问。但人类的存在又依赖极其微妙的宇宙环境。假如宇宙常数变动一点点，哪怕只是非常细微的一点点，别说人类，就连地球、太阳甚至银河系都可能无法诞

生。所以，宇宙本质问题仿佛落入一个循环论证。难道宇宙为了探索自身的本质，而精心孕育出了擅于从混沌中抽丝剥茧的人类智慧？泰格马克教授没有陷入这种循环，而是另辟蹊径，以飞鸟的视角审视世界，为我们呈现了全新的宇宙观。

乔斯坦·贾德在《苏菲的世界》中说，宇宙就像一只从魔术师的帽子中拉出来的大白兔，我们就生活在柔软温暖的兔毛深处。唯有勇于探索的哲学家才会沿着兔毛不停往上爬。当他们爬到顶端，看清世界的真相，就会向世界呼喊：“各位先生、女士们！原来我们的世界是一只漂浮在太空中的大白兔！”我觉得，泰格马克教授就像一位爬上兔子毛顶端的哲学家。你瞧，他现在正在兔毛顶端向你挥手呐喊呢：“喂！原来我们的世界是环环相扣的‘俄罗斯套娃’啊！”

我很幸运有机会翻译这本书，尽微薄力量帮助中国读者搭上泰格马克教授的“宇宙观光列车”，一同前往时光的最深处。在翻译的过程中，为力争内容的精确和准确，我参考了很多学术资料，但一些概念并无标准的中文翻译，为此我发挥了想象力，尽量贴近原意，又不乏趣味。例如，“Omniscope”是泰格马克教授发起的一个研究项目，目前没有正式的中文译名。如何翻译这个词呢？“omni-”是一个表示“全部”的词根，比如“omnipresent”（无所不在的）、“omniscient”（无所不知的）。泰格马克教授在书中提到，这个项目是一种非常“完全”的望远镜阵列，体现在它可以“全”方位拍下天空的“全”彩色图像。于是，我将这个词翻译成“万远镜”，以谐音表示它的本质是“望远镜”，又能表达它“无所不能”的本领。

有一些看似“啰嗦”和重复的语句，其实是为了更加准确，避免误解，也为了尊重泰格马克教授的原意。例如，你可能会看到书中多次提到“我们的宇宙”，比如“我们的宇宙正在膨胀”，读起来有些拗口。为何不直接简化为“宇宙”呢？如果你看到第5章，你就会发

现，泰格马克教授解释了他为什么不把“我们的宇宙”简化为“宇宙”。“我们的宇宙”是指本质上能被我们观测到的球形区域，也就是可观测宇宙。而“宇宙”的含义则因语境而异，很容易产生混淆和误解。因此，我保留了“我们的宇宙”。

在本书中还有一个非常重要的术语——“reality”。可以说，本书的所有哲学思考都是围绕着这个词展开。应该如何翻译这个词呢？大多数人将哲学中的“reality”翻译成“现实”，而我在本书中将其翻译为“实在”。原因有几点：首先，我认为泰格马克教授所说的“reality”与哲学共同体所说的“现实”是有区别的。哲学家们所说的“现实”一般指客观存在的事物。而泰格马克教授提出了三种“reality”——“external reality”“internal reality”“consensus reality”，并认为物理学是连接内、外“reality”的桥梁，这与哲学家们所说的“现实”并不完全一样。因此，我认为有必要另外找一个词，而不是直接套用“现实”。正好，哲学中的“realism”中文翻译成“实在论”而不是“现实论”，因此我认为“实在”这个词比较合适。其次，“现实”是个多义词，容易引发误解。另外，我咨询了哈佛大学认知科学博士、目前在中国人民大学任教的薛少华老师。从他的专业出发，他也认同“实在”更符合本书的语境。如果读者有不同的看法，或有其他建议，也非常欢迎与我探讨。

最后，我要特别感谢泰格马克教授和他的博士生郑浩轩，他们给了我很多宝贵的专业意见。郑浩轩更是通读全部译文，从专业和语言等角度提出了很多中肯的建议。在翻译的过程中，我还得到了来自阎航、汪灵蜀、丁淑华、周文清、阎玉明、张超、周兴莉、丁德文、邹淑娟、丁鹏春、李群、汪凌等亲友的帮助。最后要感谢湛庐文化的编辑安烨女士及其同事，没有他们的慧眼识书，也不会有这本中译本的诞生。

时间仓促，不尽之处恳请读者给予批评指正。我的博客网址是http：//wangjieshu.com，电子邮件是foundwonder@gmail.com，我还运营了一个微信公众号wonderland9527，如果各位读者对本书有任何意见、建议或想法，欢迎随时与我联系和探讨。

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

湛庐，与思想有关……

如何阅读商业图书

商业图书与其他类型的图书，由于阅读目的和方式的不同，因此有其特定的阅读原则和阅读方法，先从一本书开始尝试，再熟练应用。

阅读原则1 二八原则

对商业图书来说，80% 的精华价值可能仅占 20% 的页码。要根据自己的阅读能力，进行阅读时间的分配。

阅读原则2 集中优势精力原则

在一个特定的时间段内，集中突破 20% 的精华内容。也可以在一个时间段内，集中攻克一个主题的阅读。

阅读原则3 递进原则

高效率的阅读并不一定要按照页码顺序展开，可以挑选自己感兴趣的部分阅读，再从兴趣点扩展到其他部分。阅读商业图书切忌贪多，从一个小主题开始，先培养自己的阅读能力，了解文字风格、观点阐述以及案例描述的方法，目的在于对方法的掌握，这才是最重要的。

阅读原则4 好为人师原则

在朋友圈中主导、控制话题，引导话题向自己设计的方向去发展，可以让读书收获更加扎实、实用、有效。

阅读方法与阅读习惯的养成

（1）回想。阅读商业图书常常不会一口气读完，第二次拿起书时，至少用 15 分钟回想上次阅读的内容，不要翻看，实在想不起来再翻看。严格训练自己，一定要回想，坚持 50 次，会逐渐养成习惯。

（2）做笔记。不要试图让笔记具有很强的逻辑性和系统性，不需要有深刻的见解和思想，只要是文字，就是对大脑的锻炼。在空白处多写多画，随笔、符号、涂色、书签、便签、折页，甚至拆书都可以。

（3）读后感和 PPT。坚持写读后感可以大幅度提高阅读能力，做 PPT 可以提高逻辑分析能力。从写读后感开始，写上 5 篇以后，再尝试做 PPT。连续做上 5 个 PPT，再重复写三次读后感。如此坚持，阅读能力将会大幅度提高。

（4）思想的超越。要养成上述阅读习惯，通常需要 6 个月的严格训练，至少完成 4 本书的阅读。你会慢慢发现，自己的思想开始跳脱出来，开始有了超越作者的感觉。比拟作者、超越作者、试图凌驾于作者之上思考问题，是阅读能力提高的必然结果。

扫码关注湛庐文化，
回复“阅读”
这5种方法，让读过的书变成你的影子

[特别感谢：营销及销售行为专家 孙路弘 智慧支持！]

我们出版的所有图书，封底和前勒口都有“湛庐文化”的标志

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

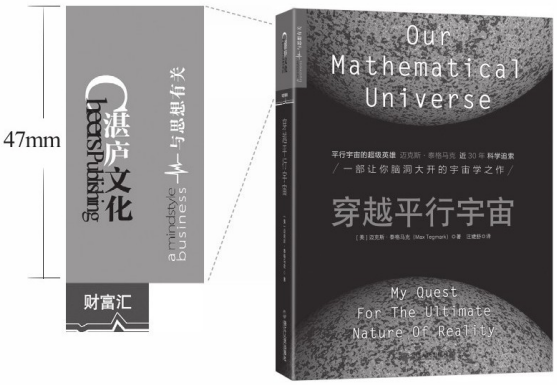
并归于两个品牌

财富汇　　心视界

找“小红帽”

为了便于读者在浩如烟海的书架陈列中清楚地找到湛庐，我们在每本图书的封面左上角，以及书脊上部 47mm 处，以红色作为标记——称之为**“小红帽”**。同时，封面左上角标记**“湛庐文化 Slogan”**，书脊上标记**“湛庐文化 Logo”**，且下方标注图书所属品牌。

湛庐文化主力打造两个品牌：**财富汇**，致力于为商界人士提供国内外优秀的经济管理类图书；**心视界**，旨在通过心理学大师、心灵导师的专业指导为读者提供改善生活和心境的通路。



阅读的最大成本

读者在选购图书的时候，往往把成本支出的焦点放在书价上，其实不然。

时间才是读者付出的最大阅读成本。

阅读的时间成本=选择花费的时间+阅读花费的时间+误读浪费的时间

湛庐希望成为一个“与思想有关”的组织，成为中国与世界思想交汇的聚集地。通过我们的工作和努力，潜移默化地改变中国人、商业组织的思维方式，与世界先进的理念接轨，帮助国内的企业和经理人，融入世界，这是我们的使命和价值。

我们知道，这项工作就像跑马拉松，是极其漫长和艰苦的。但是我们有决心和毅力去不断推动，在朝着我们目标前进的道路上，所有人都是同行者和推动者。希望更多的专家、学者、读者一起来加入我们的队伍，在当下改变未来。

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

湛庐文化获奖书目



《大数据时代》
国家图书馆“第九届文津奖”十本获奖图书之一
CCTV“2013中国好书”25本获奖图书之一
《光明日报》2013年度《光明书榜》入选图书
《第一财经日报》2013年第一财经金融价值榜“推荐财经图书奖”
2013年度和讯华文财经图书大奖
2013亚马逊年度图书排行榜经济管理类图书榜首
《中国企业家》年度好书经管类TOP10
《创业家》“5年来最值得创业者读的10本书”
《商学院》“2013经理人阅读趣味年报·科技和社会发展趋势类最受关注图书”
《中国新闻出版报》2013年度好书20本之一
2013百道网·中国好书榜·财经类TOP100榜首
2013蓝狮子·腾讯文学十大最佳商业图书和最受欢迎的数字阅读出版物
2013京东经管图书年度畅销榜上榜图书，综合排名第一，经济类榜榜首



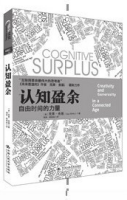
《牛奶可乐经济学》
国家图书馆“第四届文津奖”十本获奖图书之一
搜狐、《第一财经日报》2008年十本最佳商业图书



《影响力》（经典版）
《商学院》“2013经理人阅读趣味年报·心理学和行为科学类最受关注图书”
2013亚马逊年度图书分类榜心理励志图书第八名
《财富》鼎力推荐的75本商业必读书之一



《人人时代》（原名《未来是湿的》）
CCTV《子午书简》·《中国图书商报》2009年度最值得一读的30本好书之“年度最佳财经图书”
《第一财经周刊》· 蓝狮子读书会·新浪网2009年度十佳商业图书TOP5

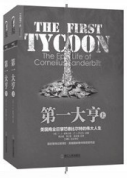


《认知盈余》
《商学院》“2013经理人阅读趣味年报·科技和社会发展趋势类最受关注图书”
2011年度和讯华文财经图书大奖



《大而不倒》
《金融时报》· 高盛2010年度最佳商业图书入选作品
美国《外交政策》杂志评选的全球思想家正在阅读的20本书之一
蓝狮子·新浪2010年度十大最佳商业图书，《智囊悦读》2010年度十大最具价值经管图书

《第一大亨》
普利策传记奖，美国国家图书奖
2013中国好书榜·财经类TOP100



《真实的幸福》
《第一财经周刊》2014年度商业图书TOP10
《职场》2010年度最具阅读价值的10本职场书籍

《星际穿越》
国家图书馆“第十一届文津奖”十本奖获奖图书之一
2015年全国优秀科普作品三等奖
《环球科学》2015最美科学阅读TOP10







《翻转课堂的可汗学院》
《中国教师报》2014年度“影响教师的100本书”TOP10
《第一财经周刊》2014年度商业图书TOP10

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

湛庐文化获奖书目

《爱哭鬼小隼》
国家图书馆“第九届文津奖”十本获奖图书之一
《新京报》2013年度童书
《中国教育报》2013年度教师推荐的10大童书
新阅读研究所“2013年度最佳童书”

《群体性孤独》
国家图书馆“第十届文津奖”十本获奖图书之一
2014“腾讯网·啖书局”TMT十大最佳图书

《用心教养》
国家新闻出版广电总局2014年度“大众喜爱的50种图书”生活与科普类TOP6

《正能量》
《新智囊》2012年经管类十大图书，京东2012好书榜年度新书

《正义之心》
《第一财经周刊》2014年度商业图书TOP10

《神话的力量》
《心理月刊》2011年度最佳图书奖

《当音乐停止之后》
《中欧商业评论》2014年度经管好书榜·经济金融类

《富足》
《哈佛商业评论》2015年最值得读的八本好书
2014“腾讯网·啖书局”TMT十大最佳图书

《稀缺》
《第一财经周刊》2014年度商业图书TOP10
《中欧商业评论》2014年度经管好书榜·企业管理类

《大爆炸式创新》
《中欧商业评论》2014年度经管好书榜·企业管理类

《技术的本质》
2014“腾讯网·啖书局”TMT十大最佳图书

《社交网络改变世界》
新华网、中国出版传媒2013年度中国影响力图书

《孵化Twitter》
2013年11月亚马逊（美国）月度最佳图书
《第一财经周刊》2014年度商业图书TOP10

《谁是谷歌想要的人才？》
《出版商务周报》2013年度风云图书·励志类上榜书籍

《卡普新生儿安抚法》（最快乐的宝宝1·0~1岁）
2013新浪“养育有道”年度论坛养育类图书推荐奖



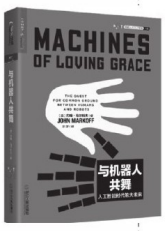
湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

延伸阅读

《与机器人共舞》

◎ 人工智能时代的科技预言家、普利策奖得主、乔布斯极为推崇的高级科技记者——约翰·马尔科夫重磅新作！

◎ 迄今为止最完整、最具可读性的人工智能史。



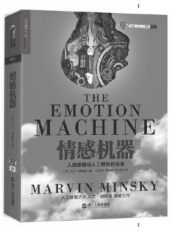
扫码直达本书购买链接

《情感机器》

◎ 人工智能之父、MIT 人工智能实验室联合创始人马文·明斯基重磅力作首度引入中国。

◎ 情感机器 6 大创建维度首次披露，人工智能新风口驾驭之道重磅公开。

◎ 中国工程院院士李德毅专文作序。

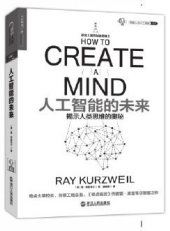


扫码直达本书购买链接

《人工智能的未来》

◎ 奇点大学校长、谷歌公司工程总监雷·库兹韦尔倾心之作。

◎ 一部洞悉未来思维模式、全面解析人工智能创建原理的颠覆力作。



扫码直达本书购买链接

《人工智能时代》

◎《经济学人》2015 年度图书。人工智能时代领军人杰瑞·卡普兰重磅新作。

◎ 拥抱人工智能时代必读之作，引爆人机共生新生态。

◎ 创新工场 CEO 李开复专文作序推荐！



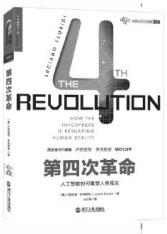
扫码直达本书购买链接

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

《第四次革命》

◎ 信息哲学领军人、图灵革命引爆者卢西亚诺·弗洛里迪划时代力作。

◎ 继哥白尼革命、达尔文革命、神经科学革命之后，人类社会迎来了第四次革命——图灵革命。人工智能将如何重塑人类现实？

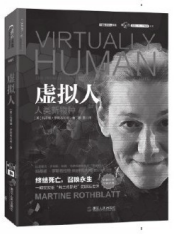


扫码直达本书购买链接

《虚拟人》

◎ 比史蒂夫·乔布斯、埃隆·马斯克更偏执的“科技狂人”玛蒂娜·罗斯布拉特缔造不死未来的世纪争议之作。

◎ 终结死亡，召唤永生，一窥现实版“弗兰肯斯坦”的疯狂世界！



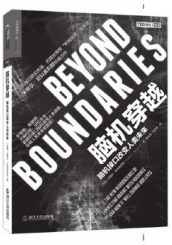
扫码直达本书购买链接

《脑机穿越》

◎ 脑机接口研究先驱、巴西世界杯“机械战甲”发明者米格尔·尼科莱利斯扛鼎力作！

◎ 外骨骼、脑联网、大脑校园、记忆永生、意念操控……你最不可错过的未来之书！

◎ 2016 年第十一届“文津图书奖”科普类推荐图书 15 种之一。

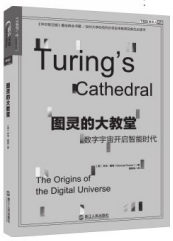


扫码直达本书购买链接

《图灵的大教堂》

◎《华尔街日报》最佳商业书籍、加州大学伯克利分校全体师生必读书。

◎ 代码如何接管这个世界？三维数字宇宙可能走向何处？



扫码直达本书购买链接

[1]这段对话的开头一般是：“哦，天文学！我是处女座耶。”当我解释说，更准确地讲应该是“宇宙学”时，一般会得到的回答是：“哦，化妆师！”（“宇宙学”的英文“cosmology”和“美容”的英文“cosmetology”发音接近。）接下来，他们就会开始问我关于眼线和睫毛膏的问题。

[2]示波器是一种用途十分广泛的电子测量仪器，它能把肉眼看不见的电信号转变成看得见的图像，便于人们研究各种电现象的变化过程。——编者注

[3]地球半径近似于$d^2/2h$，其中h是船帆的高度，d是你能看到船帆在海平面的最远距离。

[4]从数学上来说，这两种不同的观点对应着两个不同的空间坐标系，爱因斯坦的理论允许你自由挑选时空坐标系。

[5]氘是氢的同位素，也是它的“大哥哥”。它的质量是氢的两倍，因为它不仅含有一个质子，还含有一个中子。

[6]太初核合成只产生了25%的氦元素，恒星在此基础上继续产生了更多的氦元素。氦元素的这两个来源可以用望远镜来区分——我们越往回看，看到的氦就越少，最后，在恒星还未诞生的纪元，我们看到的氦最少，正好等于25%。

[7]伟大的科学发现通常并不是一人之力可以完成的，暴胀理论的发现和发展也不例外。对这个理论作出杰出贡献的人有：阿兰·古斯、安德烈·林德、亚历克西·斯塔宾斯基（Alexei Starobinsky）、佐藤胜彦（Katsuhiko Sato）、保罗·斯坦哈特（Paul Steinhardt）、安迪·阿尔布雷克特（Andy Albrecht）、维亚切斯拉夫·穆哈诺夫（Viatcheslav Mukhanov）、根纳季·西比索夫（Gennady Chibisov）、斯蒂芬·霍金、皮瑞英（So-Young Pi）、詹姆斯·巴丁（James Bardeen）、迈克尔·特纳（Michael Turner）、亚历克斯·维兰金（Alex Vilenkin）等人。本书“推荐阅读”部分，在我为你列出的许多书中，你都能找到与之有关的有趣故事。

[8]我们对万有引力的测量值只精确到了前4位，所以剩下的20位是我为了画图而进行的猜测。

[9]菲利普·赫尔比格（Phillip Helbig）等人指出，平坦性问题常被误传和夸大，但它真的很严重，因为上一章讨论过的宇宙聚集成团早就会使平坦宇宙发生随机的弯曲。

[10]如果你内心充溢着成为造物主的冲动，我强烈推荐你读一读物理学家布赖恩·格林的著作《隐藏的现实》中对“渴望创造宇宙的人”的建议。

[11]正如我们在第2章中所看到的，这个距离大于140亿光年，因为光线所经过的空间发生了膨胀。

[12]尽管从本质上说，你确实能掉进一个黑洞，并观测里面究竟发生了什么事（只要它的潮汐力一开始没有把你扯成面条），但是你却没法在科学期刊上发表你的发现，因为你实际上是有去无回的，就像手握一张单程车票。

[13]如果宇宙膨胀持续加速（目前这是一个悬而未决的问题），可观测宇宙将会最终停止增长——因为存在一个特定的距离，在此之外，所有星系的退行速度都将超过光速，所以将永不被我们所见。

[14]这是一个极其保守的估计，只是简单加总了不比10^8℃更热时，宇宙（视界体积）中量子态的可能性。尽管实际的计算还需要更多量子力学的细节，但10^{118}这个数字大致描述了在此温度下，泡利不相容原理所允许塞进宇宙的质子数量（我们自己的宇宙中仅包含10^{80}个质子）。如果这10^{118}个质子“插槽”拥有被占据和不被占据两种状态，那可能存在的组织方式数量将上升到$2^{10^{118}}\sim10^{10^{118}}$。

[15]这相当于2的n次幂，其中n等于我们的宇宙以普朗克单位制来计量的表面积。在本书的“推荐阅读”中，有一些莱尼·萨斯坎德（Lenny Susskind）和布赖恩·格林写的书。这些书详细介绍了全息原理的方方面面，以及它从一些杰出的科学家脑中发展至今的历程。

[16]如果你喜欢研究数字，请注意，$10^{10^{118}}$个宇宙直径$\approx10^{10^{118}}\times10^{27}$米$\approx10^{10^{118+27}}$米$\approx10^{10^{118}}$米。如果你想向每个方向去寻找你最近的那个分身，那你需要探索一个以我们为中心的球形区域，其中包含着$10^{10^{118}}$个宇宙，所以这个区域的直径比我们的宇宙大多了，倍数为$(10^{10^{118}})^{1/3}\approx10^{10^{118}/3}\approx10^{10^{117.53}}\approx10^{10^{118}}$。

[17]只要暗能量还在周遭潜行，我们的宇宙就会一直加速下去。这样一来，大部分第一层平行宇宙可能会永远分离，因为它们之间的空间被拉伸得太快，比光速还快，连光线都无法穿行。但是现在，我们对暗能量还知之甚少，不知道这样的事情会不会真的发生。

[18]第二层多重宇宙理论的发现和进步离不开以下这些科学家：安德烈·林德、亚历克斯·维兰金、阿兰·古斯、西德尼·科尔曼（Sidney Coleman）、弗兰克

·德卢西亚（Frank de Luccia）、拉斐尔·布索、乔·波钦斯基（Joe Polchinski）、莱尼·萨斯坎德、沙米特·卡赫鲁（Shamit Kachru）、雷娜塔·卡罗希（Renata Kallosh）、桑迪普·特里维迪（Sandip Trivedi）等人。如果你想了解第二层多重宇宙是如何一步步建立起来的，在本书“推荐阅读”部分，我为你推荐了布赖恩·格林、莱尼·萨斯坎德和亚历克斯·维兰金最近几年的著作。格林和萨斯坎德这两位弦理论的先驱在各自的著作里都对其做了很好的介绍。

[19]李·斯莫林，知名理论物理学家，加拿大圆周理论物理研究所创始人之一，被誉为“新时代的爱因斯坦”。他在《时间重生》一书中研究了时间的真实性，而我们如何理解时间，决定了我们如何思考未来，该书中文简体字版已由湛庐文化策划出版。——编者注

[20]总共有80种稳定的原子，它们包含的质子数从1（氢）到82（铅）不等，只有43（锝）和61（钷）例外，因为这二者拥有放射性，不稳定。在稳定的原子中，大部分都拥有一个以上的稳定版本，这些版本的质子数相同，但中子数不同（被称为同位素）；如果算上同位素，那么稳定的原子总共有257种。如果我们算上约30种半衰期超过8 000万年的同位素，以及50多种更加短命的原子，地球上自然中的同位素总共有338种。

[21]电子在撞到质子前，旋转的圈数大约为$1/8\pi\alpha^{3}\sim10^{5}$，其中$\alpha\approx1/137.03599\ 968$，这是电磁力的一个无量纲量，也叫作精细结构常数。

[22]实际上，玻尔所做的事并非如此，但在数学上是等价的，即假定电子旋转时的角动量是量子化的，并且只允许等于“约化普朗克常量”的n倍，等于$h/2\pi$。与动量类似，你可以把一个物体的角动量看成是使物体停止转动所需花费的时间乘以所需的平均转矩（扭力）。一个物体绕半径为r的圆周运动，假如动量为p，则角动量为rp。

[23]轨道能量为E^{2}_{1}/n，其中，E_1是最低半径的能量，所以，在轨道n_1和n_2之间跃迁，电子释放出的光子具有的能量等于$(1/n_2^2-1/n_1^2)E_1$。

[24]在高速运行的汽车轮胎中，也能观察到同样的现象，由此形成的声波会在管道中产生共振，可能会害你花很多钱来维修。

[25]具体地说，如果一个粒子的位置不确定性为Δx，动量不确定性为Δp，那么，根据海森堡不确定原理，$\Delta x\Delta p\geqslant/2$，其中是约化普朗克常量，如前面所提到过的，$=h/2\pi$从数学上来说，某个量的不确定性是指它的概率分布的标准差。

[26]实际上，最后一个数字颇有争议，许多人认为它不应该被算进来，因为如果重新定义一下时间单位，它就能等于1。如果你想获得更精确的数字，让每个小数位都符合观测结果，你只需要再扔进去几个数字，让它更好地模拟不同的原子核就行了（比如，中子质量比质子多0.1%，诸如此类）。

[27]如果你更喜欢矢量，那么，描述这个状态只需要用到位置矢量r及其对时间的导数r（也就是速度矢量）就行了。

[28]如果你是一个数学狂人，喜欢复数，那你一定很开心，因为对于空间中的每个位置r，粒子的波函数都对应着一个复数Ψ（r）。在这本书里，我所提到的波函数“平方”只是一个简称，它实际上是$|\Psi|^2$，是波函数绝对值$|\Psi|$的平方，是实部平方与虚部平方的乘积。当然，如果你并不是数学狂人，也没关系，因为即使你搞不懂这个，也一点不妨碍你理解这本书的中心思想。

[29]还有一个类似的经典实验，是让一颗银原子穿过一个所谓的“施特恩-格拉赫装置”（Stern-Gerlach apparatus），根据自旋的不同，会出现在不同的位置。

[30]校报《加州日报》（*The Daily Cal*）上引用了我说的一句话，并在后面加上了一句：“这是根据一位住在对门宿舍的瑞典学生所说，他要求匿名。”此后几天，我的朋友们一见到我就说：“嗨，迈克斯，你今天看起来可真匿名！”

[31]那种认为在某一个神奇的时刻，现实会经历某种超自然的分裂，从而形成两个永不相交的支线的观念，不仅是对埃弗雷特的误读，并且与他“波函数永不坍缩”的假设相矛盾，因为接下来的发展本质上是可能让分支产生互相干涉的。根据埃弗雷特的理论，过去、现在和未来都只有一个波函数，只有退相干计算（我将在后文进行解释）才能告诉我们何时才能把“不相交的分支”看作绝佳的近似，这并非假设。

[32]如果你真要做这个实验就会发现，这张扑克牌很快就会被细微的气流弄倒，所以，你也可以换一种方式，选用一张下边缘稍厚一些的普通扑克牌，并用一台量子装置（比如薛定谔的放射性原子开关）来控制它倒下的方向。

[33]在这个拥有无限多维数的空间内，波函数相当于一个点。根据薛定谔方程，这个点会以固定的距离，围绕着空间的中心旋转。

[34]有趣的是，波莱尔的定理给当时很多数学家都留下了很深刻的印象。当时一些数学家觉得，概率论的整个概念太哲学化了，没法被看作严格的数学。突然

间，波莱尔怀揣一个深入经典数学核心的定理出现在他们面前，用概率论重新改写了经典数学，但这个定理自身却根本没有提到“概率”二字。如果波莱尔知道他的工作不仅将概率论引入了数学，还引入了未来的物理学，毫无疑问，他一定会很有兴趣。

[35]密度矩阵是波函数的一般化概括。每个波函数都有一个对应的密度矩阵，密度矩阵又对应着薛定谔方程。如果你喜欢数学，对每个可能的状态i，你都可以把它的波函数Ψ看作Ψ_i，则对应的密度矩阵就是$P_{ij}=\Psi_i \Psi_j^*$，其中那个星号代表复共轭性。如果你不知道某个对象的波函数，只知道几个特定波函数的概率，那么你可以用这些波函数密度矩阵的加权平均值来表示它的密度矩阵。

[36]他们声称，我所检验的微管模型并不是罗杰·彭罗斯的书中所提出来的，不过2006年，斯图尔特大方地承认了这个错误。他们还辩称，我的计算有缺陷，因为我算出的退相干时间会随着大脑温度的降低而减少，尽管这违背直觉。他们忽略了一点，那就是，只要你把大脑的绝对温度降低10%，降到0℃以下，大脑就会冻结，此时退相干时间会极大地增加。但如果只将温度降低一点点，退相干时间反而会略有降低。这反映了一个众所周知的事实：当你降低温度时，物体会更容易相撞，就像核反应堆里的慢中子比快中子更容易撞击靶标一样。他们还争辩说，大脑也可能是用其他机制来进行量子计算的，但没有说清到底是什么机制，也没有提供足够的细节，让我无从验证。他们还说，大脑中也可能存在其他非计算型的量子效应，这一点我倒是从一开始就没有反对过。

[37]如果你不反感数学，你可以仔细读读这篇论文（扫码获取论文），因为其中还将这个结果和暴胀结合起来，解释了为何宇宙早期的熵如此之低，从而解释了所谓的时间流向。它也为人们利用新信息更新自己知识的标准流程（贝叶斯定理）提供了量子力学的一般化解释。本书的“推荐阅读”中推荐的肖恩·卡罗尔（Sean Carroll）和迪特尔·泽写的书中也有优美的解释。

[38]比如，这个粒子可以是一个银原子，用一个所谓的施特恩-格拉赫装置来测量它的自旋；也可以是一个光子，面前摆着一面半镀银镜，它可能穿过银镜，也可能被反射回来。

[39]英国哲学家保罗·阿尔蒙德（Paul Almond）对此话题有一个有趣的抗辩，我将在第10章告诉你。

[40]坊间流传着许多“信封背面写满数学公式”的故事，但我发现这很奇怪，因为在我的个人经验里，大多数即兴演算实际上都出现在餐巾纸上，尽管它们很容易撕碎，书写体验也很糟糕。

[41]如果你对心理学家、神经科学家、哲学家等关于意识的文献感兴趣，可以参考文末“推荐阅读”中的书。

[42]指从2001年1月1日至3000年12月31日的1 000年。——译者注

[43]爱因斯坦意识到，既然处于同一位置，并且运动状态相同的观察者的共识实在也相同，那么两组相对运动的人就会拥有不同的共识实在。也就是说，可能存在许多不同的共识实在，但它们的差异可以用物理学效应来解释，而与观察者的意识或内部结构无关。

[44]在nobelprize.org这个网址，你会发现，爱因斯坦于1922年荣获诺贝尔物理学奖，但获奖原因是“为他对理论物理学的贡献，特别是发现了光电效应”。然而，我有一个在诺贝尔奖委员会工作的瑞典同行曾向我展示过一份不为人知的完整文本，我将翻译附在下面。其中一些语句被我标成了粗体，看起来很像是某些坏脾气的人插入的滑稽警告，以表达他们对相对论的担忧。然而今天，人们已一致认为，相对论是人类思想最伟大的珍宝。瑞典皇家科学院在1922年11月9日召开了会议，遵照阿尔弗雷德·诺贝尔于1895年11月27日立下的遗嘱，决定将此奖授予1921年物理学领域作出最大发现或发明的人，阿尔伯特·爱因斯坦，为他对理论物理学的贡献，特别是发现了光电效应，但该决定与他的相对论和引力理论无关。

[45]杰克博士和海德先生是同一个人，来自罗伯特·史蒂文森（Robert Stevenson）的名作《化身博士》（*The Strange Case of Dr.Jekyll and Mr.Hyde*）。杰克博士因喝下自己配制的药剂而化身为邪恶的海德先生。人们常用“杰克与海德”来指代双重人格。——译者注

[46]我还会对“海德先生”的论文进行策略性的时间控制。政客们通常会在星期五下午公布一些令人沮丧的消息，给人们两天时间用来遗忘，这样它们就不会成为下个星期的新闻。我也采取了同样的策略。1996年夏天，我刚刚获得普林斯顿大学博士后职位之后，就开始写那篇所谓的“想入非非的论文”，因为我知道，这能在我下次找工作之前，将人们遗忘的时间最大化。

[47]我的爱好从集邮变成了收集那些答案为42的酷问题。以下是我最喜欢的几条：·这本书是在什么纬度写的？·那个彩虹的半径范围用角度表示是多少？·黑洞周围的气体最多能有多少百分比会被黑洞吞噬？黑洞吞噬物质其实很像喂婴儿：许多物质都以高速向你喷回来……黑洞能吞噬掉的气体占周围总气体的百分比为：$1-1\sqrt{3}\approx42\%$。

[48]图9-2中的篮球轨迹是一个抛物线，但实际上，如果我们把地球压缩成一个黑洞，使篮球不会受到地面的阻挡，那么它轨迹中的抛物线部分将保持下去，延展成一个完整的椭圆形，围绕着中心的黑洞旋转。

[49]这两个质量的比值的精确度比它们各自质量的精确度都高，因为二者的测量误差是高度相关的。

[50]罗杰·彭罗斯在他的著作《通向实在之路》（*The Road to Reality*）中也表达过同样的意思。

[51]西班牙语的“2加2等于4”。——译者注

[52]在哲学著作中，约翰·沃勒尔（John Worrall）创造了一个词“结构实在论”（structural realism），作为科学实在论和反科学实在论之间的妥协产物。大致来说就是，实在的根本性质只能用数学化或结构化的科学理论来正确描述。不同的科学哲学家对这个词有不同的解读。戈登·麦凯布（Gordon McCabe）声称，由于我的理论认为我们的物理宇宙与数学结构是同构型的，所以应该称其为“宇宙结构实在论”（universal structural realism）更合适。

[53]我们的大脑是“性质源自关系”的另一个实例。根据神经科学中所谓的概念细胞假说，不同神经元群组的特定放电模式对应着不同的概念。不同概念（如红色、飞翔和安吉丽娜·朱莉）之间的主要差异显然并不来自涉及的神经元个体，而是它们与其他神经元之间的关系（神经联结）。

[54]许多人都提出和探索过这种思想——“时间是恒常不变的实在中的第四维”，包括著名小说家赫伯特·威尔斯（Herbert G.Wells）在1895年的小说

《时间机器》（*The Time Machine*）中也提到过。物理学家朱利安·巴伯在他的著作《时间尽头》中讲述了这种想法及其历史。

[55]为了简化，图10-1忽略了以下几个事实：地球和月球的自转，月球的轨道略微呈椭圆形（而非正圆形），以及月球的万有引力也让地球发生着半径约为地球半径74%的圆周运动。

[56]布赖恩·格林在《隐藏的现实》一书中再三强调了这个结论。他指出，根据爱因斯坦的相对论，如果你开始运动，那么图10-2中将过去和未来分隔开的水平切片会发生倾斜。这么说来，你只需走快一点，就能让遥远的一颗超新星爆炸从“已经发生”变成“还未发生”。很显然，过去与未来之间的区别还有什么基本性可言呢。

[57]如果你有数学背景，并对“同构”（isomorphism）的概念很熟悉，那么你可以说：从数学结构的定义来说，如果一个数学结构与其他结构之间存在同构（保留了关系的一一对应性），那么，它们就是同一个。如果我们的外部物理实在与一个数学结构是同构的，那么它就符合了一个数学结构的定义。

[58]如果克隆指令来自一台人体扫描仪，扫描仪会分析原始的那个你，克隆指令以无线的方式传导，那么，我的时空之辫和我的克隆体可能依然以一种非常精妙的模式在电磁场中相连。但是，如果一个与我完全相同的版本在第一层多重宇宙（见第5章）中醒来，他也会感觉到与C点相连，但这两个版本之间并未进行任何信息交换。

[59]如果你想了解过去2 000年间人类对时间体验的详细讨论，以及关于该主题的丰富的哲学文献，可扫码获取相关内容。特别要提到的是，约1600年前，圣·奥古斯丁（Saint Augustine）首次提出，时间知觉（如持续的时段）的关键部分只能解释为对记忆的感知。数学宇宙假说为这些问题带来了新的紧迫感。



[60]信息含量是一个随意的称呼，它的技术术语应该叫作“物体和外部世界的交互信息量”。

[61]这与条形码、硬盘、移动通信等现代信息科技所使用的所谓“冗余”（redundancy）和“错误矫正码”（error-correcting codes）有着密切的联系：你使用的比特数比最低要求多一些，并采用一种巧妙的集合方式来编码你的信息，这样，即使你损失了少许比特，也不会损失任何信息。我们的大脑似乎也使用了同样的冗余结构，因为它并不依赖于单个神经元，即使少许神经元死去了，也不会影响大脑的正常功能。也许，正是由于从进化论的角度来看冗余十分有用，所以才进化出了意识。

[62]古罗马诗人昆图斯·贺拉斯·弗拉库斯（Quintus Horatius Flaccus）著有拉丁文诗集《颂歌》，其中包括一句格言“活在当下”（carpe diem）。——译者注

[63]你可能已经注意到了，《黑客帝国》中的大部分模拟角色其实都发生在真正的人脑内。相比之下，另一部电影《异次元骇客》中的一些模拟人物却不具备任何人类“硬件”。

[64]作者的意思是，包括过去曾经活过的、现在正在生活的以及未来即将出生的所有人口。——译者注

[65]2016年1月，互联网梅森质数大搜索（Great Internet Mersenne Prime Search）又发现了一个更大的质数2 74207281-1，这个数共有223 386 18位数。——译者注

[66]科学哲学的传统方法认为，一个数学物理学理论可以被分解成：第一，一个数学结构；第二，一个经验域；第三，一组对应规则，将数学结构中的各部分与经验域中的各部分连接起来。如果数学宇宙假说是正确的，那么第二条和第三条都是冗余的，因为至少从本质上说，它们都可以从第一条中推导出来。相比之下，它们可以被看成是第一条所定义的理论的“便利用户手册”。

[67]雷·库兹韦尔，21世纪最伟大的未来学家，奇点大学校长、谷歌公司工程总监。推荐阅读其著作《人工智能的未来》，这是一部洞悉未来思维模式、全面解析人工智能创建原理的颠覆力作。该书中文简体字版已由湛庐文化策划出版。——编者注

[68]实际上，正如肯·沃顿（Ken Wharton）在论文《宇宙不是一个计算机》（*The Universe Is Not a Computer，扫码获取该论文*）中所提到的那样，我们的物理定律有可能并不能从过去唯一地确定出未来，所以，“我们的宇宙是模拟的”这种想法从本质上说只是一个假说，不能认为是理所当然的。



[69]如果随机标志的数量为n个，那么，允许出现停车区域的概率为$(n+1)/2^n$；一旦标志被放置好，箭头向左或向右的方式就会有2^n种，在这些方式中，只有$n+1$种方式对应着左箭头放置在所有右箭头左侧的情况。

[70]将这种离散微调性的定义一般化，扩展到多个参数的情况，是很容易的事情。

[71]这种对物理学的本体论扩展，让人想起过去几个世纪中数学的本体论扩展。数学家将其称为泛化（generalization），意思是说，我们所研究的东西是某个更大结构的一部分。

[72]埃利斯的文章并没有真的提到第2点，但是我还是在这里加上了这一点，因为我认为，如果编辑允许他写超过6页的话，他一定会把这条写进去。

[73]大多数不稳定性都与某种时空的自我增殖/连锁反应有关。例如，森林中燃烧的树木会引起更多树木燃烧，核弹中的自由中子会产生更多自由中子，黑死病携带者会传染给更多的携带者，一个成功产品的消费者会带来更多的消费者。

[74]经济学家罗宾·汉森（Robin Hanson）对第一个假设提出过一个有趣的观点。银河系中存在大量宜居的行星，然而我们却从未见过天外来客，这个矛盾被称为“费米悖论”（Fermi Paradox）。这意味着存在一个机制，被汉森称之为“大筛选”（Great Filter），意思是说，从非生命发展到太空殖民种族之间的路径上，一定有某处存在着一个进化或科技障碍。如果我们在太阳系中发现了其

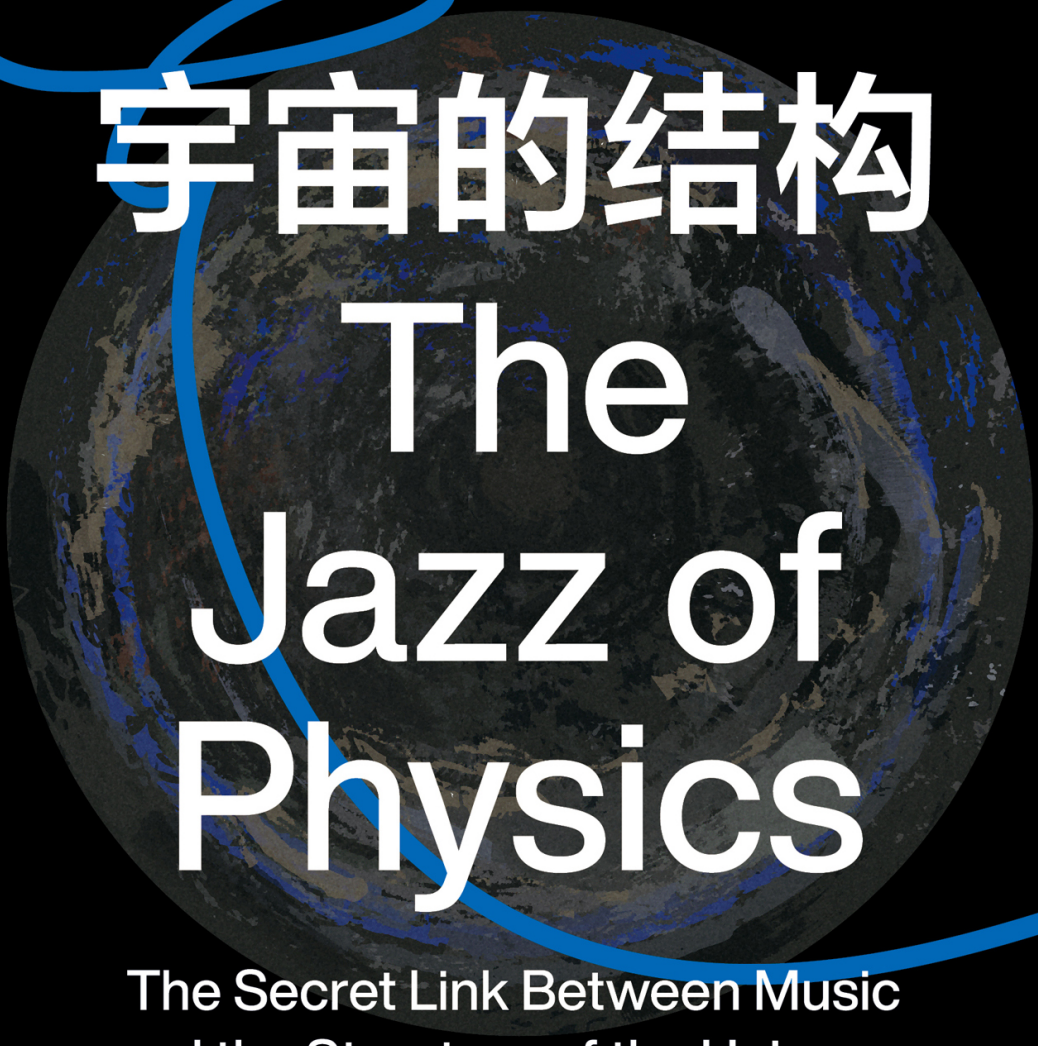
他独立进化出来的原始生命，这可能意味着原始生命并不罕见，因此，障碍就可能存在于我们目前的人类发展阶段之后——有可能是第一个假设错了，也可能是几乎所有高级文明在他们获得太空殖民的能力之前都会自我毁灭。我祈祷着人类在火星等地方对生命的搜寻都一无所获，因为这就符合“原始生命很罕见，所以我们人类很幸运”的情景，这样，那个障碍早已被抛在我们身后，这意味着我们未来拥有非凡的潜力。

[75]约翰·格里宾（John Gribbin）在他2011年的《独在宇宙中》（*Alone in the Universe*）k一书中得到了一个类似的结论。关于这个问题的一系列迷人的观点中，我还要推荐保罗·戴维斯2011年所著的《可怕的寂静》（*The Eerie Silence*）k一书。

CHEERS
湛庐

无限空间里上演的
一场即兴演出

宇宙的结构
The Jazz of Physics



The Secret Link Between Music and the Structure of the Universe

[特立尼达和多巴哥共和国]
Stephon Alexander
斯蒂芬·亚历山大 著　符玥 译

中原出版传媒集团
中原传媒股份公司
河南科学技术出版社

版权信息

本书纸版由河南科学技术出版社于2020年6月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：宇宙的结构

著者：斯蒂芬·亚历山大

电子书定价：89.99元

The Jazz of Physics: The Secret Link Between Music and the Structure of the Universe

Copyright © 2016 by Stephon Alexander

All rights reserved

前言

以爵士之眼，透视物理学之奥秘

正是直觉告诉我，音乐是直觉的原动力。我的这项发现源自乐感。

——爱因斯坦

（当他被问到有关相对论的问题时）

我最为珍视类比法，它是我最信赖的导师。它们洞悉了自然界中的一切奥秘，但在几何学等领域中被忽视了。

——开普勒

人类是独一无二的存在。在宇宙诞生110亿年之后，在被我们称为“地球”的这颗行星上，富含矿物质的海洋充满生机，这种条件刚好适合孕育生命——不断发展、进化的艰难求存者。在宇宙演化的最后一段时期，人类已经成长起来，一边辛勤地耕作，一边大胆地仰视天穹，以探究“我们从哪里来”的大问题。

每一文化背景下的人都曾沉思：人类是如何诞生的？宇宙又是如何形成的？我们周围的空间是什么？人类来自哪里？无疑，这些我们在孩提时代就问过的问题，在科学界依然是最难回答的。这类问题既出于我们与生俱来的对自我起源的好奇，又出于我们自身知识的局限性。几千年来，我们只能用神话来作答。而从科学革命开始，我们一直在试图抛开神话，让科学家及其所应用的唯实的方法论来回答人类与宇宙的起源问题。虽然现代宇宙学家用复杂的方程和高科技的实验来佐证自己的理论，但他们可以说是我们这个时代的“神话制造者”。虽然我们进行了精确的数学计算与实验，但现代物理学和宇宙

学中还是不断出现新的问题，这迫使一些杰出的物理学家制造出某些神话，以解释人类在探索宇宙本质的过程中所发现的令人费解的现象。

科学家曾竭尽全力向普通读者解释那些构成现代宇宙学基础的概念，但在书中解释这些概念并非易事，因为用通俗的语言来阐释广义相对论、量子力学这些通常用数学语言来描述的学科，实在是困难重重。那些复杂的方程甚至会蒙蔽物理学家的眼睛，以至于想完全理解或是设想出这些公式到底意味着什么，于他们自身而言都是一项艰巨的挑战。这一事实表明，我们需要另辟蹊径，以清晰的物理图像或类比法来呈现宇宙的结构。我发现，在思想交流方面，最成功的书籍必然都找到了最合适的类比法来映现物理学。实际上，类比推理法也是本书阐释的关键。

《宇宙的结构》这本书将带你进入理论物理研究进程之旅的最前沿。你将看到，与物理定律中固有的逻辑结构相反，在试图展示我们理解中的新远景时，我们通常必须接受一些荒诞且不合逻辑的演示过程，有时这些过程中还充满了缺乏深思熟虑的错误想法。对爵士乐手与物理学家来说，在各自的领域内努力掌握技术和理论固然十分重要，但若是想创新，他们就必须超越自身已经精通的技能。于理论物理而言，创新的关键是类比推理法。正确的类比是一门艺术，在本书中，我将向读者展示它是如何帮助我们开辟新天地，并横贯隐藏的量子世界，直抵宇宙广袤的超结构的。

在本书中，我将以音乐作为类比，它不仅能帮助我们理解现代物理学和宇宙学中的许多知识，还有助于揭开物理学家面对的一系列最新的谜团。在撰写本书时，通过这种类比思维，我甚至发现了解决早期宇宙学中一个长期存在的问题的新方法。理解这一点的关键是“最初的结构是如何从空无一物、毫无特征的婴儿宇宙中产生的”，这也是宇宙学中一个重大的开放性问题。那些基本的物理定律以错综复杂

的方式一起运作，从而创造并维持了宇宙那包罗万象的结构，而宇宙的结构则可以解释我们的存在，这听起来很不可思议——正如乐理的框架催生了从《一闪一闪亮晶晶》到爵士乐萨克斯演奏家约翰·柯川（John Coltrane）的《星际空间》（Interstellar Space）的一切一样。在三位伟人（柯川、爱因斯坦和毕达哥拉斯）的启发下，通过跨学科研究，我终于发现，“绽放”的宇宙那“魔法般的”行为正是建立在音乐的基础之上。

大约10年前的一天，我独自坐在马萨诸塞州阿默斯特镇（Amherst）主街上一家灯光昏暗的餐厅里，正为一份物理学报告做准备。突然之间，我产生了一种冲动。我找到了一台投币电话和一本本地的电话簿，并鼓起勇气给尤瑟夫·拉蒂夫（Yusef Lateef）打了个电话。拉蒂夫是一位传奇爵士乐音乐家，刚从马萨诸塞大学阿默斯特分校音乐系退休。但是那个时刻，有件事我必须告诉他。

怀着激动的心情，我的手指颤抖着在电话簿的条目之间划过，紧张地寻找着拉蒂夫教授的电话号码。终于，我找到了！当我拨出那个号码时，新英格兰轻快的秋风吹拂着我的面庞。冒着给对方留下粗鲁印象的风险，我一直在等他接听。

“你好？”终于，一道男性的声音从电话那端传来。

“你好，请问拉蒂夫教授在吗？”我问道。

“拉蒂夫教授不在。”那个声音直截了当地说。

“我可以给他留言吗？是有关1961年柯川作为生日礼物赠送给他的一幅图，我认为我找到了它潜藏的意义。”

电话那端的人沉默起来，良久之后说道：“我就是拉蒂夫。”

关于那张出现在拉蒂夫教授广受好评的《音阶与旋律图谱大成》（*Repository of Scales and Melodic Patterns*）一书中的图，我们聊了将近两个小时，这本书是对来自欧洲、亚洲、非洲，乃至全世界

的音阶的汇编[1]。我表达了自己的观点，即那张图是如何与另一个看起来毫不相关的领域——量子引力联系在一起的。量子引力是一个宏伟的理论，它试图将量子力学与爱因斯坦的广义相对论统一起来。我告诉拉蒂夫教授，推动爱因斯坦的理论的几何原理也出现在柯川的图中。实际上，爱因斯坦是我心目中的英雄，柯川与拉蒂夫也是。

拉蒂夫教授告诉了我一些重要的信息，即那张图与四度圈和五度圈很相似。他对哲学和物理学也有着浓厚的兴趣，并且向我讲授了他的“自动灵魂治疗”(1)音乐的概念，这是一种来自人类身体、精神以及灵魂的音乐。[2]在我将宇宙与音乐建立起联系的后续研究中，这个概念发挥了重要的作用。拉蒂夫鼓励了我，并且肯定了我的想法，即音乐与宇宙结构之间有着深刻的联系。那一天就像一幅立体图画般逐渐清晰起来，我在物理学与音乐两个领域中的平行生活在我眼前慢慢融合，最终创造了一个新的图景。

柯川深深地痴迷于爱因斯坦及其理论。爱因斯坦因其对物理学的直觉超越数学局限的能力而出名，这可能是他最大的天赋。他总是通过“思想实验”（gedankenexperiments，德文）来进行即兴推演，从而想象出那些无人能完成的实验的结果。例如，爱因斯坦曾想象：如果乘着一束光旅行，会是什么感觉呢？成功地想象出结果是需要洞察力的。爱因斯坦拥有的另一项资源正是音乐。他会弹钢琴，虽然这一事实并不广为人知。他的第二任妻子埃尔莎曾说：“音乐有助于他思考自己的理论。工作时，爱因斯坦偶尔会走到钢琴前弹奏几个和弦，记下某些东西后，又回到研究之中。”一方面，爱因斯坦运用了数学的严谨性；另一方面，他又有着非凡的创造力与敏锐的直觉。本质上，他是一位即兴演奏者，正如他心中的英雄莫扎特一样。爱因斯坦曾表示：“莫扎特的音乐既纯粹又美丽，在我看来，它是宇宙内在美的一种映射。”

柯川的曼荼罗（图0-1）让我意识到，即兴演奏是音乐与物理学的一个共同特征。与爱因斯坦进行思想实验一样，某些爵士乐即兴演奏者在独奏时也会在脑海中构建一些图案和形状。我猜想，这正是柯川所绘图案的意义。

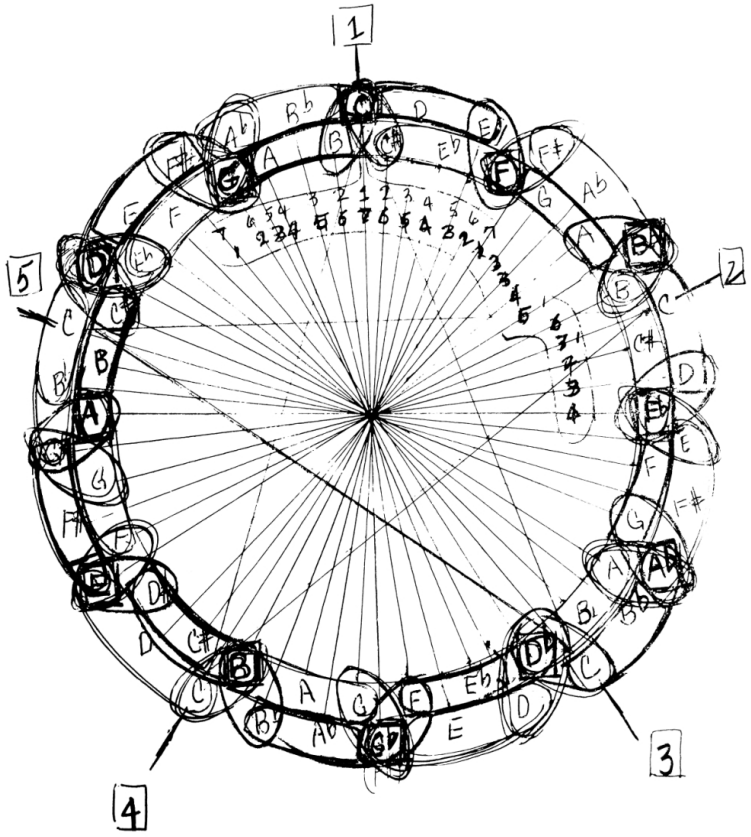


图0-1　柯川的曼荼罗

注：柯川于1961年作为生日礼物赠送给拉蒂夫的图。

图片提供者：艾莎·拉蒂夫（Ayesha Lateef）。

柯川于1967年逝世，仅在阿尔诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）与罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）发现宇宙微波背景辐射（CMB），即宇宙大爆炸残留物两年之后。这项发现推翻了静态宇宙论，并且证实了宇宙膨胀理论，正如爱因斯坦的引力理论所预示的那样。在柯川最后录制的唱片专辑中，有三张分别名为《恒星区域》（*Stellar*

Regions）、《星际空间》和《宇宙之声》（*Cosmic Sound*）。柯川的音乐中包含着物理学，并且令人难以置信的是，他正确地意识到了宇宙膨胀是反引力的一种形式。在小型爵士乐团中，“引力”的拖曳来自节奏乐器中的贝斯和鼓。《星际空间》中的曲目就是柯川磅礴的独奏表演，它们不断膨胀，最终挣脱了节奏乐器的引力拖曳。柯川是一位音乐革新者，对物理学知识信手拈来。爱因斯坦是一位物理学的革新者，对音乐了如指掌。不过，他们之所为并不新奇。他们都是在重建音乐与物理学的联系，这种联系是几千年前毕达哥拉斯（那个时代的“柯川”）第一次提出音乐中的数学时建立的。由此，毕达哥拉斯的哲学变成了“万物皆数”，而音乐与宇宙都是这种哲学的表现形式。“天体之声”在行星轨道的数学模型中回响，以一根振动的弦演奏着和声。

追随着柯川和爱因斯坦的脚步，在《宇宙的结构》这本书中我们也会重游古老的王国，在那里，音乐、物理学与宇宙是一体的。我们将会看到毕达哥拉斯与其他人是如何理解声音的，以及他们的思想与实践是如何经开普勒和牛顿等伟大思想家的改造，最终发展成我们今天所理解的弦与波的动力学的。2 500年后，弦理论的发明者正忙于研究如何用基本弦来统一自然中的4种基本作用力，但他们中有多少人记得或者重视这样一个事实：他们理论中的一个核心方程——波动方程，正是根植于对物理学和音乐之间的普遍联系的研究。

本书也是对类比法的力量的一次运用。通过类比法将物理学与音乐重新联系起来，我们就可以借由声音来理解物理学。我们将会看到，和声与共振是一种普遍现象，可以用来解释早期宇宙的动力学。我们还将看到，大量有关宇宙的数据表明，在大约140亿年前，一系列相对较简单的声音模式发展成了诸如星系和星系团这样的结构，并最终使行星与居于其上的生命的形成成为可能。

我们还将讨论生命的量子起源。在大多数音乐中，一个音阶中的音调的范围受到离散振动的限制。亚原子领域也充斥着离散的波包，这些波包被称为量子（相关学科因此被称为量子力学）。大型强子对撞机证实了希格斯玻色子（Higgs Boson）的存在，在此基础上，我们验证了构成许多物理实在性的范式正是量子场论（Quantum Field Theory）。这是一个在数学上令人生畏的物理学领域。让我们感到幸运的是，这个领域中的许多知识都可以通过音乐元素来理解。例如，量子对称性破缺在产生基本作用力与基本粒子方面至关重要，而音乐结构（如大调音阶）上的对称性破缺则创造出一种合成的分解感。在我们的探索之路上，即兴演奏将会发挥重要作用，为我们提供一种工具以理解量子世界那奇异的动力学：它内在的不确定性，以及“每个结果实际上都是所有可能的结果的叠加”的理念。

我意识到，若想解开理论科学的奥秘，最重要的工具除了数学就是简化正在使用的系统，并借助某些乍看上去可能完全不相关的学科来做类比。这些类比有其局限性，我们需要进一步研究才能找到通向新发现的大道。这就像跨学科的“跨礁玩浪”（rock hopping），从无知之岸跳向知识彼岸，而生命的长河从两岸之间汹涌而过。

从我们所能想象到的最小尺度到最大尺度，物理学在揭开大自然的秘密方面取得了前所未有的成功，但物理学界如今却陷入了困境。物理学家在一些基本问题上遇到了困难，比如宇宙的“微调”，这是自然中形成碳基生命的4种基本作用力相对强弱平衡的一个例子。但我认为，物理学会迎来一个兼容并包、多学科交融的新时代——这是一种即兴演奏式的物理学。这种物理学根植于交叉学科间的类比，将界限推向了类比法的极限。

这便是我的生命之旅。我是一个纽约出租车司机的儿子，我父亲来自特立尼达（Trinidad）。十几岁时，我便迷恋上了维克托·魏斯科普夫（Victor Weisskopf）的著作《有幸成为一位物理学家》

（*Privilege of Being a Physicist*）。我的家人则希望我学习音乐。“只有两种事物能赋予生命价值，”诺贝尔奖得主、该书作者魏斯科普夫说，“那就是莫扎特和量子力学。”我热爱莫扎特，但在那时，我对量子力学所知不多。然而，这最终成为一段长久的“爱情”的开端。这段“爱情”成就了我的未来，并且包含了除量子力学与莫扎特之外的许多事物，而宇宙学与柯川将成为这种激情的核心部分。在成为一位物理学家的过程中，我接触到了一些那时预料之外的名字。我为自己铺设了一条融合爵士乐与物理学的非凡之路，最终我成了一位理论物理学家。我能取得这些成就，离不开过去的20年里老师和朋友的指导与认可，其中包括诺贝尔奖得主、超导理论的先驱、热爱音乐的利昂·库珀（Leon Cooper），以及奥尼特·科尔曼（Ornette Coleman）和布莱恩·伊诺（Brian Eno）等热爱物理学的音乐家。他们使我明白了跨学科思维的重要性，以及类比法是扩展知识边界的重要手段。

领略这些重要人物的思想是我们旅行的一部分；按照乐理的节奏轻叩节拍是我们旅行的一部分；追寻宇宙结构的演化是我们旅行的一部分；在物理学与音乐之间构建类比是我们旅行的一部分；不进行精确的类比，以及清晰地论证问题所需的严格计算，也是我们旅行的一部分。

如何阅读本书

《宇宙的结构》这本书将探索现代物理学、相对论宇宙学以及乐理的诸多方面，但读者并不需要具备这些领域的专业知识，因为书中已经包含了这些内容。以我多年的经验来看，通过讲故事的方式来学习是一种既有趣又有效的方法，可以将物理学中的复杂理念传达给读者。本书中的许多故事都包含着意义深远的概念。有时书中会出现一些美丽的方程，但领会某个概念并不需要理解这些方程。如果你遇到

一个不理解的方程，我建议你直接跳过它，继续读下去。就我自己的经验而言，只要我定性地理解了一个概念，那么在事后我总能慢慢理解那个方程。尽管如此，我通常还是会用通俗的语言来推导和解释这些方程。

我邀请你加入一场物理学家与音乐家共舞的盛会；我期待你与我共同探究和质疑；我希望你严肃地对待音乐类比，也许我们可以通过它做出关于宇宙的新发现。让我们来即兴演奏吧！

想了解更多关于宇宙结构的奥秘吗？
扫码下载“湛庐阅读”App，
搜索“宇宙的结构”，
听作者更多精彩解读。

目 录

前言　以爵士之眼，透视物理学之奥秘
第一部分　当物理学与音乐相遇
01　巨人的步伐
音符的魔法
与爱因斯坦相遇
音乐是一个“物理事件”
像科学家一般“种下科学”
02　寻梦物理学，无所畏惧地向最难的问题发起进攻
库珀的诺贝尔奖之路
成为物理学家
探秘伊辛模型
03　通向宇宙结构的所有河流
爵士乐，通向实验思想的大道
宇宙大尺度结构如何而来
第二部分　音乐与那些科学家的故事
04　弦论，审视美丽宇宙之声
倾听宇宙的交响曲
物理之美，数学之美
与方程式“共舞”，在和弦变化之间“演奏”
05　毕达哥拉斯之梦
万物皆存在于数的和谐之中
从托勒密到牛顿，一场反直觉的探索
06　伊诺，音乐宇宙学家
李·斯莫林，还有我的新朋友
音乐视角中的傅立叶变换
宇宙是否也是一种即兴创作
07　在爵士乐中，打破物理学的界限

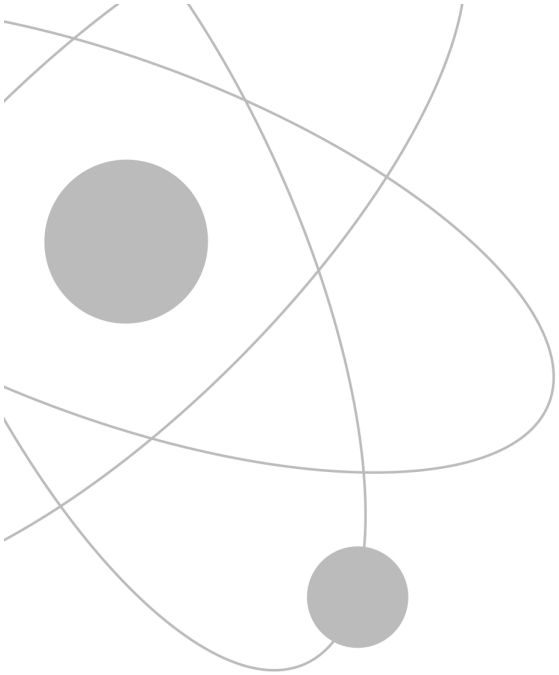
即兴创作与物理学
相对论中的6个音符
08　无处不在的振动
牛顿定律：一切孤立物体都有惯性
宇宙结构，某种振动模式的结果
第三部分　宇宙本身是否就是一件乐器
09　野心勃勃的物理学家们
退出物理学界，成为生物学新人
所有生命都是量子现象
10　我们生活于其中的空间
空间远比运动在其中的物质更有趣
爱因斯坦的方程可以用来描述整个宇宙的时空
“点燃”宇宙的膨胀
11　会发声的黑洞
黑洞，已知最神秘的天体
研究黑洞前，我们要知道声音如何在水中运动
听，黑洞正在“演奏”
12　声音与静默，宇宙结构的和谐旋律
一切都要归功于声音振动
引力与辐射，让声波不断响起
宇宙是一首音乐吗
13　马克·特纳的量子头脑之旅
海森堡不确定性原理
光子本质上还是一种波
14　费曼的爵士风
爵士乐是一种语言
音符像是在跳一场量子之舞
费曼的“即兴创作”
15　宇宙的共振
声音宇宙的奥秘
打开了一个潘多拉魔盒

第四部分　我们的音乐宇宙
16　噪声之美
聆听来自噪声的音乐
暴胀场正是我们宇宙的“导体”
有可替代的暴胀模型吗
17　音乐宇宙
宇宙是音乐的
宇宙之声正是这件乐器，而这件乐器正是宇宙之声
18　星际空间
把复杂简单化
创造一个结构，它终将理解宇宙自身
后记
致谢
注释

The Jazz of Physics

第一部分

当物理学与音乐相遇



01

巨人的步伐

The Jazz of Physics

音乐正是这样一种乐趣，它源自人类思维在计数上的经验，而人类却没有意识到这就是一种计数。

——莱布尼茨

音符的魔法

在一个炎炎夏日里，已为人祖母的露比·法拉（Ruby Farley）正襟危坐在自己的摇椅上，头戴一个华丽的加勒比风格的发带。孩子们在她位于布朗克斯的褐色砂石屋外玩着威浮球。祖母用她那悦耳的特立尼达口音喊着："哎呀，我才不管你会练习几个小时的钢琴呢，反正你必须练到掌握这首歌为止！"她8岁的孙子——也就是我，很难把手指放在正确的琴键之上。我泫然欲泣，因为我唯一能听到的"乐声"就是小伙伴在外面玩耍时发出的欢笑声。突然，祖母严肃的表情柔和了下来。她笑了笑，自言自语般唱道："啊，仿佛现在就可以看到，我孙儿的名字在百老汇的星光大道上闪耀。"祖母在布朗克斯区做了30年的护士，积攒下了一些钱，希望能把我送上成名之路，但我并没有成为一位钢琴演奏家。

法拉是我的祖母，于20世纪40年代在特立尼达长大（那时特立尼达还是英国的殖民地），并在60年代迁居到纽约。当时，加勒比海地区和纽约之间的音乐交流非常活跃，因而她带去的不仅是她的特立尼达口音，更多的是当地的音乐。当她从特立尼达返回纽约时，她会带回来卡利普索大师的唱片，如《小麻雀》（*Mighty Sparrow*）和《基钦纳勋爵》（*Lord Kitchener*）。正是通过这些唱片，我才得以把灵魂乐（soul music）与特立尼达本土的卡利普索音乐（calypso）结合在一起。这种被称为"卡利普索之魂"的索卡音乐（soca music）融合了东印度文化与非洲文化，于60年代末期发展起来，并在70年代特立尼达的艺术家在纽约录制唱片时成形，灵魂乐、迪斯科音乐和放克音乐（funk music）都曾对它产生影响。

对祖母和她那一代的许多非裔加勒比人来说，音乐家是为数不多的具有经济地位与社交地位的职业之一。早在我8岁时，在我的父母及其兄弟姐妹离开特立尼达，来纽约与祖母同住之前，祖母就为我制订了学习古典音乐并成为钢琴演奏家的宏伟计划。这是她试图给我一张通向经济自由的船票的方式，而无论是她还是我的父母都从未拥有过这种自由。我的钢琴老师迪·达里奥（Di Dario）夫人是一位年逾古稀的意大利女士，也是一位严格的监督者。对一个8岁的孩子来说，跟随她弹奏练习曲、记忆音阶是一项艰巨的任务。然而，正是这种必须成功的潜在压力迫使我坚持下去。虽然我不喜欢在祖母期盼的眼神中进行枯燥的练习，但那些创作了我练习曲目的古典作曲家还是勾起了年少时的我的好奇心。他们竟然可以把音阶组合在一起构成音乐！我深深地为“仅仅12个音调就可以构成大量歌曲”这个想法着迷。每当练习钢琴时，我就会被一些杂乱的想法分散注意力，而这些想法会逐渐变成意义深远的问题。人类是如何发明这种被称作“音乐”的事物的？当我演奏大音阶时，我为什么会感到愉悦？C大调中的关键音符C、E和G都是令人愉悦的音符。“猫王”埃尔维斯·普雷斯利（Elvis Presley）的歌曲《情不自禁爱上你》（*I Can't Help Falling in Love*）的第一行“Wise（C）men（G）say（E）”正是这3个音符。然而，当我的手指从白E键滑到黑E平键上时，令人愉悦的音符就变得令人悲伤了。这是为什么呢？

与爱因斯坦相遇

相比于演奏别人创作的曲目，我对探索音乐的运作机制兴趣更大。这个隐秘的兴趣贯穿我的青春期与成年时期，但它并没能让我在日常练习中集中精力。最终，我那有着悦耳的特立尼达口音的祖母意识到，她的积蓄不足以培养我成为钢琴演奏家，于是缴械投降。我的钢琴课程也终于停止了。

那时，我就读于第十六公立小学三年级，班主任是汉德勒夫人。我字写得不好，而腼腆、好奇的天性被视为“智力发育迟缓”。我的父母从未怀疑过我的智力，而老师们则不然，所以我差点被送入“智力障碍班”。还好，我幸免于难，并且在一次改变了我人生轨迹的出游活动中找到了自我。那时候，公立学校的小学生可以免费参观百老汇的戏剧表演以及博物馆。我所在的班级被分配到自然博物馆参观恐龙。我们排成队列，手牵手地走过满是生物标本的宏伟走廊。那些生物标本栩栩如生，好像正在睡觉、进食、咆哮，甚至随时准备向我们扑来。

进入主厅之后，我发现了一条通向左侧的小一些的走廊。我走在队列的末尾，犹如一只好奇的猫，天真而坚定地准备着牺牲自己九条命中的一条，所以我擅自脱离了队伍，偷偷溜到那条走廊，打算去看看那里有什么。走廊里只有我一个人，我看到厚厚的玻璃柜里放着一些纸张，上面的字迹是清晰的手写体，然而不知所云。在8岁的我眼中，它们不像是这个星球上的文字。接着，我看到了这些谜一般的字迹背后的人。他坚硬的头发形成了一个蓬乱的、灰白相间的光环，专注的目光极为沉静，隐隐又透着一丝顽皮。我想象着他伛偻着坐在书桌前，对自己的方程涂涂改改，时而发出满意的“哼哼”声，时而发出沮丧的嘟哝声。这就是我第一次看到爱因斯坦和他描述相对论的方程时的场景。于是，不可思议的事情发生了。

那时，我并不知道那些潦草而迷人的方程把时间与空间当作一个单一的、可变的整体来描述，但我确实感觉到伟人沉思的时刻仿佛超越了时空，成为永恒。我的目光在爱因斯坦的照片与他写下的符号之间徘徊。我感觉我和他有些相似，不仅是因为我那卷曲的爆炸头型与他的不羁外貌极为相像，更是因为我看到了一位沉迷于符号与理念的孤独行者，正如喜欢用音符创作自己的音乐，并且试着回答自己提出的问题的我。我希望能深入地了解他，并理解他写下的那些方程。我内心有一种感觉，无论爱因斯坦是什么样的人，我都希望能成为和他

一样的人。在那一刻，我意识到，有某种事物超越了汉德勒夫人的班级，超越了布朗克斯，甚至可能超越了整个世界，而与保存在玻璃柜里的那些爱因斯坦在很久以前写下的神秘符号有关。

音乐是一个“物理事件”

4年时光转瞬即逝。在20世纪80年代初期，包括我在内的美国大部分年轻人都沉迷于嘻哈乐（Hip-Hop），因为它展现了我们的经历和背景。嘻哈乐混合了詹姆斯·布朗（James Brown）和议会乐队（Parliament）的放克音乐，以及加勒比音乐（Caribbean music）和拉丁音乐（Latin music）的即兴抒情形式。我周围的一些朋友都希望成为成功的嘻哈乐制作人和艺术家。其中，我的朋友兰迪（Randy）给我留下的印象最深，他后来成了文尼·伊多尔（Vinny Idol）。那时的兰迪年仅12岁，高大、帅气，是一个有着牙买加血统的音乐发烧友，住在我送报路上的一栋房子里。出于对音乐的共同爱好和理解，我们相识相知。我经常驻足于兰迪的公寓前，而他则会为我演奏他收藏的唱片中的灵魂乐。他通常会把电贝司声与那些唱片的内容融合在一起，这正是我喜欢的风格。看，它又来了——我着迷于用音符来进行创造，而不只是复现别人的作品。这就是即兴演奏，这是我第一次欣赏到它的韵味。

我家阁楼上有一间屋子，后来成了我的“疯狂科学家”实验室——我的实验车间。屋子里到处是七零八落的收音机零件、组装到半截的电动玩具作品，还有一套漫威漫画集。几乎每天晚上入睡之前，我都会听一会儿七年级学生很喜欢的广播电台——98.7 Kiss FM或是107.5 WBLS。某天晚上，我决定寻找一个新的电台。当我转动收音机的旋钮，期待着找到一个能与朋友分享的新节拍时，突然，我的耳朵自动聚焦在了某种声音上。一开始我误以为是电台之间纷杂的白噪声，然而它并不是。几秒钟之后，我意识到，这是萨克斯的声音。最

初，这些音乐听起来混乱而随意，但随即我却感受到一种神秘的力量吸引着我屏息凝神地静静聆听。我被这乐声迷住了，直到一曲终了。这时，电台主持人说：“你刚才听到的曲目是奥尼特·科尔曼的自由爵士乐。”看，它又来了——即兴演奏。

我的父亲是萨克斯的狂热爱好者，他注意到了我对萨克斯与日俱增的热情。我的父母给我买了一把二手的老式中音萨克斯，它来自一次宅前旧货出售，前主人是纽约大都会棒球队（New York Mets）球员蒂姆·托伊费尔（Tim Teufel）的夫人。我父母花了50美元买下它，虽然它多处掉漆、凹痕遍布，但音色尚可。之后，我参加了我所在的约翰·菲利普·苏萨初级中学（John Philip Sousa Junior High School）的乐队，乐队由专业的爵士乐小号手保罗·皮泰奥（Paul Piteo）先生领导。他向我演示了如何用萨克斯吹奏出音符，以及如何自己制作簧片。“真是万幸，”我想，“我并不需要练习。”有了“音乐独立”的工具，我就可以演奏自由爵士乐，就像我的朋友兰迪和科尔曼一样。我可以即兴演奏，这很有趣。于我而言，这才是音乐，与练习钢琴截然不同。

如今回想起来，我简直大错特错。我从模仿和即兴演奏便携式收音机里的流行歌曲中得到了乐趣，然而，在自由爵士乐中并没有免费的午餐[(2)]。在传统爵士乐中，一首歌曲中的旋律主题与和声运转都是很明确的。刚开始学习爵士乐时，我曾认为演奏自由爵士乐意味着：任何不经训练或者练习的人就可以弹奏某种乐器，并进行有意义的即兴演奏。当我在音乐之路上成长起来，逐渐领悟了标准爵士乐传统中的和声规则和基本形式时，我才发现自由爵士乐其实有着它自己的内部结构，它是标准爵士乐传统的延展。对自由爵士乐音乐家来说，结构并不是必需的，真正的挑战在于如何即兴演奏能够打动听众的音乐。然而，我们所谓的“音乐”到底是什么呢？

音乐是非常个人化的，[1]不同的人对音乐有着不同的品位和偏好。我有一些朋友只听电子乐（electronic music），另一些朋友则认为爵士乐是唯一值得聆听的音乐。我还认识一些人，他们认为“真正”的音乐只有古典音乐。此外，越来越多的个人开始喜爱噪声音乐。鉴于很难给出一个适用于所有人的“音乐”定义，我打算把对音乐的讨论限制在西方古典音乐的范畴之内。我之所以这么做，是因为本书中讨论的许多音乐都是基于经典的西方十二音体系。一般来说，一段音乐可以表述为随时间变化的复合声波波形。我们能感知到的许多元素都包含在这种波形中，比如音调、拍子、节奏、音高、旋律与和声。[2]

我们很难用一句简短的话来精确地定义西方音乐中的大量元素。为了简便，我会给出简单的描述。想象我们听到了一首用钢琴演奏的乐曲，那些离散的声音就是音调或音符。我们可以感觉到，音调有确定的频率（或者音高），它属于某个特定的音阶，而音阶是一系列有限频率的集合。旋律是一系列的音调，它通常是某段音乐的主旨。每个人都有自己最喜爱的旋律，我最喜爱的旋律是《我的最爱》（*My Favorite Things*）。舞者们特别关注拍子。拍子是反复出现的、一致的重音的模式，它提供了节拍，且决定着歌曲的节奏。拍子中的节拍通过小节来分组。例如，华尔兹舞曲的拍子每小节有3个节拍；而电子舞曲有4个重复的节拍；和声则涉及同时演奏出的音符之间和谐或是不和谐的关系，这些和弦制造了音乐在绷紧与释放之间的运动。

音乐是一个物理事件，和大多数非平凡的物理系统一样，它有自己的结构，也即音乐家所说的“形式”。正如骨骼决定了动物的形态，音乐形式为旋律、节奏与和声提供了框架，让它们得以按照一致的风格来展开。在许多情况下，一首歌曲通常以主题或者主旋律开始。在许多古典音乐和巴洛克音乐（Baroque music）中，我们常常能见到这种情况。一个非常著名的主旋律是贝多芬《第五交响曲》（*Fifth Symphong*）的前4个音符：ta ta ta taaaa。这些音符可以共

同构成一个乐句，在音乐上相当于一个句子，是一组有着一致乐感的音符。

乐句可以纳入某种和弦或者音调。在很多流行的音乐形式中，和弦会不断变化，并最终回到初始的和弦上。很多歌曲都有一个起始音调，并且从它出发，逐渐偏离，最终又回到主音调上来。主音调通常由罗马数字Ⅰ表示。大多数西方音乐中的典型和弦运动是II-V-I演变。在C调上，II-V-I对应于D-G-C。我最喜欢的II-V-I歌曲是科尔·波特（Cole Porter）的《日与夜》（*Night and Day*），后经法兰克·辛纳屈（Frank Sinatra）的演唱而流行开来。另一种常见的音乐形式是蓝调（blues），它应用从I到IV运动的12个小节，中间重复数次，并最终回到I上。听一听B. B.金（B. B. King）的歌曲，你就会明白这种演变是如何运作的了。

这些形式创造了一种进程，制造出紧张与坚决之感，并深入人类的感觉和想象。我们对音乐的描述始于一个单一的音符，然后是和弦、乐句、节奏，直到形式——一个复合结构，而形式始于某种波及其特有的波长和频率。这一切都向人类的情感与创造力敞开了大门——用音符来表达自我，并在自我与自然之间构建联系。音乐如魔术一般出现了，而它的确是非常个人化的。

虽然大多数来自摇滚乐、流行乐和爵士乐的流行歌典都是基于图1-1所示的简单形式，但是诸如利盖蒂·捷尔吉（Ligetti György）等现代作曲家却以更为复杂的作曲结构为基础，这些结构是类似分形（fractal）的自相似系统。在这些形式中，较小的片段反映了较大结构的形式。自然界中的很多结构都具有分形的特性，比如雪花、树叶和海岸线。[3]研究发现，巴赫的一些作品中也存在分形结构。[4]当较短的音乐片段反映了较长的音乐篇章时，分形结构就出现了。

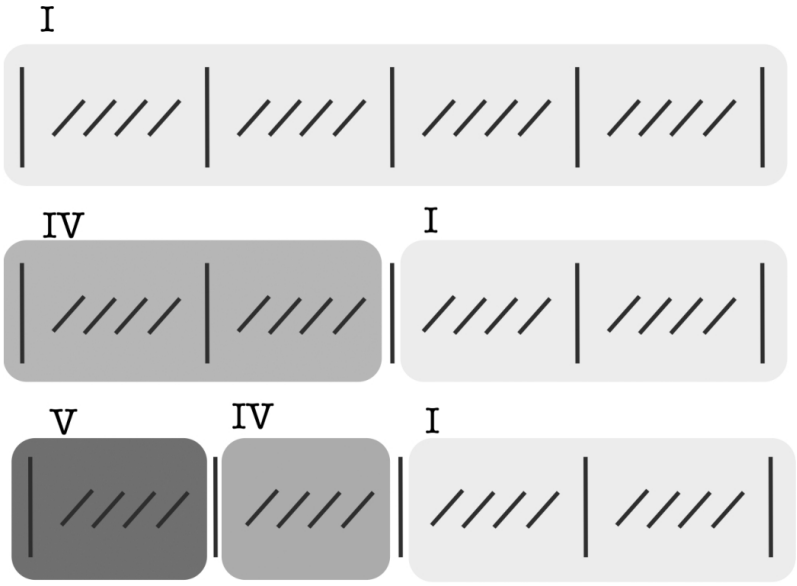


图1-1　12小节的蓝调结构图解

注：拍子通常是每小节4拍。在C调上，这种形式以主音开头：音阶（I）的第一个音符重复了4个小节，然后升至第4音阶（IV），也就是F调。在最后4个小节中，和声最终分解成了主音。

于我而言，吹奏萨克斯与打篮球极为相似——因为好玩，所以我才会去做。这是一项业余爱好，往往出于一时的热情，但我内心深处潜藏着求知的欲望，我想要知道更多，我不满足于仅仅知道如何创造音乐，还想知道它的起源，它与我们情感之间的联系，以及如何从“音符”之中获得所谓的“音乐”。那“音符”又是什么呢？那时，我还没有意识到，科学可以帮助我找到这些问题的答案。科学将成为我真正的爱好。

像科学家一般“种下科学”

约翰·菲利普·苏萨初级中学属于埃德沃德工程（Edenwald Projects）的一部分，离贝彻斯特大道（Baychester Avenue）不远。在我入学之前的几年里，苏萨中学被评为美国犯罪率最高、最危险的中学之一。直到希尔·布林德尔（Hill Brindle）博士上任之后，情

况才有所改善。布林德尔操着一口清晰的男中音，是一个激进分子。对于他家长式的作风，无论是学校里的学生还是潜藏在附近的暴徒都既钦佩又惧怕，还心怀尊重。苏萨中学是一所公立学校，但布林德尔把它当作一所军事化的私立学校来管理。就读于西点军校时，布林德尔曾有望参加奥运会400米短跑比赛。然而，有一天他在跑道上训练时，被一个来历不明的枪手击中了腿部，他的奥运梦因此破碎。后来他加入了马丁·路德·金的民权运动，并投身于贫民区学生的教育，或许就是为了发泄精力也说不定。在苏萨中学，每天早上布林德尔和系主任们都会来到学校的两个入口，检查每个学生的笔记本和作业本。每个星期三，布林德尔都会向全校学生发表福音书式的演讲，所有学生都要穿半正式的服装出席。

在又一次星期三的晨会上，布林德尔像往常一样做了演讲，然后突然告知我们有一位重要来宾，说完他就走下了舞台。那时我正在读八年级，那一天令我永生难忘。一个年长一些的男人身着一件橙色连体衣裤，肩膀上扛着音响，从舞台的幕布之后走了出来。接着，一段大家耳熟能详的嘻哈乐节拍从音响中传出来。一些学生嬉笑起来，仿佛那人是个小丑；另一些学生则一脸困惑，但绝大多数学生都不由自主地随着音乐的节奏摇头晃脑。这个家伙确实引起了我们的注意。接下来，他关掉音乐，并介绍了自己。他叫弗雷德里克·格雷戈里（Fredrick Gregory），是一位非裔美国宇航员。格雷戈里操着一口华盛顿本地口音问道：“你们中有多少人喜欢这种节奏？它酷不酷？”学生们振奋起来，脸上露出了会心的笑容。“是的……节奏当然很酷！”他说。就这样，这次集会变成了一场派对。这位宇航员又问：“那你们知道这台音响为什么能制造出这些音乐吗？”他继续说，“能够拥有一台音响并且听到这些音乐，无疑是一件很了不起的事情。不过，更了不起的是‘拥有制作一台音响的能力’。正是因为学习了音响的工作原理，我才成了一位宇航员。我进入大学，学习科学知识，并且获得了工程学学位。”他的话使我们深受震动。格雷戈

里来到我们学校，来到我们面前，并且清楚地向我们说明了科学的重要性。而且无论是在文化、社会和经济上，还是在地域背景上，他都与我们极为相似。最后，他总结道：“我和你们有着相同的背景，我能做到的事情，你们一样可以做到！”这不是我第一次考虑学习科学，但这次与以往都不同。

然而，我踏上科学之路并不是为了成为一位物理学家，以探究音乐中的物理学，或是揭示爱因斯坦的方程中的奥秘。我想成为一位机器人专家。在我的收音机、我的二手萨克斯，以及我凌乱的卧室里那些实验器材旁边，还堆着我的漫威漫画集。漫画中的超级英雄托尼·斯塔克（Tony Stark）制造了自己的钢铁侠盔甲，这给了我很大的启发。自那次学校集会之后，虽然我仍在学校爵士乐队中吹奏萨克斯，但我的兴趣已经转移到了科学上。

在临近毕业的某一天，保罗·皮泰奥先生把我拉到一边，对我说：“孩子，你是我见过的最有音乐天赋的两个学生之一，另一个是‘阿波罗剧场’乐队的指挥。我敢保证，我可以把你送入表演艺术中学（High School of Performing Arts）。”能够进入纽约市最好的音乐高中无疑是一个巨大的机会，也会让我的祖母脸上有光，但我从未告诉祖母此事，因为我已经有别的打算了。我已经走上了科学之路，并且决定进入德威特·克林顿高等中学（DeWitt Clinton High School）。

在有着约6 000名学生的德威特·克林顿高中的第一天，我就感觉自己格格不入。在英语课上，我和大家一起讨论哈姆雷特，突然，课程被窗外一些年轻人发出的声音打断了。那是一群拉丁裔的学生，正在玩手球、跳霹雳舞，还有人唱着“自由风格的战斗说唱”。这是一种即兴表演，节奏复杂，但极富韵律。说唱歌手们彼此竞争，并接受周围的热情观众的评判。我们的莎士比亚课老师班布里克

（Bambrick）小姐是一位开朗的爱尔兰人，她激动地说：“看到了吗，这才是真正掌握了英语这门语言！”

我的生活发生了转向。我会翘掉我讨厌的课程，然后乘坐公交车去篮球场。在篮球场上，我们通常会打几场凑队球，以说唱以及在压平的冰箱包装纸箱上跳霹雳舞作为中场休息。在公交车上，我遇到了来自我所在中学的其他翘课的同学。我还无意中听到一些自称“百分之五”（Five Percenters）的人之间的讨论。这些人会就如下话题展开争论：来自外太空的类人外星人是否会与“亚洲黑人始祖”进行互动。这不是开玩笑。至于他们讨论的其他科幻主题，我也有所耳闻，并且我发现他们真的相信这些！我所在的高中是这些“百分之五”族向往的圣地，我们学校的学生从来不会与这些人搅和在一起。这些家伙身强体壮、少有笑容。我最初以为“百分之五”族只是一群暴徒，然而很快我就发现自己错了。在精神和思想的研究上，他们极有决心、高度自律。我和他们有一些共同之处，不仅仅是我们都翘课，并且我们都玩弄“科学”。“百分之五”族的日常活动是“种下科学”，这类似于某种知识辩论，有些时候以战斗说唱的形式进行。我们都想逃离我们面临的黯淡未来。我从漫画书、电子游戏以及对科学的热爱中寻求解脱。这些家伙的世界观来自他们的领袖克拉伦斯·13X（Clarence 13X），后者是马尔科姆·X（Malcolm X）的学生。在获得了精神上的启蒙后，“百分之五”族在纽约的大街小巷广泛宣传如下理念：

- 85%的人盲目信仰宗教；
- 10%的人故意误导他人；
- 只有5%的人免于蒙昧，意识到命运掌握在自己手里。
- 数学是描述实在性的语言，为了征服自然，“百分之五”族必须理解隐藏在自然背后的数学模式——他

们称之为“至高无上的数学”。

“百分之五”族正是那5%。当他们总是看到我独自一人坐在公交车上，静静地演算着我从数学老师丹尼尔·菲德尔（Daniel Feder）先生那里学到的方程时，他们就试图鼓动我参与他们有关外星生命形式的辩论，这些外星生物曾与亚洲黑人始祖进行互动。最后，他们向我发出邀请，希望我加入他们。诚然，我对他们所谈论的话题很感兴趣，但我克制住了自己，继续做我的微积分先修课程作业。虽然我从未加入“百分之五”族，但他们十分欣赏我，并且保护我免受那些经常欺负书呆子或弱者的暴徒的欺凌。我也很欣赏他们，因为主持人拉基姆（Rakim）就是“百分之五”族的虔诚一员，当时他刚刚发行了他的首张唱片，名为《埃里克·B是总统》（Eric B is President），风靡了整个纽约乃至全世界。拉基姆一直是我最喜欢的主持人。与现今的嘻哈乐不同的是，他的歌词能提升自我认识，他还像科学家一样传播他的即兴演奏。拉基姆注定作为最伟大的战斗说唱歌手而留名青史，因为他具有非凡的即兴演奏能力，他的说唱歌曲还有着独一无二的多重节奏。有时我会想，伟大的数学家莱布尼茨预言了拉基姆的出现，因为他曾说：“音乐正是这样一种乐趣，它源自人类思维在计数上的经验，而人类却没有意识到这就是一种计数。”拉基姆将自己歌曲中的节奏视为“种下科学”。他的经典歌典《我的旋律》（*My Melody*）的部分歌词如下：

这正是我在讲述的东西，我像科学家一样“种下科学”；

我的旋律是一段代码，是下一段特有的插曲；

麦克风的声音被扭曲，时刻有可能爆炸；

我把麦克风控制在零摄氏度，把主持人冻结，让他们变得更冷；

听众像太阳系一样活跃……

一年之后，我升到了高中二年级，开始学习物理课程。我非常紧张，而且并非只有我这样，所有坐在教室前面的书呆子都很害怕。一个身材瘦削、头发蓬乱且戴着眼镜的男人走进教室，在黑板上写下了一个非常简单的方程，只有3个字母和一个等号：$F=ma$，意为力等于质量乘以加速度。当外力作用于某个物体之上时，这个物体就会加速运动。当外力相同时，物体的质量越大，它的加速度就越小。那时的我们从未见过这样的方程。丹尼尔·卡普兰（Daniel Kaplan）先生走到教室中间，坐在一张空桌子上，然后从口袋里掏出一个网球。他把网球扔向空中，随后又接住了它。见每个人都很专注，他便知道自己不必再做第二遍。少顷之后，他问：“当球回到我手中的时候，它的速度是多少？”所有人都沉默了，没有人知道答案。就在那一两分钟里，奇迹发生了。我想象着那个网球向上运动，停在我们头顶上方，然后回到卡普兰手中的情景。我一次又一次地重现了这一场景。我想象着自己就是那个网球。我的双手发抖，而不知何故。可能是我的眼睛出卖了我，卡普兰注意到了我。

“你叫什么名字？”他问。

“斯蒂芬。”我说。

“那么，斯蒂芬，你觉得它的速度是多少？”

在一阵惊愕之后，我脱口而出：“球回到你手中时的速度与它离开你的手时的速度是一样的。”

卡普兰脸上露出了非常满意的笑容：“回答正确！这就是自然界中的一个神圣法则，叫作能量守恒。”

卡普兰回到黑板前，通过简单的加法和乘法，应用方程里的字母*F*、*m*与*a*展示了能量是如何守恒的。这是一个通过网球来论证和演示的神圣法则。这是我人生中第一次看到，一些特定的事件结合起来就有了意义。我以一种之前从未体验过的方式理解了有关世界的某些事情。这些方程让我回想起了7年前我和爱因斯坦“相遇”的场景，以及我看着玻璃之后那些神秘的方程时所感受到的吸引力。现在，4个符号的力量恰到好处地结合在一起，组成了一个揭示网球的运动，甚至是宇宙中行星运动规律的方程。下课后，卡普兰先生走过来，对我说：“最伟大的物理学家都有着天赐的直觉，而你有这种直觉。稍后来我办公室一趟。”或许是受“百分之五”族的影响太深，那一刻我不禁怀疑我是否会被引荐加入一个秘密组织。

卡普兰曾是一位训练有素的专业作曲家，也是爵士乐上低音萨克斯演奏者。后来他应召入伍，致力于研究雷达技术。最终，卡普兰被物理学深深吸引了，回美国后继续攻读物理学研究生，不过他并没有放下他的萨克斯，而且一直坚持作曲。

因为卡普兰，我想成为物理学家的热情更高涨了。他是音乐系和科学系的系主任，当我进入他的办公室时，看到了一幅爱因斯坦的巨幅画像，正对着它的是一幅约翰·柯川的画像。这是我第一次看到这两个人的画像被放在一起。为什么卡普兰先生会同时拥有一位爵士音乐家和一位物理学家的画像？后来，柯川成为我最喜欢的爵士音乐家，因为我们都崇拜爱因斯坦。“你有着很敏锐的物理直觉，但若想成为一位物理学家，你还需要学习很多数学知识，因为数学是物理学的语言。”卡普兰说。我告诉他，我读过一点有关爱因斯坦的书，知道物质可以转化为能量。他的回答令我永生难忘：“看到那本书了吗？”他指着一本名为《引力》（*Gravitation*）[5]的鸿篇巨制，“这本书介绍了爱因斯坦的广义相对论，而广义相对论揭示了空间、时间和引力背后的奥秘。如果你想成为一位物理学家，就必须进入大学学

习，”他继续说，“你若是想读这些书，或者有任何问题，可以随时来我办公室。”

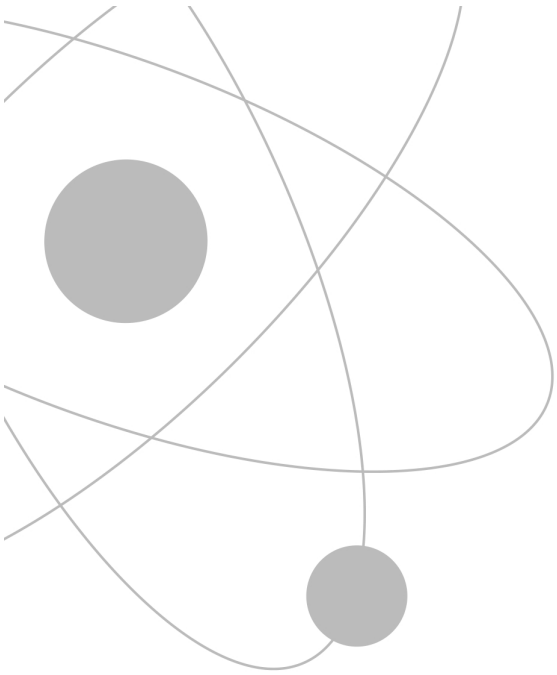
只要有闲暇时，我就会去卡普兰先生的办公室。我会读他推荐的书，与他讨论物理学和音乐，甚至经常忘了吃午饭。有一天，卡普兰给了我一张柯川的唱片《巨人的步伐》（*Giant Steps*）。事后看来，这张1960年发行的开创性唱片正是柯川“纸片声”（Sheets of Sound）[(3)]的典范，是爱因斯坦那弯曲的时空结构的音乐体现。在卡普兰的鼓励下，我退出了高中爵士乐队，转而开始在纽约城市学院学习微积分。然后，几乎一切都开始发生转变。

20世纪80年代中期，美国人的穿着逐渐从喇叭裤变为氨纶裤，美国总统从吉米·卡特（Jimmy Carter）变为罗纳德·里根（Ronald Reagan），而布朗克斯区则充溢着艺术创造的活力。哈维·弗格森（Harvey Fergurson）是我最好的朋友之一，得知我会吹奏萨克斯之后，他便邀请我加入他新成立的嘻哈乐乐队，乐队名为“提姆巴克3”（Timbukk 3），由嘻哈乐的先驱阿弗里卡·蓬巴塔（Afrika Bambaataa）与贾兹·杰（Jazzy Jay）指导。蓬巴塔以在世界范围内广泛传播嘻哈乐，并建立了“环球祖鲁联盟”（Universal Zulu Nation）而闻名，这个联盟通过嘻哈乐让成员摒弃恶习，追求和平。“母语”（Native Tongue）是一个“自发嘻哈乐艺术家”共同体，“提姆巴克3”希望成为这个共同体在布朗克斯的分支。探索一族（A Tribe Called Quest）、丛林兄弟（The Jungle Brothers）和迪拉索（De La Soul）是“母语”中的典型代表。蓬巴塔的录音室名为“强大城市”工作室（Strong City Studios），位于布朗克斯北部。在那里，我录制了打击乐，并且让贾兹·杰为我录制了萨克斯。我爱上了在录音室里的那种兴奋感。当我的中音乐器对准麦克风时，我看到贾兹与哈维一边随着音板摇头晃脑，一边记录着我演绎的柯川的连复段，之后他们会把我的演奏拆分为不同的样本段，并把它们纳入自己的说唱歌曲。一切都是那么顺利：我们的合作像是插上了想象力的翅

膀，而几个月之后，“提姆巴克3”就收到了一份唱片合约。那是1989年，嘻哈乐在国际上的吸引力和影响力正呈爆炸式增长，成为打击乐创作者和制作人的大门也正在向我敞开。然而，在内心深处，我知道自己在音乐上还不成熟，尤其是在吹奏萨克斯上。更重要的是，物理学仍深深地吸引着我。对我来说，潜藏在方程与事物中的规律比嘻哈乐之路更为重要。所以，我最终决定进入大学。

我在布朗克斯长大，尽管生活在那里会遇到各种挑战和荒谬的事情，但那里于我成为物理学家而言却是一片丰饶的土壤。生活在布朗克斯时，我有很多机会成为一个音乐家，我的侪辈（战斗说唱歌手、霹雳舞者、打击乐手和“百分之五”族）身上都充满了创造力，不过，我挚爱的老师（尤其是卡普兰先生和布林德尔博士）却鼓励我去追逐自己真正热爱的事物。卡普兰先生是我的榜样，他向我展示了我可以同时成为音乐家与物理学家，并且鼓励我在物理学领域开创自己的一片天地。然而，我依然纠结于我的选择是否正确。为了消除自我怀疑，我必须找到某种方法，让我同时钟爱的音乐与物理能互相交流。卡普兰办公室里爱因斯坦与柯川的画像相对而立的画面一直深藏在我的脑海中，这代表着物理学与音乐之间的对话，而那就是我未来的生活。

在大学里，事情又有所变化。我主修了物理学，走上了职业物理学家的道路。虽然我也修了少量的乐理课，但实际情况是，在大学里我投入到音乐上的精力很少。直到读研究生时，我才真正开始探究音乐与物理学之间的联系。



02

寻梦物理学，
无所畏惧地向最难的问题发起进攻

The Jazz of Physics

利昂·库珀教授与我同在纽约，他是诺贝尔奖获得者、“库珀对”（Cooper pair）概念的提出者之一。那时，这位物理学天才站在我所在班级的最前方，身着得体的意大利西装，一头卷发修剪得无比精致（图2-1）。在他的高等量子力学课上，学生们一脸敬畏地看着他随手在黑板上画出费曼图。



图2-1　库珀教授在布朗大学

注：左一为库珀教授。图片由美国物理学会埃米利奥·塞格雷视觉档案、W. F.麦格斯诺贝尔奖获得者纪念展友情提供。

量子力学在特定的最小亚原子尺度上描述宇宙（图2-2），在这个尺度上，构成宇宙的“物质”同时具有粒子和波的特征。能量和物质同时具有粒子性与波动性。你明白了吗？没有？没关系，大多数物理学家也不明白。这是一个抽象的、反直觉的理论，那些描述它的方程盘根错节，极为复杂。1948年，理查德·费曼（Richard Feynman）找到了一种更好地理解量子力学的方法，后来他因在量子电动力学方面的贡献获得了诺贝尔奖。他提出了简单又直观的费曼图，完全改变了物理学家处理复杂粒子相互作用的方法。费曼还因他广泛的兴趣，追求真正的生活之乐，以及简化概念并清楚明白地传达给学生的教育理念而闻名。他可以让物理系的年轻学生理解最艰深的理论，而费曼图表明，他也可以让那些成名已久的物理学家理解这些理论。

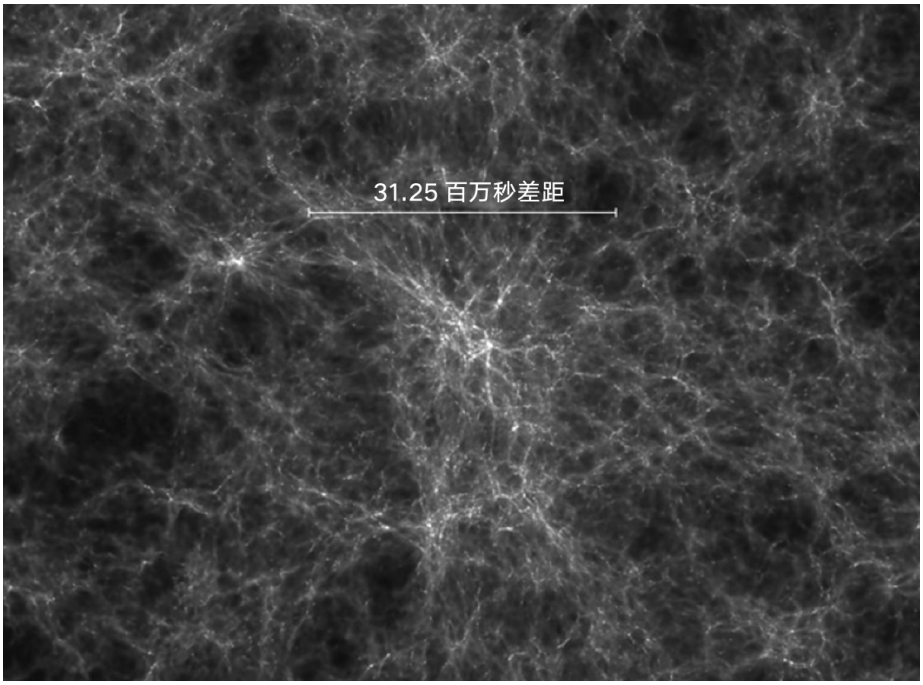


图2-2　宇宙中的大尺度结构

注：图中的每个点都对应着一个星系，而图中共有约10亿个星系。图片由加州理工学院的杰米·博克（Jamie Bock）提供。

库珀站在黑板前，面露迷人的微笑，寥寥几笔就画出了一幅图。那些直线、曲线和螺旋线，那些向前或是向后的箭头，那些诸如电子、正电子和夸克的大量粒子符号迅速地出现在黑板上又很快消失。最终，费曼图（图2-3）出现了，它描述了电子及其反粒子湮灭过程中的量子动力学。我似乎看到能量与物质如粉笔一般洁白，而黑板就犹如浩瀚的宇宙，能量和物质匆匆地出现又迅速消失，从一种形式变成另一种形式。库珀是一位物理学大师，跟随他学习物理学，就像一个篮球爱好者有幸能与迈克尔·乔丹（Michael Jordan）打一场球一样。

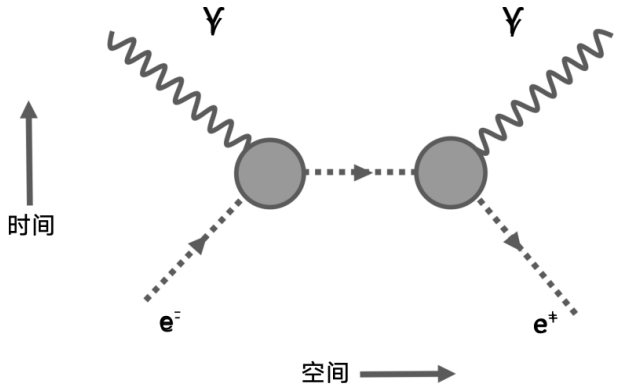


图2-3　费曼图

注：一个电子（e^-）与一个正电子（e^+）彼此湮灭，并产生光子（γ）。

库珀的诺贝尔奖之路

1957年，27岁的库珀与约翰·巴丁（John Bardeen）、罗伯特·施里弗（Robert Schrieffer）一道，成功破解了一个存在了40年的谜题，解释了一种被称为“超导”现象的量子力学机制，并因此获得了诺贝尔奖。

库珀的诺贝尔奖故事始于1911年。当时，荷兰的实验物理学家海克·卡末林·昂内斯（Heike Kamerlingh Onnes）发现，当把金属的温度降低到接近绝对零度（-273.15℃，理想状态的可能最低温度，在这个温度下系统的能量为0）时，电子会无阻力地“流过”金属。这一发现震惊了科学界。在一般情况下，电路中的电流是电子相对于导体固有电阻的流动，它与摩擦力使路面上的车轮减速的原理类似。因此，对电子流不具备阻力的材料被称为超导材料。这就像路面情况发生了突变，车轮可以在绝对光滑且无摩擦力的表面上完全无阻力地滚动一样。从此，超导材料被应用于诸多技术领域，其中很多都是基于电流与确定电流产生的磁场之间的密切关系。

在20世纪初期量子力学出现之后，很多伟大的物理学家（包括爱因斯坦）都试图找到超导性在微观层面的理论基础，然而都失败了。超导性的量子力学图像并不存在。库珀凭借着自己与生俱来的对物理学的敏锐洞察力，提出了“库珀对”的概念，揭开了超导性的量子力学秘密。在一般情况下，单一电子在金属导线中流动时之所以会遇到阻力，是因为它们之间彼此排斥，就像橄榄球或足球比赛中防守球员干扰带球者的运动一样。然而，库珀指出，通过利用电子的波动性，它们可以“结对”，这就改变了它们在金属中彼此排斥的性质，并可以让它们无阻力地传导。

量子化后的超导性意味着只存在离散能量，而没有连续的能量流，所以离散能量同样很重要。当库珀、巴丁和施里弗发现了超导性的原理之后，其他人就可以将其应用于众多领域了。超导性是核磁共振技术（MRI）的核心理论，在医学影像上，核磁共振技术常被用来探究解剖形态和功能。在某些情况下（比如肿瘤探测），X射线扫描还不够精确，而更精确的方式需要均匀的强磁场。超导体中的强电流可以产生强磁场，而强磁场正是核磁共振扫描所需的。此外，超导量子干涉装置（SQUID）可用于探测极端微弱的磁场，例如在生物学领域，它被用于测量大脑中的神经活动，或是微小的生理变化所产生的其他弱磁场，比如胎儿的心脏。

磁悬浮列车是基于迈斯纳效应（Meissner effect），而后者是超导体的直接结果。磁场与电流之间的相互作用意味着磁场会对电子产生作用力，从而阻碍电流的流动。超导体不会对电子流产生阻碍，它会排斥外部磁场，以保持电流的无阻碍流动。因此，如果你把一块磁铁放在超导材料上方，材料中的超导电流会拒绝磁场进入其内部，这就会产生强烈的镜像磁场，让磁铁飘浮在半空中。磁悬浮列车的轨道完全由超导体铺就，以磁铁为原材料的火车“轮”会产生迈斯纳效应，让列车飘浮起来。这种效应在希格斯玻色子的发现过程中发挥了关键作用。实际上，希格斯玻色子就是超导性的表现形式之一，只不

过超导介质是空无一物的空间本身。这些成就紧随库珀及其侪辈做出的突破性发现，但这只是库珀成为我心目中的英雄的部分原因。

成为物理学家

在高中学习快结束时，我已经阅读了维尔纳·海森堡（Werner Heisenberg）关于矩阵力学的著作。海森堡是量子力学的奠基人之一，他因提出了量子力学中的基本原理——不确定性原理而为大家所知。我也读过史蒂芬·霍金（Stephen Hawking）的《时间简史》（*A Brief History of Time*），霍金是一位宇宙学家，以研究黑洞发出的辐射而闻名。我还通读了《别逗了，费曼先生》（*Surely You're Joking, Mr. Feynman!*），这本书节选自费曼多姿多彩的生活。阅读一切我所能找到的有关物理学的书籍，让我在布朗克斯的成长生涯里，从多数人眼中“无比黯淡”的未来之中挣脱了出来。

怀着成为一位物理学家的梦想，我进入了大学。在面对物理学专业的严苛要求时，我却觉得自己完全没有准备好。我经常盯着某一页书达数小时之久，反复阅读某一段话或是一组方程，直到那些概念慢慢地渗入我的脑海。为了应付冗长的考试和实验报告，我几乎把咖啡当成了主食。在本科阶段和研究生阶段早期的大部分时间里，我都觉得自己是一个来自布朗克斯的十分愚笨的特立尼达人，梳着一头发辫，与周围格格不入。

在努力成为一个物理学研究人员的过程中，我甘愿忍受多年的自我怀疑和同僚的看低。在本科阶段，我学会了巧妙地使用各种方程来描述我周边的世界。那些物理概念虽然非常有趣，但难于理解，因而令人沮丧。我常常在心里问自己：“为什么宇宙中会存在大尺度结构，而非空空荡荡、一片鸿蒙？”这完全是我的好奇心作祟，但这个问题令我寝食难安，就像小时候弹奏钢琴时，我的注意力会离开乐谱上的音符，转而去思考音乐存在的意义，以及为什么它会让我产生我

所体会到的感受。后来，通过研究量子理论，我慢慢找到了探究这个物理学基本问题的关键。

非常幸运的是，在我读了两年硕士研究生之后，那位神奇的量子大师库珀破格接收我作为博士研究生进入他的科研小组——库珀组。我非常震惊，我的梦想就这样实现了。随着我对库珀的了解的不断加深，我发现他是一位既不受任何分支学科限制，也无法用任何分支学科来定义的理论物理学家。在追求自己理想的过程中，他和费曼一样，不受条条框框的约束，敢于怀疑一切。他满怀热情地与其他学科的教师一起授课，仿佛这种合作以及思想之间的交流已经铭刻在了他的血液之中。我从库珀那里学到的最有价值的一课，就是把一个学科的概念移植到另一个学科是一门艺术。通过将一个领域中的已知理念和另一个领域中的待解决问题进行类比，我们就可以做出新的发现，并开辟一条崭新的探索之路。在我进入库珀组后参与的第一个项目中，这种类比法的魅力就展露了出来。

库珀喜欢研究那些有趣的、看似无法解决的问题，无论它们属于哪一门学科。他会无所畏惧地向最难的问题发起进攻，甚至会修正其他领域中长期存在的错误概念和范式，譬如辐射生理学、神经科学和哲学。在我加入库珀组的那段时间，库珀正在研究神经科学，所以我的物理学研究生涯是从研究大脑开始的。谁能想到，计算神经科学会把我变成一位宇宙学家呢？

当时，库珀正在尝试构建一个基于神经网络的记忆相干性理论。神经网络的一个经典例子是霍普菲尔德模型（Hopfield model），它阐释了联想记忆的工作机制。有趣的是，霍普菲尔德模型并不是源自神经科学，而是源自量子力学机制下的磁理论，更确切地说是以德国物理学家恩斯特·伊辛（Ernst Ising）的名字命名的“伊辛模型”（Ising model）[1]。

想象一个关于磁铁的简化模型，模型中，某种金属（譬如铁）的原子等间距地排成阵列，阵列中的每个原子都由一种被称作“自旋”的性质来确定。量子的自旋和陀螺的自旋很相似。与陀螺不同的是，量子的自旋只能取两个数值中的一个——它要么向上，要么向下，因为原子的自旋是量子化的。原子的自旋不能取一系列任意的值，而只能取这两个量子化的或者离散的值——上或者下。

在这个模型中，任何带电粒子（无论带正电还是负电）只要具有自旋，都可以产生磁场。到目前为止，所有单独的原子都可以用它来描述。然而，当原子结合成一个有序的整体时，它们的相互作用就会形成新的物理现象，一些科学家称之为“层展现象”（emergent phenomenon）。如果所有原子的自旋指向相同，那么它们就会结合起来形成一个净磁场。在正常情况下，这不大可能发生，因为在室温下，环境中的热能足以搅动原子，使它们发生翻转，于是它们的自旋便会随机地选取方向，而不会形成净磁场。

原子与其周边原子之间的效应被称为“相互作用能”（interaction energy），这是一种被储存起来的能量，科学家称之为势能（potential energy）。与物理学中所有形式的势能一样，自然界总是倾向于使其数值变得最小。例如，当你拉紧一根橡皮筋时，它的势能会增加。当你松开它时，它就会啪的一声弹回到原来的位置，把势能消耗掉或者转化为动能。这是一个让势能变得尽可能小的过程。

费曼图阐明了量子粒子之间的相互作用。为了便于理解物理学中的复杂情况，我们引入另一项工具——数学。数学就像一种新事物，它超越了物理感觉的范畴，让我们得以理解那些仅凭自己的认知或直觉所无法理解的事物。事实上，物理学中的许多领域都是高度反直觉的，其他科学（比如化学和生物学）的诸多方面也是如此。若想了解它们所遵循的一致且可理解的规则，我们就必须通过数学来扩展感

知。在原子、自旋与磁化的情形下，我们可以用数学来阐释复杂原子系统的行为，具体方法是：先凭直觉来陈述理念，再用数学将这些直觉形式化。我们先从数学的角度来看看库珀的研究中所使用的磁化的伊辛模型。这些细节值得我们花费一些时间，因为其中的许多理念在本书的后续章节中会多次出现。

自旋的数学理论将展示相互作用能（E）如何作用于模型中的原子。当某个原子的自旋发生了改变，与之相邻的原子的自旋会如何变化呢？我们任意选定一个原子i，用一个正整数来标识。例如，i=1是1号原子，i=3是3号原子。我们将i号原子的自旋记为S_i。于是，i=1指定了S_1，也即1号原子的自旋，余者类推。与i号原子相邻的原子的自旋是S_i+1。如此，i=1表示原子1的自旋S_1，以及与之相邻的2号原子的自旋S_2。

当相邻原子的自旋相同时，i与i+1要么同时向上，要么同时向下（图2-4）。我们凭直觉就可以判断，当二者同向时，它们之间的相互作用能会减少。

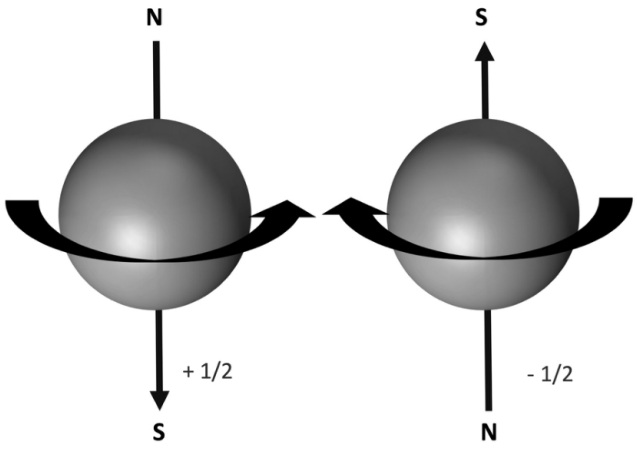


图2-4　量子自旋的方向——“向上”态与“向下”态

当相邻原子的自旋异向，也即S_i向上，S_i+1向下，或者S_i向下，S_i+1向上，二者之间的相互作用能就会由于异向自旋之间的“绷

紧”而增大。我们可以想象两个正在讨论问题的人，如果他们意见一致，那么可供讨论的问题就变少了，所以互动就减少了；如果他们意见不一致，那么他们就会有更多的交流，并试图改变对方的观点。

在数学上，如果我们把“自旋向上”视为正的，把“自旋向下”视为负的，当把这两个自旋结合时，就可以用S_i乘以S_i+1，从而得到正的或者负的结果。可能的结果总共只有4种：二者都向上，即1×1=1；二者都向下，即（-1）×（-1）=1；第一个向上而第二个向下，即1×（-1）=-1；第一个向下而第二个向上，即（-1）×1=-1。对于任意一个粒子对而言，如果它们的自旋同向，那么其乘积为$S_i \times S_i+1=1$；如果它们的自旋异向，其乘积为$S_i \times S_i+1=-1$。因此，只要知道值的正负，我们就可以推断出两个原子的自旋是同向还是异向。仅两个数字就揭示出了确切的物理信息，而我们则有了第一个用数学表示的原子自旋模型。

在磁化的伊辛模型（图2-5）的创建过程中，我们凭直觉确定了，当两个相邻原子的自旋同向时，其相互作用能会减小，而当它们自旋异向时，相互作用能会增大。然而，整个原子阵列的相互作用能具体减小或者增大了多少还有待确定。

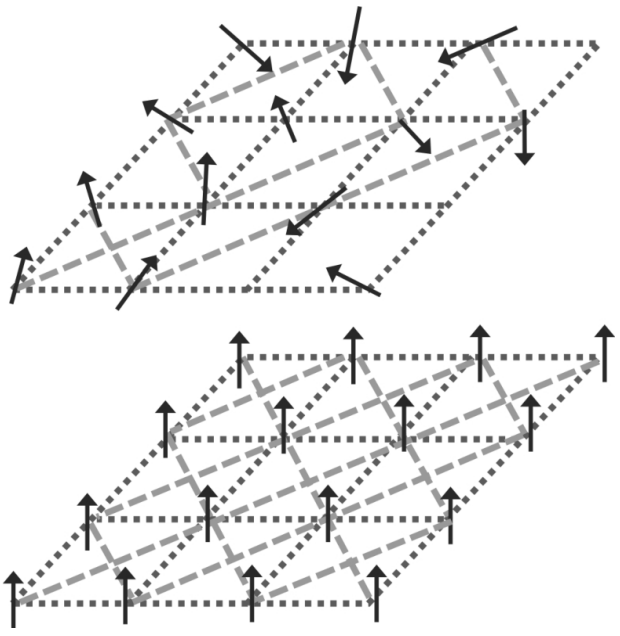


图2-5　伊辛模型中的自旋方向S

在写出方程之前，我们先回顾一下模型中的元素：

- 样本是一块金属，比如铁，它的所有原子排成一个阵列。
- 样本中的每个原子要么自旋向上（1），要么自旋向下（-1）。
- 如果相邻原子的自旋同向，那么相互作用能（E）就小（其数值为1，因为1×1=1，（-1）×（-1）=1。
- 如果相邻原子的自旋方向相反，那么相互作用能（E）就大（数值为-1，因为1×（-1）=-1，（-1）×1=-1。

把系统中所有同向和异向的自旋加起来，我们就可以得出描述粒子之间相互作用能的完整方程：

$$E = -J \sum_{i} S_i S_{i+1}$$

E是粒子之间的相互作用能，它等于S_i×S_i+1，自旋同向时取1，异向时取-1。西格玛符号（Σ）的意思是把所有的同向、异向对i求和，从而得到整个体系中同向和反向的数值。请注意，如果它们全部同向，那么最终的和就是一个很大的正数；而如果全部反向，和就是一个很大的负数。

J表示由所有的同向、异向共同确定的和所决定的相互作用能。J越大，自旋之间的相互作用能就越大。例如，如果J=0.1，而所有同向的和恰巧是400，那么能量值就是40。最后，负号意味着，自始至终我

们都认为同向会减少作用能、异向会增加作用能，所以在这个例子中，相互作用能是-40。

当相互作用能由于异向自旋而增加时，单一同向原子产生的小磁场是受限的，所以金属不会对外产生磁性。但是，如果相互作用能因为大量同向自旋而减少时，小磁场的积累效应便会叠加起来。总之，最小能量的状态对应着自旋全部同向的状态，在这种情况下，物质会产生磁场，并因此变成了磁铁。势能也会变得最小，相当于橡皮筋处于最初的位置。当磁性最强的材料铁原子自旋同向时，它就变成了铁磁性材料，而描述铁磁性的数学模型就是伊辛模型。

探秘伊辛模型

伊辛模型的重要之处在于，它考虑了量子物理在确定金属能否成为磁性材料时的影响。当然，还可以加之于其他的外界条件，譬如外磁场存在时的情形，但我们现在不是为了探究磁性的内在机制，而是要阐释铁磁性的伊辛模型如何导出神经科学上的霍普菲尔德模型。让我惊讶的是，描述磁性的伊辛模型和描述神经网络的霍普菲尔德模型看起来完全无关，但前者竟直接为后者提供了灵感，所以这个类比十分贴切。

霍普菲尔德模型是神经元回路的经典模型。在伊辛模型中，金属中的原子自旋产生相互作用能，霍普菲尔德模型借用了这个理念，并将其重构为大脑神经元中可交流的相互作用，由此得到了一个神经网络系统。这个系统利用极其简单的规则和数学来有效地储存习得的记忆，这样我们就可以检索或者记起往事。粗略地说，我们可以把本地有关联自旋的岛屿的形状看作可以存储记忆的结构。

实验证明，神经元之间以“激发”的形式进行交流，也即在神经元连接处释放神经传导物质。这些连接处被称为突触。通过引入两个

神经元之间的相互作用“强度”（相当于伊辛模型中的J），约翰·霍普菲尔德（John Hopfield）把这种复杂的传输过程简化了。不过，在霍普菲尔德模型中，事情并没有这么简单。在伊辛模型中，自旋只与最近的原子发生相互作用，但在我们复杂的大脑中，所有的神经元都彼此相连。伊辛模型中的自旋和霍普菲尔德模型中的神经元激发才是关键的类比。如果神经元的数值是“向上”，那么神经元就激发了一个电化学信号；而如果神经元的数值是“向下”，那么神经元就没有被激发。

对于彼此连接的神经元晶格的全部“状态”，霍普菲尔德提出了一个方程，并把它类比为存在相互作用的铁原子阵列的总能量。支配着伊辛模型的数学原理也支配着霍普菲尔德模型：两个同时被激发或者同时不被激发的神经元会增加关联状态数，而表现相异的神经元则会减少关联状态数。我们只需把表示自旋的变量S（S_i，S_i+1，……）替换为神经元变量n（n_i，n_i+1，……）即可，因为两个模型几乎是相同的。

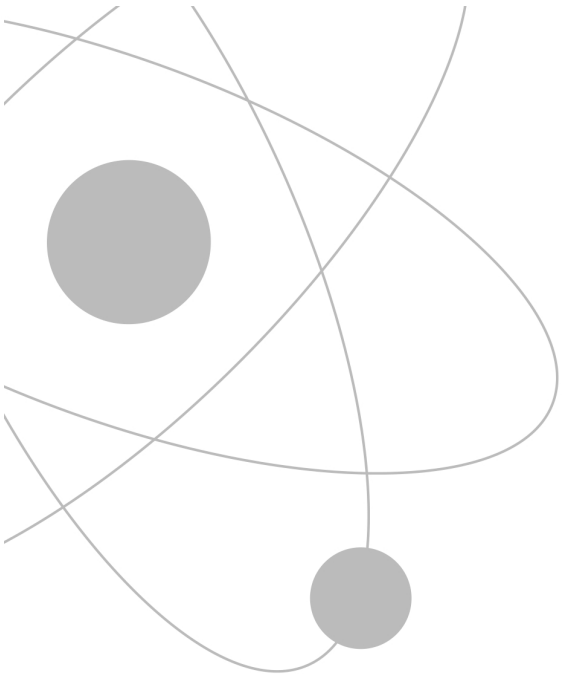
$$E = \sum_{ij} w_{ij} n_i n_j$$

根据大脑中神经元的关联度，我们为每个神经元对引入分立的不同数值，以代替原来的每对粒子改变总状态的单一项J。这个模型中的新变量是神经元i和神经元j之间的权重w_{ij}，它决定了一个特定神经元i与它的相邻神经元j之间相互交流的强度——连接两个神经元的突触的效能。我们设定这些关联强度是霍普菲尔德模型的核心。这个阵列可以形成诸多截然不同的状态，这些状态在数学上由整个阵列的关联强度模式决定。

这个类比有其局限性，毕竟人类的记忆显然比一块磁化的金属更为复杂。[2]人类有鲜活的生命，可以自我控制。基于这些模型的神经网

络也可以不断学习。在库珀实验室中，我的工作是研究无监督神经网络，它们是那些神经网络的延伸。霍普菲尔德网络必须通过学习才能训练自身的突触识别模式，相比之下，无监督网络可以进行自我训练，以习得新的记忆。当待处理的数据非常多，而又没有事先给定分类方法时，无监督神经网络就派上用场了。这个网络假定了一种能识别这些数据所属的自然类别的智能程序。通过无监督学习来进行“数据挖掘”的海量数据库的例子有很多，比如人造卫星图、股票交易图和推特上的推文等。在把一个领域中的概念引入另一个领域方面，霍普菲尔德模型是一个经典案例，而它也解释了为什么我从事着神经科学研究，最终却拿到了物理学学位。

在库珀组工作的过程中，我发现了两件重要的事情。首先，观察两个领域中的相似模式，并将其中一个领域中的模式应用于另一个领域，这一过程展现出的价值与美令我永生难忘。跨领域应用类比法不只是纯粹的科学，更是一门艺术。在音乐中也是如此，尤其是当不同的音乐传统混合在一起时。例如，柯川就曾将其他文化中的乐器融入爵士乐传统，他巧妙地把印度拉格（Raga）[(4)]系统融入自己的即兴演奏，后者因此变得极为有趣，因为一些印度音阶与莫达尔爵士乐之间有着许多相似之处。这种融合在柯川的著名歌曲《我的最爱》中也出现过。其次，我发现这些类比总有其局限性，不过，正是它们的局限性为新的见解和发现提供了生长的土壤。在霍普菲尔德模型中，把神经元看作磁铁中的一个具有自旋的量子就是一个有用的类比，它为神经科学家提供了物理学家最初计算磁性时所使用的计算工具。当然，这种类比并不完美，因为神经元是以一种远比金属中的自旋更为复杂的方式连接在一起的。由于这种局限性是众所周知的，所以神经科学家能把精力放在将电路的复杂性引入这个类比模型上，从而不断完善它。作为库珀组中的一个新成员，我曾经致力于为我正在研究的一类特殊的神经网络寻找一个新的类比。那时，我并不知道它将源自宇宙。



03

通向宇宙结构的所有河流

普罗维登斯（Providence）位于美国最小的州罗得岛州，它虽是首府，但也是一座小城。我曾在坐落于此的布朗大学攻读研究生。那里虽然与我从小生活的纽约有所不同，但两个城市中也有相似的场景，尤其是在帝国大街（Empire Street）上的AS220艺术中心。我有时会从研究生课业和科研任务中抽身出来，来到这个位于普罗维登斯市中心的爵士乐俱乐部。那时有一支名为“边缘”（The Fringe）的爵士乐队，由长号大师哈尔·克鲁克（Hal Crook）领导。奥尼特·科尔曼的自由爵士乐和克鲁克本人那令人费解的作曲“算法”，在克鲁克天马行空的长号独奏中得到了完美结合。这激起了我重拾长号、自学爵士乐的热情。白天，我做着物理学上的各种计算，而晚上，我会参加爵士乐即兴演奏会。正是因为有了这段经历，那年夏天回到纽约后我才有幸加入了斯莫斯爵士乐俱乐部（Smalls Jazz Club），后来又进入了位于波士顿的沃利餐厅爵士乐俱乐部（Wally's Café Jazz Club）。在斯莫斯举行的音乐会对我的影响极大，因为身处其中与身在科学实验室的感觉并没有多大区别。斯莫斯是一家让人感到惬意的小酒吧，老板米奇（Mitch）曾是护士和教师，那里聚集了纽约最优秀的音乐家。我参加了通宵的爵士乐即兴演奏会，并从那些传奇音乐家身上学到了很多东西。我的老师莎夏·佩里（Sacha Perry）教会了我多种转场独奏的方法[1]。佩里常说：“巴德·鲍威尔（Bud Powell）向我们展示了该怎么做，但是那些家伙却不愿意练习。”我的钢琴老师迪·达里奥夫人终究是对的。

爵士乐，通向实验思想的大道

在6年的研究生生涯中，我对演奏爵士乐的热情与我对物理学的热爱不相上下。在这种双重兴趣之下，某些强大的新事物开始茁壮成长。我加入了新成立的爵士乐队“集体”（The Collective），乐队不仅在AS220和其他爵士发烧友组织的都市音乐会上演奏，还在校园咖

啡厅演奏，面向很多跨学科的特殊听众，我从中汲取了丰富的能量。一些听众并不关注音乐，还有一些甚至恼怒地转过身去。不过，大多数人还是融入了这种氛围。乐声让他们的大脑也“滴答滴答”地转动起来，进而冒出了一些新想法，或是有关爵士乐的东西，或是甚至于我而言很神秘的事物。在我看来，乐队中的每个人都拥有独特的视角。我慢慢地意识到，我的演奏中隐藏着双重驱动力：首先，我被激励着进行即兴演奏；其次，根据听众的反馈建立新的联系。二者都有助于我培养实验思维。

我很幸运，因为我的新导师、宇宙学家罗伯特·布兰登伯格（Robert Brandenberger，图3-1）是一位爵士乐爱好者。他放手让我去创建属于自己的物理理念，鼓励我同时从事物理学与爵士乐的研究。每逢星期三，当我听着克鲁克的演奏时，新的物理理念便会不断地涌现出来。我会带着笔记本去看克鲁克的演出，并即兴创作方程与图表。当我沉入克鲁克错综复杂的长号连复段(5)的海洋中时，节奏乐器组便开始自发地探索实验爵士乐并产生节奏。每次我上台演奏时，布兰登伯格都会出现在台下，还带着一沓物理学论文和未完成的计算工作。



图3-1　罗伯特·布兰登伯格教授

注：图片由克里斯蒂娜·布克曼（Christina Buchmann）提供。

布兰登伯格不仅擅长于构造量子场论，对许多技术问题（像蒙克对乐理的贡献）也有着极深的了解，比如支撑着爱因斯坦的广义相对论的微分几何。然而，他并没有把自己局限在数学的框架中。与蒙克应用他那些生硬的旋律主题一样，布兰登伯格会用自己的理念来构造理论，即便这些理论乍看上去非常奇怪。

当布兰登伯格和学生们聚在一起时，感觉就像是在斯莫斯爵士乐俱乐部上演的一场即兴演奏会。他会与学生们展开小组形式的自由讨论——某个学生可能会提出一个想法，虽然这个想法可能毫无意义，但他总能以更加层次分明的形式重述该想法。通过这种互动，学生能即时地从这位大师身上学到有用的东西。通过模仿他，我们获得了更充分地表达自己的想法所需的直觉和技能。

在布兰登伯格的广义相对论课上，我终于明白了玻璃柜里那些出自爱因斯坦之手的神秘符号的意思，也知道了在丹尼尔·卡普兰办公室看到的那本巨著《引力》中的秘密。

宇宙大尺度结构如何而来

布兰登伯格在研究生中很受尊敬，并以“可以向他提出任何问题的教授”而为人称道——无论那些问题看上去多么愚蠢，他都能使其变得有意义。布兰登伯格和我都酷爱喝咖啡。一天，在普罗维登斯一家我们都很喜欢的咖啡馆“海洋咖啡”里，我问他：“宇宙学中最重要的问题是什么？”我正在搜集这一类数据的案例，这些数据也许能应用于我在库珀组负责的无监督学习机制的研究。我本以为会听到类似“是什么导致了大爆炸”或者“物质的基本组成部分是什么”之类的答案，但布兰登伯格却陷入了沉思，足有两分钟之久。我一直在观察他思考时的样子：他笔直地坐着，低着头，修长的双手放在膝盖上，保持着一个略显笨拙但适于沉思的姿势。他的露指手套覆盖着衬衫袖口到手指尖的部分，遮住了他枯瘦的手腕。突然，他找到了答

案。他迅速抬起头来看着我，像根本没有经过思索般脱口而出：“宇宙中的大尺度结构是如何产生和演化的？”“什么？！”我心里一惊，但并没有说出口，因为我知道最好不要急于向他发问。

那时，我的物理学知识还局限于地球之上的物质，比如量子物理和经典电动力学。直到布兰登伯格回答我的那一刻，我都没有意识到星系和超星系团是有组织的结构，更不用说它们可以告诉我们关于宇宙本质的真相，如宇宙是由什么构成的、是如何形成的。实际上，我甚至不知道宇宙学家的研究对象就是这些大尺度结构。我花了好几个星期来研究布兰登伯格提出的问题，然后就被深深地吸引了。如果在遥远的过去宇宙中是没有结构的（例如，在早期宇宙混乱、炽热的条件下），那么我们就可以理解现在的宇宙中的结构是怎么来的，以及是什么导致了将星系与恒星、行星，最终与人类连接在一起的宇宙自组织。

早在公元前2000年，占星师就在夜空中寻找星星随机分布形成的图案，以期能找到宇宙的规律和意义。在美索不达米亚、中国、巴比伦、埃及、希腊、罗马和波斯，人们发现了星座中的一个明显规律。然而，人类肉眼所见的部分极为有限。1608年，第一台望远镜在荷兰建成；1609年，伽利略对这台望远镜加以改造。它能探测到人类肉眼看不见的光线，这是通过透镜组的放大、聚焦效应来实现的。之后，人们用了800年的时间，努力建造更大的望远镜，以看到宇宙中越来越多的物体。最终，埃德温·哈勃（Edwin Hubble）发现我们的宇宙中还存在着其他星系。一个典型的星系是由数以百亿计的恒星构成的薄饼形结构，直径约为10 000秒差距[(6)]，绕着一个中心旋转，就像旋转的飞盘一样。

1920年，在哈勃做出他震惊世界的发现之前的几年，两位著名的天文学家哈罗·沙普利（Harlow Shapley）和希伯·柯蒂斯（Heber Curtis）就宇宙的尺度展开了一场“伟大的辩论”。在

宇宙学历史上的这个关键时刻，还没有确凿证据能证明宇宙的大小。天文学家发现了一些神秘的螺旋状物体，他们称之为“星云”。根据沙普利的说法，那些星云只是我们星系中的旋转气体云。他认为，宇宙中只有一个星系，就是我们所在的银河系。而柯蒂斯却认为，那些星云正是银河系之外的星系。

哈勃的发现终止了这场辩论，证实了我们的宇宙中存在着除银河系以外的其他星系，不过那时的宇宙学家忽视了一点，即这些星系存在于星系团之中，且延展到了亿秒差距的数量级上，但是这一事实并没有引起人们的广泛兴趣。即便在绘出了星系在更大距离尺度上的分布图很多年之后，对于星系分布中是否存在着有趣的组织或者更大的团结构，一些天文学家依旧不确定。

不过，玛格丽特·盖勒（Margaret Geller，图3-2）是个例外[2]。盖勒从小就对图样感兴趣。童年时，她的父亲西摩·盖勒（Seymour Geller）就向她展示了自然界中的图样与物理学之间的联系。她父亲是一位X射线晶体学专家，主要研究物质的原子结构与其物理性质之间的关系。



图3-2　宇宙学家玛格丽特·盖勒

注：图片由斯科特·凯尼恩（Scott Kenyon）提供。

当玛格丽特·当盖勒在哈佛-史密森中心从事天体物理学方面的研究时，她便特意去寻找星系在大尺度上的分布图，并勇敢地用自己的望远镜去探索遥不可及的空间。1989年，在一项与约翰·修茨若（John Huchra）合作发表的开创性研究的论文[3]中，盖勒绘制出了扩展到100亿秒差距数量级上的星系图！他们发现星系聚集成一个像墙一样的丝状结构，并称之为“长城”（图3-3），这是目前观测到的宇宙中的最大结构。这个结构首次表明，星系是自排列的。然而，正如布兰登伯格对我说过的那样，真正的问题在于这些星系是怎么形成的。

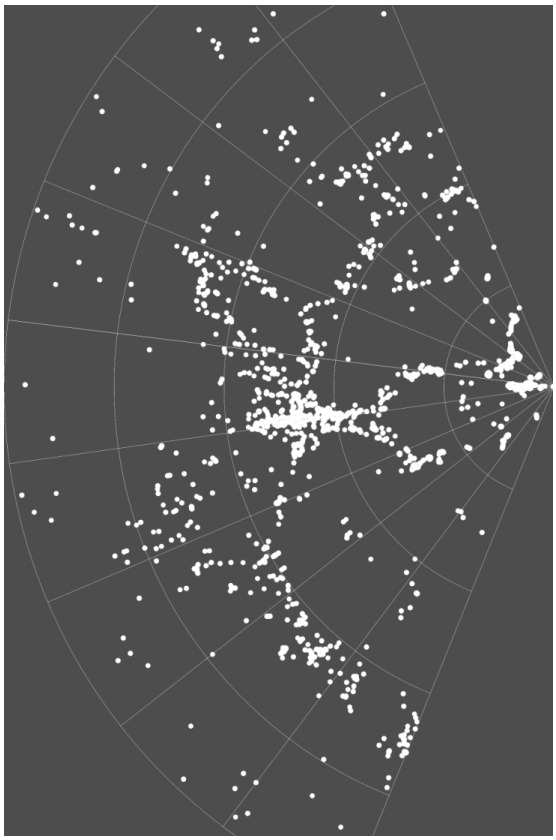


图3-3　由盖勒和修茨若发现的“长城”的大尺度图

注：图片由玛格丽特·盖勒提供。

第一次看到盖勒与修茨若绘制的星系图时，我就觉得整个宇宙就犹如一个巨大的自组织网络。这个关于大尺度结构的课题也引起了我的共鸣，因为我曾在生物课上学到，一个生物系统的功能通常可以经

三维结构展现出来。DNA的双螺旋结构就是一个典型的例子，它揭示了基因的编码功能，以及蛋白质与DNA之间的相互作用。星系的大尺度结构是在辉煌之中，向我们展示事物为什么会像现在这样运作吗？

在现代技术的帮助下，宇宙学家像古人那样寻找着看似随机分布的星系的分布规律——不仅包括我们星系中数以百亿计的恒星，还包括整个宇宙中的星系的分布。这是一个如此“卑微”的追求。他们致力于寻找新的星系，并绘制出这些星系的位置，仅仅为了研究星系之间的“相关性”。

除了绘制和研究宇宙中星系的分布图，宇宙学家的工作还包括研究星系的动力学。大质量的星系具有巨大的引力，所以它们会彼此吸引，进而影响它们在空间中的运动轨迹。宇宙学家和天体物理学家发现，我们的宇宙正在膨胀。随着时空的膨胀，星系之间正在彼此远离，就像面包膨胀起来时，上面的葡萄干彼此远离一样。宇宙的膨胀速度随时间而变化，并在星系的形成和演化过程中，即它们形成并组织成大尺度结构的过程中起着关键作用。实际上，如果宇宙不膨胀，这些结构就不会形成。这是一个非常重要的事实。然而，当宇宙学家开始研究那些前所未见的超星系结构时，他们对结构本身的性质尚无法达成一致。一些人基于这些数据，坚信这些星系的集合呈丝状结构，就像一张蜘蛛网。另一些人则认为宇宙的时空构造呈气泡状结构，而星系就分布在这些气泡的表面。确定宇宙到底是哪一种结构至关重要，因为它能告诉我们，在宇宙的早期阶段，原初的恒星、星系和星系团形成的物理机制。

这两种观点造就了布兰登伯格对我“研究什么”这个问题的回答。对于宇宙学家之间的分歧，布兰登伯格觉得很遗憾。这是我第一次认真思索宇宙膨胀的问题，我想象着作为大质量自组织星系网络的最大结构的诞生和成长。我想出了一个准备问布兰登伯格的问题：“为什么不能在大尺度结构数据上训练利昂·库珀新开发的神经网

络，让它确定真正的结构是什么呢？”当然，我会以合作者的身份而不是学生的身份向他提问。事实证明，库珀的跨学科研究方法是可以传播的，之后不到一个月，我就加入了库珀和布兰登伯格合作的一个项目，这个项目旨在用无监督神经网络来检测大尺度结构。几个月后，我向布兰登伯格请教了众多问题。他也是一位研究费曼图的专家。对于电子与正电子彼此湮灭、立即产生光的点，我始终感到很困惑。我怀疑，在无限接近那个点时，我们需要无穷大的能量[4]，而我对这个结果感到不可理解。一天，布兰登伯格凭直觉知道了所有困扰我的问题驱使着我去往的方向，他对我说：“啊哈……你想找到引力的量子理论，对吧？”后面我们会讲到，在基本粒子之间存在相互作用的最小尺度上，量子力学与引力的不相容表现得非常明显，而这被认为是基础物理研究中的一座“圣杯”。在那个学期期末，布兰登伯格成了我的博士生导师。宇宙结构的形成与演化问题是促使我开展研究的动力，带着这份动力，我开始探究量子引力与宇宙学的共同点。

我们的神经网络计划之所以从未完成，原因有二。第一，关于众多星系的数据太过庞大，若想厘清它们之间的关系，无监督网络需要高度依赖计算机算法与编程。越是应用爱因斯坦的相对论来研究宇宙结构的形成，我就越对仅仅依靠纸笔和咖啡来处理这些漂亮的方程入迷，而对在超级计算机上撰写成千上万行代码毫无兴趣。万事万物均在变化，如今，在物理理论方面，计算机在研究中扮演着越来越重要的角色。幸运的是，编程也变得越来越好玩。第二，其他的研究人员后来也产生了用神经网络来研究大尺度结构的想法。所以，也许这项计划终会完成。

从量子力学、磁学到神经网络，再到星系团，在不知不觉中我已经开始了冒险。我已经走上成为物理学家的路，而且沉迷于由无数星系编织而成的宇宙结构。在星系、行星和人类出现之前的早期宇宙中，亚原子粒子的海洋就已经存在，当我研究它时，我会回到量子力学上来，但那时我对此还一无所知。两者之间的联系就在那里，但我

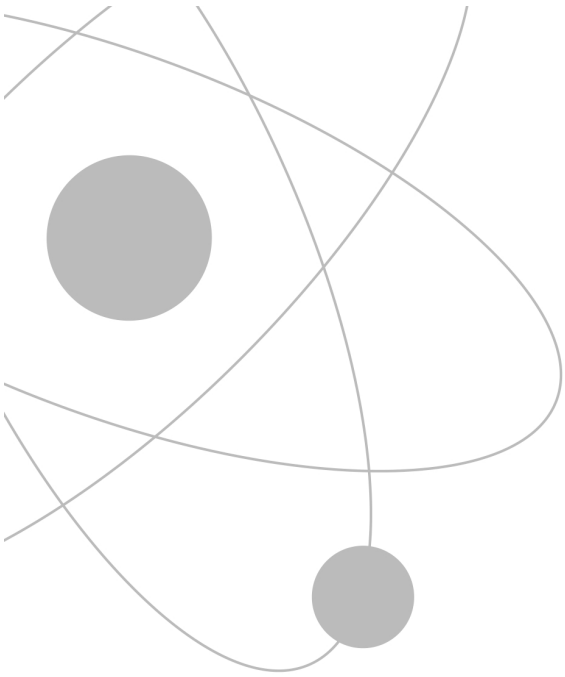
需要一块基石，也许是另一种类比法，来确定宇宙结构产生自量子物理的机制。这需要往前跨出一大步。毕竟，布兰登伯格认为这个问题是宇宙学中最大的谜题。是的，这的确需要迈出一大步。

《巨人的步伐》是爵士乐萨克斯手约翰·柯川即兴演奏的一首著名乐曲，这首曲子对和弦的影响是独一无二的，并且永远地改变了爵士乐。柯川是我最崇拜的爵士乐大师之一，他会如何看待今日的技术所揭示的宇宙结构呢？对于宇宙，他曾做过深入思考，并在自己的爵士乐创作和即兴演奏中尝试了各种结构（在后面的章节中，我们会讲到这些）。现在，我们先讲这个故事的另一面，即那些用音乐来解释宇宙的科学家的故事。古代的哲学家如毕达哥拉斯，早期的天体物理学家如开普勒，这些伟大的科学家仅凭直觉就知道，物质的产生和宇宙结构的演化背后隐藏着和声与音乐。他们的理论为今天我们所知的科学铺就了康庄大道，不过他们在音乐上的类比却与现实不符，所以他们未能更进一步。然而，我没有停下脚步，而且在这条路上我并不是孑然一身。

The Jazz of Physics

第二部分

音乐与那些科学家的故事



04

弦论，
审视美丽宇宙之声

The Jazz of Physics

在我研究生生涯的最后一段时期，超弦理论风头正劲。爱德华·威滕（Edward Witten）是这个领域的天才，我认识的所有从事理论研究的研究生都在研读他最新的论文。英国理论物理学家保罗·狄拉克（Paul Dirac）对量子理论做出了奠基性贡献，和狄拉克一样，威滕也有着世界一流的数学能力。他获得过菲尔兹奖（Fields Medal），还拥有和爱因斯坦一样的物理直觉。当你刚刚自认为抓住了他一篇论文的要点时，他可能又发表了一篇新的颠覆性的论文——这个理论已经经历了两次革命，第三次革命马上就要到来了。我们不得不逼迫自己努力跟上他的步伐，因为弦理论实在太令人兴奋了。它虽然在理论上是简单的，但在数学的推演上却极为复杂，为新的创造性理念留出了巨大的想象空间。

倾听宇宙的交响曲

乍看上去，弦理论似乎是反直觉的。在经典物理学中，一根真实的、正在振动的弦会产生整数频率的驻波。不断靠近弦，观察它的细节，你会发现它其实是由原子构成的。根据弦理论，如果你不断靠近一个基本粒子，观察它的细节，那么你会发现它是一根由能量构成的振动弦。在弦的世界里，弦才是最基本的元素。当你离它们够远时，它们才表现得像粒子。弦理论比量子场论更具音乐性，对此，加来道雄（Michio Kaku）曾做过精妙的描述：“我们在自然界中看到的亚原子粒子、夸克和电子不是别的，正是一根小小的振动弦奏出的音符……物理学就是你可以给出的关于振动弦的和谐定律……宇宙则是由诸多振动弦共同演奏的一首交响乐。”[1]

那么，爱因斯坦在他人生的最后30年里慷慨激昂地写下的“上帝的思想”，又是什么呢？现在，历史上首次出现了一个“上帝的思想”的参选者，它就是宇宙之声。

基于弦理论的音乐本质，以及通过对音乐和声音的理解，我能仅凭直觉就迅速地掌握这个理论。此外，它还与我把物理学和音乐结合起来的期望高度契合。如果弦调好了，那就开始演奏吧！基本弦不同的振动方式可以产生不同的音符，这些音符可以转变成不同的粒子性质，譬如电荷、质量和自旋。此外，弦的特定振动方式能产生量子化的引力场，也即引力子（graviton）。至此，我们终于得以把引力引入量子物理。和爱因斯坦一样，许多顶尖的物理学家都曾试图将量子力学与引力统一起来，但他们都失败了。现在，一根简单的振动弦就优美地做到了这一点。

在“振动弦的物理学能给出所有传递作用力的粒子，以及所有基本粒子”的意义上，弦理论很自然地成了万物至理。不过，这种优美是有代价的。当弦理论学家开始探索弦的物理学原理时，他们获得了一些惊人的发现。在小空间中运动的弦与在大空间中运动的弦遵循同一种物理学，我们把这种性质称为T对偶（T-duality）。在弦理论的假设中，我们不是生活在四维空间，而是十维空间。即便在今天，强大的粒子对撞机和多种多样的太空实验仍在寻找这些隐藏的额外维。然而，在如今这个丰富的统一新世界里，似乎并不存在弦理论的唯一解。实际上，弦理论共有5种不同的版本。

在我研究生生涯的最后一年里，布兰登伯格召开了一场组会。20世纪80年代早期，一些理论家致力于推动应用量子场论解决早期宇宙问题，他就是其中之一。在组会上，布兰登伯格告诉我们，他认为弦理论已经发展成熟，可以用来解决一些关于早期宇宙的问题了。我还记得他当时说：“如果我们能通过弦理论找到暴胀理论的机制或者其替代理论，那就再好不过了。”对我来说，在接下来的几年里，我要做的事情已经很清楚了：深入学习弦理论，以探究宇宙暴胀到底是不是一个弦理论现象。

在离开布朗大学之前，我走进弦理论学家安托·杰维奇（Antal Jevicki）的办公室，然后关上门，问他：“杰维奇先生，我想在博士后阶段研究弦理论，您能给我一些建议吗？”杰维奇带着他匈牙利式的笑容，说：“整装待发，开始行动。”这场竞赛的获胜者将得到一份博士后研究员职位的合同，以及永久教职。作为一名博士后，你必须进行独立的研究，并在自己的研究领域取得一定的成就。在理论物理学领域，若想获得教职，必须做过博士后的工作。然而，很多科学家在获得永久教职之前都要经历10年炼狱般的博士后研究员生涯。这些研究职位的竞争极为激烈，而在顶尖的学术机构得到一份博士后研究员职位的机会更是渺茫。不久之后，我发现，在申请伦敦帝国理工学院博士后的300多名候选人中，只有两人最终得到了这份职位。由于我在研究生阶段的最后一年里独立完成的一些工作，我成了幸运儿之一。

因此，我最终还是离开了布兰登伯格，跨过大西洋，来到了伦敦帝国理工学院——欧洲理论物理学的圣地之一。那时，我天真地以为，在物理学领域，布兰登伯格和库珀推崇的“他山之石”与“即兴演奏方法”很普遍。然而，帝国理工学院却截然不同。作为一个新入职的博士后研究员，对失败和被轻视的恐惧在我的潜意识里慢慢滋生。与其他的博士后交流对我并没有什么帮助，尤其是我的舍友尤西·卡克基纳（Jussi Kalkkinen）。卡克基纳是一位优秀而刻苦的芬兰弦理论学家，他能把自己锁在办公室里进行马拉松一般的冗长计算，演算那些十一维的超引力方程。我曾尝试效仿他，但在两个小时的计算之后，我就坐在办公室里昏昏欲睡了。

物理之美，数学之美

当开始思考一名成功的博士后必须具备的能力时，我不禁怀疑，这个似乎主要是“闭上嘴，动笔算”[2]的领域是否真的适合我。很快我

就感到有点力不从心了，因为其他博士后所掌握的技术与数学能力都比那时的我更强。所以，在理论研究中，什么才是最重要的呢？是技术，还是直觉？现在回想起来，当时困扰着我的是学界正在争辩的问题，即什么是理论物理研究中的“美”，而这是我在课堂上无法学到的东西。

史蒂文·温伯格（Steven Weinberg）是诺贝尔奖获得者、电-弱核力统一理论的先驱，在《终极理论之梦》（*Dreams of a Final Theory*）[3]一书中，他提到了狄拉克的一次演讲：

> 1974年，狄拉克来到哈佛大学，讲述他作为现代量子电动力学的奠基者之一的历史性工作。在演讲快结束时，他向我们研究生致辞，并建议我们关注方程的美，而不是意义。虽然对学生而言这并不是一个好建议，但在狄拉克的工作中，甚至在物理学的大部分历史中，对物理学中的美的追求始终是一个重要的主题。

我们可以理解温伯格部分同意狄拉克的说法的原因。温伯格曾应用纤维丛理论——一个有着极为优美的几何公式的理论，发现了电磁力与弱力实际上是一种统一的力，即电-弱力。他认为，学生不必严格遵循有关“不要回头去关注那些方程的意义”的建议。如果温伯格没有回头去追问他研究的那些方程和所做的计算的意义，那么他就不会获得突破性的发现，也就不可能因此获得诺贝尔奖。原来，温伯格将自己的方程用在了错误的物理学系统（强核力）中。他在诺贝尔奖获奖致辞中说：“1967年秋天的某日，在驾车去麻省理工学院的路上，我突然意识到，我把正确的方程用在了错误的问题上……根据对称性自发破缺（Spontaneous Symmetry Breaking，简称SBB）[4]的理论，弱力与电磁力可以被统一。”

那么，狄拉克所说的物理学中的“数学之美”到底是什么呢？许多物理学家认为，物理学之美是指它看起来有多优美。在词典中查阅“优美”（elegant）一词时，你会发现诸如“精练”（refined）、“高雅”（tasteful）、“雅致”（graceful）、“高级”（superior）等词汇。当一个方程简明扼要、直击本质时，我们就便认为它精练。当一个方程由数字、字母和符号等数学语言构成时，我们就说它高雅。当一个方程具有推导出其他方程的能力时，我们就觉得它高级。一个优美的方程是非常美丽的。

在物理学中，关于优美的一个绝佳例子是描述行星运动的方程。开普勒总结了三条极为精确的定律，可以用来解释行星绕太阳进行的椭圆运动。然而，其中缺少一个关键因素，即引力。于是，牛顿出现了。牛顿的万有引力定律表明，开普勒三定律可以由一个方程推导而来。相似地，在爱因斯坦证明了时间与空间可以统一成四维时空后，另一系列极为精确的方程，即描述电磁现象的麦克斯韦方程组，也可以从一个“母”方程推导而来。这些统一振奋了人心，因为它们简化了方程。

在随后的几年里，人们发现，大多数粒子都有与之对应的反粒子，这个发现催生了现今物理学中最重大的理论之一——弦理论。弦理论的目标是建立一个框架，以容纳自然界中四种已知的基本作用力，它因此被称为“万物至理”。弦理论并不是唯一试图实现这种统一的理论，它虽然来源于基础粒子物理，但是基于狄拉克发现的粒子对称性，它尚未被实验证实。不过，弦理论的成功却凸显了人类对物理学之美的认识所面临的挑战。

具有数学之美的理论是非常迷人的，因为它为研究人员提供了一个舞台，他们可以在这个舞台上探索能够反映真实物理世界的虚拟现实场景。弦理论的优美不仅体现在统一量子力学与引力的目的上，还体现在具体的实现手段上。正所谓“千里之行，始于足下”，从一维

振动弦的方程出发，我们可以推导出所有作用力（引力、电磁力、弱力和强力）的方程。此外，弦理论还有一个我认为非常美丽的特征。通过额外维（我们所处的四维时空之外的维度）的几何形状，弦理论为4种基本作用力和物质的存在提供了一种极为有趣的描述。

一个物理学理论无论多么优美，它都必须符合事实，而争论往往会围绕着一个理论做出的不符合预期的预言来展开。为了理论的自洽，充满对称之美的弦理论需要依靠额外维，有人据此认为弦理论预言了一个无限世界的存在。关于这一点，我们将在后面的章节中进行讨论。由于无限世界远远超出了我们的观测能力，也超出了大多数物理学家的常识范围，所以一些物理学家认为弦理论并不优美。尽管如此，这种追求对称性与数学之美的审美倾向，一直影响着现代物理学的发展进程。

与方程式“共舞”，在和弦变化之间“演奏”

作为一个年轻的物理学工作者，我对狄拉克与温伯格的天分以及两人对物理学的贡献无比崇敬，同时也将他们的建议铭记于心。然而，狄拉克为我指引的方向与我博士后工作需要面对的现实，以及我期望能在新的工作环境和同事交好的愿望相悖。总之，在离开了我在普罗维登斯的耗费6年时间建立的交际网后，我必须在帝国理工学院与其他博士后同事建立新的友谊和社交关系。我还记得在亨利·庞加莱研究所（Institut Henri Poincaré）参加一场理论物理研讨会时，一群博士后同事争论着一个弦理论问题，我则在他们周围晃来晃去。我兴奋地试图从一个思辨的角度切入话题，但其他博士后却继续相互讨论，仿佛我不存在一般。这给我上了一课：若想加入他们的讨论，我就必须拿出自己的真本事。你的方程呢？要想在这个球场上打球，我必须学会各种动作——这意味着我要进行一些数学方面的训练。这一

切让我回想起了我参加过的爵士乐聚会，在那些聚会上，每个人的关注点都在于谁能完美地“演奏”出和弦的变化。

狄拉克想表达的意思非常清楚：“工欲善其事，必先利其器”，闭上嘴，动笔算，你终将在这个领域取得成功。因此，我打算收起天马行空般的即兴演奏和类比思维，并尝试狄拉克的方法，看看从这些方程中能获得什么样的物理学发现——优美的数学到底预言了什么现实。我并不是一个人在战斗，实际上，我大部分同事都严格地遵循着这种狄拉克式的科研方法。博士后们紧闭房门，趴在桌上夜以继日地工作。我们在计算上花费了大量的时间，希望能解开一个通向颠覆性发现的谜题，或者至少得到一篇值得发表的论文。

我经常端着双倍浓缩咖啡走进办公室，继续计算超引力。在我博士后生涯的几年里，宇宙学研究的主要目标遵循着布兰登伯格所指示的方向，即找到早期宇宙中物理学运作机制之间的深层联系，以解释宇宙中的大尺度结构是如何演化而来的。科学家认为超引力就是这种理论，尤其是它的十一维版本，这个版本被称为十一维超引力。超引力有可能就是狄拉克梦想中的理论，因为它非常优美，仅一行方程就将曾经分离的引力方程和电-弱统一理论结合起来，后者是温伯格关于电-弱力的理论。大家都认为，沿着十一维超引力深入探索，就能找到更多隐藏着的具有简洁美的数学公式。当时我正在寻找超引力微观世界的一种隐藏形式，它关乎宇宙中的大尺度结构的形成。

超引力其实是爱因斯坦的广义相对论的一个版本，只不过它披着超对称的外衣。超对称把费米子与玻色子联系在一起，并把每个玻色子与费米子配对成“超对称粒子”。玻色子是传递作用力的粒子，比如传递电磁力的光子。而费米子既是构成物质的粒子（比如电子和夸克），又是这些亚原子粒子的反粒子。只要照照镜子，你就能明白超对称的运作机制了。由于你的身体是左右对称的，所以即便镜子把你的左半身与右半身颠倒了，镜中的你与他人眼中的你仍是相似的。在

不影响物理系统行为的前提下，超对称就像一面镜子，把玻色子与费米子对调了。

从理论上讲，超引力不仅令人着迷，而且意义深远，不过我却被计算本身深深吸引，那些符号自带美感的同时，又共同呈现出震撼的视觉效果。那一刻，我的敬畏之情油然而生，时间仿佛回到了20年前，我又变成了那个站在自然博物馆里盯着爱因斯坦写下的符号的小男孩。只需提高或者降低某个变量的值，我的笔尖就可以操纵虚拟的几何世界。如果能得到一个偶然的发现，付出再多的努力似乎也是值得的。大量的项会相互抵消，方程因此变得更简单，纸上的方程和我的思维也瞬间变得更清晰了。有些时候，某个方程的形式会出乎预料地与某个已知的宇宙事实相对应，而我知道，在这种狄拉克式的努力之下，这些方程终将指向我们的宇宙。虽然偶尔能获得巨大的满足感，但这终究是一项艰苦的工作。在工作间隙，博士后们会边喝咖啡边抱怨自己的徒劳努力，有时也会兴奋地分享自己的“神恩时刻”，或者只是想喝点咖啡，以便让大脑满载着能量继续做计算。

我的目标是熟练掌握超引力，那种操纵方程的感觉总是让我感到很愉悦。时光飞逝，转眼之间，两年博士后时光马上就要结束了。在探究超引力和超弦理论如何揭示宇宙结构的秘密方面，我觉得自己并没有取得进展。虽然我在超引力计算上遇到了困难，但其他人似乎都在发表揭示超级世界中隐藏的数学结构的精彩论文。即便我很努力，但我还是陷入了自我怀疑的深渊。也许布兰登伯格和库珀会为有意阻止我进入数学的迷宫而感到抱歉，因为只有精通数学，我才能掌握在研究中取得进展所必需的技能。

一天下午，在一次休息时间过后，我收到了理论组行政人员格拉济耶拉（Graziela）的一封电子邮件。邮件中说，理论组的组长克里斯·艾沙姆（Chris Isham）博士想和我谈谈。我被吓到了，心想：“他终于发现了，我就是个骗子。”我丢下正在进行的计算，慢慢地

站起来，朝艾沙姆的办公室走去。一路上我都在嘀咕，他会不会把我看作小丑，并要求我离开他那声誉卓著的研究小组。

我第一次知道艾沙姆是在霍金的《时间简史》一书中，他是与罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）一同出现的。艾沙姆、彭罗斯和霍金是同事，他们都是世界级的数学物理学家。艾沙姆身上笼罩着一层神秘的光环，并集合了独立、创造性的思维和超人类的数学能力，魅力十足。他在量子引力理论方面取得了关键性的突破，而量子引力理论试图统一量子力学与引力，也即“万物至理”。在20世纪60年代，艾沙姆是一位年轻的奇才，也是诺贝尔奖获得者阿卜杜勒·萨拉姆（Abdus Salam）的博士生。萨拉姆的突出贡献是提出了关于两种基本作用力的大统一理论，但这两种力不包括引力。

与霍金一样，艾沙姆也患有一种罕见的神经系统疾病，这使得他在一生中的大部分时间里都要承受难以忍受的痛苦。他非常高，在帝国理工学院的长廊里，你可以越过如潮水般涌出教室的学生，远远地看到他。他走起路来一瘸一拐的，身体微微斜向一方，有点儿像舞台剧中演员的动作。他在许多方面都令人钦佩，比如他很爱笑，风趣而幽默，经常提出建设性意见。一个帝国理工学院的学生与我分享了一个关于艾沙姆的故事。

在一个潮湿的冬日清晨，伦敦阴沉的天气让你一点儿也不想起床时，艾沙姆的举动却震惊了昏昏欲睡的学生，让他们亢奋起来。他突然宣布，要把推导了一半的公式倒着推回去。“这只是一个惯例而已。如果你能从右往左读，那为什么还要坚持从左往右读呢？”他狡黠一笑，如此问道。学生们从震惊中回过神来，也不再浪费时间做笔记了，都专注地看着他倒推公式。那天的课程内容是关于纤维丛的，那是艾沙姆当时最喜欢的课题之一。他总是能在课堂上深入浅出地讲解纤维丛。他身体里的每个细胞都

装着数学，所以无论它朝向哪个方向——无论是朝前还是朝后、朝上还是朝下，对他来说都无所谓。

我走进艾沙姆博士宽敞的办公室，看到他正坐在一张倾斜着的扶手椅上休息，双脚翘在桌子上。他的双臂微微颤抖着，身后的黑板上写满了对拓扑理论（关于拓扑空间规则的极为复杂的代数操作）的说明。这些内容极多，一张A4纸是写不下的。看到我时，他微微一笑，也不浪费时间，直截了当地切入正题。“你为什么要来这里？”他问。我有些紧张地回答：“我想成为一位优秀的物理学家。”艾沙姆接下来的话令我惊讶不已：“那就别再读那些物理书了。你需要培养你的直觉，因为它是伟大的理论物理学家的灵感源泉。”仿佛他的科研能力还不够令人印象深刻一般，接着，他平静而认真地告诉我，他曾在梦中训练自己的大脑进行冗长的计算。那时的我还不知道他在对待精神和哲学方面的问题时态度非常认真。在告诉了我他的秘密之后，他又问我：“你有什么爱好？”他在睡梦中（我只在晚上睡觉）施展的技艺让我目瞪口呆，我神思恍惚地答道：“我会在晚上演奏爵士乐。”他沉默了一会儿，才道：“你应该多多演奏音乐。我也唱歌，我发现音乐对激起直觉而言是一项很理想的活动。”说到这里，他停顿了一下。“看到这些书了吗？”他指着分析心理学创始人卡尔·荣格（Carl Jung）的著作全集问，“15年来，我一直在学习荣格学派的精神分析学。你可以看看第九卷第二部分《伊雍：自性现象学研究》（*Aion: Researches into the Phenomenology of the Self*）。物理学研究自有其神秘的一面。你知道沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）与荣格共事过吗？”

我并不知道，所以感到很吃惊。作为量子力学的奠基人之一，泡利被爱因斯坦亲自提名诺贝尔奖。泡利能迅速发现数学错误，且无法容忍毫无条理的理论，他的名言是：“你的理论连错误都算不上。”他是狄拉克的忠实拥护者，且预言了一种难以捉摸的粒子——中微子

的存在，而中微子被认为是一种不可忽视的技术力。我很难相信，泡利竟然会与心理学扯上关系，但我的想法很快就发生了转变。艾沙姆指着另一本书《从原子到原始型》（*From Atom to Archetype*），那是泡利与荣格在20年间的书信集。“书中提到，泡利从出现在梦中的一个符号得到启发，提出了泡利自旋矩阵。你想把这本书借去看看吗？”我不仅借走了那本书，还视它为珍宝，因为我刚刚获得了深刻的领悟。这是一个有待开发的新领域。我不再和理论组的同事一起在工作间隙喝着咖啡抱怨冗繁的计算，而是在波多贝罗路（Portobello Road）上的一家酒吧里一边小酌，一边阅读那些书信。

凭借艾沙姆给我的特权，我每星期都能与他讨论理论物理中的基本问题，我像他的弟子一般遵循着他的指示。我加入了一支爵士三重奏乐队，并在诺丁山（Notting Hill）的剧场里做了两场演出。我阅读了荣格的著作，并且告诉了艾沙姆我的想法。几个月后，我的新爱好就收到了成效。当时，我在一个项目上卡了很久。我试图把弦理论与宇宙膨胀联系在一起，也即宇宙在诞生后经历了一个快速膨胀（或暴胀）的阶段这一理念。一天晚上，我来了段萨克斯独奏，演奏曲目是约翰·柯川的《PC先生》（*Mr . PC*）。中场休息时，我的脑海中出现了一幅图像，我知道它一定有助于解决我在项目中遇到的问题。第二天，我带着这个新发现醒来，匆匆跑到办公桌前，草草写下一些方程。这些方程与一个叫非对易几何（noncommutative geometry）的数学分支相关，而后者提出，早期宇宙中的光速是可变的。我与宇宙学家若昂·马盖若（João Magueijo）就这种新联系共同发表了一篇文章，后来这篇文章被引用了100多次。这虽然并没有让我离自己的超引力宇宙结构之梦更近一步，却证明了艾沙姆的方法对我来说是有用的。

在艾沙姆与布兰登伯格对我演奏音乐的鼓励之下，以及出于对他们追求数学的卓越与优雅的敬佩，我的狄拉克方法开始发生变化。与方程“共舞”变成了一个多层次的任务。在学习爵士乐的过程中，练

习音阶和技术固然很重要，但走出去并与他人合奏也十分重要。即兴演奏是一种即时行为，练习它的唯一方式就是去公开场合演奏。我慢慢意识到，我在科研过程中忽略了这一点。我对狄拉克方法的理解太流于表面了。通过把我研究的问题和面对的挑战带入爵士乐演奏中，我发现自己就像一个正在玩沙盒游戏的小孩，丝毫不担心有没有犯错，或是显得傻不傻。在多年保有对物理学与音乐的热爱，却一直把它们限制在两个不同的领域之后，突然之间，音乐就激发出了我的数学直觉。我第一次发现，直觉也是一条通向新发现的大道。最终，泡利与荣格的交流使得泡利发现了物质的新性质和自然的新法则。自从进入大学以来，将音乐与宇宙学结合起来的想法就一直萦绕在我脑海里，而现在，我把它们从我的直觉中挖掘出来，直面它们，我发现它们并没有我想象中那么古怪。

与他人一起演奏音乐成为我科学实践的一部分，它也是一种研究方法，而且非常有趣。在夏日纽约的通宵爵士乐晚会上，我会随时进行物理计算。每到中场休息时间，当爵士乐迷们热烈地讨论音乐时，我会提到我的物理学研究，并且把它们与爵士乐联系起来。我采用的依旧是狄拉克方法，只是换了个环境而已。在这些音乐会上，我找到了一种做研究的新形式，我也因此变得玩心十足。我凝视着小号手与爵士乐独奏手换场，就像在看两个超对称粒子进行超对称反演。我永远不会忘记我曾告诉一位现在很有名的钢琴家他的演奏是几何的。一位次中音演奏者加入了我们的讨论，他说：“虽然我听不懂你在说什么，但他的演奏真美！”

这里面有一个关键的几何概念，即等距，也就是一个点集中的任意两点之间的距离保持恒定不变。我所谓的钢琴独奏是“几何的”的一个简单例子，类似于在二维平面上取一个正方形，并滑动它。这个滑动的正方形与原来的正方形是等距的，因为四条边上任意两点之间的距离保持不变。而有些曲面是弯曲的，那么在这种曲面上移动正方形，即使再怎么做也无法保持它的四边之间的距离不变。通常，一位

爵士乐独奏者会重复一段有旋律与节奏的组合，或是反复演奏即兴段，并且在全部12个调上演奏它——在旋律组合的音符之间，组合在不同调上的变换不会改变音符之间的距离。

几年之后我发现，当年在斯莫斯时，我试图在几何推理、对称性和音乐之间建立联系的想法并不疯狂。值得一提的是，在音乐和即兴演奏中，对称性与几何推理功能的使用有着惊人的相似之处。我们来看看史提夫·汪达（Stevie Wonder）的《你是我生命中的阳光》（*You Are the Sunshine of My Life*），以及德彪西（Debussy）的《帆》（*Voiles*）。这两首歌曲都展现了人类的共同情感中一些强有力的东西，当然，音乐本身也很美妙。两首歌曲都使用了对称的音阶，之所以这么说，是因为当你把它们画出来时，它们看起来是对称的。想象一下把12个音符写在圆周里：如果我们从C音开始，按顺序逐次向上走半步，持续12次，我们就又回到了C音。这就是12个音符的几何表示（一个其上分布着离散点的圆周）。

我们可以用线把这些音符连在一起。等边三角形是二维三边图形中对称性最高的，正六边形是二维六边图形中对称性最高的。在图4-1中，六边形上的音符为C音、D音、E音、升F音、降A音和降B音，它们共同组成了一个被称为“全音音阶”的对称音阶。它听起来像什么呢？你可以在《你是我生命中的阳光》的开头听到它，在歌唱部分开始之前，电子键盘会演奏出一些欢快的上行音符。在德彪西的《帆》中，全音音阶则是下行的。

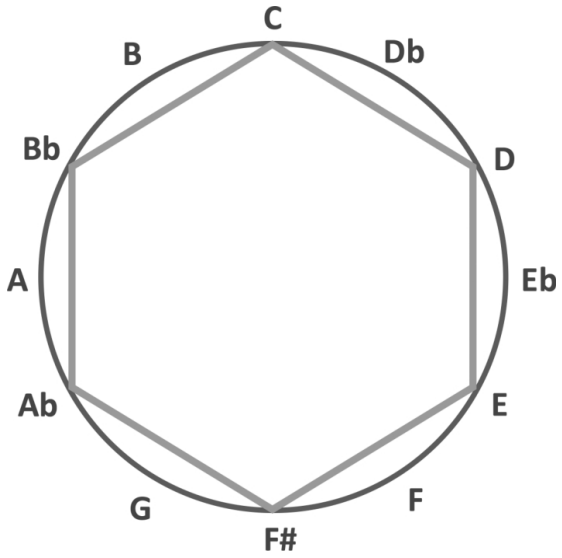


图4-1　全音音阶的六边形对称性

我们可以创造诸如减音阶（一个正方形）等其他对称音阶。派特·马蒂诺（Pat Martino）是当今最伟大的爵士乐吉他手之一，他于1980年患上了致命的脑动脉瘤。手术拯救了他的生命，却让他患上了失忆症，他不得不重新开始学习吉他。巧合的是，他开发了一套基于两种“亲本类型”对称性的新系统，它们与吉他指板的几何结构天生相合。这些亲本类型或者说和弦仅仅是对称的增三和弦与减七和弦。马蒂诺做过许多演示，展示了母和弦生成一系列次级和弦的力量。

与之类似的是，柯川也使用对称音阶作为他的专辑《巨人的步伐》的基础，关于这一点，我们很快就会进行详细讨论。柯川告诉戴维·阿姆兰（David Amran），他的一个关于音乐的简单理念是受到爱因斯坦关于相对论的著作的启发，这个理念就是对称性。我研究了柯川的曼荼罗，发现它具有强烈的对称性。基于惯性参考系之间的时空对称性，爱因斯坦提出了狭义相对论和四维形式的电动力学。此外，他还利用卷曲时空的对称性，证明了加速观察者与静止观察者之间的等价性。在统一且简化的对称性理念的基础上，爱因斯坦才得以成功表述那些复杂的、截然不同的物理学理念。

我曾有幸与马蒂诺交谈，他是一个慈祥的人，言语之间带着缜密的逻辑。他告诉我，他希望找到一个能迅速地执行他的即兴演奏理念和技术的系统。我露出了会心的微笑。“很多物理学家都渴望找到一种能解释众多现象的最有效的理论。”我说。马蒂诺和柯川都受教于已故的费城爵士乐吉他手丹尼斯·萨多拉（Dennis Sandole），萨多拉把对称音阶称为“八度音阶与三度音阶之间的等分”[5]，并将这个概念传授给了马蒂诺和柯川。然而，柯川和马蒂诺并没有意识到，对称音阶及其对称性破缺与物理学之间存在着深层联系。从对称音阶的对称性破缺中，我们可以一窥物理学的对称性破缺。

和弦往往涉及一个主音。例如，由音符C、E和G构成的C大调和弦，其主音为C。如果你演奏这个和弦，那么C音就将是你听到的最明显的音符，而G音与E音将会起到为C音增添和声并润色的作用。不过，对称和弦有多个主音，所以它听起来非常模糊，那些音符均匀地展开，并且归入不同的音调。例如，C全音和弦的5个音调：C音、D音、E音、升F音、降A音和降B音都是它的主音。由于存在这种不确定性，所以对称音阶在音乐中扮演着极为特殊的角色。几百年来，诸如拉威尔和巴赫等作曲家都用它来制造张力或矛盾感，通常出现在和弦转换的乐段。减音阶也是一种很常见的对称音阶，广泛存在于爵士乐，以及乔治·格什温（George Gershwin）和科尔·波特的作品中，它能创造两个具有主音的和弦之间的移动。

在图4-2中，左图展示了对称减音阶，右图展示了主音阶。如果你仔细观察，就会发现只要改变4个音符中的2个，减音阶就可以变成主音阶。在对称音阶中，不同的主音之间并没有层级之分。相比之下，非对称主音阶破坏了对称性，而且产生了层级，这就导致了主音的出现，也即大调和弦，其重要性高于音阶中的所有音符。早期宇宙中的非对称性就是通过类似的机制使早期宇宙结构产生层级的，我们在后面的章节中讨论这一点时，会回到这个重要的音乐类比上来。

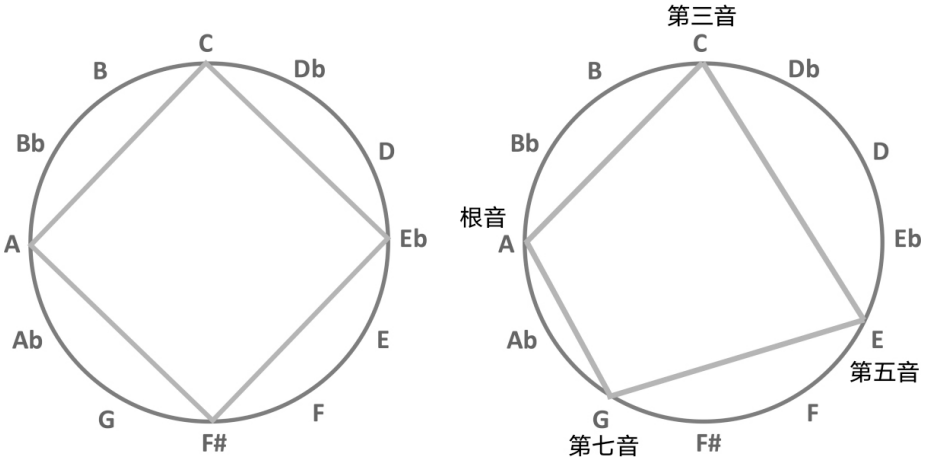
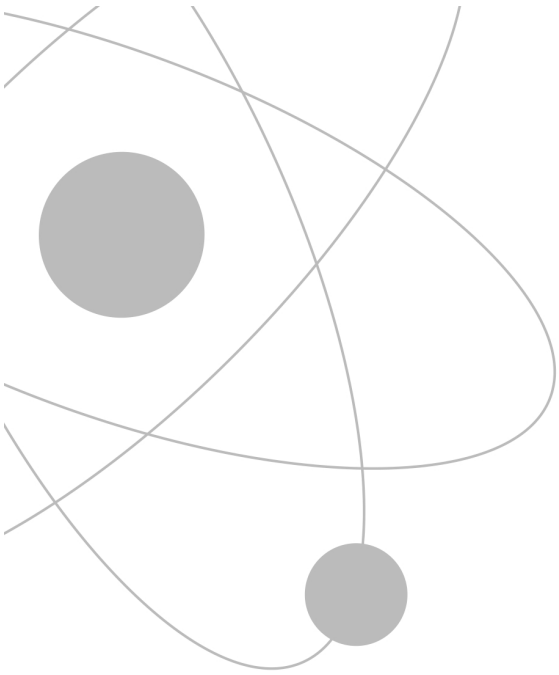


图4-2　对称减音阶（左图）与主音阶（右图）的对称性破缺示例

在我读博士、做博士后，接着成为独立开展研究的教授的那些年里，爵士乐音乐家待在音乐学院里，花了上千个小时的时间来学习音乐理论和乐器。和其他物理学家在一起时，我通常会藏起自己对物理学与音乐之间的联系的好奇。然而，这并没有动摇我的信念。毕竟，狄拉克方法认为，数学（尤其是对称性的应用）促进了基础物理学的发展，而我则在斯莫斯的音乐晚会上亲身体验了音乐中的几何结构和对称性。此外，当我进行次中音独奏时，我的脑海中经常会闪现物理上的灵感火花。几年后，我欣慰地发现，那些致力于寻找美的人推动了物理学的形成，他们在音乐和数学的结合中发现了美，后人称他们为毕达哥拉斯学派。看上去，我已经远远落后于毕达哥拉斯学派了。



05

毕达哥拉斯之梦

The Jazz of Physics

在接受了多年的科学训练后，我试着把自己对音乐与物理学的热爱融合起来。我逐渐意识到，音乐的类比有助于物理学研究，而且物理世界具有音乐的特性。克里斯·艾沙姆与罗伯特·布兰登伯格是少数鼓励我结合二者的大师，除此之外，我感受到的压力使我不得不把这两个领域分别对待。于某些人而言，物理学是以数学表达的绝对真理，而音乐是一种表达情感的语言。如果我知道在科学史的早期音乐与天文学是密不可分的，那么这种压力也许就会烟消云散。在现代音乐家与科学家看来，这可能颇为荒谬，但是对缺乏现代科学工具的古人来说，音乐很自然地就成了宇宙结构和秩序的一个类比。

万物皆存在于数的和谐之中

和现代人一样，古人也会自问：我们从哪里来？我们在宇宙中处于何方？这种古人与今人面对死生之问、面对自然环境的考验时所生出的敬畏，以及随之而来的幸运或是不幸，都促使人类将自然人格化，并且崇拜“他们”，以平息自然的种种力量。从某种角度上说，创世神话正是这些因素的副产品。从创世神话到演绎法这种类科学的推理法的转变，可能始于2 500年前的毕达哥拉斯学派。他们致力于寻找数学和神秘力量的结合体，以理解天体运动及其与人类的关系。[1]虽然就“宇宙是数学的”这一概念是起源于巴比伦王国还是埃及，科学界尚存在争议，但是提出“宇宙由数的和谐组成”的毕达哥拉斯获得了一致的赞誉。如果我在研究弦理论时就知道这段历史，那么在我的老师鼓励我将音乐与科学结合起来时，它就会提供强有力的支持。但是，跨学科学习太紧张、太少见，我一度对它的有效性产生了怀疑。现在回想起来，“百分之五”族在那时候比我所知的还要多一些呢。

毕达哥拉斯因他著名的毕达哥拉斯定理而广为人知。根据这个定理，在直角三角形两条直角边a和b边长已知的情况下，可以计算出斜边h的边长。

对于毕达哥拉斯是否应该因得出“$a^2+b^2=h^2$”这一公式而获得赞誉，学界尚有争议，但这并不是使他成名的唯一原因。很多人也许会惊讶地发现，他竟然还是西方音标方面的先驱。他通过数学演绎法来理解物理世界，并为数千年后物理学和天文学领域出现的突破奠定了基础。

传说中，毕达哥拉斯背井离乡，以寻找“神圣的知识”。他从爱琴海东部的萨摩斯岛（Samos）出发，游历了埃及和巴比伦王国，然后又返回故乡。在20年的旅程中，他进一步确定了自己的学说，即“万物皆存在于数的和谐之中”。他提出，行星的自转会奏出音符，他称之为“音”，其音高由行星的速度以及它与太阳之间的距离决定。当时，已知的行星共有5颗，毕达哥拉斯假设它们共同奏出“美妙的和谐”。他还认为，处于特定位置的行星和运动中的行星都在演奏“宇宙之歌”，而传说中，他可以听到“天体之声”。于毕达哥拉斯而言，真理就存在于数字及其彼此之间的联系之中。数学能揭开宇宙的奥秘，宇宙的和谐只是数字之间的关系的一种表现形式。

据说，毕达哥拉斯在一家铁匠铺中顿悟。在不断重复的敲打声和金属之间的碰撞声之下，毕达哥拉斯突然领悟了现在所谓的“协和音”（consonant tone）。他敏捷的耳朵和数学头脑能捕捉到悦耳的振动，即音符，这是因为声音的振动与人耳的实际物理结构产生了共振，或者说两者同步了。通过询问铁匠，他发现锤子的重量正好是对半递减的。

毕达哥拉斯沉迷于探究宇宙可能具有的和声本质，并把这些比例应用到观察和公设中。他开展了一项实验：将许多根弦悬挂起来，弦被拨动时，会奏出各种音（图5-1）。他发现，锤子之间的重量之比与弦长之比是相同的。虽然两者是不同的物体，材质也不同，但其中隐

藏的数学与泛音是相同的。在此基础上，他做出了一项伟大的发现。当他拨动一根长度为原长一半的弦时，得到了一个相似的音，但频率更高，这就是八度音阶。经过重复这个拨动长度逐阶减半的弦的过程，毕达哥拉斯最终得到了西方音阶。弦长减半意味着它的频率翻倍。例如，220赫兹的音符A的频率与440赫兹的音符A的频率的比例就等于1:2。在西方音乐中，这个频率的翻倍相当于升高一个八度音阶，也即从一个A音到另一个A音，或者在古典钢琴上提升8个调。我们会感觉到，音符虽没有发生变化，但音高却比原来的更高。

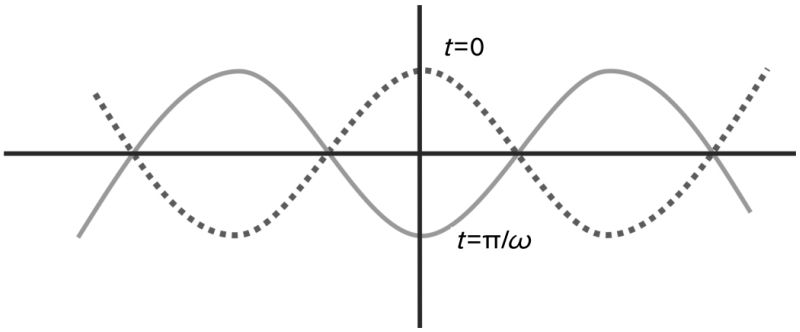


图5-1　弦的振动

接着，毕达哥拉斯又拨动只有原本长度1/3的弦，发现它的振动是纯五度音阶，在C调中就是音符G。在“猫王”埃尔维斯·普雷斯利的歌曲《情不自禁爱上你》中，音符G恰好是第二个音符：“Wise（C）men（G）say（E）”。当弦长减到原长的1/4时，C调上有了音符F。这种模式在1～5之间的整数上都成立。协和音是由弦长的整数关系确定的，这证实了毕达哥拉斯所坚信的“万物皆数”是正确的，而且确实存在“天体之声”。

虽然毕达哥拉斯证明了弦长中小数字所占的比例会产生辅音，但产生这种现象的原因尚未找到，我们在后面将用一整章的篇幅来讨论这一点。他的发现不仅为后来出现的众多令人惊叹的音乐，比如巴赫、莫扎特和披头士乐队的作品奠定了基础，对理论数学与天体物理学来说也是一项极大的贡献。“万物皆数”是毕达哥拉斯的基本信

念，在大约3 000年后，这成了研究现代理论物理学的人的口头禅。我发现，狄拉克就是一个毕达哥拉斯学派中人。

古希腊哲学家与天文学家认为，地球处于宇宙的中心——这就是“地心说”。毕竟，那时人们还没有发现万有引力，而且从表面上看，确实所有事物都往地球上落。地球周围都是完美的球体，它们主导着球形天体的运动，因此产生了“天体之声”。当时的人认为球形具有神性，并坚信球形是宇宙动力学和宇宙结构的本质，一切事物的存在都是为了维持这种状态。

时至今日，亚里士多德所推崇的完美宇宙模型依旧为人们所欣赏，无论是因为它的美，还是它的精确性。在此模型中，行星、恒星和月球全都嵌在绕地球旋转的水晶球上，而水晶球由他称之为第五元素的“以太”（Ether）构成。亚里士多德是柏拉图的学生，后者也是毕达哥拉斯学派中人。柏拉图将“天体之声”的数值基础扩展到了几何结构，并以自己的名字将其命名为“柏拉图多面体”（Platonic Solid）。除球体外，5种柏拉图多面体是最特殊的几何结构，它们具有对称性、规则性和精确性。根据毕达哥拉斯-柏拉图哲学，这些完美的几何结构被认为是从人类所在的球体中自发产生的，就像完美的音乐一样[2]。所有这些凸多面体都是由同种类型的规则多边形构成的，每个顶点上相邻的多边形个数相同。立方体也许是最简单、最普遍的柏拉图多面体了，它由6个正方形组成，每个顶点上都有3个正方形相邻。其他的柏拉图多面体包括四面体（4个三角形）、八面体（8个三角形）、十二面体（12个五边形）和二十面体（20个三角形）。

柏拉图将这些多面体与土（立方体）、火（四面体）、气（八面体）和水（二十面体）这4种元素联系起来。由于没有元素与十二面体相对应，所以柏拉图究竟有没有发现全部5种几何结构就成了一个未解之谜。古代哲学家对宇宙中存在的美的迷恋，以及试图找到与之对应的精确的数学的尝试，促进了现代科学的形成。

从托勒密到牛顿，一场反直觉的探索

在亚里士多德之后的400年里，天文学观测变得越来越精确，人们开始重新审视旧的宇宙模型，那些古老的水晶球理论也遭到质疑。约公元100年，托勒密创造了著名的托勒密模型（图5-2），以解释行星穿过夜空时表现出的明显的逆行现象。现在我们知道，从地球上看到的行星时而慢下来，并且逆向运动，像在天空中被阻滞了一样，这是因为它们在绕太阳运动，我们看到的实际上是它们相对于地球的运动。然而，存在完美球形模型的“地心说”，几乎不可能解释这种不规则运动。托勒密是一位富有创造力的天才，他竭尽所能地完善了托勒密模型。当时，人们仍坚信宇宙的神性和完美的圆是不可动摇的，所以他不得不在循环圆周中引入一系列圆周（或称本轮），以解释行星逆行现象和一些行星表观上的小椭圆运动。托勒密模型不仅极其复杂，而且极为反直觉，但它维护了古人的信仰。

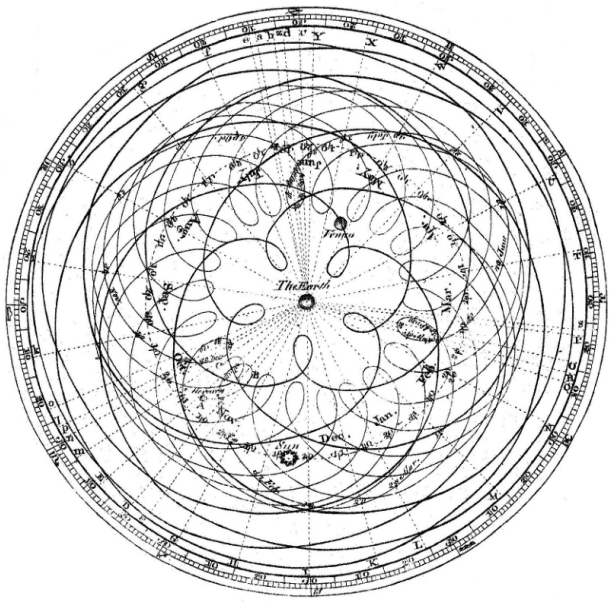


图5-2　托勒密模型的图像

注：图片来自Wikipedia。

大约过了1 500年，人类对自身知觉的自信才战胜了对神圣几何的信仰。对一介凡夫俗子而言，鼓起勇气与神对抗是极为艰难的，其结果并非每个人都能承受。让我们看一看1054年爆发的超新星吧。这是一颗极为明亮的爆发星，它生成了今天我们在天空中依旧可以看到的壮观的蟹状星云（图5-3）。它突然出现在夜空中的已确定的恒星之间，并被中国人与阿拉伯人记录了下来。这是上帝创造的完美宇宙中出现的可变化的新事物吗？这是“天体之声”中出现的不和谐啊！虽然超新星很明显是一种反常现象，但人们依旧用了几百年的时间才推翻古老的标准。出生于15世纪晚期的哥白尼是一位波兰数学家和天文学家，他扔出了一颗石头，彻底颠覆了人们对水晶球、本轮和上帝（对某些人来说）的信仰。

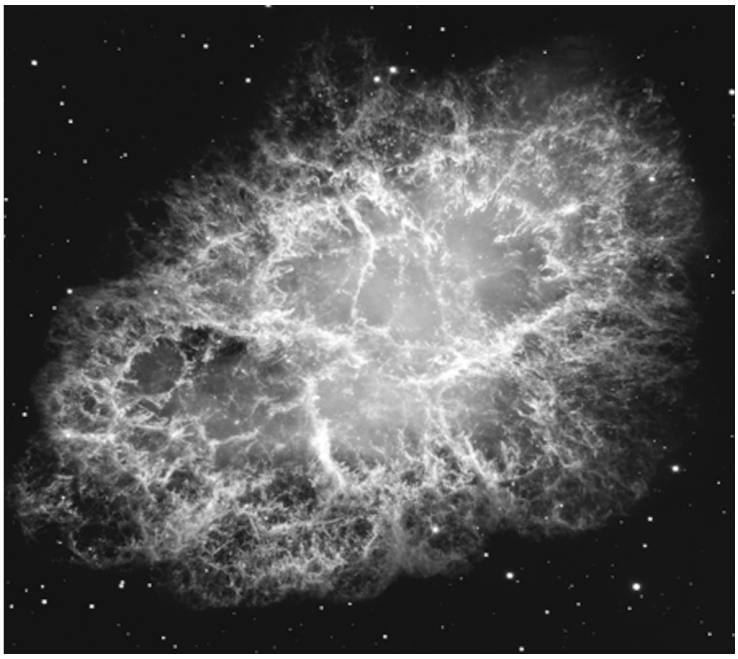


图5-3　蟹状星云

注：蟹状星云是一颗爆发星（超新星）的残留物。图片来自NASA，ESA，J. Hester，A. Loll（ASU）。

哥白尼用太阳取代地球，并认为太阳是宇宙的中心，所有行星都围绕太阳运动。行星的逆行是我们从地球上看绕太阳公转的行星的结

果，而太阳在天空中的运动之所以会发生变化，是因为地球围绕太阳公转。他认为，正是因为地球在轴上自转，恒星每天才会在天空中移动。这是多么伟大的发现啊！他不仅准确地描述了所有要点，还认识到其他恒星距离太阳和行星都非常遥远，这就解释了它们运动的不同之处。“日心说”因此被尊称为“哥白尼革命”。也许是承受的压力太大，在提出“日心说”的同年，哥白尼就逝世了，在某种程度上，这也许是一种幸运。他没能活着看到他把上帝降级为一个旁观者的后果，那是一个更具人性和理性的世界。

大约在1600年，“观测天文学之父”伽利略做出了一系列伟大的天文学发现。太阳黑子、月球表面的陨石坑和金星的相位都是由他观测并确定的。他还对银河系产生了兴趣。银河系是一条神奇的星带，由密布的恒星和星际云构成。当我们凝视我们所在星系的中心时，会看到一条星带将夜空分为了两部分。伽利略最重要的成就之一，也许是发现了木星的4颗大卫星，现在它们被称为伽利略星。夜复一夜，日复一日，他一丝不苟地记录着行星在木星前后来回运动的方式，最终证明了那些卫星围绕着木星公转。这些观察结果本身就足以推翻“地心说”，并为哥白尼的“日心说”提供强有力的证据。与哥白尼不同的是，伽利略在有生之年一直捍卫着自己的理论，并为此被指控扰乱了神圣的秩序，余生都被软禁在家。虽然因为“妨碍上帝的存在”而受到了处罚，但伽利略与他的前辈哥白尼一起开辟了一条道路，永远向希望在所见之美下探索物理学而不仅仅是宗教推理的未来理论家敞开。

第谷·布拉赫（Tycho Brahe）是一位荷兰[(7)]贵族、天文学家，他在天文观测方面的成就与伽利略不相上下，但在信仰选择上更为保守。在一生中的大部分时间里，他都致力于发明观测仪器，并且逐步对天体的位置进行更精确的测量。在那个时代，他无疑掌握着关于天体运动的最精确的数据。他虽然尊重哥白尼的一些几何论证，但并没有放弃“地心说”，并且坚定地支持托勒密学说。1599年12月，他聘

请了一位临时助手来帮助自己整理所有的数据，那位助手就是年轻的约翰尼斯·开普勒。一年之后，第谷猝然离世，为家人留下了大量巨细无遗的观测数据。最后，他的家人很不情愿地把那些宝贵的数据交给了他的临时助手——年轻的开普勒。

开普勒是第一位试图放弃神性、寻找行星运动的物理原理的天体物理学家（学界对此尚有争议）。他一生坎坷，母亲因为巫术差点儿被烧死在火刑柱上，而他5岁之后就再也没有见过自己那唯利是图的父亲，开普勒的妻子和三个孩子因为瘟疫与疾病相继去世。他童年时得过天花，这毁掉了他的视力，给他的手留下了残疾。虽然经历了各种悲剧，但当开普勒还是个小男孩时就开始了天文观测，看到了伟大而振奋人心的宇宙现象。人间的痛苦与不幸只会让他更渴望拥抱天堂。第一个重大事件是1577年出现的大彗星。它从地球附近掠过，全欧洲的人都看到了它，第谷也不例外。他正确地推断出，这并不是一个大气现象，而是出现在地球之外的一种事物。不久之后，开普勒观察到了月蚀，虽然他的视力很差，但他还是被月球的红色外表震惊了。从此，他将自己的心和剩下的视力都奉献给了天空。第谷良好的视力与他那不幸助手的短板形成了完美的互补。

开普勒是一位杰出的数学家、充满激情的天文学家和富有创造力的实验主义者，他敢于否定“地心说”和“完美球体”说，在整个学术生涯中始终坚守自己的信念，并对第谷毕生的工作给予了公正的评价。

一天，在一次关于天文学的演讲中，开普勒的脑中突然灵光一闪。在讨论行星运动时，开普勒猛然意识到，行星之间的距离并不是由偶然因素决定的，而是反映了毕达哥拉斯的“神圣比例”的观点。例如，就与太阳之间的距离来说，火星只有木星的一半，而前者会在一个比后者高8度的轨道上转动。虽然开普勒确信那些行星是按照“天体之声”运动的，但他并没有停止追问，就像现代科学家所做的那

样。他想知道，为什么太阳系总共有6颗行星？为什么不是25颗或者3颗？那时，天王星和海王星尚未被发现。在经过数日令人沮丧的工作之后，开普勒得到了一个惊人的发现，即宇宙在数学比例上必然遵循着某种更深层的几何和谐。这一发现贯穿了他的余生。他认为，5种柏拉图多面体正是行星只有6颗的原因，它们还可以确定6颗行星之间的距离和各自的运动。

想象一个由柏拉图多面体构成的俄罗斯套娃。每个柏拉图多面体都可以被放进一个球壳中，多面体的每个顶点都能接触到球壳的内表面。通过这种方式，开普勒建立了一个模型，他在模型中设定了6个假想球壳，并把它们与6颗行星的位置对应起来。冒着被终身监禁的风险，他把太阳放在了中心，然后依次是水星、金星、地球、火星、木星和土星。它们的运动被限制在由柏拉图多面体分隔开的球壳内。1596年，他在《宇宙的奥秘》（*The Cosmic Mystery*）上发表了自己的研究成果（图5-4）。通过应用对称性与几何学，开普勒取得了非凡的成就，成功地解决了两个困扰了哲学家与天文学家两千年的基本问题。在26岁时，开普勒就指出了太阳系只有6颗行星的原因，并且几乎给出了它们的轨道。

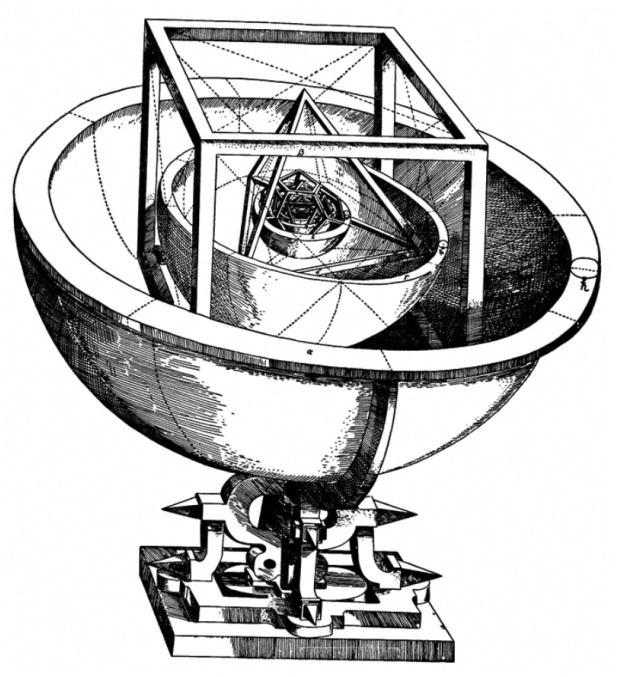


图5-4　太阳系的柏拉图多面体模型

注：在《宇宙的奥秘》（1596年）一书中，开普勒给出了太阳系的柏拉图多面体模型。

然而，开普勒的观点并不全是对的。凭着惊人的直觉和数学才能，开普勒不断地完善着自己的方程和模型，并提出了一个意义深远的问题：在物理学上，到底是什么导致了行星环绕太阳运动？这又是另一个研究方向了。开普勒笃信宗教，最初希望从“三位一体”（Holy Trinity）的理论中寻找答案。上帝，也即太阳，居于中心；圣子是那些定星；圣灵散发出力量，或是力，以产生所有天体的运动。然而，这还不足以构成令他满意的解释。开普勒写道：“可能的解释只有两种：第一种，挪动行星的圣灵离太阳越远，其力量就越弱。第二种，太阳周围只有一个圣灵，离太阳越近的行星，圣灵施加于它的力量就越强。”[3]他进一步推断，这种力量“与距离成反比，就像光的力量那样”。这是人类历史上首次将物理学推理的方法应用于天文学。开普勒正在慢慢解开一个巨大的谜题，在那些纠缠的未知之下潜藏着的是引力和光的物理学。他发现了圣灵和光在行为上的相似之处，即它们的力量都是离源越远越弱。开普勒还敏锐地意识到，太

阳的“圣灵”是一种驱动行星运动的力，实际上，这就是后来被称为引力的力。然而，揭开行星绕太阳运动的秘密还需要更多的信息，而这些信息就隐藏在他已经掌握的数据之中——第谷在忙碌之中潦草地记下了详细的数据，这些数据揭示了火星的运动规律。

开普勒极为注重细节，他很快就意识到，第谷关于火星轨道的数据与自己模型的契合度并没有预期中那么高。严谨的数学肯定能解决这些细节问题。他想这可能要花几天时间，但他并没有望而却步。实际上，他花了将近8年时间才解决了这个问题。真正的问题在于，火星绕太阳运行的轨道偏离圆周太多，所以不可能用基于完美球体的模型来描述它。与之前的天文学家不同的是，开普勒最终放弃了他的柏拉图多面体理想模型，并本着发展的精神，转而采用了今日我们视之为现代科学方法的假说-检验法，以获得新的知识。那时，人们已经知道地球会释放出磁力，在此基础上，开普勒通过类比法，用来自太阳的磁力取代了圣灵。1605年，开普勒写道：

> 我忙于研究那些物理学原理。我这么做是想证明那些天体机器与神圣的生物没有关联，而只是钟表般的装置……几乎所有天体的运动都是通过一种简单到不能再简单的磁力来实现的，就像钟表一样。一种简单的重量决定了所有的运动。接下来，我还将展示通过计算和几何结构来表达这种物理概念。

虽然太阳的确具有磁力，而正是磁力催生了伽利略所观测到的太阳黑子，但它并不是开普勒所寻找的引力。

开普勒继续着自己的研究，并决定重新审视自己的毕达哥拉斯式理想，以及自己所坚信的“天体和谐论”。他充分领略了这种理想所带来的美。毕竟，毕达哥拉斯提出的数学理论奠定了西方音乐的基础，而文艺复兴时期的许多著名作曲家都是开普勒的侪辈，比如克劳

迪奥·蒙特威尔第（Claudio Monteverdi）和威廉·伯德（William Byrd）。开普勒推测，如果这些行星沿着完美的圆轨道运动，那么整个轨道上的音高就应该是相同的。然而，有些行星的轨道是椭圆形的，就像火星那样。开普勒认为，这种行星离太阳越近，它就会运动得更快，音高也会变得更高。通过一种全新的形式，音高的变化为毕达哥拉斯学派的“宇宙和谐”理论做出了贡献。毕达哥拉斯的追随者认为比例能产生和谐的音符，比如八度音阶（其中的比例是2:1）或纯五度音（其中的比例是3:2），后者是“do re mi fa so la ti do”中的5个音符。就开普勒版本的“天体和谐论”来说，其关键之处在于采用了行星旋转的最大速度与最小速度之比。

令人着迷的是，开普勒是通过几何推理与音乐推理得到了开普勒三定律。这三条定律是非平凡方程，它们共同决定了行星沿着椭圆轨道进行的精确运动。到1605年时，他已经确定了行星是沿着椭圆形轨道而不是其他长形轨道运动，而且行星与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积（图5-5）。不过，直到15年后的1620年，他才发表了自己的三大行星定律，它们不仅描述了火星的运动，还描述了其他行星的运动。最后一条定律给出了行星轨道的周期与长度之间的精确数学关系。

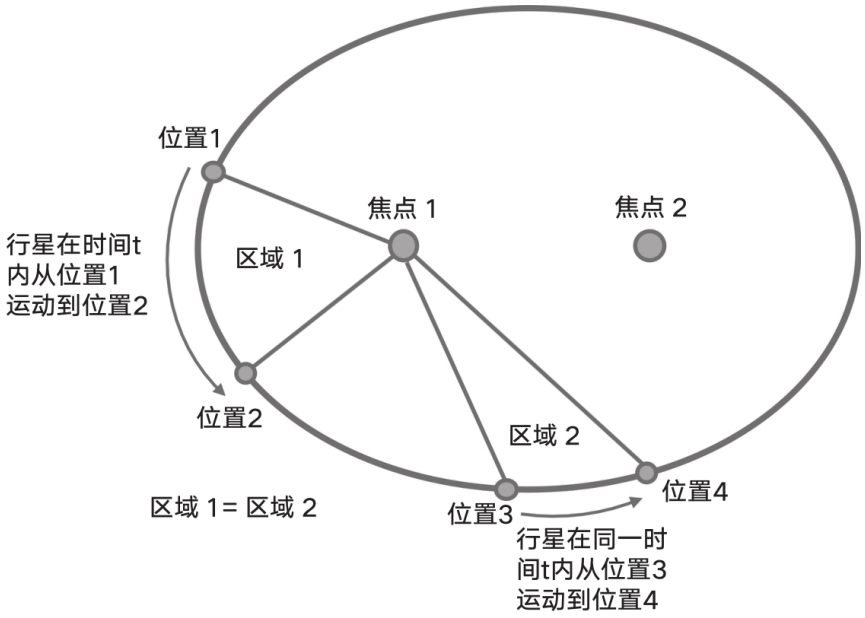


图5-5　开普勒第二定律

成功之路漫长而艰难，开普勒最终理解了毕达哥拉斯提出的充满传奇色彩的“天体之声”，他甚至能把其中的音符写下来展示给世人（图5-6）。我曾有幸聆听了一张关于开普勒的“天体之声”的专辑，专辑名为《世界的和谐：约翰尼斯·开普勒之耳的天文学数据的实现，数据来自1619年的<世界的和谐>》（*The Harmony of the World: A Realization for the Ear of Johannes Kepler's Astronomical Data from Harmonics Mundi 1619*）[4]，由耶鲁大学音乐学院的作曲家威利·拉夫（Willie Ruff）和约翰·罗杰斯（John Rodgers）创作。行星在绕太阳做椭圆运动时所奏响的迷人且令人回味无穷的和声，经由这张唱片展现得淋漓尽致。令人惊讶的是，这些和声混合在一起竟形成一种统一的节奏，而这种节奏恰好与行星的周期性轨道相对应。例如，土星奏出大三度（音高比例为5:4），木星奏出小三度（音高比例为6:5），火星奏出五度（音高比例为3:2）。在开普勒的设想[5]中，所有行星在神圣的愉悦中共同奏出了一首天体的和声。

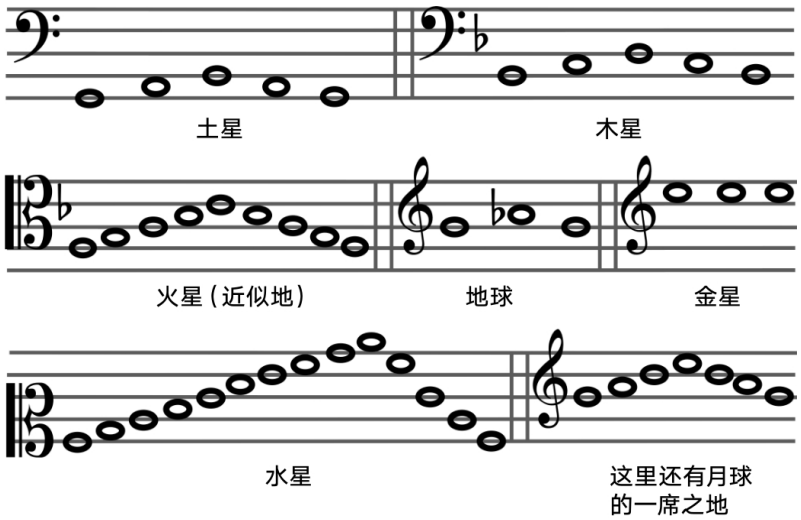


图5-6　开普勒为每颗行星的椭圆轨道计算的音符

注：对每颗行星而言，最低的音符与它轨道和太阳的最大距离相对应（最低轨道速度），最高的音符与它轨道和太阳的最小距离相对应（最高轨道速度）。

最终，另一位天才牛顿确定了开普勒三大定律背后的正确的物理学原理。牛顿无疑是有史以来最具影响力的数学、物理学家之一，他于17世纪晚期发现了一种新的力——引力。正是因为引力的存在，太阳才能吸引行星，并使它们保持在椭圆轨道上。在出版于1687年的著作《自然哲学的数学原理》（*Mathematical Principles of Natural Philosophy*）中，牛顿描述了天体以及地球上的物体在引力作用下的运动。此外，他还从自己的万有引力定律中推导出了开普勒三定律，后者是开普勒通过分析几何结构与和谐宇宙得出的，不过带有一点毕达哥拉斯学派的遗留瑕疵。

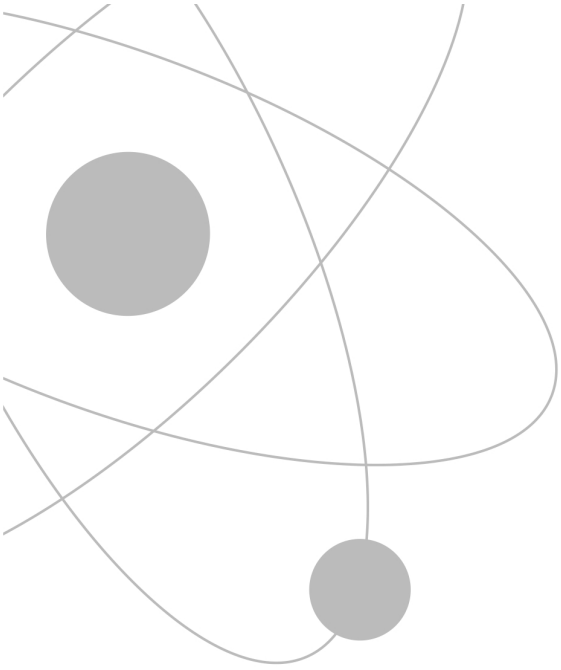
在跨越领域的过程中，开普勒清楚地意识到了类比思维的作用。从球体的神性到和声与几何比例的数学，再到地球磁力和陌生的天体运动，他为后继的研究者提供了无尽的灵感。尤其是对理论物理学家来说，开普勒的奉献精神、创造力以及对待数学的严谨态度，都指向了通向新发现的终极大道。

如今，毕达哥拉斯畅想着天体和谐的时代已成为遥远的过去，“行星奏出音符”的理念也有可能被认为是经不起推敲或无关紧要的。即便这样，我们仍可以想象，若是毕达哥拉斯得知在太阳系之外竟然还有那么多行星，想必也会欢欣鼓舞吧。截至目前，开普勒任务（Kepler Mission）已经发现了2 000多颗候选系外行星，而这只是银河系中万亿数量级行星中的一小部分，就不用说自牛顿时代以来在宇宙中发现的其他新事物了，比如星系、星系团，以及难以捉摸的暗物质。当然，宇宙中还存在亚原子等级的物质，比如夸克和中子，以及包含在统一不同粒子与作用力中的对称性。对于一切自然现象可能都是由弦决定的这一观点，毕达哥拉斯又会如何看待呢？于毕达哥拉斯而言，今日的宇宙是一个在几何与和声方面具有无限可能的梦想。那么于我们又如何呢？

现代物理学家非常清楚，他们所构建的漂亮的数学模型无法描述他们所看到的事物。我们并没有尽到一个物理学家的职责。差异、分歧、反常现象，以及不合理的元素或初始条件总是存在，当然，问题远远不止这些。一些物理学家认为这是发现更深层的数学真理的机会，另一些物理学家则认为我们所掌握的知识已经达到了极限。当我们面对这些局限时，毕达哥拉斯的理想或许能发挥作用。古人仅凭直觉就意识到宇宙的本质是音乐，所以我很好奇，如果给定所有已知的知识，我们是否可以将这种直觉应用于今日的问题，从而进入现代物理学的新阶段？宇宙有没有可能实际上就是一种宏大的和声振动的表现方式呢？不和谐在我们的宇宙中扮演的又是什么角色呢？当然，任何类比都有极限，但在对知识的追求中，类比法的力量正在于其局限性。明白了类比法有其局限性后，我们只要在面对它留给我们的问题时足够大胆并不断创新，就能获得新的发现。优雅与美丽不仅存在于方程的形式中，还存在于人类做出发现的方法中。在我的求学历程中，利昂·库珀、布兰登伯格和艾沙姆都是极为重要的老师，因为他们教会了我探索发现的方法。

古代哲学家的学生仔细思索过天体之声、几何形式的完美、物力论（dynamism），以及有机的人与宇宙的数学之间的博弈。现在的学生学习的是古代哲学家提出的精确计算，比如开普勒的椭圆形轨道、牛顿的万有引力定律，以及爱因斯坦的更为复杂的时空方程。至于未来的学生会学习什么，我们无从得知。教育、技术和全球互联性正在飞速发展，学生若想跟上进度，研究者若想发现新的真理，教授若想给出指导和洞见，或许需要将古代和现代的哲学、创造力以及即兴创作能力结合起来，还要有着不怕犯错的魄力。

对我来说，开弓没有回头箭。



06

伊诺，
音乐宇宙学家

The Jazz of Physics

直觉告诉我们，复杂的事物源自更复杂的事物，但进化论认为，复杂源自简单。这是一幅倒置的图景。我喜欢这种组合的理念，你只需设置好一些条件，然后就让它们自由发挥吧。从这个角度来说，比起建筑，作曲更像园艺。

——布莱恩·伊诺

所有人手里都拿着自己喜爱的饮料。在心满意足的聊天声中，鸡尾酒杯中的冰块相互碰撞着，浮现出泡沫与一片深红。苗条的长发女士和西装革履的男士点亮了整个房间，那些男士脖子上还挂着亮闪闪的金项链，袖口上的袖扣也在闪闪发光。不过，这可不是盖茨比[8]举办的聚会，而是帝国理工学院一年一度的量子引力鸡尾酒会。

李·斯莫林，还有我的新朋友

鸡尾酒会的主人从头到脚一袭黑色装束——黑色高领毛衣、黑色牛仔裤和黑色风衣。我来帝国理工学院做博士后研究的第一天，就在布莱克特实验室外的走廊尽头看到了他，那个实验室位于理论物理系大楼的侧廊。他有着一头黑亮的乱发，蓄着黑色胡须，戴着黑色眼镜，十分引人注目。我很好奇他是谁，于是在他经过时，向他打招呼：“嗨！”他回道：“今天过得怎么样？”就这样，我们搭上了话。“你来自纽约吗？”我问。他确实来自纽约。

他就是我的新朋友，也就是李·斯莫林（Lee Smolin）[9]。斯莫林是圈量子引力理论（Loop Quantum Gravity）的创始人之一，当时正考虑在帝国理工学院找一份终身教职。在试图统一量子力学与爱因斯坦的相对论方面，圈量子引力理论和弦理论一样备受瞩目。与认为构成宇宙的基本元素是微小的弦理论不同，圈量子引力理论把空间本身视为一个由大小相同的圈交织而成的网络，这些圈的地位与弦理论中的弦相同。斯莫林刚刚完成了他的第三部著作，即《宇宙的本源：

通向量子引力的三条途径》（*Three Roads to Quantum Gravity*），他已经迫不及待地把手稿寄给了编辑。我与他在细雨中漫步到了邮局，一起喝了一杯浓缩咖啡作为庆祝——这只是我们未来要一起喝的数百杯咖啡中的第一杯。

那天晚上，斯莫林把自己位于西肯辛顿的房子贡献出来举办这场酒会，而往年通常是在费伊·多克尔（Fay Dowker）家中举行。多克尔非常高兴，因为这样她就能作为客人成为当晚的最佳演讲者。她身材苗条、才华横溢、戴着眼镜，也是量子引力领域的先驱。在霍金手下做博士后时，多克尔教授的研究方向是虫洞和量子宇宙学，但她感兴趣的是因果集合论。几个小时之后，当多克尔像往常一样清楚透彻地讲述作为弦和圈替代物的因果集合时，众人便渐渐安静了下来。和圈量子引力理论一样，因果集合论不关心宇宙的构成，而把重点放在时空结构上。不过，因果集合论并不认为时空是由圈交织而成的，而是用一种以因果方式组织的离散结构来描述时空。因果集合论所设想的空间结构类似于滩头的沙粒。当我们从远处看时，看到的是均匀分布的一片沙子；当我们逐渐走近时，就可以看清单独的沙粒。在因果集合中，时空就犹如由沙子构成的沙滩，只不过它是由颗粒状的“原子”构成的。

那些主要研究弦理论的人也参与了关于量子引力的大讨论，比如美国理论物理学家凯洛格·斯特里（Kellogg Stelle），他是P膜（P-brane）的提出者，也是我的博士后导师之一。在数学上，膜是一种二维的可延展的事物，也即它会占据空间。P膜就是高维空间中的类似物。弦理论中所有的弦都能以P膜为端点。另一条通向量子引力的途径由克里斯·艾沙姆提出，他的哲学拓扑理论应用了仅仅“部分存在”的数学实体。在聚会上，研究通向量子引力的途径的博士后给其他人上了一堂量子引力理论课。面对这样的场景，我不仅感受不到智慧的碰撞，反而觉得自己缺乏那种能力和专注力，无法像其他人那样坐在潮湿的办公室里，趴在书桌上进行几个小时的数学计算。幸运的是，

艾沙姆曾经表示，他相信我有能力在宇宙学领域有所成就，他鼓励我走出办公室，多接触音乐。在卡姆登（Camden）的爵士乐酒吧中，在人潮之中思考着物理学理念、做着计算，我觉得这确实能给我科研上的灵感，但这只是开始。理念开始在我的脑子里流淌，更多的改变即将到来。

当多克尔开始在客厅演讲时，我却在琢磨着另一个我整晚都在观察的人。他和斯莫林一样穿着一件黑色衣服，面色坚毅，与人说话时总是会露出一颗闪闪发光的金牙。看着他专注地听着多克尔的演讲，我猜测他是一位狂热的俄罗斯理论物理学家。后来我才发现，他是和斯莫林一起来的。当斯莫林注意到演讲结束后我依旧在四处游荡时，他便邀请我和他们一起走，他要和那位镶着金牙的朋友一同返回后者位于诺丁山的工作室。我非常好奇他那位朋友的研究方向，以及他属于量子引力的哪个学派。当我们一同走过伦敦街头雾气中时隐时现的明亮大街时，我必须很努力才能跟上他们跳跃性的谈话。我很快就意识到，这个家伙不是普通的物理学家，因为他们的对话是空前绝后的。两人从时空结构以及爱因斯坦关于时间与空间的相对论谈起，不过这并不是令我吃惊的部分。很快，他们就开始抛出各种关于波的数学概念，而不知为何，最后竟然谈到了音乐。那一刻，我对那位“金牙先生”越发好奇了。

这就是我与布莱恩·伊诺初次见面时的情景。到达他的工作室后，我们交换了电话号码，他还慷慨地让我随意使用他的自行车。那时，我还不知道他是谁，直到一个星期之后，我把与他见面的事告诉了一位朋友、乐队成员塔伊布（Tayeb）。塔伊布是英国-阿尔及利亚混血，同时也是一位很有天赋的贝斯手和乌德琴[(10)]手。听了我的话后，他被我的无知惊得目瞪口呆：“天哪，斯蒂芬……你遇到了一位大师！”

伊诺曾是英国摇滚乐队洛克希音乐团（Roxy Music）的成员，年轻时就是一位伟大的音乐革新者。当摇滚乐开始结合古典与前卫的影响力，并以一种新的音乐形式呈现出来时，他就是艺术摇滚和迷惑摇滚运动的参与者。摇滚乐手衣着华丽、发型时髦、妆容灿烂，想一想卢·里德（Lou Reed）、伊基·波普（Iggy Pop）和大卫·鲍伊（David Bowie）吧。伊诺是乐队的电子合成器专家，他能操纵精细的声音。在当时，电子合成器因其复杂性而显得格外美妙。早期的电子合成器必须由人来操作，这与今日只需按一个键就可以生成声音的电子合成器不同。洛克希音乐团很快就声名鹊起，伊诺为声名所累，所以他离开了乐团。他的音乐事业不仅没有因此受到影响，反而迅速发展起来。他一手打造了传声头像乐队（Talking Heads）和U2乐队，并且成就了一系列伟大的名字，这里只简单地列举其中几个：鲍伊、保罗·西蒙（Paul Simon）和酷玩乐队（Coldplay）。与此同时，他也没有放弃电子合成器，后来还成为传奇的雅马哈DX7合成器的世界级演奏者。

我很好奇，像伊诺这样的艺术家为什么会对时空和相对论感兴趣。随着我对他的了解不断深入，我终于明白，这对他而言并不是一件用来打发时间的事情，他也不是为了自己的健康才这么做。生活在伦敦的两年里，我发现伊诺正是被我称为“声音宇宙学家”的那一类人。他研究宇宙的结构不是因为受到了音乐的启发，而是以音乐为方法。他时常会发表一些评论，有时甚至对我的宇宙学研究产生影响。我们开始定期在他位于诺丁山的工作室聚会，那里成为我驶向帝国理工学院途中的一个休憩站。我们会一起喝杯咖啡，并交换一些关于宇宙学与乐器设计的理念，或者仅仅是放松一下，演奏一些伊诺最喜爱的马文·盖伊（Marvin Gaye）或费拉·库蒂（Fela Kuti）的歌曲。他的工作室成为我绝大多数创新性理念的发源地。之后，我会精神抖

擞地走向帝国理工学院，带着满脑子的新想法，干劲十足地继续我的计算工作，或是与我的物理学家同事讨论和研究论文。

一天早上，当我走进伊诺的工作室时，我物理学研究生涯中的一个最难忘、最具影响力的时刻到来了。伊诺一如既往地在处理一个新曲调的细节，他把贝斯在某条音轨上调节正确，以协调那个比正常节拍稍微滞后一点的音。他不仅是氛围音乐领域的先驱，还是一位多产的艺术家。

在唱片《氛围音乐1:机场音乐》（*Ambient 1: Music of Airports*）的封面上，伊诺描述了自己的工作："氛围音乐必须能够适应多个层次的听众的注意力，而不是特别关注某个层次，它必须是有趣的，又同样程度的可有可无。"他所寻求的是一种有关基调和氛围的音乐，而不是强迫听众去主动倾听。然而，创作一段听起来轻松的音乐绝非易事，所以他经常沉浸在细致入微的音乐分析中。

音乐视角中的傅立叶变换

在那个特别的早上，伊诺正在操纵电脑上的波形，以使它听起来像是在和瓦瓦莉安——一些声波的母语交流。令我大感震惊的是，伊诺正在操纵的可以说是宇宙中最基本的概念，也就是振动的物理学。对量子物理学家来说，正是振动的物理学描述了粒子。在量子宇宙学家看来，振动的客体（比如弦）在整个宇宙的物理学中可能扮演着关键的角色。很不幸，那些弦所演奏的量子音阶在精神和肉体上都是一种令人恐惧的无形之物，现在它却以声音的形式（也即振动的实际表现）出现在我面前。这种新的联系并不是我创造的，但它让我开始思考它对我的研究的影响，以及罗伯特·布兰登伯格曾经问我的问题："宇宙的结构是如何形成的？"

声音是一种推动介质（如空气或固体）产生压力行波的振动。不同的声音产生的振动是不同的，进而产生不同的压力波。我们可以画出这些波的图像，即波形。每个波都有可测量的波长和高度，这是振动的物理学的一个关键点。对音波来说，波长决定了音的高低，而高度（或者说振幅）反映了音量的大小。

如果某些事物是可测量的，比如波的长度和高度，那么你就可以用一个数字来描述它。如果你能给予某些事物一些数字，那么你就可以把它们简单相加。这就是伊诺正在做的事情，即把不同的波形叠加起来，从而得到新的波形。他把简单的波形混合起来，以得到复杂的声音。

对物理学家来说，这种把波叠加起来的概念称为“傅立叶变换”（Fourier transform）。这是一个非常直观的理念，可以用往池塘里扔石子来说明。如果你往池塘里扔一颗石子，那么石子与水面的接触点就会辐射出确定频率的圆形波。如果你在第一个接触点附近投下另一颗石子，那么就会产生第二个圆形波，而源自两颗石子的波会发生干涉，形成一个更加复杂的波形。傅立叶理念的不可思议之处在于，它意味着一些简单的波形叠加起来可以形成任何波形。这些简单的“纯粹波”是一些周期性重复自身的波形，我们将在下一章详细讨论它们。

我和伊诺因为振动中的物理学而相知。我开始从一个混声音乐家的视角来看待物理学中的傅立叶变换，并将它视为一种创新的途径。伊诺借给我的自行车成为我大脑运动所需的交通工具。几个月来，跨学科思考的力量转变为了我的肾上腺素。对我来说，音乐不再仅仅是一种灵感、一种改变我看待问题的角度的方式，还是一种完善我的科研方法的必不可少的补充。我沉迷于解密罗塞塔石碑（Rosetta Stone）上有关振动的内容，其中描述了波是如何创造声音和音乐的，而这正是伊诺最擅长的；此外，还模糊地描述了早期宇宙中的量子行

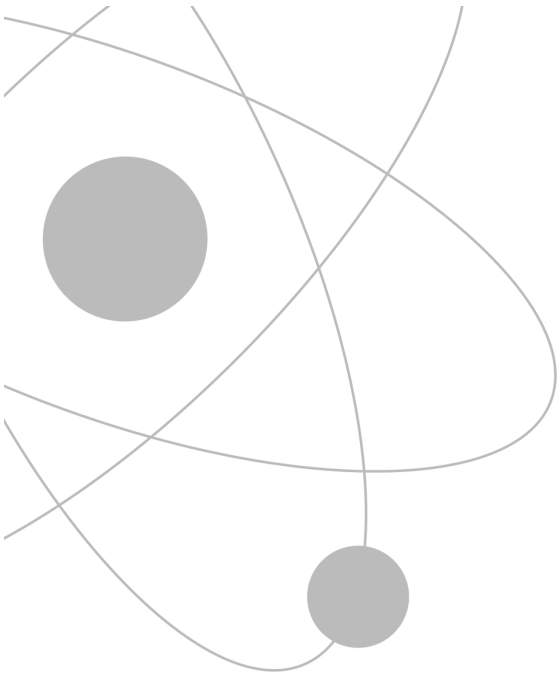
为，以及它是如何产生大尺度结构的。波与振动构成了共同的线索，我们面临的挑战是如何把它们联系起来，以绘制出一幅清晰的图像来展示宇宙结构形成和人类出现的过程。

宇宙是否也是一种即兴创作

那时伊诺正在做许多项目，其中之一被他称为“生成音乐”（Generative Music）[1]。1994年，伊诺在自己的工作室向众多一头雾水的记者公布了生成音乐，同时发布了第一个生成软件。大约10年后，生成音乐的理念才趋于成熟，它其实是一种有声的摩尔纹。池塘水波通过互相干涉产生了复杂的波纹，它们具有无穷多种形态。这些波纹就是摩尔纹，它们由重复的波纹叠加而来，其种类无穷无尽。生成音乐是基于两个以不同速度播放的节拍的理念，而不是两颗产生波的石子。它随时间向前播放，只需输入简单的节拍，就能得到美丽又令人印象深刻的复杂性，也即一种不可预知的、无穷无尽的声音模式。它是“一种理念，有可能催生出一个系统或是一套规则，一旦建立起来，就会为你创造音乐……你从未听过的音乐”。在1975年发布的专辑《乐音》（*Discreet Music*）中，伊诺第一次尝试了摩尔纹。与2012年发行的录音室专辑《洛克斯》（*Lux*）一样，《乐音》也是他创作的长篇氛围音乐的重要组成部分。音乐变得不可控制、不可重复、不可预测，与古典音乐大为不同。最终得到的结果完全取决于你输入的内容，节拍还是音乐？

我逐渐意识到，伊诺的生成音乐和隐藏在宇宙最初时刻背后的物理学有着紧密的联系，后者展示了空无一物的宇宙是如何产生我们今日所见的复杂结构的。我不禁自问，宇宙结构是否也源自一种单一的、处于初始模式的波，就像伊诺的生成音乐那样？我需要傅立叶变换以及伊诺的音乐大脑中的灵感。毕竟，在运用傅立叶理念方面，他有着超越所有物理学家的直觉。我想发展这种直觉，并用它进行创

造。那天早上，当我走向正在操纵各种波形的伊诺时，他微笑着对我说：“看，斯蒂芬，我正试图设计一个简单的系统，它被激活之后就能生成一首完整的曲目。”那一刻，我脑海中突然闪过一个念头。早期宇宙中有没有可能存在一种振动模式，它能生成我们现在生活于其中的复杂结构，以及构成我们的复杂结构呢？这些结构是否有可能具有即兴演奏的性质？这是我学到的有关即兴演奏的第一课。



07

在爵士乐中，
打破物理学的界限

The Jazz of Physics

暑假时候，我会离开帝国理工学院，去拜访布赖恩·格林（Brian Greene），他在哥伦比亚大学弦论、宇宙学和天体粒子研究中心（ISCAP）有一个团队，我会加入他们，以便进行我的新项目，努力把弦理论的一个关键理念引入宇宙学。那时的我并没有想到，这种联系会来自与一位爵士乐传奇人物的偶遇。在我应聘博士后长达5个月却一无所获时，格林是第一个为我提供职位的人，但我最终还是决定进入帝国理工学院工作。格林因其在弦理论拓扑变化方面的开创性研究而闻名，但使我决定跟随他的是他对弦理论在早期宇宙中的应用上的研究热情。格林将弦理论应用于宇宙学问题，这个成立于2000年、由他担任主任的研究所是他的研究自然演化的结果。他所研究的项目为我们这一代的许多年轻宇宙学家提供了机会，我们都极为感激。我非常感谢格林提供的工作机会。幸运的是，在我决定去帝国理工学院之后，他还给了我一个在他领导的研究所做访问博士后的机会。因此，暑假期间，我会离开伦敦去纽约访问他所在的研究所，在那里做物理计算，并在我最喜欢的地方演奏爵士乐。

我并不是唯一一个来自纽约、客居他乡，终又得以“归家洗客袍”的物理学家。李·斯莫林也在纽约做着自己的计算，他的工作涉及一个有关暗能量和量子引力的令人兴奋的理念。我们经常联系，以交换想法，并定期在他的好朋友杰伦·拉尼尔（Jaron Lanier）家中的阁楼上见面。斯莫林称拉尼尔是天才。如果斯莫林称某人为天才的话，那么这个人肯定不简单。我跳上从布朗克斯开往翠贝卡（Tribeca）的两班火车之一，下车后进入了一座高大的阁楼，在阁楼的一端，我看到了数以百计的异国乐器。阁楼的另一端放着各种电子设备和计算机设备。斯莫林向我打招呼，几分钟之后，一个又高又壮的男人走了进来，他穿着一件像是睡衣的黑色T恤和一条黑色宽松短裤，脚上穿着拖鞋，还梳着一头又长又厚的金色发辫。他走过来，颇为自来熟地给了我一个熊抱。他就是世界著名的计算机科学家、作曲家拉尼尔，也是虚拟现实领域的先驱之一。我扫了一眼整个房间，看

到了《连线》（*Wired*）杂志的首刊，封面人物正是梳着一头发辫、戴着大眼镜和手套的拉尼尔。他看起来像是来自外星。

即兴创作与物理学

那时我也梳着一头长长的发辫，所以并不是很在意这种形象。随着时间的推移，拉尼尔成了我最好的朋友之一。用“博学多才”来形容拉尼尔绝非溢美之词，因为他不仅是艺术家和科学家，还是作曲家、多乐器演奏家和作家。然而，真正令我感到惊奇的是他研究科学和音乐时所使用的方法。他把来自音乐和科学的不同理念结合在一起，形成一种新的技术方法，进而推动科学的发展。与丹尼尔·卡普兰先生一样，拉尼尔非常鼓励我把对音乐和物理学的兴趣结合起来开展研究。

2000年我们第一次见面时，拉尼尔提到，他对果蝇视觉系统的神经网络很感兴趣。对遗传学和神经生物学来说，果蝇是非常好的实验对象，因为它们的繁殖速度很快，所以其神经回路中存储着很多生物信息。拉尼尔与他的同事有意对这些神经网络进行计算机算法模拟。当时，我并没有看出这项研究的意义，我心想：“那又怎么样？”9年之后，拉尼尔在一座能俯瞰旧金山湾的山上购买了一栋漂亮的房子。有一天，我去拜访他，当我们一起走在伯克利山间的小道上时，拉尼尔若无其事地说：“斯蒂芬，你还记得那个关于果蝇的项目吗？我的一些朋友基于这项技术，成立了一家创业公司，并给我开了一张支票，我用这笔钱买了这栋房子。”对于一个没上过高中的人来说，这实在是好事一桩。好吧，公正地说，拉尼尔十几岁时就在新墨西哥州建造了测地线圆顶帐篷并住在里面，还学习了大学数学课程。

拉尼尔还会吹奏萨克斯，所以当我们第一次在纽约见面时，他就提到了萨克斯，并对我说：“你知道的，斯蒂芬，我朋友奥尼特·科尔曼住在上城区。我们一起去看他，如何？”我惊讶得下巴都快掉下

来了。我小时候在布朗克斯就听说过科尔曼，那是我与爵士乐即兴演奏的第一次邂逅。在我还沉浸在思绪中时，斯莫林就回道：“噢，这太棒了。”拉尼尔拿起电话，叫了一辆出租车，然后我们就来到了科尔曼位于市中心的殿堂。

科尔曼在得克萨斯州的蓝调和民间传统音乐中长大，他是自由爵士乐的主要革新者之一。那时，我正在（现在依旧在）学习被某些音乐家称为经典主流爵士乐的音乐。和研究理论物理一样，在演奏主流爵士乐之前必须掌握完整的知识体系。例如，如果你在即兴演奏时，观众指出了一个曲调，譬如“秋叶”（Autumn Leaves），那么你必须知道曲头（开始的旋律），以及余下的形式（和声与节奏的结构）。所以，经典爵士乐的即兴独奏会受到某首歌曲的结构或形式的约束。然而，我和科尔曼之间的讨论，以及我从他身上学到的东西，不仅改变了我对即兴演奏的看法，还改变了我对即兴演奏与理论物理学之间关系的认识。

科尔曼是一个温和而沉着的人，而且语言中总是充满比喻之美。当我第一次见到科尔曼时，他把我带到了自己的工作室，并且向我展示了他最喜爱的白色中音萨克斯。科尔曼把它递给我说：“试一试。”天哪，一位爵士乐传奇人物邀请我演奏他的乐器！我心中狂喜，又惶恐至极。他递给我一副干净的吹口和簧片，我便开始在某个音阶附近吹奏。我吹奏完后，他轻柔地说：“音符虽然只有12个，但你可以用这12个音符组成一篇对话，真是太神奇了。”科尔曼的话极大地鼓舞了我。接着，我们开始谈论他的即兴演奏方法——他因采用一种新的“态度”或是策略来进行即兴演奏而闻名，他称之为“和声旋律混成乐”。在一次访谈[1]中，他描述了这个过程：

> 想想那些基本的音符，不要在演奏这些音符的时候束手束脚，并认为“你迈不出这一步”，而要思考它们构成的声音，以及你能用这些声音做什么。这就是我用和声旋律混成

> 乐在做的事情，即从一个全新的角度思考旋律、节奏与和声。这更需要依靠听觉和反应、声音和反馈，而不是任何一种我可以为你们写下来的模式。音乐并不像人们认为的那样与许多事物都有关联。

对我来说，这种观点太激进了，因为我一直认为演奏爵士乐只有一种正确的方法，即熟记所有的音阶，然后用手指弹奏出来。认真练习，提高技艺，这样你才能在和弦变化中演奏出一致而富有想象力的变调。抄录并分析你所擅长的乐器领域中大师的独奏，对我来说就意味着约翰·柯川、桑尼·罗林斯（Sonny Rollins）、德克斯特·戈登（Dexter Gordon）、查理·帕克（Charlie Parker）、韦恩·肖特（Wayne Shorter）和迈尔斯·戴维斯（Miles Davis）。不过，我和科尔曼的第一次谈话，让我想起了我在研究生时代得到的一些意想不到的建议。有一次，我正在普罗维登斯一家音像店阴暗的地下室里翻着旧乐谱，背后突然响起一道刺耳的声音。我转过头去，看到一位穿着花呢夹克的高个子老人，他自称是一位古典作曲家：你这是在浪费时间。如果你想成为一位伟大的音乐家，那么你必须知道三件事情：

- 欲要挑战规则，必先对其了如指掌；
- 音乐是关乎张力与决心之物；
- 练习，练习，再练习。

但是，当你出去玩的时候，就要把这些统统忘掉！从那以后，我再也没有见过他，但他的话一直萦绕在我耳边。我经常和我的学生分享这个故事。

与山地景观具有固定的形状一样，比如拉尼尔所居住的那座山，经典爵士乐的结构提供了由和声、旋律和节奏组成的骨干，即兴演奏

在此基础上进行展开。例如，很多爵士乐曲调都来源于早期的叮砰巷（Tin Pan Alley）[11]、百老汇和好莱坞歌曲，爵士乐手将这些歌曲作为基本材料，借以发挥并进行独奏。在即兴演奏歌曲和声方面，“次中音萨克斯之父”科尔曼·霍金斯（Coleman Hawkins）是一位大师。莱斯特·杨（Lester Young）外号“总统”（Pres），他轻柔、欢快又激烈的风格与霍金斯的粗犷风格形成了鲜明的对比，这种差异正是源自两人对即兴演奏旋律的研究。在旋律、和声与节奏层面上，“爵士乐之父”路易斯·阿姆斯特朗（Louis Armstrong）和比博普[12]天才查理·帕克都是即兴演奏大师。

在和声旋律混成乐中，科尔曼有意地在即兴演奏中变换了和弦。一般来说，经典爵士乐是由和声在主调上的移动来引导音乐，而在和声旋律混成乐中，旋律、和声与声音在即兴演奏中的地位是一样的。与对称性原理一样，所有的音乐元素都是对等的。我们很难把“声音”这个词归入一个良定义[13]的概念集合中，它更像是一种隐喻，暗示着不同的爵士乐手有着不同的声音。科尔曼与帕克演奏的都是高中音萨克斯，但他们各自有各自的声音或特征——不同的音质与音响，以及安排音符与形成节奏的不同方式。一个真正的爵士迷能听其声辨其人。

相对论中的6个音符

当科尔曼进行自发的变化时，乐队的反馈将会产生新的音乐结构。标准爵士乐吉他大师马克·里博特（Marc Ribot）[2]观察发现，科尔曼将这些结构建立在主旨之上的方法是：

> 表面上，他们正在解放比博普的特定结构，实际上是在发展作曲的新结构……关于科尔曼的和声旋律混成乐的一系列规则……很明显，它是基于抓住主旨，并且解放它，让它

变成多调、旋律、节奏的音乐，它与主旋律的主旨紧密相连。

主旨是一段短旋律，在一首歌中，它通常会反复出现。最著名的主旨也许就是贝多芬《第五交响曲》开头的3个音符。在整首交响曲中，主旨在不同的曲调上重现，并且被不同的乐器演奏出来。这种方法让人想起布莱恩·伊诺生成音乐的方法。两者都应用了同一个理念，即复杂的结构可以源自简单的规则或模式。认真地听一首科尔曼的曲子，你就会发现，他的独奏曲目通常是通过调制自己的乐音与音高来完成的。

在短暂的萨克斯课程之后，科尔曼问我目前正在做什么。我回道：“研究涡旋。”虽然涡旋在量子场论中很常见，但我是在弦理论（不久之后甚至超出了弦理论）的背景之下思考它们。涡旋是一些束缚能量的管状区域，在自然界中非常常见。水向水槽中流动的旋涡运动就是一种涡旋，台风和风暴的中心也是一种涡旋。即使在量子领域，磁场也可以在超导体中形成涡旋晶格，这是一个十分重要的理念，甚至足以获得诺贝尔奖。我拿出一张纸，画出涡旋给科尔曼看。他回复说，他在独奏中也采用了类似涡旋的模式。在这次会面之后，每当我倾听科尔曼的音乐时，我的听觉就会变得敏锐起来，我不仅能听到他即兴演奏的音符，还能听到其中的集合模式，就像涡旋一样。

几年之后，这次与科尔曼的会面对我的影响，在我和电子乐乐手埃琳·里乌（Erin Rioux）合作制作我的第一张专辑时体现了出来。这张名为《来了》（*Here Comes Now*）的专辑（图7-1）是向伊诺和科尔曼致敬的作品。专辑中包含有伊诺精通的调频音乐合成的元素，我还以生成电子节奏演奏了大量的自由爵士乐。以我之拙见，这张专辑中最好的一首歌正是科尔曼的《涡旋》（*Vortex*）。



图7-1　专辑《来了》的封面

注：这张发行于2014年的专辑广受好评。图片由埃琳·里乌和布兰登·桑切斯（Brandon Sanchez）提供。

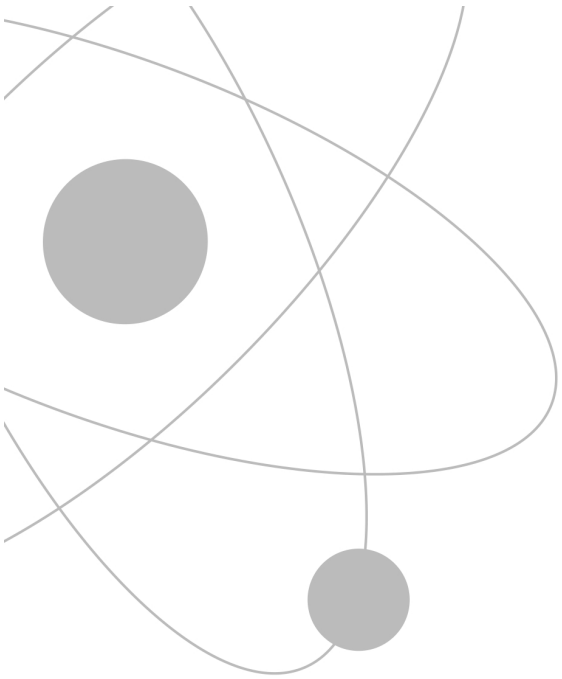
拉尼尔和科尔曼向我打开了一个作为科学家与音乐家的全新视角。拉尼尔也是一位音乐家，他可以毫不费力地在音乐与科学之间做出有效的类比。我曾看到他在一次关于计算机科学的很重要的讲座上，以一种被他称为第一台数字计算机的中国古乐器开始了演讲。科尔曼虽然没有接受过科学训练，但他仍可以和我讨论物理学理念，以及如何把这些理念与音乐联系起来。一天，他对我说：“我给你提供一个模式吧。”他在纸上写下了6个音符，然后说：“把它们练熟，这有助于你演奏和弦的变化。”很遗憾，我现在还不能透露这6个音符的秘密。所以，我们来谈谈相对论吧！

作为一位年轻的理论物理学家，我虽然受到了导师的鼓励，但还是承担着一定的压力，这迫使我变得循规蹈矩。能否取得进展、获得晋升很大程度上取决于你是否受到侪辈的尊敬。一旦有迹象表明你缺乏作为一位训练有素的理论物理学家所必需的能力，就有风险被踢出

局。我非常清醒地意识到，即便是在那些最富想象力的人群中，我即将提出的理念也是不受欢迎的。虽然我尽我所能地去掌握每位理论物理学家所期望掌握的传统技术，但我还是希望在心中保留对物理学的想象。这和我在音乐上的追求是一样的，即找到即兴演奏的精神表达，把我从我所练习和内化的形式主义中解放出来。与科尔曼的初次会面打开了我探究理论物理的突破口，我体会到了不随大流的自由和自信。

科尔曼冒着巨大的风险，打破了比博普和经典爵士乐的传统。他对新理念的热爱给了他打破传统的力量，一些非常酷的音乐由此诞生。本着同样的精神，我认为我也可以成为一位为了理念之美而创造理念的理论物理学家。和科尔曼改变受西方和声理论限制的旋律路径，只为了追求新的理念并表达他所听到的声音一样，我也可以操纵那些虚拟的理论世界。我意识到，在那些我所提出的推测性的科学命题中，很多（甚至是绝大多数）都有可能是错误的，但或许其中的一两个会成为理论物理领域中的突破。

多年来，科尔曼的话以及我们之间的讨论一直影响着我，促使我不断完善爵士乐和宇宙学之间的类比。正如利昂·库珀告诉我的那样，最好的类比可以让我们对物理学有新的认识，而这是应用其他方法不可能得到的。



08

无处不在的振动

The Jazz of Physics

在电子合成器和生成音乐出现之前，在量子宇宙学领域关于宇宙结构形成原理的争论出现之前，牛顿就出现在这个世界上了。他通过一个直观而普遍的机制，把3位数学家前辈（毕达哥拉斯、伽利略和开普勒）的工作整合在了一起。公元前500年，毕达哥拉斯开始重现他在铁匠铺中听到的泛音。通过倾听锤子敲击金属发出的声音，他用不同长度的绷紧的弦重现了锤子的重量之间的数学比例。然而，毕达哥拉斯以及其后几千年里的研究者都没有意识到，即便是最复杂的振动，其背后也隐藏着一个普适的秘密，我们可以用一个实用而优美的数学原理——傅立叶变换来描述它。

牛顿定律：一切孤立物体都有惯性

2 000多年后，即大概1600年，伽利略与开普勒依然对毕达哥拉斯的发现抱有热情。虽然他们无法从物理学上解释弦是如何奏出和谐的音符的，但是他们毕生的工作为实现这一目标打下了坚实的基础。对神圣几何与宇宙和谐的信仰使开普勒发现了行星运动定律。不过，他与开普勒都没有意识到，他们研究的运动只是一种尚未被发现的力作用的结果。接下来，该牛顿登场了。

牛顿于1643年出生在英格兰，是有史以来最有影响力的数学家和物理学家之一。他才华横溢，最痴迷的是物体的运动。在微积分和光学领域，牛顿都做出了重要贡献，而最重要的是，他是经典力学的奠基人。经典力学描述了地球上的物体的运动，比如机械的运动、抛射体的运动，甚至是伽利略从比萨斜塔上扔下的铁球的自由落体运动。牛顿证明了力是物体运动发生变化的原因，但他并没有止步于此。他希望能解释一切物体的运动，无论是地球上的物体，还是天体。他的决心促使他完成了《自然哲学的数学原理》一书，并于1687年出版。他在书中提出了作用于地球，甚至宇宙中的一切运动的力——引力。正是因为有了引力，物体才会落到地球上，行星也才会围绕太阳运

动。当他用自己提出的“一般定律”去推导开普勒的行星运动定律时，他获得了巨大的成功。

由弦的振动产生的泛音虽然仍难以捉摸，但牛顿在发现三大运动定律的过程中，不知不觉地就为弦的物理学奠定了基础，后来的研究者最终得以理解了它。随着时间的推移，他的继任者共同探索着这幅拼图的剩余部分，最终得到了弦运动的图像。接着，物理学家又成功描述了波的运动，而这最终会被证明是黏合量子物理学、宇宙学和音乐的“胶水”。

牛顿的发现中隐藏的秘密就存在于支配着自然界中所有物体的一种现象。它是一根把所有运动连在一起的线，牛顿称之为惯性原理。他发现，一切孤立的物体不会旋转、加速或者减速。惯性是物体的一种固有属性，它天然地抵抗物体运动状态的变化。

牛顿第一运动定律：除非受到外力的作用，否则处于静止状态的物体会保持静止，而处于运动状态的物体其运动速度与方向会保持不变。

牛顿第一运动定律促使我们提出一个新问题：“力是什么？”为了解释它，牛顿提出了第二个运动定律。他精确地定义了“力”，把它等同于一个以特定的速率和方向运动的物体速度的变化率。如果一个物体的速度发生变化——速度增大、速度减小或改变方向，我们就说它在加速。这就是牛顿第二运动定律的本质。作用在物体上的力会使该物体加速。相反，通过观察一个物体如何加速，我们可以确定相应的力的特征。牛顿发现，当力作用在物体上时，加速度和物体的质量直接相关，且通常取决于物体的质量。

牛顿第二运动定律：作用在物体上的力F，等于物体的质量m与加速度a的乘积——

$F=ma$

乍看上去，牛顿所发现的惯性、力与速度变化之间的关系似乎是显而易见的，但其意义十分深远。通过这个简单的方程，我们能确定受力粒子未来的位置。实际上，这个方程的魔力正在于它的预测能力。

我的物理老师丹尼尔·卡普兰在第一天上课时写在黑板上的方程，恰好就是牛顿第二运动定律方程。当他把网球扔向空中时，他的手提供了一个力，网球向上加速运动。引力提供了另一种力，网球又向下加速运动。网球会经历加速——减速——停止，并且速度变换方向，而整个过程只用$F=ma$就可以表达。

为了更直观地理解加速度，我们设想牛顿正在1958年的一级方程式赛车中驾驶一辆玛莎拉蒂250F。想象一下，这个痴迷于运动的男人坐在史上最棒的赛车里该有多开心。启动引擎的那一刻，牛顿是静止的，而汽车的速度为零，但当他踩下油门时，他会感觉到自己被推向座椅靠背。当牛顿紧张地猛踩刹车时，他又会被力推向方向盘。经过一段时间的练习后，牛顿逐渐掌握了驾驶技术，并以250 km/h的恒定速度沿直线行驶。这时，速度是恒定的，所以不存在加速度，对运动入了迷的牛顿注意到没有任何力在推动他。于是，他断定：只有速度的变化才会使他感受到力，无论是被向后推向靠背，还是向前推向方向盘。相似地，当这辆玛莎拉蒂250F转弯的时候，汽车行驶方向的变化会产生明显的侧向力，有经验的司机能预见到这种力，并向这种力的方向倾斜。

在数学上，“变化”通常用符号Δ来表示。如果我们用X来表示位置，那么ΔX就表示位置的变化。速度正是位置的变化，因此我们可以写成$v=\Delta X$，而加速度$a=\Delta v=\Delta\Delta X=\Delta^2X$。用位置来表示加速度意味着我们可以把牛顿第二运动定律$F=ma$写成$F=m\Delta^2X$。

牛顿方程的预测能力开始显现出来，因为它表明，一个作用在物体上的力决定了物体位置随时间产生的变化。速度正是位置随时间的变化，而加速度是速度随时间的变化。因此，准确地说，速度可以写成时间的函数$X(t)$。同理，速度和加速度分别是时间的函数$v(t)$与$a(t)$。再精确一些说，这个方程应该写成关于时间的变化，所以牛顿方程就变成了：

$$F = m\frac{\Delta v(t)}{\Delta t} = m\frac{\Delta^2 X(t)}{\Delta t^2}$$

将牛顿方程写成一个与加速度、速度、位置和时间相关的方程后，我们就可以得到许多信息。

宇宙结构，某种振动模式的结果

我们可以通过4种情形，来理解关于弦的基本物理知识。

情形1：不存在外力。如果不存在外力，那么$F=0$。假定物体的质量非零，那么，由$F=ma$可以得出$a=\Delta v=0$。这就是牛顿惯性定律——如果没有外力，物体的速度会保持不变。牛顿在驾驶赛车时沿直线行驶就是这种情形。当赛车运动时，它的位置以恒定速度发生变化，我们可以用一张简单的图来描述这种情况。

图像是物理学家拥有的一种精细艺术理念，是一种无价的方程可视化方法，它能揭示出一些函数中隐藏的信息。图像本身就可以被“阅读”。例如，图8-1中的速度图的斜率为零，这立即告诉我们（当然，这需要经过训练），函数不会随时间发生变化——它是恒定不变的。位置图$X(t)$的斜率在任意一点都等于它的变化率，并由$v(t)$

在那一点的值给出。这是多么有用的可视信息啊！斜率越陡峭，变化率就越大，反之亦然。

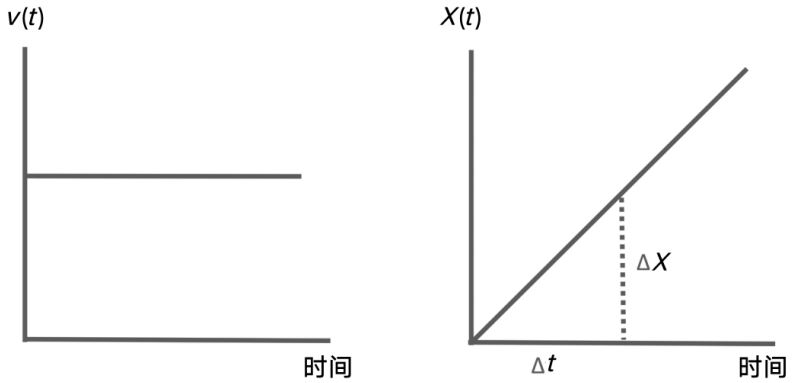


图8-1　汽车的速度与位置随时间变化图

情形2：外力恒定。此时，受某个恒定外力作用的物体的牛顿方程为：

$$F = constant = m\frac{\Delta^2 X(t)}{\Delta t^2}$$

如果牛顿能凭借他在精确计算方面的天赋，稳定地踩住玛莎拉蒂250F的油门而不上下摇晃，那么他就在提供一个恒力。方程$F=ma$告诉我们，汽车将以恒定速度加速。这种恒力产生恒定加速度的现象，正是伽利略从比萨斜塔上扔下铁球时所观察到的景象。在这种情形下，恒力就是重力！

从图像上看，$a(t)$与之前的$v(t)$十分相似，因为它也是恒定的，而$v(t)$与之前的$X(t)$类似，因为它以恒定速度增加。问题在于，如何找出$X(t)$的图像。这个问题很有趣，因为它将证实牛顿方程的预测能力，即预测在某个恒力的作用下，汽车在任意时刻t的位置。基于函数在某点的斜率等于它在该点的变化率这个事实，我们可以通过这些图像得到一个理念。例如，在$t=1$时，我们可以得到$v=1$，

而我们知道$X(t)$的变化率等于$v(t)$。因此，在t=1处，变化率或者说X的斜率等于1。同理，在t=2处，我们得到v=2，而$X(t)$的斜率等于2，余后类推，其数值单调递增。画出这种函数图形，我们就得到了图8-2。

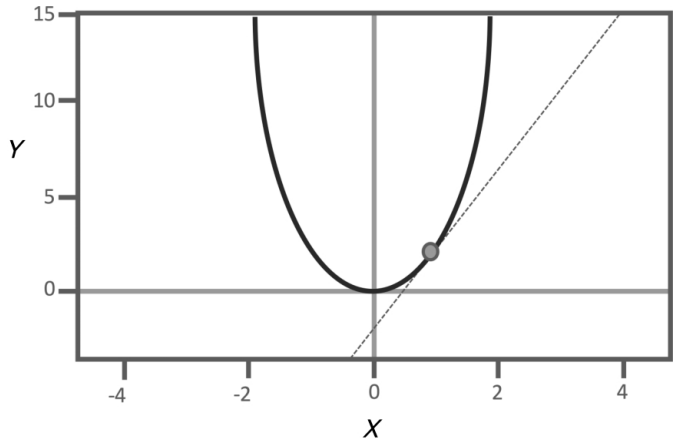


图8-2　$X(t)$的抛物线图

注：斜度线位于t=1、t=2、t=3处时，$X(t)$的抛物线会更完美。

接下来的问题就是如何得到函数$X(t)$的精确形状了。在处理这个问题时，牛顿发现，他所掌握的数学工具远远不够。他需要一种能描述物体在任意特定时刻的运动方式，而不仅仅是在一段时间内的运动方式的工具。莱布尼茨对物理学、语言学和政治学均做出了贡献，此时他也正在德国思考同样的问题。令人难以置信的是，出于想要理解物体在最小可测量变化时的运动的愿望，牛顿与莱布尼茨各自独立地创建了数学的一个分支——微积分，它正是描述变化的数学。

既有的符号被描述瞬时变化率的导数替代，时间间隔t也变成了无穷小的间隔。有了导数，我们就得到了一种新的数学构造，即微分方程。描述一个物体在恒定的外力作用下的牛顿方程就变为：

$$F = constant = m\frac{\partial^2 X(t)}{\partial t^2}$$

从图像上看，一个函数的一阶导数是它在某一点的斜率，而二阶导数转变成了函数图像在该点的弯曲程度。我们需要找到满足这个方程的位置函数$X(t)$，以使它的二阶导数在任意时刻都是常数。在这一点上，大多数数学家与物理学家都不吝于根据已有的关于函数及其图像的知识，大胆猜测$X(t)$的形式。然后，他们会把猜测的结果代入方程，看看是否满足条件，并对其做出相应的调整，直到最终得到一个正确的结果。在这种情况下，最终的结果是一条抛物线，其最基本的形式由$X(t) \sim t^2$给出。受过一些训练的人都能很直观地看出形式与方程之间的联系。如果已知任意一点$X(t)$的导数或者斜率，我们就可以得到速度函数，它的斜率以恒定速度增加。再对速度求导，我们将得到恒定的加速度，即$a(t)$=常数，这与恒力是对应的。

微积分十分重要，因为它表明，一个函数可以由另一个函数根据“描述变化的数学”求导得出，所以这种函数被称为导数。如今，导数已成为物理学、工程学和声学领域最重要的工具之一。从本质上说，通过画出图像，我们不用计算就能得出导数，因为函数的形式——与导数相关的形状、表观斜度（变化率）和弯曲程度，给出了动力学的信息，我们甚至都不用去看那些方程。

情形3：外力不恒定。一个经典的例子是一端系有重物的弹簧。想象一下，我们微微拉动这个重物，然后释放它。重物将会从零开始加速。接下来，想象一下把重物拉得更远一些，重物将会加速得更快。结果证明，这是一种线性关系，加速度与重物被拉离原点的距离X成正比。形式最简单的牛顿定律告诉我们，F与X成正比。牛顿方程变为：

$$\frac{\partial^2 X(t)}{\partial t^2} = \alpha X(t)$$

方程中的比例常数包括重物的质量m和弹簧的劲度系数k。这个方程表明，存在函数$X(t)$，它的二阶导数等于自身。

对于系在弹簧一端的重物，无论它是竖直悬挂还是水平置放在光滑的表面上，它的运动都会是简谐振动，或者一种相对于中心平衡位置的振动。如果你能想象出这种运动随时间变化的图像，你就会发现，它的轨迹犹如一条波形曲线。力与物体离开静止位置的距离成正比的所有系统都有着相同的特征，也都满足情形3中的牛顿方程。波形曲线是一个正弦函数，简单地说就是sin，可以写成$X(t)=\sin(t)$[1]。如果把正弦函数求导两次，我们就又得到了同样的正弦函数（图8-3）。

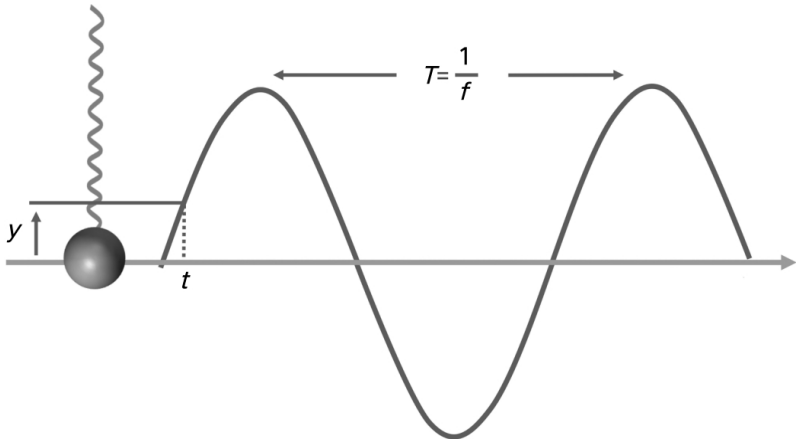


图8-3　描述一个系在弹簧一端、相对于平衡位置振动的物体的正弦函数

本质上，前面的方程描述了一个单一的振动粒子，这让我们离困扰着毕达哥拉斯、伽利略、开普勒，甚至牛顿的谜题——弦的振动近了一步，也离理解声波和布莱恩·伊诺的电子合成器更近了一步。我们能从图像中直观地看出，正弦函数可以描述纯粹波的运动。为了更透彻地理解这一点，我们试着把这种振动粒子的例子扩展到连续物体上。

情形4：另一种变力。让我们想象一下拨动一根吉他弦，并且只考虑弦上的一小段。一个简化而精确的描述弦的模型，是想象那些构成弦的原子（微观的质点）彼此之间以弹簧相连。在这种统一的原子链条上，每个原子都独立地相对于一个平衡位置来回振动，正如系在弹簧一端的重物的振动一样。我们用u来表示来回振动的距离。

在情形4中，每个独立的质点都会通过弹簧拖动分布在x方向上的相邻质点，于是，有趣的事情就出现了（图8-4）。

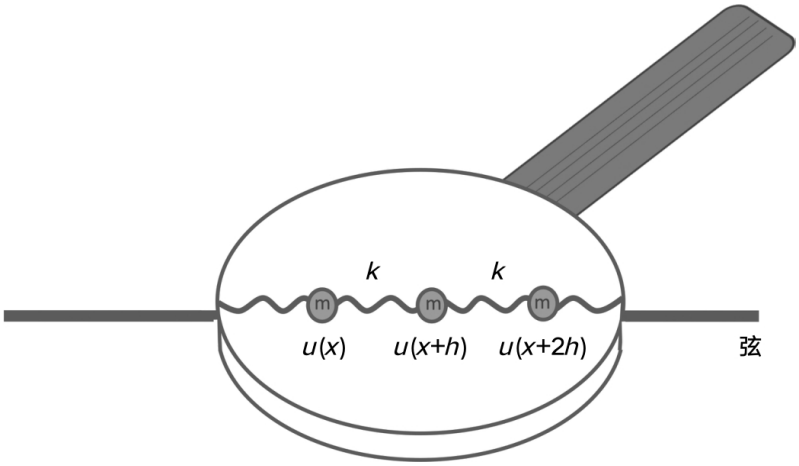


图8-4　弦的运动的放大图

当一个质点拖动一个、一个又一个邻居时，某个波就会沿着弹簧传播，导致每个质点都开始振动，于是这种振动就会在质点之间传播——这是一种传播的扰动。当然，与那些分离的质点不同，弦本身是连续的，所以我们用导数来缩小弦与弦之间的距离。从本质上说，我们描述的是一个连续的实体。想象一下足球场边的球迷形成的“人浪”吧。从远处看，我们只看到“人浪”在球场边流动，而无法分辨出单独的个人。我们与这些球迷的距离就像导数一样运作，把一个球迷与另一个球迷之间的距离缩小到几乎为零。在这种情形下，牛顿方

程用一个关于时间与位置的函数u（x，t）描述了整条弦的来回运动，这个函数具有如下的奇妙形式：

$$v^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2}$$

由于现在有两个变量x和t，所以存在与这两个变量相关的导数。这个方程告诉我们，弦在某点的弯曲程度（对x的二阶导数）会导致弦在那一点加速（对t的二阶导数），也正是这个方程描述了振动弦的运动。毕达哥拉斯若是泉下有知，想必也会和我们一起欣赏这一非凡的洞见吧。

这个方程的解依旧是一个正弦函数，它有高度（振幅）和波长（一个波峰到另一个波峰的距离）。正弦函数有两种纯粹的形式，即正弦波与它的导数余弦波，而余弦波仅仅是正弦波的平移。一个惊人的事实是，任意数量的正弦函数之和依旧是一个正弦函数。这些波的高度与波长以这种方式相叠加，从而使得波的本质保持不变，并且使解依旧是波的方程。纯粹波的这种可叠加性质就是傅立叶理念，它隐藏在伊诺的作曲方式中，并且告诉我们，振动弦的所有形状都可以通过纯粹波的叠加得到。这意味着u（x，t）的方程不仅描述了一个纯粹波，还可以描述波的所有叠加形式。

傅立叶理念：任何随时间变化的复杂波形（比如复杂的声波），都可以分解为不同频率和振幅的纯粹正弦波之和。

在这个意义上，纯粹的谐波正弦波可以用来制造任何复杂波形，这简直就是魔法。将两颗石子扔进池塘，它们各自产生独立的波形，并且最终会彼此接触。这些波可以彼此干涉，使强度增强或者减弱。如果波峰或者说最高点是一致的，那么它们的叠加就会彼此增强，产

生的波会具有相同的频率，但振幅增大。然而，当一列波的波峰恰好遇上另一列波的波谷时，两列波则会彼此相消。

因此，傅立叶变换的核心是波的干涉。雨落池塘时，众多雨滴会产生彼此作用的水波，并在水面上形成漂亮（有时是混乱）的图案。现在我们可以用数学语言来表达傅立叶理念了（图8-5）。简而言之，方程是：

一个随时间演化的复杂波形=一系列正弦波的叠加

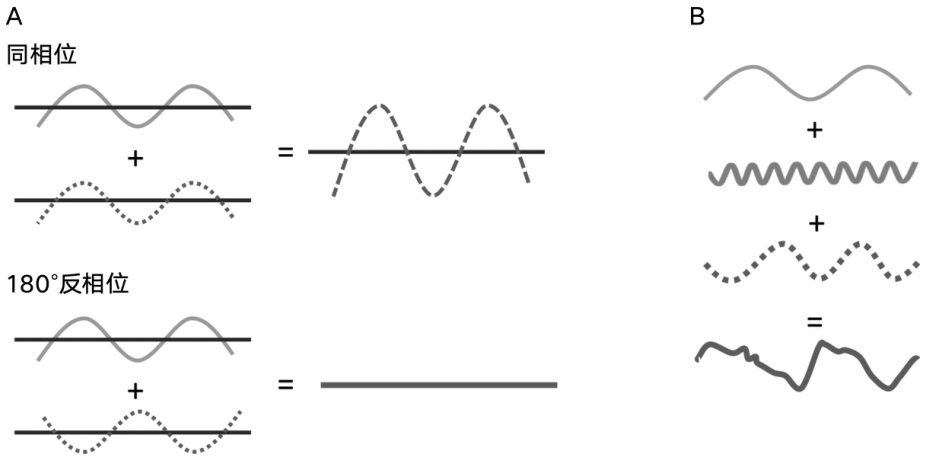


图8-5　波的干涉与傅立叶理念

注：A图显示了波的干涉中的增强与减弱。B图通过叠加不同频率的纯粹正弦波表达了傅立叶理念，这些正弦波叠加在一起形成了一个复杂的波形[2]。

由于复杂的波形可以随时间演化，所以我们称非平凡的（复杂的）信号为函数$F(t)$。强大、美妙且无所不在的傅立叶变换就是一个数学方程，它可以按照振幅A和频率将$F(t)$分解为不同的子波。于是，方程如下[3]：

$$F(t) = \sum_n A_n \sin(\omega_n t) = A_1 \sin(\omega_1 t) + A_2 \sin(\omega_2 t) + A_3 \sin(\omega_3 t) + \cdots$$

在图8-5（B）中，我们可以看到波函数$F(t)$是由等号下方的实线曲线表示的。如图8-5（A）所示，我们可以应用波彼此干涉后强度

会发生变化这一性质，通过叠加纯粹正弦波得到波函数。正是应用了这一理念，电子元件才从振荡器中产生了电子音，这是现代电子合成器的关键之处。

傅立叶变换是一种数学运算，通过指定当前的频率与振幅，把复杂函数分解为子纯粹波。我们可以从上图非常清楚地看到这些。傅立叶逆变换是一种逆向数学运算，即在知道各个子波的振幅与频率的前提下，我们可以得到原来的关于时间的复杂波函数。傅立叶变换是物理学、工程学和计算机科学中最常用的工具之一（图8-6）。电路中需要它，在地球和人造卫星之间通过电磁波收发信号的理论基础也是它。傅立叶变换还是理解宇宙结构形成机制的关键。

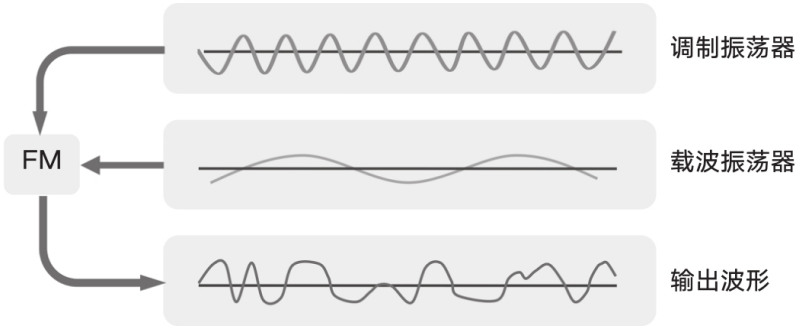


图8-6　伊诺在他的作品中使用的调频音乐合成技术

现在我们有了探究被称为“共振”的普遍现象的工具。声音、音乐以及量子宇宙中的许多奇迹都离不开共振（图8-7）。萨克斯能否奏出特定的音符，粒子加速器能否产生粒子，都取决于共振的物理学。实际上，共振是物理学中最普遍的现象之一。简而言之，共振是振动能量高效地从一个物理实体传递到另一个物理实体的途径。很多物体都有一个固有频率，尤其是乐器（以及我们即将讨论的量子场），所以在受到扰动时会以一个（或一组）特有的频率振动，这些频率由物体材料的属性决定。关于固有频率，最简单的例子就是系在弹簧一端的重物，仅有的两个参数是质量和弹簧的劲度系数。

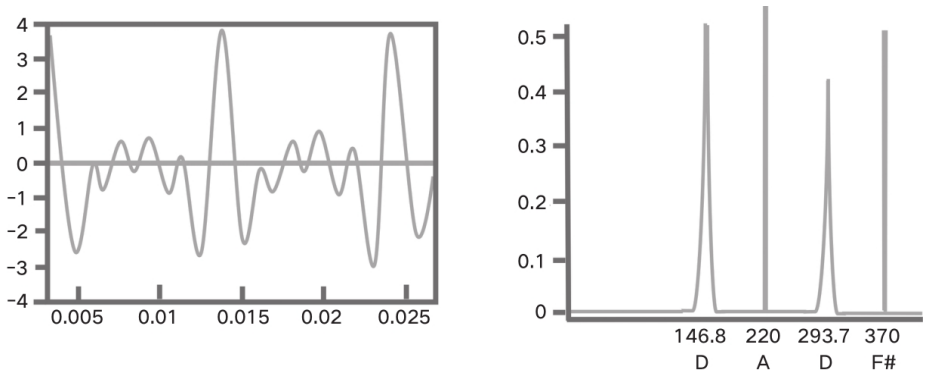


图8-7　D大调和弦的振幅-时间图与傅立叶变换

注：左边的信号表示D大调和弦的振幅-时间图。右边的曲线是傅立叶变换，显示了振幅与频率的分解。值得注意的是，在右图中，只需要4种频率就可以重构左图中的波形。这4种频率正是D大调和弦中的4个音符。

把牛顿第二运动定律应用到与弹簧相连的重物上，我们就可以得到有关这个系统“固有”频率的方程$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$。这个方程表明，弹簧的劲度系数越大，系统振动得就越快（因为它的波矢k更大）；重物越重（其质量m越大），系统振动得就越慢。如果一个外力以与固有频率不同的随机频率不断推或拉重物，弹簧依旧会振动，不过它的振幅（重物走过的最大距离）将会变小。而如果驱动力的频率与固有频率相当，则会发生一些不同寻常的事情，即振动的振幅会迅速增大。这正是乐器，甚至粒子加速器的工作机制。

由于弦可以被看作一系列用弹簧连接的质点，所以它具有许多较高的共振频率。实际上，我们是用傅立叶理念推导出这些频率的。乐器被设计成在一组与音阶的各个音符相对应的离散频率上共振，其中的关键之处在于得到一系列驱动频率（比如振动的簧片或者从笛孔流出的气流），并控制乐器中的哪个频率发生共振。例如，在木管乐器中，这是通过关闭乐器上的一个音孔来实现的。

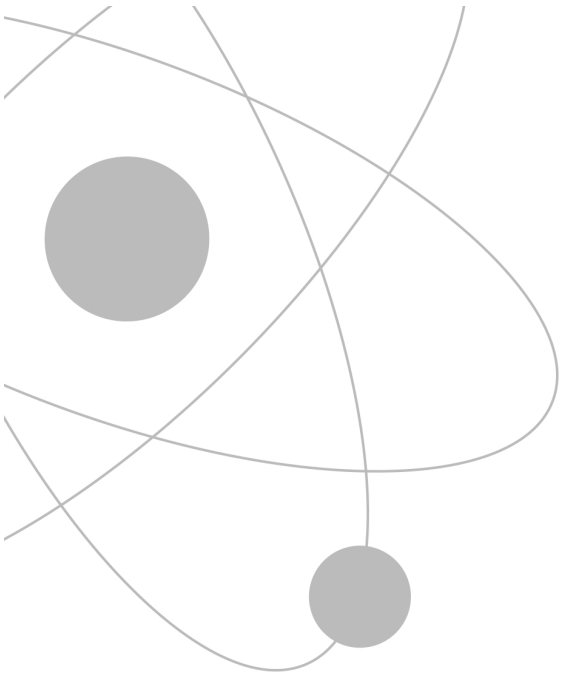
通过傅立叶理念，牛顿运动定律揭开了振动与共振的秘密，我们也因此得以理解复杂的波形是如何产生于简单的波形，并能用简单的

波形构造复杂的波形。我们很快就会讲到，傅立叶理念可以应用于4种基本作用力，而且这是理解宇宙结构的关键。在此给读者一点提示：如果宇宙结构是某种振动模式的结果，那么是什么引发了振动呢？宇宙本身是否表现得就像一件乐器呢？

The Jazz of Physics

第三部分

宇宙本身是否就是一件乐器



09

野心勃勃的物理学家们

The Jazz of Physics

理论物理学家吉姆·盖茨（Jim Gates）是与我关系最亲密的导师之一，也是超引力理论方面的先驱，而我在帝国理工学院研究的正是这一理论。盖茨曾告诉我，研究理论物理就像在没有声音的行星上长大的作曲家试图创作音乐一样。在试图追寻140亿年前宇宙中到底发生了什么时，我们确实有这种感受。有些时候，唯一能帮助我评估自己的进展、让我再次脚踏实地地开展研究的，就是我从我的博士生导师罗伯特·布兰登伯格身上学到的叛逆精神和冒险精神，它们能造就有益的成果。我忽然顿悟，偶尔转身拥抱新事物正是振兴旧事物的秘诀。

有趣的是，在我离开物理系研究生院的那一天，量子场论引起了我的兴趣。盖茨曾这样描述量子场论：探究大爆炸的原因就像试图在没有声音的行星上作曲，而我在其中迷失了。我想寻找一些更基础、与现实联系更紧密的事物。埃尔温·薛定谔（Erwin Schrödinger）于1946年完成了著作《生命是什么》（*What Is Life?*），他在书中把量子力学应用于生物学领域。而薛定谔也提出了量子力学中的基础方程薛定谔方程。读完后，我对生物物理学产生了浓厚的兴趣。毕竟，生物与非生物都由分子组成，而支配它的是量子力学。

周期性重复的自组织原子可以形成非生命物质，就像伊辛模型中周期性的电子自旋产生了不同形式的磁力。薛定谔睿智地推断出，生命中隐含的基因编码应该是一种准周期结构，就像一条螺旋线。顺着螺旋线的垂直轴向下看，你会看到一个圆像波一样周期性地运动。然而，从侧面看，周期性却消失了。詹姆斯·沃森（James Watson）、弗朗西斯·克里克（Francis Crick）与莫里斯·威尔金斯（Maurice Wilkins）受到启发，致力于寻找DNA的双螺旋结构（图9-1），最终他们成功了，并因这项发现共同获得了诺贝尔奖。结构与组成物之间存在着一种有趣的联系——螺旋结构保证了生命体在存活期间储存基因物质所必需的力学稳定性。

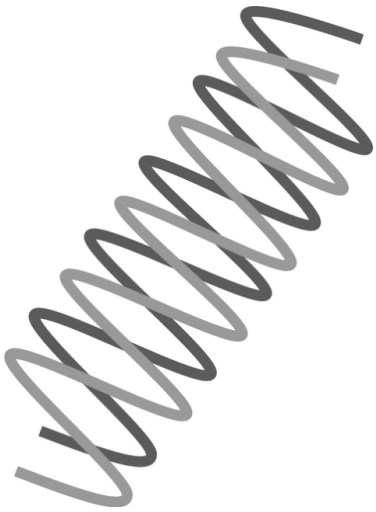


图9-1　DNA双螺旋的准周期结构

退出物理学界，成为生物学新人

因此，我打算退出物理学界。我必须和他人交流一下我的想法。杰拉德·古拉尔尼克（Gerald Guralnik）是希格斯玻色子的发现者之一，他也因此而为人们所知。他操着一口美国中西部口音，行为举止酷似泰迪熊。作为一位有着极高威望的物理学家，他非常平易近人，并且很关心学生的前程。和他的导师朱利安·施温格（Julian Schwinger）一样，古拉尔尼克也喜欢开快车，还喜欢在喝完一杯啤酒之后闲聊一会儿。他授课技艺精湛，课堂总是座无虚席。

“斯蒂芬，退出物理学界并没有什么……但是，不要退出科学界，”古拉尔尼克一脸关切地说，“你的新兴趣是什么？”

我告诉古拉尔尼克，我想了解生命的量子起源。沉思了片刻后，他说：“我有个想法。我有没有和你说过，我曾经错过了诺贝尔化学奖？”但是，他是理论粒子物理学家，所以我以为他是在开玩笑。原来，他以前的博士生导师沃利·吉尔伯特（Wally Gilbert）曾与沃森合作，共同研究一个分子生物学方面的问题，并希望他加入团队。吉尔伯特离开了粒子物理学界，进入了生物学界，并且希望古拉尔尼克

也跟随他的脚步。“我才不要去呢！”古拉尔尼克说，“然而，谁会想到他会因为在DNA基因测序方面的工作而获得诺贝尔奖呢？我现在就给吉尔伯特打个电话。”

古拉尔尼克拿起电话拨号，电话很快就接通了。“嘿，吉尔伯特，我是古拉尔尼克。我这儿有个学生想见一见你，他正在考虑进入生物物理学领域。上次听到关于你的消息时，你还是哈佛一个项目的负责人。”电话的那端传来了一阵杂音。古拉尔尼克接着说：“好的，我会让他下星期去见你。”

我和吉尔伯特见面后，他慷慨地用3个小时的时间向我讲述了自己作为一位科学家的历程。他非常理解我目前的处境，并在哈佛医学院为我找到了一份有关X射线晶体学的工作。X射线晶体学可以应用于确定病毒的三维原子结构。我收拾好自己的书，离开了布朗大学物理系研究生院。

我已经准备好进入哈佛医学院的“广阔天地”了。布朗大学物理系的研究生总是挤在狭小的空间里，里面充斥着浓咖啡的味道，以及不洗澡的学生身上散发出来的怪味。狭小的窗户、彻夜不眠、大量的习题都是常态。几年之后，当我们听到一则传闻说布朗大学物理系的大楼是由一位监狱建筑师设计的时候，我们一点儿也不惊讶。

当我抱着一个装满书的箱子走出巴拉斯与华立楼（Barus and Holley Building）的122号房间时，我看到有位同学的桌子上放着一本教材，封面上写着“量子场论……”，但自那之后我再没有见过它。那位同学当时不在，所以我偷看了一眼，犹记得前言的开头部分是：“量子场论结合了狭义相对论与量子力学，它指出，所有的物质及其相互作用都是由场的共振构成的。它提供了一个新的视角，认为整个宇宙就是由这些场构成的交响乐团。”

我竟在退出物理学界那一天发现了这样的瑰宝，幸何如之！当我的大脑兴奋地转动时，我几乎能感觉到新的神经连接正在形成。手中

的箱子十分沉重，而我终究还是离开了，但是这幅场景铭刻在了脑海里。我被量子场论深深地吸引了。

所有生命都是量子现象

我在霍格尔实验室（Hogle lab）度过了一个充满挑战的暑假，每天都竭力避免接触致命的化学物质。我的导师是吉姆·霍格尔（Jim Hogle），他运用在威斯康星大学的群论课上学到的对称性原理，发现了动物病毒（脊髓灰质炎病毒）的三维结构（图9-2）。他天资聪颖、成就无数，总是对我提出的推测性理念表示肯定，因此对我的影响尤深。有一天，霍格尔随意又严肃地对我说：“你知道吗，斯蒂芬，我很敬佩那些为生物学做出贡献的物理学家，但物理学家必须尊重生物系统中的复杂性。世界不是由球形母牛构成的。”[(14)]他开了一个小玩笑，讽刺那些试图理解复杂事物的物理学家所做的一切简化。从方程中找出对称性是一种非常重要的方法，但实际上，在纸上画出一头球形母牛比画出现实中的不规则事物要容易得多。毕竟，无论你站在那头球形母牛表面上的什么地方，它看起来都是一样的。

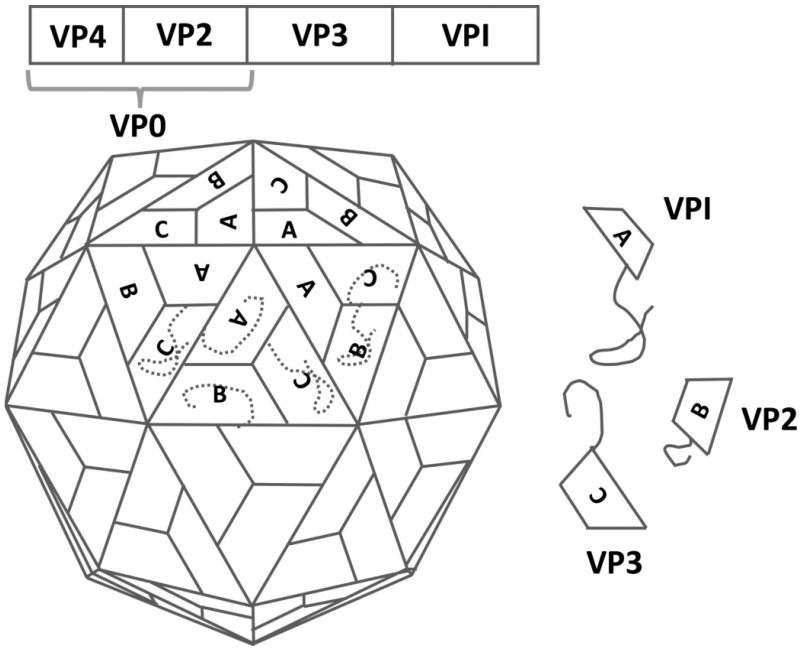


图9-2　脊髓灰质炎病毒的二十面体对称

注：用字母A、B、C标示的亚基是构成三角形衣壳的蛋白质。20个三角形衣壳在12个顶点上相遇，赋予了这个三维二十面体对称性。

在进入生物学领域之前，我以为对称性的力量仅仅体现在物理学上，然而我错了。我了解到，病毒天生便具有不同程度的对称性。与乐高积木一样，单一的蛋白质会自组装为病毒的二十面体结构。布兰登·奥格博努（Brandon Ogbunu）是我的朋友，也是麻省理工学院的生物物理学家。他认为，在生物系统中，小到分子，大到生物体本身，都存在对称性，因为这能最大化其进化的适应性。我们双腿的两侧对称就是一个简单的例子，我们若想在丛林中奔跑和捕猎，两条腿的长度就必须相同。多种对称性赋予病毒多样的功能，例如，提供机械稳定性以及高效地依附在宿主细胞上的能力。更重要的是，病毒是由成千上万个原子构成的，知道它们在三维空间中的精确位置反而增加了确定其结构的难度。它们的结构表明，病毒以及构成它们的分子都是一种量子现象。

对称性看起来似乎是粒子物理学与生命功能之间的关键连接点，然而科学界关于还原主义的争论一直潜藏在我的思维中。我在霍格尔实验室工作时曾读过一篇题为《多即不同》（*More Is Different*）[1]的短文，作者是诺贝尔奖获得者菲尔·安德森（Phil Anderson），他在文中简洁有力地讨论了这场争论，争论的焦点是对称性与基础物理学。粒子物理学家在探索更小的距离与更高的能量时发现了新的对称性，这简化了基本粒子的相互作用。这种对称性的基本框架是由量子场论来描述的。对此，安德森持有不同观点，他认为：“基本粒子物理学家给出的基本法则的性质越多，它们看起来与其他科学领域中的实际问题就越不相关，更不用说社会问题了。”他指出了一个关键点，即在复杂现象发生的尺度上，基本粒子物理学中发现的高度对称性不再起作用：

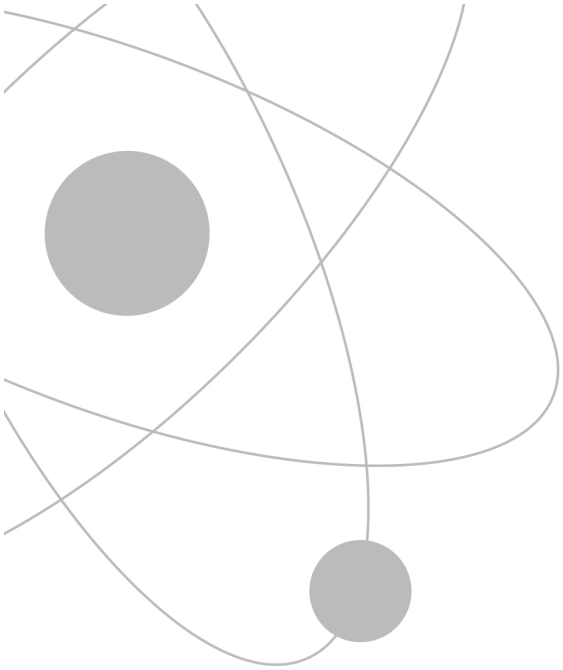
> 事实证明，大而复杂的基本粒子集合的行为并不是少量粒子的性质的简单外延。相反，不同程度的复杂性都会产生全新的性质，而若想理解这些新的性质，就需要开展新的研究，我认为这种研究在本质上与其他研究一样重要。

换言之，像霍格尔发现的病毒这样的生物系统，正是由量子场论所描述的基本粒子构成的。不过，整体并不等于局部的简单相加，比如，固有的对称性会随着原子与分子数量（也即复杂度）的增加而减少。复杂病毒的对称性虽然很小，但并不是不存在。从基本粒子到生命，再到宇宙本身，甚至音乐，这些现象虽然看上去毫不相关，但似乎都存在着对称性与对称性破缺的博弈。

霍格尔明确地告诉我，生物学的发展需要以物理学为基础，因为总有一天，生物学将发展到足以解决诸如量子力学在病毒功能中的作用等问题。“我们还没有走到那一步。”他承认。霍格尔这是在委婉地告诉我，我天生就不是做实验生物化学家的料。事后想来，他是对的，我非常感激他。

古拉尔尼克很高兴看到我回心转意。我回到了布朗大学物理系研究生院，继续充满动力地钻研量子场论成为物理学的基本语言的原因，以及它与对称性和对称性破缺的关系。也许有一天，我将明白生命是如何出现的，这也是布兰登伯格正在研究的课题。他在阿兰·古斯（Alan Guth）的宇宙膨胀理论的基础上继续探索，并发现了量子场论为宇宙中现有的大尺度结构提供“种子”的方式。宇宙中的大尺度结构并不是生命本身，但若离开了行星和恒星，生命也将不复存在。布兰登伯格重新对量子场论产生了兴趣，现在我也一样，不过我是通过生物物理学发现这一兴趣的。作为一位训练有素的物理学家，我一直坚信美与优雅在于对称性，然而生物学告诉我，在破缺的对称性中存在着深刻而美丽的事物。我与布兰登伯格的任务是探索早期宇宙中存在的微小不对称性，后者最终让人类诞生。

这个过程必然存在一定的风险。这有点像在一场爵士乐独奏中，演奏者突然意识到这个时候需要一个刻意为之的错误音符。我的一位爵士乐老师曾经说过：“你要勤于练习，熟练掌握所有的音阶和长音，这样在独奏进行到一半时，如果你要演奏那个错误的音符，你就可以像一位杂技演员一样从容应对。”我决定在我的研究中演奏一些错误的音符，并付诸了行动，在这个过程中我受益良多。



10

我们生活于其中的空间

布莱恩·伊诺是一位声音宇宙学家，当我开始思考他向我展示的宇宙结构时，我还在应用老方法——爱因斯坦的广义相对论来研究这个问题。自丹尼尔·卡普兰先生在办公室里告诉我爱因斯坦关于时空的突破性理论以来，我就踏上了研究它的道路。20年后，我在研究生期间终于掌握了它，并能够运用爱因斯坦场方程来理解宇宙的时空结构。这与我解决研究生课程中枯燥的习题以及考试是大不相同的。现在，我可以即兴使用爱因斯坦场方程，就像我用萨克斯演奏每一个新掌握的音阶一样。我是宇宙学家，我研究的对象是宇宙与时空，以及其中的物质。

空间远比运动在其中的物质更有趣

宇宙空间与把你和书本隔开的空间一样。几个世纪以来，哲学家和天文学家都假定空间是空无一物的，是一种真实物质运动于其中的“惰性介质”。然而，几千年后，睿智的哲学家证明这种观点是错误的。爱因斯坦就是其中之一，他敢于质疑已被广为接受的物理学基本假设，并向我们展示了：空间远比在其中运动的物质更有趣。

爱因斯坦首先质疑的就是引力。伽利略在比萨斜塔上所做的实验证明，两个质量不同的铁球会以相同的加速度下落。爱因斯坦把这个实验延展到了地球之外的太阳系，进而永久地改变了牛顿对引力和运动的描述。爱因斯坦从一个思想实验开始，下面是这个实验的现代版本。

> 假设一个人坐在静置于地球上的太空船中，另一个人坐在太空中的太空船里。地球上的人受到地球的引力，并且感觉不到运动。对太空中的人来说，只要太空船不动，他就会飘浮起来，因为太空中不存在引力。如果太空船加速，那么这个人就会感觉到自身具有重量，因为他会被推到太空船的地板上。爱因斯坦推

断，一个人无法区分自己到底是静止于某个常引力场中，还是在空无一物的空间里做加速运动。他认为，这两种情况在物理学上是等价的，区别只在于运动的相对状态。这个“等价原理”（equivalence principle）正是爱因斯坦广义相对论的关键。

这个简单到甚至带着孩子气的想法，却把数学上最美妙的分支之一——微分几何，带到了引力物理学的前沿。微分几何可以用于描述一个坐标系统。利用坐标系统自身的性质，爱因斯坦概括了自己的理论，从而创建了广义相对论。他认为，时间与空间本身的结构是由物质的结构决定的。他把时间与空间统一为一个单一的坐标实体——时空，并且描述了它在物质和能量存在时是如何弯曲的，以及物质如何在弯曲的时空中运动。物理学界的泰斗约翰·惠勒（John Wheeler）曾说：“物质决定了时空如何弯曲，而弯曲的时空决定了物质如何运动。”

所以，在爱因斯坦太空船的例子中，一个乘客经历了加速度，是因为地球弯曲了空间，从而产生了引力。对另一个乘客而言，太空船助推器产生的能量弯曲了空间，从而使太空船加速。

爱因斯坦的方程可以用来描述整个宇宙的时空

在爱因斯坦进行自己的思想实验时，水星绕太阳公转的轨道还是物理学中的一个未解之谜，它与牛顿的引力理论所预言的轨道是有偏差的。1915年，爱因斯坦提出了弯曲时空理论，并且计算出了水星绕太阳公转的反常运动。水星离太阳太近，所以它的开普勒轨道被太阳的巨大引力效应改变了。爱因斯坦确信，水星的轨道揭示了太阳弯曲其周围时空的方式。1919年，随着爱因斯坦的预言被证实，所有宇宙学家的职业生涯都发生了巨大的变化。爱因斯坦曾预测，在日蚀来临之时，位于太阳后方的某颗恒星将被发现，因为它的光线将沿着太阳

附近的弯曲轨迹传播。他的预测是正确的，然而这只是冰山一角。不可思议的是，在我们的太阳系之外，爱因斯坦的方程还可以用来描述整个宇宙的时空。

广义相对论是一个既美丽又令人敬畏的理论，它极端复杂，难于应用。广义相对论既提供了物体运动的方程，又提供了描述时空中引力场弯曲程度的方程，这让其极难求得精确解。与牛顿以一个方程确定的引力理论不同，广义相对论有10个彼此相关的微分方程，它们必须被同时求解。不过，爱因斯坦和那些试图求解这些方程的同时代的人并未因此而驻足不前。

爱因斯坦的理论对太阳系很适用，并且解释了水星的反常运动，但当把那些理论应用于整个宇宙时，爱因斯坦就感到困惑了。他的理论预言，宇宙必须是膨胀的。然而，当时的观测结果表明，宇宙是静态的。爱因斯坦凭自己一如既往的聪明才智，通过将一个名为“宇宙常数”的常量引入自己的引力场方程来抵消膨胀，从而“修正”了膨胀的问题。

1927年，天文学家埃德温·哈勃向爱因斯坦展示了他的数据。爱因斯坦意识到，引入这个宇宙常数是他“一生中所犯的最大错误”。通过拍摄星系的照片，哈勃得以计算出它们之间的相对速度和距离，这在历史上尚属首次。如果宇宙是静态的，那么无论处于哪个位置的星系，都应该有着相同的速度。出乎所有人——尤其是爱因斯坦意料的是，结果显示，所有星系彼此之间的距离越远，运动速度就越大。爱因斯坦立即意识到，这意味着宇宙在膨胀。

正如结果所示，宇宙膨胀这一事实有利于找到爱因斯坦方程的解，因为它可以把哥白尼在大约1500年提出的应用于太阳系的相同原理——地球不是宇宙的中心，应用到宇宙之中。4位物理学家通过这种

方式，并应用爱因斯坦的理论，各自独立地找到了描述完美对称的膨胀空间的精确解。

为了应用哥白尼理论，我们需要回到过去。既然宇宙在膨胀，那么理论上我们可以把宇宙的钟表往回拨，并且进行压缩。随着宇宙的收缩，恒星、行星和星系中的物质会被压缩到越来越小的空间中。如果我们把钟表回拨到足够早的时候，那么所有这些物质中的原子都会开始发生变化。在我们通常接触的低能尺度上，电子均被束缚在原子核中。然而，在致密状态下，热能会汹涌而出，把电子推离它们的轨道。这意味着，在宇宙大爆炸之后，早期宇宙中充斥着炎热而致密的自由电子、核子与光子。早期的宇宙中还随机分布着大量高能物质和辐射。这是一团沸腾的等离子体，没有任何结构，只是一个“原始火球”——这正是一种“哥白尼宇宙”。这听起来可能很无趣，但它至少是一个能用爱因斯坦方程得出精确解的宇宙。这种对早期宇宙的设想引出了一个最终将由我来解决的问题：“是什么力量把这些早期等离子体转变成了我们抬头就能在夜空中看到的恒星、行星以及星系？”

在某些人看来，一个好的物理理论应该是完美的，我那些致力于寻找“万物至理”的同事更是这么想的。我不相信我们能找到这种完美的理论。大自然就像一位伟大的即兴演奏者，总是会给我们带来惊喜，而我们的理论却无法解释或者预言这些惊喜。此外，一个好的物理理论总是指向自己失效的根源，这正是爱因斯坦面对宇宙膨胀假说时的情形。对于我们观测到的星系中轻元素的比例，以及哈勃定律中退行的星系的比例，这一假说做出了精准的预言，但它本身并不能告诉我们是什么推动了结构的形成。我们的解决方法是：保留理论的正确预言，并回避理论的不当之处。让我们一起去寻找宇宙的“元凶”吧。

“点燃”宇宙的膨胀

也许关于膨胀宇宙最重要的预言来自第一种元素形成时期。高度压缩的炽热电子分散开来，然后逐渐冷却，其运动也变得温和起来。质子正在等着捕获这些电子，而第一个轻元素氢即将诞生。氢元素诞生的条件形成于大爆炸后38万年左右，那时宇宙的温度已经冷却到3 000开尔文[(15)]，大约是5 000摄氏度。在这个温度下，粒子的能级足够低，使得电性相左的质子与电子之间的库仑力可以发挥作用，把它们结合在一起，从而形成氢元素。然而，大部分电子依旧是高能的，这使得氢元素十分不稳定。为了形成稳定的氢元素，电子必须落到可能的最低能级上，这意味着多余的能量必须以光子的形式释放出去，其特征温度大约为3 000开尔文。此时，宇宙真的是在发光。

早在1948年，乔治·伽莫夫（George Gamow）、拉尔夫·阿尔菲（Ralph Alpher）和罗伯特·赫尔曼（Robert Herman）就预言了这一结论。爱因斯坦的方程可以精确地描述数十亿年前的宇宙的情况，这的确令人敬畏，也鼓舞人心。然而，更鼓舞人心的是，我们可以通过寻找早期宇宙发光的遗留物，来证明这个时期存在的证据。这个寻找过程将是对大爆炸范式，以及充斥着等离子体的早期宇宙是否如所有人认为的那样是均匀的这一预言（哥白尼学说）的一次重大检验。

多年来，宇宙学家一直在寻找人们期望发现的弥漫在所有空间中的残留辐射。随着宇宙的膨胀，那个时代的光波的波长将会延长1 000倍。这将致使宇宙中弥漫着微波波段的光子，就像微波炉一样。1967年，在美国新泽西州的贝尔实验室，工程师阿尔诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊“阴错阳差”地发现了宇宙微波背景辐射，两人因此获得了诺贝尔物理学奖。在用天文望远镜检测离散的电磁波信号时，彭齐亚斯和威尔逊发现了一种持续的干扰源。为了消除它，他们将天文望远镜与一系列干扰信号隔离开来，这些干扰信号包括其他无线电波、来自机器本身的热量，甚至在绝望中，他们还动手清扫了设备表面的鸽粪。即便这样，他们也没能消除掉一种特殊的背景噪声，它几乎均匀地来自各个方向。最终他们推断，这种背景噪声来源于他们的机器

之外，来源于地球之外。对于普林斯顿大学的宇宙学家罗伯特·迪基（Robert Dickie）、吉姆·皮布尔斯（Jim Peebles）和大卫·威尔金森（David Wilkinson）来说，这正是他们一直在寻找的特殊事物，而彭齐亚斯和威尔逊恰好碰上了。普林斯顿大学的研究小组研制了迪基辐射探测仪来寻找这种背景辐射。更重要的是，他们已经具备了估测它的能力。

宇宙微波背景辐射环绕着我们，它无处不在，是第一个稳定原子形成的印记。随机的宇宙微波背景辐射光子有力地证实了宇宙学原理和宇宙膨胀范式。然而，早期宇宙的遗迹中隐藏着一个重要的问题。这个问题的发现将打开潘多拉的魔盒，并揭示出爱因斯坦宇宙膨胀理论存在的缺陷。

标准的宇宙大爆炸模型预言，宇宙微波背景辐射中的粒子具有相同的温度。然而，如果气体中的每个粒子温度相近，那么，它们必须时时相互作用，才能保证这种稳定性与热力学的平衡。因此，它们在过去一定有着某种联系。想象一下来自两个相对方向的宇宙微波背景辐射。电磁辐射（无论是可见光、无线电波，还是微波）以光速运动，这是物理学允许的最大速度。

我们可以回溯宇宙膨胀，倒回到大爆炸发生后38万年的时刻，来看看那些以光速运动的辐射。我们追踪着来自一个方向的辐射到达宇宙中的一个特定区域，并追踪着来自反方向的辐射到达另一个区域。这包含了两个区域的辐射到达我们的时间，然而，这两个区域若想实现相交则需要更长的时间，因为它们与我们的方向是相对的（图10-1）。假定我们根据遥远星系之间的退行速度，测量出了宇宙的膨胀速率，那么就会出现一个令人困惑的结论：相比整个宇宙的寿命，这两个区域中的宇宙微波背景辐射相遇所需的时间要更长！这就是所谓的“视界问题”（Horizon Problem）。大爆炸模型的巨大成功，以及宇宙微波背景辐射的热力学平衡预言，恰恰让它们失效了。

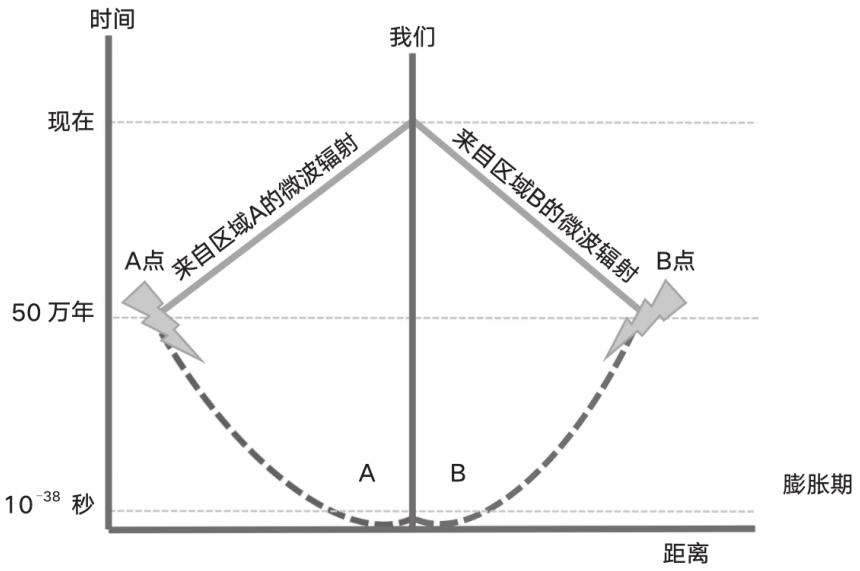


图10-1　未发生相互作用的区域A和区域B

注：区域A与区域B表示尚未发生相互作用的等温微波辐射。大爆炸模型缺乏一种使这些区域达到热力学平衡的因果方法，除非达到这种平衡所需的时间比宇宙的寿命还要长。

在宇宙微波背景辐射被发现后不久，年轻的研究生布鲁斯·帕特里奇（Bruce Partridge）及其导师威尔金森建造了一个探测器，以探测大爆炸之后38万年的辐射，看看其是否如哥白尼均匀理论所暗示的那样毫无特征可循。他们希望能找到被称为宇宙微波背景辐射各向异性的不规则性，以了解诸如星系团和星系等不规则结构的由来。

帕特里奇与威尔金森的想法是，如果在原始火球中存在一些微小的涨落，那么它们就会随着宇宙的膨胀变为大密度的涨落——这种变化会带来引力不稳定性，从而导致物质在引力的作用下开始坍缩，最终形成结构。这是一个优美的理论：各向异性是大尺度结构形成的基础。如果找到这种各向异性，我们就能更好地理解宇宙是如何从哥白尼式的开端，演化为现在这个截然不同的宇宙的。不幸的是，帕特里奇与威尔金森的探测器没有找到任何各向异性（图10-2）。不过，探索仍在继续。

VOLUME 18, NUMBER 14 PHYSICAL REVIEW LETTERS 3 APRIL 1967

ISOTROPY AND HOMOGENEITY OF THE UNIVERSE FROM MEASUREMENTS OF THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND*

R. B. Partridge and David T. Wilkinson†
Palmer Physical Laboratory, Princeton, New Jersey
(Received 2 March 1967)

A Dicke radiometer (3.2-cm wavelength) was used to make daily scans near the celestial equator to look for possible anisotropy in the cosmic blackbody radiation. After about one year of intermittent operation we find no 24-h asymmetry with an amplitude greater than ±0.1% (of 3°K). There is, however, a possibly significant 12-h anisotropy with an amplitude of about 0.2%.

图10-2 帕特里奇和威尔金森的论文摘要

注：帕特里奇与威尔金森发表在《物理学评论快报》（*Physical Review Letters*，1967年4月3日）上的论文摘要，阐述了探测宇宙微波背景辐射固有各向异性的初次尝试。

多年之后，我也研究了这些问题。那时，帕特里奇（学生通常称呼他为布鲁斯）就职于美国宾夕法尼亚州的哈维福德学院（Haverford College）。他彬彬有礼，广受尊重，在学生中以清楚、正统、极有条理的授课方式而闻名。他非常平易近人，这使他能与那些胆小、怯弱的学生打成一片——我就是其中一员。与我一样，在成为宇宙学家之前，威尔金森也是一个萨克斯乐手，但最终是帕特里奇在我的大学生涯中影响了我。在我大二时，帕特里奇邀请他在麻省理工学院的同事阿兰·古斯来到哈维福德学院，给我们班做一次演讲。在我生命中的那段时间里，物理学渐渐吸引了我，但那时的我有点目中无人。我佩戴着非洲勋章，穿着绘有马尔科姆·X的T恤，还把头发扎成发辫，上课时总是坐在教室的最后一排，但从来不听课，而是戴着耳机听乐队“公共敌人”（Public Enemy）的黑人说唱歌曲。那是1990年，美国国家航空航天局的一颗人造卫星正在做一项实验，旨在寻找宇宙微波背景辐射中的各向异性，而这正是帕特里奇与威尔金森在1967年首次试图寻找的。

古斯是宇宙暴胀理论的提出者，他还提出了视界问题以及各向异性问题的解。古斯指出，如果宇宙在诞生之初经历了指数级增长，那

么辐射传播的距离应该随着这种加速而暴增。这可以解释那些看起来不可能互相交流的区域之间的因果联系，它们之前被认为需要用比宇宙的年龄还长的时间来交流（图10-3）。宇宙暴胀理论是一个建立在宇宙微波背景辐射观测上的宏大理论。进一步说，因为古斯的暴胀理论具有量子力学的性质，所以他能对假设的宇宙微波背景辐射各向异性的性质与起源做出预测。罗伯特·布兰登伯格热衷于探索早期宇宙的量子力学性质，而我那时还不知道暴胀理论将成为我未来工作的重点。

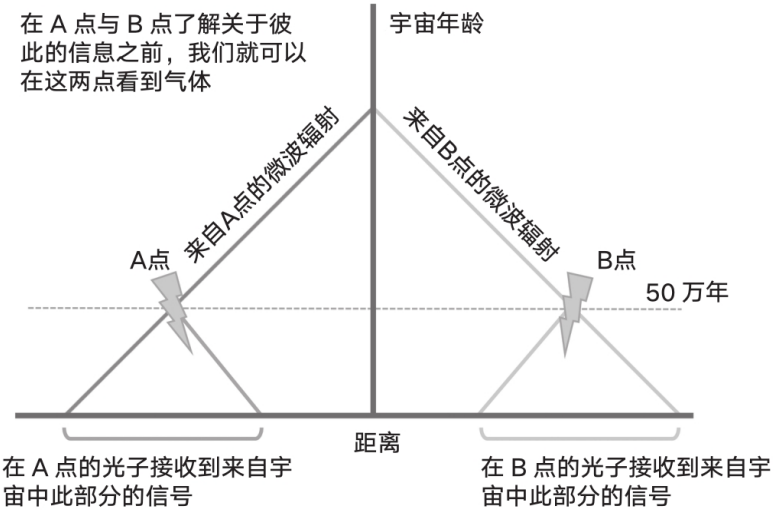


图10-3　A点与B点辐射的区域之间的因果联系

注：A点与B点辐射形成的等边形区域，来自标准的大爆炸模型中无法相互作用的区域。在一段时间呈指数级增长，或者说暴胀之后，早期宇宙提供了解释宇宙微波背景辐射均匀性所需的因果联系。

也许我太沉迷于音乐本身了，那时我并没有意识到古斯访问哈维福德学院的重要性。我知道他很厉害，所以我决定稍微收敛我的叛逆行为。毕竟，这是自卡普兰之后，我第一次从他人口中听到爱因斯坦的广义相对论。这超出了我作为大二学生所学习的数学和物理学的知识范围。这是宇宙学。古斯描述了宇宙作为一个整体是如何演化以及展开的，这都体现了爱因斯坦在数学上的才华。宇宙微波背景辐射意

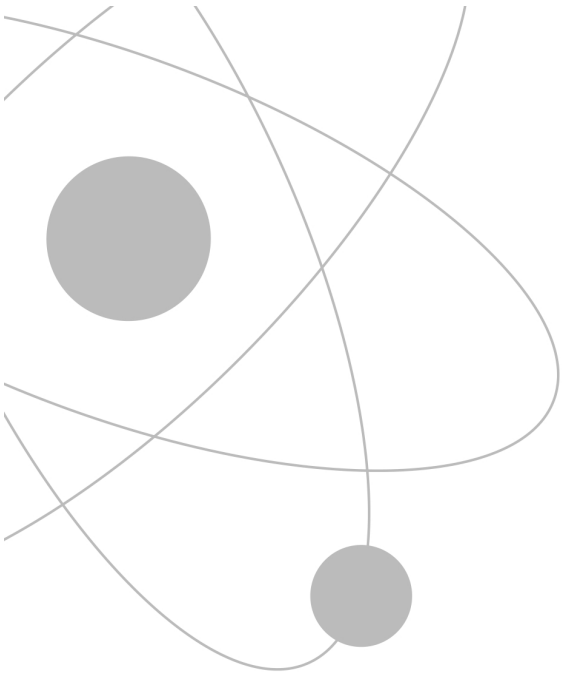
义重大，结构形成的理论与之同等重要，而现在到了暴胀理论。这些知识非常难以消化。

古斯，这位来自宾夕法尼亚大学与普林斯顿大学的著名宇宙学家来到我们教室。听古斯关于暴胀理论的演讲，学生们都过于紧张，不敢提问。在演讲结束之后，帕特里奇说：“我们先把提问的机会让给学生。”我颤抖着想举起手，却又本能地克制住了。“斯蒂芬，我看到了你想提问。”帕特里奇马上说道。他太了解我了。我感觉自己的心正随着扑面而来的幼稚感和愚蠢感而不断下沉。我不假思索便脱口而出：“暴胀会做功吗？”在帕特里奇的入门课程中，我们了解到，当力使物体移动一段距离时，它就会做功。既然暴胀会让宇宙膨胀，那么是什么力促使宇宙发生暴胀呢？在不做功的前提下，宇宙膨胀有可能实现吗？物理学中最美妙的时刻，莫过于那些我们认为不可改变的“原则”被打破之时。我想知道这个问题的答案。古斯回答道：“这个问题问得好……暴胀会做功，以‘点燃’宇宙的膨胀。我们称其中间介质为‘暴胀场’（inflaton field）。”帕特里奇并不知道，他的鼓励以及古斯对我问题的严肃回答对我产生了多么大的积极影响。即使到今天，我仍希望我的学生提出一些“愚蠢的问题”，因为这些问题往往很难回答。

最终，在帕特里奇与威尔金森首次寻找宇宙微波背景辐射各向异性的30年后，宇宙背景探测者（COBE）卫星直接探测到了它。在对宇宙微波背景辐射进行了4年太空探索之后，星载宇宙背景探测者（差别微波辐射探测器）探测到了微弱的变化。在寻找了有关人类起源的线索多年之后，宇宙学家终于进入了精确科学的黄金时期。这项发现让暴胀变得更为重要：如果没有它，那些无懈可击的缺陷就会加剧视界问题，因为这意味着我们需要用某种膨胀来解释近乎完美的热力学辐射，以及辐射模式中的微小涨落。暴胀也可以提供一种答案，但它的作用不止于此。

每一项发现似乎都会揭示出更深层次的问题。宇宙微波背景辐射海以及其中的各向异性已经得到确认。一直以来，天文学家孜孜不倦、一丝不苟地绘制着我们宇宙中的最大结构。哈勃望远镜成为地球观察宇宙的“眼睛”，它拍摄了地球周围的壮丽而多变的景象，比如星云和碰撞的星系。技术的进步让我们得以从多个视角看问题。那些对无线电信号、微波信号、红外线和伽马射线敏感的望远镜既可以独立成像，也可以协同成像。放大到最大的可观测距离上，这些望远镜为可观测的宇宙提供了一幅图景，并且给人们带来了一个惊喜。玛格丽特·盖勒和约翰·修茨若的大尺度结构图景显示，星系团中的星系聚集起来，形成墙状或条纹状。事实证明，宇宙中最大的结构呈均匀、各向同性分布，这就是“宇宙学原理”。利用不断发展的技术和自身的聪明才智，并经过多年的科学研究，我们终于发现宇宙中存在着很多层级的结构。

虽然宇宙结构层级现象的起源依旧是个谜，但在理解早期宇宙中的量子涨落如何在原本均匀的原始火球中制造分布的不对称性，以及它是如何被时空的暴胀式扩张所放大的方面，暴胀迈出了极为重要的一步。随后的观测旨在发掘出早期宇宙中各向异性的和谐，而它是不可能在缺乏宇宙视界的情况下产生的。为了更好地理解视界，我们现在转到声音上来。



11

会发声的黑洞

黑洞是物理学中已知的密度最大、最神秘的天体，潜伏在宇宙之网上每一个活跃的星系中。它是广义相对论中第一个可以精确求解的系统，最初只是作为一种理论构想而被提出。然而，黑洞被某种视界遮盖，这种视界与宇宙学中的宇宙视界相似。以黑洞为例，通过探索视界之外的“宇宙之声”，我们将在研究音乐与宇宙结构之间的联系中获得更深层次的直觉。

黑洞，已知最神秘的天体

与牛顿的一个方程相比，处理爱因斯坦的10个相关微分方程要困难得多。我们假设一系列重物通过弹簧连在一起，且这些重物都处于运动中。牛顿的微分方程可以应用于一个单独的重物，然而由于重物之间是相连的，所以一个重物的运动会影响与之相邻的重物的运动，进而影响它们的运动方程。我们需要一系列相关的方程来确定它们的最终运动。若想求解一个方程，就必须把所有的方程求解出来。与之类似的是伊辛模型中的磁性，相邻原子的自旋相互影响，最终影响了整个系统的相互作用。在爱因斯坦的微分方程中，质量不仅与质量相关，而且还与空间相关，因此，求解就更困难了。

为了真正理解爱因斯坦的10个相关微分方程背后的魔力，我们首先考虑它的一个特解。不过，鉴于它们的复杂性，很难想象出一个能满足它们的物理时空结构。我们不能再像处理牛顿方程一样，通过研究图像来猜测函数的形式了。即便在今天，在最先进的计算机的帮助下，我们仍然无法找到有趣的天体物理系统引力场的特解。在爱因斯坦发展了自己的理论之后，物理学家对他的新时空概念充满了好奇，并且渴望找到它的解。至于那些新手，他们使用了保罗·狄拉克的值得信赖的方法——利用对称性的力量。

数学对称性的伟大之处在于，它可以降低方程组的复杂性。我们假设存在两个独立的方程，分别描述了粒子X与粒子Y的振动。“对称

性”情况的一个例子是，X的行为与Y的行为完全一致。这样，两个微分方程就可以减少到一个，而一旦描述X或Y的解被找到了，另一个解自然也就找到了。

有时候，大自然中确实会出现偶然的高对称性情况，而物理学家乐于找到这些解。就爱因斯坦的微分方程来说，球对称性是一个很好的切入点。球体可以作为恒星（比如太阳）结构的模型。鉴于球体的几何结构，引力能被简化为以场源为中心的径向均匀场。这个想法是如此简单而自然，因此，在爱因斯坦发展了他的理论几个月之后，德国物理学家、天文学家卡尔·史瓦西（Karl Schwarzschild）就找到了那些方程的一个球对称解。不过，问题仍然存在。随着半径不断缩小，直到某个确定的数值（现在我们称之为“史瓦西半径”），这些方程揭示了某种奇点的存在——在数学上，就是那种你用零去除某个数时得到的值。物理学家不喜欢奇点，因为它们通常意味着具有无穷大的能量或者力的区域。实际上，就大多数奇点来说，当它们出现时，就表明我们的理论出了问题。然而，这个奇点指向的是某些全新的、令人敬畏的事物，其与我们的“球形朋友”——恒星有关。

当大量的星际尘埃云聚集、压缩，并开始发光时，一颗恒星就诞生了。在诞生后的几十亿年里，恒星会慢慢变老，最终走向死亡。不过，它们的“来生”非常有趣。在燃烧了一生之后，恒星耗尽了自身的燃料，接着冷却下来，由于缺乏向外的辐射压，它们最终会在内部引力的作用下坍缩。1931年，诺贝尔奖得主、印度物理学家苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡（Subrahmanyan Chandrasekhar）表示，当走向死亡的恒星坍缩到一个很小的体积内时，它就会形成一种被称为白矮星（White Dwarf）的有趣事物。白矮星是原来恒星的残留物，依靠自身电子的简并压力来抵抗引力的作用。在未来的某一天，我们的太阳会变成一颗白矮星，收缩到与地球差不多大小。1939年，罗伯特·奥本海默（Robert Oppenheimer）与乔治·弗尔科夫（George Volkoff）在理查德·托尔曼（Richard Tolman）工作的基础上，向我们展示了

质量比太阳更大的恒星，即便只比太阳大1.5倍，它们的引力也会非常大，电子的简并压力也无法抵抗引力的作用。这种恒星的残骸会进一步坍缩，最终需要中子来扛起抵抗引力的重任。结果会发生什么呢？中子星由此诞生。对于质量比太阳大3倍，甚至更多的恒星而言，中子也无法抵抗引力了。中子将会坍缩，而我们的理论将在我们理解的边缘摇摇欲坠。接下来，就是黑洞了。

黑洞是一种广义相对论史瓦西解的理论实体，并随着对恒星演化的理解成为一种物理可能性。1958年（大约在同一年，利昂·库珀找到了超导的解），我心中的物理学英雄戴维·芬克尔斯坦（David Finkelstein）发现了一些重要的东西，让黑洞的故事变得更加有趣了。

芬克尔斯坦是一个安静而睿智的人，全身散发着天才的光辉，仿佛整个宇宙都存在于他的脑海之中。他所取得的成就影响深远，连有关量子引力的两大竞争理论的先驱——李·斯莫林与伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind），都视他为导师。实际上，我也非常崇拜芬克尔斯坦。2014年，我在达特茅斯学院召开了一场讨论会，以缅怀他一生所取得的成就。

芬克尔斯坦想要了解的是，一束光是如何在黑洞周围的弯曲时空中运动的。毕竟，正是来自遥远恒星的光在太阳附近的弯曲确证了爱因斯坦的观点，即引力实际上是大质量物体周围时空的弯曲。然而，芬克尔斯坦发现，光在黑洞附近的运动更为离奇。通过对支配时空的方程进行巧妙的变形，芬克尔斯坦发现，一个气泡状的球体区域环绕着奇点，任何进入该区域的事物（包括光本身）都无法逃逸。这就是约翰·惠勒引入“黑洞”一词来描述这种物体的原因。如果光无法从围绕着奇点的史瓦西区域中逃逸出来，人们就不可能看到它。任何进入这个区域的事物都会消失在黑暗之中。芬克尔斯坦发现的是一个单向的、不可见的球体表面，他称之为“视界”。视界之后的景象是不

可见的，它与我们看到的宇宙过去的视界并非完全不同，这让我们对它的研究变得更加有趣。

研究黑洞前，我们要知道声音如何在水中运动

当芬克尔斯坦做出他的推断之时，黑洞还只是一个存在于科幻小说中的事物，属于推测，但它也是一个亟待探索的领域。当包括斯莫林在内的物理学家猜测黑洞在其奇点中孕育了婴儿宇宙时，我们也知道了，黑洞可以通过吞噬物质来增加质量，并且根据量子效应，它们还可以在事件视界附近辐射出粒子。对黑洞物理学的研究因芬克尔斯坦的工作变得更加坚实。事件视界虽然不可触摸，但它是确实存在的数学元素，或许还能解释宇宙的结构和古代宇宙的视界。为了更好地理解其机制，我们需要研究声音，尤其是声音在水中传播的规律。

加拿大理论物理学家比尔·昂鲁（Bill Unruh，图11-1）发现了这种关于声音的绝妙类比，而声音揭示了黑洞物理学的很多知识。在加拿大乃至全世界，昂鲁都是极受尊敬的理论物理学家。为了完成博士论文，我在他的母校温哥华英属哥伦比亚大学待了半年。昂鲁身材高大，满脸胡须，总是穿着背带裤。他经常会惊吓到其他物理学家，并且对任何可能出现的错误都极为敏感，但他对我非常宽容，即便我说了些蠢话。有一天，在英属哥伦比亚大学，他在我组织的第一场研讨会上发现了一个问题，并提出了修改意见。这是我第一次见识到他在寻找物理学概念类比上的天分。一年后，他的建议得到了完美的应用。

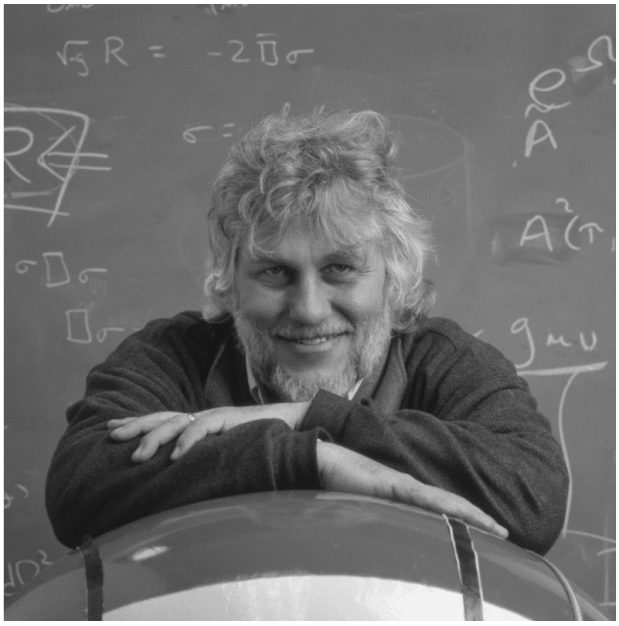


图11-1　加拿大理论物理学家昂鲁

注：图片提供者为昂鲁本人。

应用有关波的力学基础，我们可以计算出水中声波的速度。方程如下：

$$c^2 = \frac{K}{\rho}$$

这个方程把声波的波速c、介质的刚度K和介质的密度ρ联系在了一起。它表明，波速会随着介质刚度的增大而增大，并随着介质密度的增大而减小。声波在密度较大的气体中运动得较慢，比如在氧气中就比在氦气中运动得更慢；而在刚度更大的介质中运动得更快，比如固体。由于固体的密度比气体大，所以人们可能会认为声波在固体中运动得更慢，但是实际上固体的刚度比气体大得多，因而声波的速度变得更快。

为了理解黑洞的事件视界，昂鲁想象了一条顺流而下的鱼，而它的朋友另一条鱼则逆流而上（图11-2）。在某一时刻，顺流而下的鱼

跳进了一条瀑布。瀑布中水流的速度远远超过了顺流而下的水流的速度，因为引力使它们加速了。在向下冲的过程中，这条鱼大喊：“嗨，我在往下掉！”然而声波是一种波，正如前面的方程所示，它在均匀的介质中以确定的速度运动。如果瀑布的速度比顺流而下的鱼发出的声波的速度快，那么声波永远不可能到达瀑布的另一端，并让另一条鱼听到。这是一场艰苦卓绝的抗争，它最终失败了。对顺着瀑布下落的鱼而言，它们可以听到这声音，但对另一端的鱼来说，则是一片静默。瀑布的边缘正是声音视界。对逆流而上的鱼而言，顺流而下的鱼只是消失了而已。如果看不到、听不到，对鱼来说就意味着感知不到。当然，如果它大声呼唤自己失散的朋友，那么声波将会顺流而下，并在水流的帮助下越过瀑布的边缘。这就是光在黑洞的事件视界附近的行为。光可以很容易地进入黑洞，但永远不可能出来。

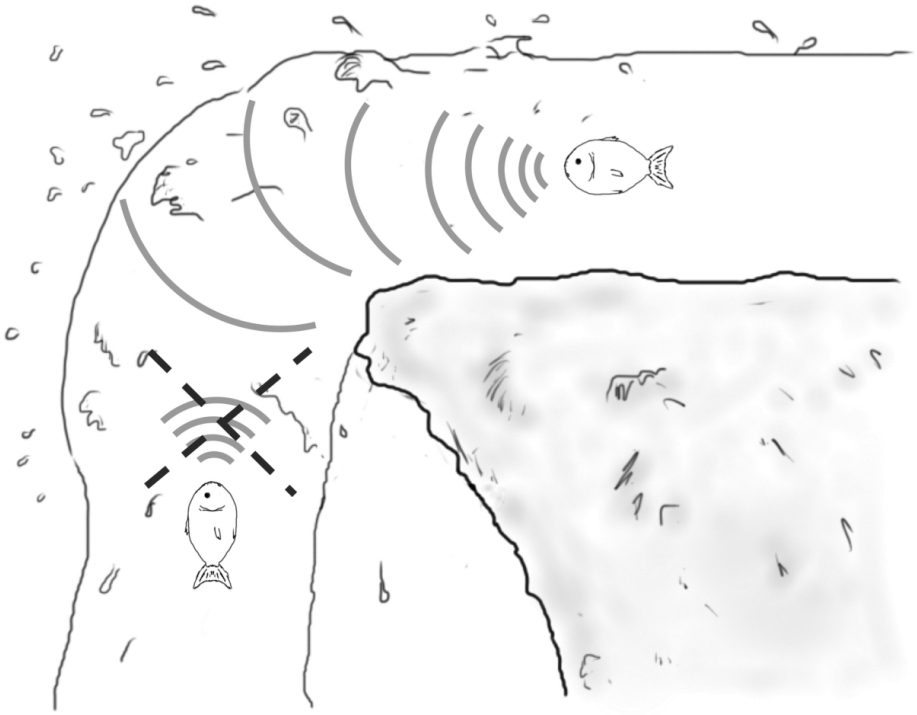


图11-2　顺流而下的鱼和逆流而上的鱼

注：我们可以通过瀑布来理解声音视界。顺流而下的鱼发出的声音用弧线来表示，由于声波的波速比瀑布水流的速度小，所以它不可能抵达瀑布另一端，让逆流而上的鱼听到。

广义相对论中的黑洞解具有一种少数物理学家提出过的预测性力量，即黑洞的事件视界的实在性。根据黑洞的解，如果一条鱼掉进了事件视界，那么无论它如何努力试图与黑洞之外的朋友联系，它的信息永远不可能逃逸到事件视界的另一端。更可悲的是，一旦一条鱼掉进了黑洞的事件视界，它就永远不可能再出来了，就算是大马哈鱼也游不出来。

听，黑洞正在“演奏”

黑洞不仅具有声音的性质，最近科学家发现，有一些黑洞还会发出让人上瘾的兴奋的声音。图11-3展示了英仙座星系团的某个星系中心的黑洞产生的声波。黑洞声波的音符相当于比钢琴上的中C调低50个八度的降B调。

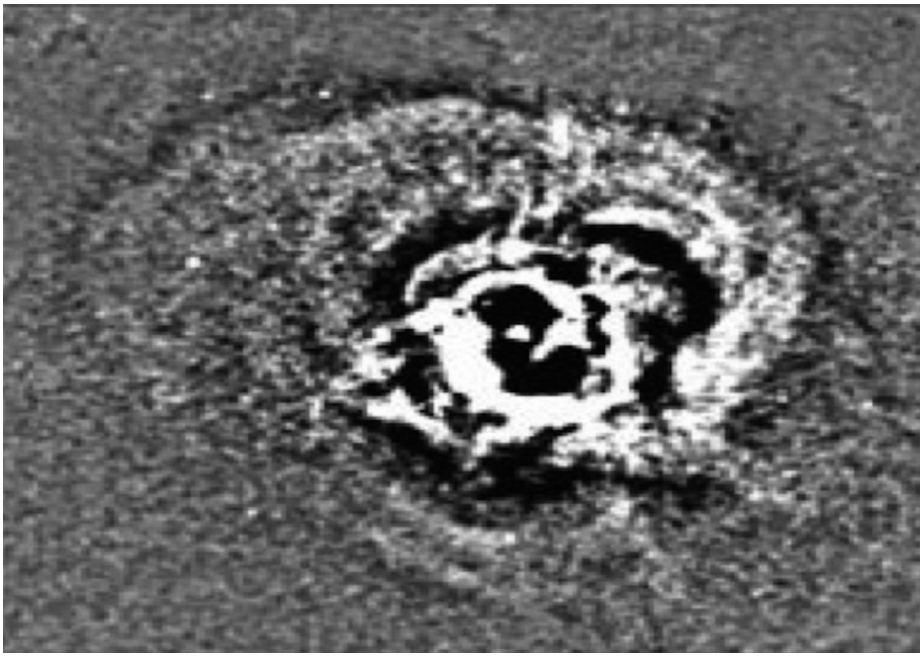
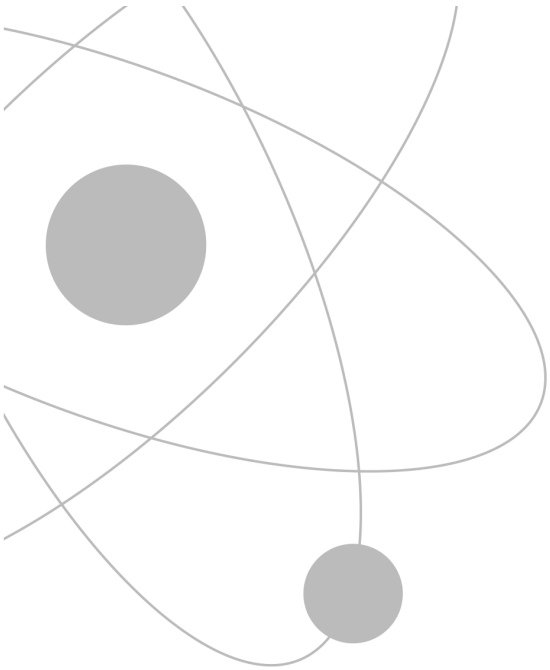


图11-3　英仙座星系团中的黑洞

注：白色与黑色区域表示英仙座星系团中的黑洞“演奏”出的声音[1]。

视界的存在是爱因斯坦相对论的一般特征，我们对宇宙时空结构的研究深受其影响。对黑洞以及宇宙视界而言也是如此。不过，宇宙视界与事件视界又略有不同。与黑洞不同，宇宙视界是一个双向通道，光与物质可以从两条通道自由出入，这是由宇宙的膨胀和时间的流逝这两个因素的共同作用决定的。

由于涉及巨大的引力，所以黑洞的事件视界是十分独特的，它帮助我们理解了视界为何像某种边界。正是因为这种边界（宇宙视界）的存在，在宇宙微波背景辐射发出的那一刻，在第一个稳定原子形成的那一刻，共振才在宇宙微波背景辐射各向异性中产生了。与吉他中的琴桥为琴弦发生共振进而产生音符提供了必要的边界一样，正是因为宇宙视界的存在，宇宙中物质的扰动才会形成离散的音符。那么，是什么引起了这些由宇宙视界指板确定的振动呢？这就是量子力学的用武之地了。



12

声音与静默，
宇宙结构的和谐旋律

为了研究宇宙结构与音乐之间的联系，我于2011年在普林斯顿大学休了一年的假，以便与戴维·斯伯格（David Spergel）一起工作。他是威尔金森微波各向异性探测器科学团队的首席科学家，该探测器是一架太空望远镜，对宇宙微波背景辐射各向异性做出了一些精确的测量。我办公室楼下就是吉姆·皮布尔斯的办公室，他是最早一批试图确证我的期望的物理学家之一，即观测宇宙微波背景辐射的正确方式不是通过各向异性的透镜组，而是通过声音振动。

一切都要归功于声音振动

对于毕达哥拉斯与开普勒对音乐宇宙的直觉，皮布尔斯和他的研究生于哲（Jer Yu）是第一批尝试验证的人。他们发现，早期宇宙产生的声波的波长跨度达30万光年，这正是第一个稳定原子形成、宇宙微波背景辐射发出时的宇宙尺寸。这些声波对宇宙大尺度结构的最终形成做出了贡献。1970年，皮布尔斯和于哲发表了一篇开创性的论文，题为《膨胀宇宙中的原始绝热微扰》（*Primeval Adiabatic Perturbation in an Expanding Universe*）。在论文的开头，他们总结道：“原始火球中可能存在的辐射，或许能导向一个描述星系起源的理论。”[1]

等离子体由紧密结对的电子、光子与质子构成，它们像方块舞舞者一样完美地同步，如果不加扰动，它们会像平静的海面一般保持静止。然而，量子不确定性会引起原始量子扰动，从而使等离子体发生振动，在振动过程中，高密度的区域会向低密度的区域传递能量，声波因此得以传播。

一个革命性的观点是，为了在早期宇宙中形成大尺度结构，宇宙中必须包含一些不规则性，大概在1/10 000的数量级上。也就是说，如果平均温度是10摄氏度，那么不规则性就会偏离平均值1/1 000度。

1992年，通过在宇宙背景探测者卫星上开展的实验，科学家终于发现了那些搜寻已久的各向异性。

宇宙微波背景辐射图（图12-1）中的黑、白、灰点表示在平均、均匀能量值（或者温度）附近的涨落。它们是早期宇宙中的声波和音乐，也是结构形成的第一阶段。一方面，光波是由加速的带电粒子产生的，它们的传播不需要任何介质。另一方面，如果没有时空介质的推动和刺激，声波就不可能存在，因为它们无法在真空中传播。声波是力学的波，是介质的振动，可以把话语、音乐和噪声送到我们耳中，而无论它们到达与否。当存在一个初始扰动（如敲鼓）时，振动就会引起相邻粒子来回振动。接着，这些粒子的振动引起它们的邻居依次振动，一系列密集区域与稀疏区域由此形成，这就是波在介质中的传播过程。当空气中的振动到达我们耳中时，我们的大脑会把它们解码为声音。

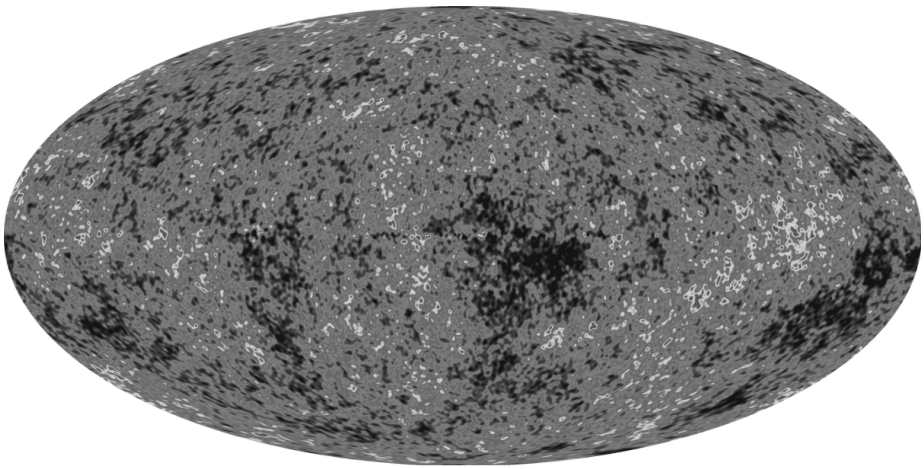


图12-1　137亿年前宇宙的一张快照

注：这张照片揭示了电子与质子结合（重组）那一刻发出的光。图片提供者：威尔金森微波各向异性探测器科学团队。

虽然不同的涨落看起来并不存在有趣的特征，但通过傅立叶理念，我们可以把宇宙微波背景辐射图像分解为纯粹波。值得注意的是，我们可以从图12-2中的曲线中看到声波的特征。*X*轴表示宇宙微波

背景辐射声波的频率，*l*轴表示声波的强度，那些峰值表示共振频率，其在宇宙结构的形成中起着决定性的作用。乐器可以发出声音，通过与乐器的功能进行类比，我们可以理解宇宙微波背景辐射中的许多物理原理。

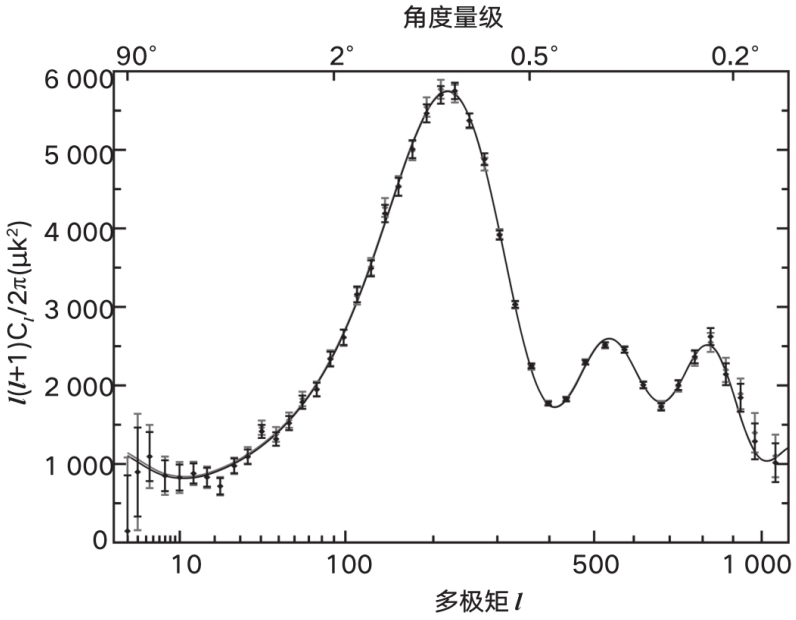


图12-2　宇宙微波背景辐射各向异性的傅立叶变换

注：此图揭示了声波以及宇宙微波背景辐射振动中的共振频率。图片提供者：威尔金森微波各向异性探测器科学团队。

具体而言，我们可以先来看看乐器是如何产生声音的。例如，当我们对着萨克斯的送气口吹奏时，由空气分子携带的压力波会进入乐器之中。簧片会在很大的频率范围内振动，并产生声源。因此，我们需要一些初始能量来制造空气中的压力差。小号可以产生很多种声波。对吉他来说，它能产生的最低频率（基频）是弦的两个端点之间所能产生的最长的波型。还有一种描述基频的方法，即把它的一个完整的波长周期延长到吉他弦长度的两倍，这样我们就得到了乐器长度L与波长λ之间的有用关系：

$$\lambda=2L$$

另一个有用的公式可以把波速v与周期T联系起来，T是波运行一个完整的周期所需的时间。应用牛顿思维，我们可以很快得出下面这个公式。我们知道，距离等于速度与时间的简单乘积，因此，我们得到了以下这个强有力的关系：

$$\lambda = vT$$

在知道波的传播速度和它的振动周期的前提下，这个方程轻而易举地确定了基音的波长。用一个整数去乘以基本波长，我们就可以得到高次谐波（或者泛音），后者在乐器的音色的特定性质中扮演着相当重要的角色（图12-3）。

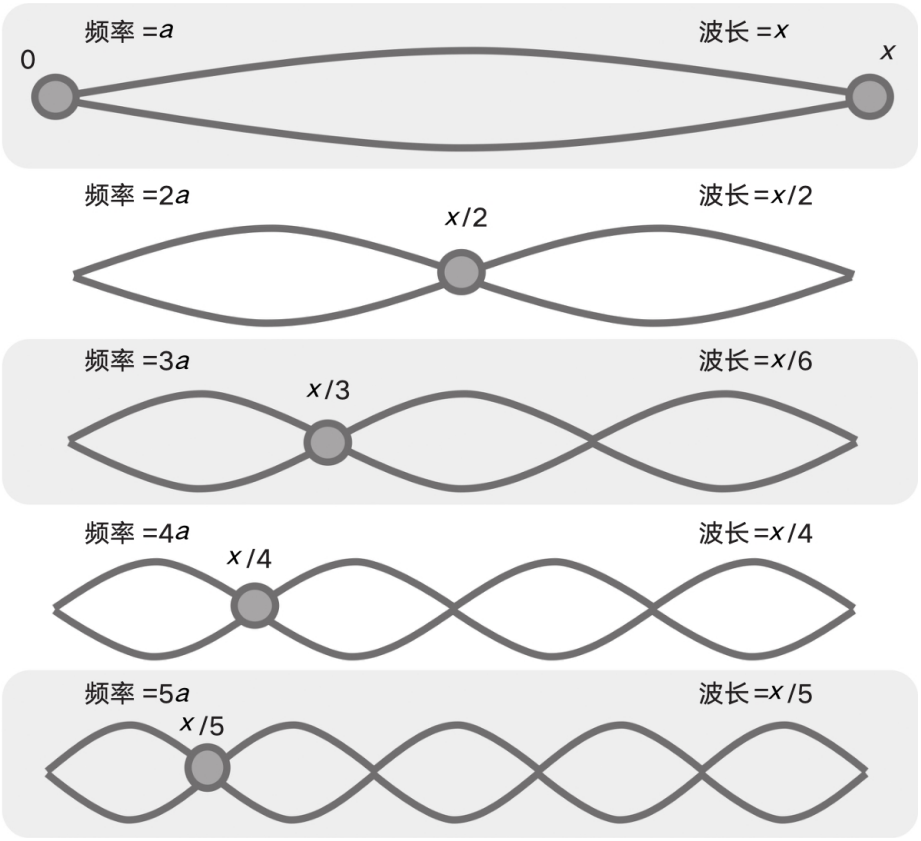


图12-3　两端固定的弦上的驻波

注：第n个谐波表示长度为弦长$2/n$的波长，约定长度$2L=x$。

我们以长笛和竖笛这两种乐器为例，来讨论音色这个非常重要的概念。这两种乐器可以演奏同一个音符，然而特征各有不同，所以你可以区分它们。这种独一无二的特征就称为音色。当一种乐器演奏一个音符的时候，它产生的并不是一个单一的频率。我们在前面讲到，一根弦可以被看成系有一系列重物的弹簧，固有频率由无穷多的弦决定。当弦被拨动的时候，它会在基频之上以大范围的共振频率振动。特定的高次谐波的振幅会受到阻尼，具体取决于弦的材质。弦最终会停下来，因为某些固有频率会由于摩擦而损失能量，从而失去振幅。余下的东西形成了高频谐波不同振幅的特定特征，从而产生了特定的声音（图12-4）。

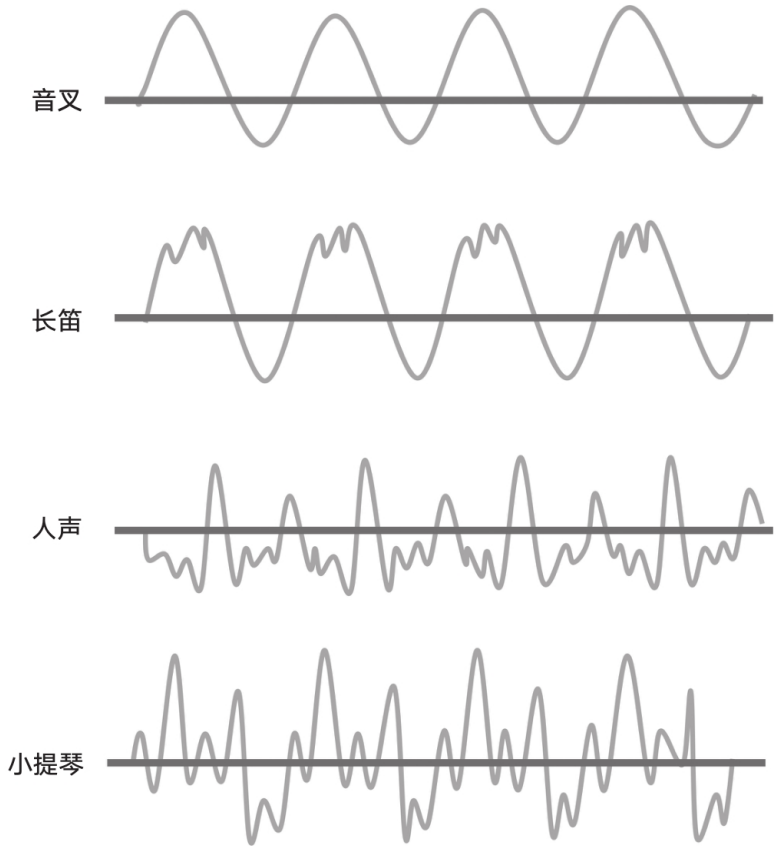


图12-4　高次谐波的特定特征形成的不同声音

注：根据高次谐波的特征阻尼所产生的特征，不同乐器具有不同的物理性质。

音色是一个特定物体通过空气传递的特征振动能量。想象一个物体通过弹簧把它的特征运动传递给相邻物体。与弹簧不会永远振动下去一样，由于摩擦力或者热损耗导致的阻尼效应，乐器与空气的耦合效率是很差的，而且取决于频率。钢琴上较高的频率比较低的频率更能有效地与空气耦合。由傅立叶理念可知，一种乐器产生的所有频率叠加在一起就是一个音符的声谱。我们的听觉系统把基频选作“音高”[2]，并将高次谐波解释为乐器的音色。有趣的是，虽然音叉可以产生完美的正弦波，但这种声音在乐感上比小提琴声单调得多，因为后者拥有更丰富的高次谐波谱。

引力与辐射，让声波不断响起

物理学中并不存在需要早期宇宙维持声波的基本原理。如果我们将处于等离子体时期的早期宇宙视为一件乐器，那么它的声学就可以阐释其结构的形成原理。皮布尔斯和于哲发现，宇宙微波背景辐射正是引发并维持声学振动30万年的介质。如果情况确实是这样，那么我们就可以应用刚才提到的所有概念，来理解声波在宇宙微波背景辐射中传播的结果。在大爆炸之后不久，早先的一个时期（极有可能是宇宙暴胀时期）赋予了等离子体能量，这些能量产生了声波。

引力与辐射这两种力的共同作用维持着这些声波。在引力的作用下，物质聚集起来，并在压力的作用下形成致密物质，如果不加以外力，致密物质就会迅速坍缩，整个宇宙中也就无法形成任何有趣的结构。对我们而言幸运的是，光能像弹簧那样产生恢复力，而原初宇宙中充满了构成光的光子。当光子散射到电子上时，它的动量会发生变化，根据牛顿第二运动定律，我们知道它会产生一个力。在等离子体中，散射到电子上的大量光子产生了极大的压力，足以抵抗进一步的引力坍缩。其结果是，等离子体发生膨胀，压力减小。在这种情况下，引力会返回来压缩等离子体，这种和声的舞蹈成为宇宙中的第一

个声音。根据宇宙学的标准模型，在大爆炸之后的30万年里，宇宙一直像一件乐器一样以谐序发出这种“嗡嗡”声（图12-5）。

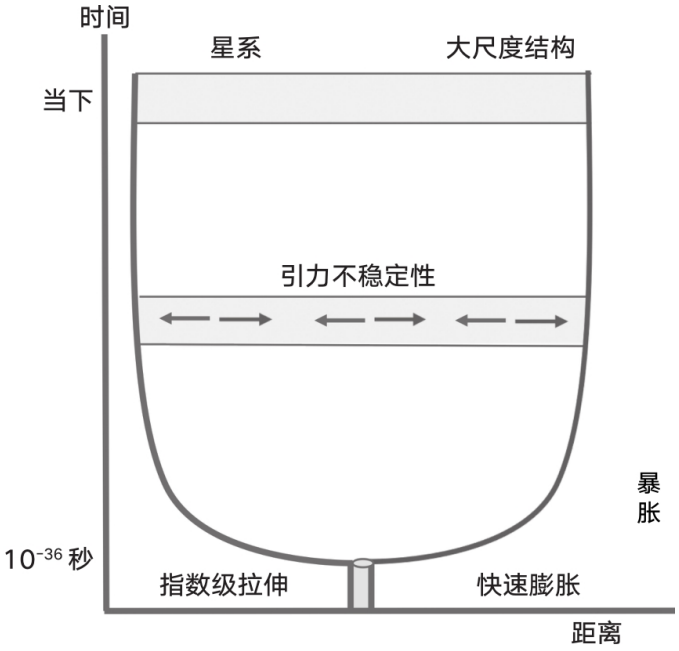


图12-5　时间跨度图

注：从重组之后的引力不稳定时期开始，到大尺度结构的形成，时间跨度长达100亿年。

宇宙微波背景辐射中的粒子之间密切地相互作用着，声波以接近光速的速度传播。根据这些知识，我们可以把简单的基频波长公式应用于宇宙微波背景辐射中的等离子体。

我们已知波以接近光速的速度传播，并且已经传播了30万年。我们可以应用之前推导过的声波公式：

$$\lambda = vT = 3 \times 10^{8}\mathrm{m/s} * 3\,000\,000\mathrm{Y} \cong 1\ \mathrm{MPC}$$

从这个公式可知，宇宙微波背景辐射中基本声波的距离在100万秒差距的数量级上！令人惊奇的是，在观察玛格丽特·盖勒与约翰·修茨若发现的星系团是如何分布的时，我们发现，它们精确地占据着与其尺寸相匹配的孤立区域。经过几十亿年的时间，皮布尔斯发现的微

小声波发展成了我们今天看到的大尺度结构，而这一切都是从声波开始的。如果声音只是某些振动驻波的混合体，那么它是如何发展为星系和恒星的呢？

许多音乐学家都认为，音乐是具有结构的声音。如果声音结构发展成为宇宙结构，那么宇宙也是一首音乐吗？在重组阶段，当电子与质子结合形成氢原子时，引力便取得了胜利，那些音则变成了某种节奏。这些节奏代表了氢原子气体坍缩到中心区域，进而形成了第一批恒星和原星系。在下一章中，我们会详细讨论恒星形成的过程。

宇宙是一首音乐吗

总而言之，我们对早期无结构宇宙中形成结构的最初时刻有了一定认识。第一种模式是各种频率的声波的结合。在一个理想的共振器中，比如一根理想的弦，所有的频率会以相同的振幅（或响度）生成。然而，当我们根据分量频率来分析宇宙微波背景辐射的数据时，发现其中存在一个响度的峰值（即声波峰值）。这很像乐器中的情形，声波峰值通常与人们听到的音符相对应。其他的峰值揭示了声音的音色，而这些峰值由另一些物理参数决定，比如乐器的材质。相似地，宇宙微波背景辐射中的其他声波峰值或许就含有宇宙物理构成的信息。不可思议的是，它们确实含有这些信息！例如，它们告诉我们，早期宇宙中一定存在暗物质。

我曾从利昂·库珀那里学到，当一个类比失效的时候，发现新事物的可能性就出现了。

第一，在宇宙等离子体奏响音乐的时候，宇宙一直在膨胀，从大爆炸开始，直到第一批氢元素形成。为了更好地理解这一点，我们可以想象在气球的表面画一条线。当气球逐渐充满气体

并膨胀时，那条线也会膨胀。同样，随着空间的膨胀，光波也会被拉伸。

第二，一些简单的计算表明，声波的传播速度与光速接近。那么，宇宙微波背景辐射听起来到底像什么呢？一些宇宙学家把宇宙微波背景辐射的频率转化成了声音，虽然它听起来不是很悦耳，但也不完全是噪声。有趣的是，存在一种原始的量子声音，它引起了等离子体中的原始振动，虽然这种声音被归类为白噪声，但在观察者听来，它是十分美妙的。

如果宇宙中的结构一开始是声波，那么它们会形成更加复杂的本质上是音乐的结构吗？我们的音乐宇宙里有没有类似音、旋律、和声与节奏的事物？我认为答案是肯定的。

在大爆炸之后的1.5亿年里，声波与氢发展成了恒星，而恒星聚集为星系，不过，事情远没有这么简单明了。当压力密度波的振幅随着物质的聚集而增大时，原本很简单的声波方程变得高度非线性。此外，原始声波中（由普通的重子物质组成）的引力势能太过微小，无法坍缩为我们今日所见的星系网络。这就需要某些不可见的物质来增强引力，使其坍缩为恒星与星系。这种物质就是暗物质。暗物质不与光和可见物质直接发生相互作用。通过观测恒星在星系中公转的速度，宇宙学家已经搜集到了暗物质存在的证据。暗物质为成长中的宇宙产生谐波提供了音色。

根据牛顿力学，恒星离大质量星系中心越远，其围绕这个星系公转的速度就会越慢。然而，薇拉·鲁宾（Vera Rubin）发现，恒星的速度实际上并没有降低，而是接近一个常数（图12-6）。暗物质、重子物质和光子都是量子场，在宇宙的早期阶段，它们的关联粒子从真空中创生。探究从宇宙的原始等离子体中产生元素的正确物理机制，是宇宙学的主要研究方向之一。

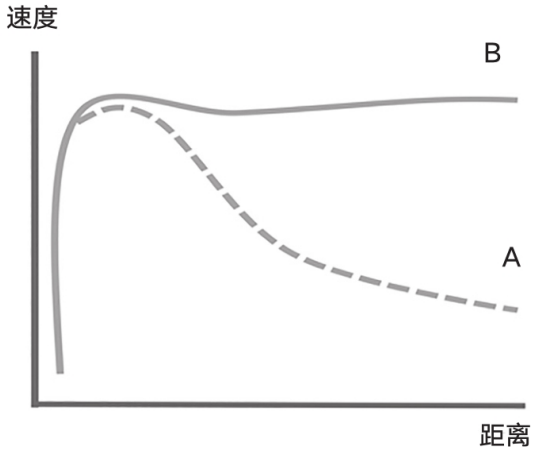


图12-6　恒星围绕星系运动的典型的公转速度曲线

注：虚线表示牛顿引力理论的预言，实线表示实际观测到的速度，这需要借助某些不可见的暗（不发光的）物质来解释。

有了适量的暗物质后，计算机模拟揭示了大片网状纤维网络的形成机制，这些纤维网络由暗物质和氢原子气体构成。在这些纤维的节点上，氢原子气体结合起来，就像雨后蛛网上的水滴一般。正是在这些被称为原星系的区域中，氢原子气体在引力的作用下聚集起来，形成了第一批恒星（图12-7）。通过核聚变，恒星内部巨大的引力压力将氢元素转变成了更重的元素。在第一批恒星中，质量最大的比太阳重100万倍，它们的寿命约为1亿年，最终通过超新星爆发而死去。

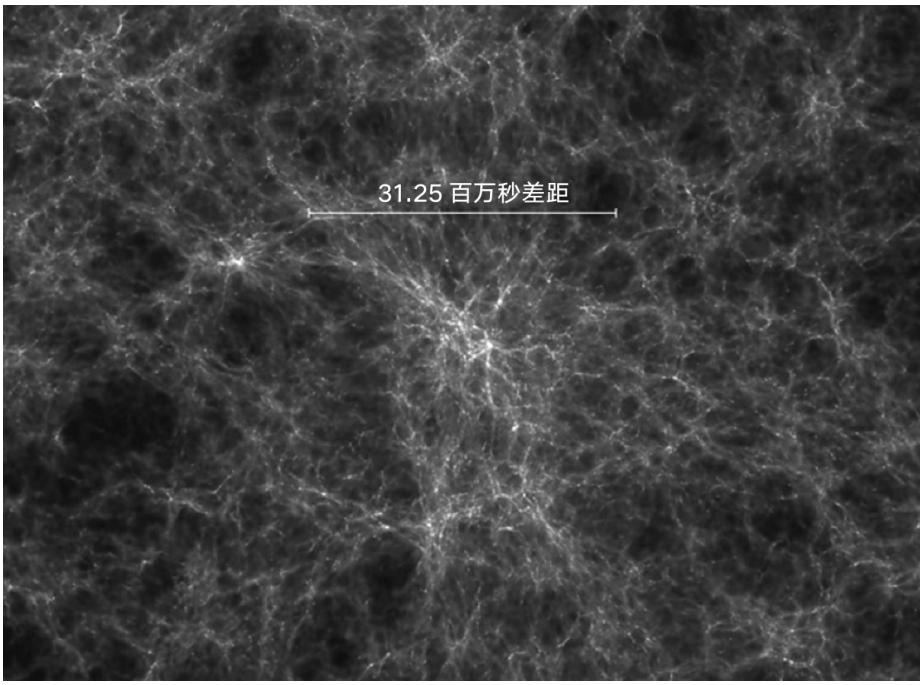


图12-7　原星系节点上的恒星

注：原星系为交错丝状结构，恒星就集中在这些结构的节点上。

在宇宙的发展史上共有三代恒星，各自之间有着很大的差别。第一代恒星被称为第三星族（Population III），由氢元素和氦元素构成。第二代恒星被称为第二星族（Population II），它们含有少量金属元素，而且比第三星族稍小。现今的第一星族（Population I）富含金属元素，且比前两者都要小得多，比如我们的太阳。第一代恒星是在大爆炸之后约2.5亿年时形成的，其寿命只有几百万年。在可观测的宇宙中，大约有100万亿颗恒星。

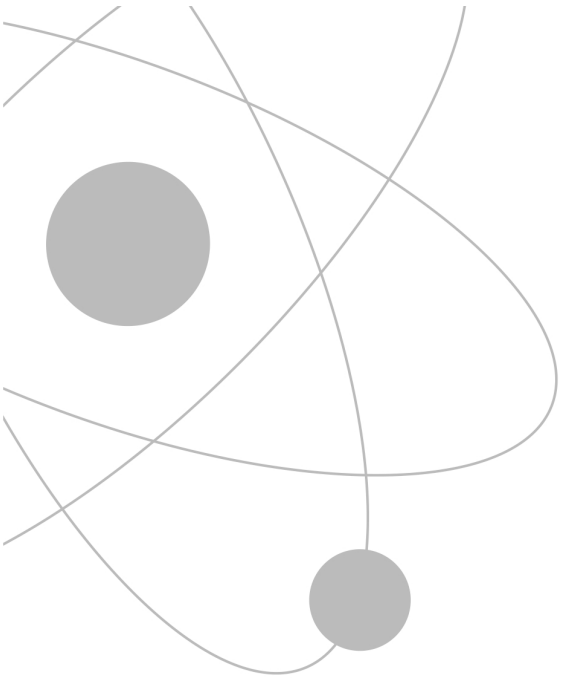
2015年冬天，我在开曼群岛大学做了一场关于宇宙学与音乐的演讲。我通常会用我的萨克斯来说明一些本书中已经讨论过的理念。天体物理学家爱德华·吉南（Edward Guinan）也参加了这次会议，他是海王星环（之后被证实是两颗卫星）的共同发现者之一。在喝了一杯当地酿制的啤酒之后，吉南告诉我，我应该关注一下日震学（Helioseismology），这门学科研究的是恒星表面的声波。

太阳是一个近乎完美的球体，其表面充斥着炙热的等离子体。湍流会在太阳表面产生声波，类似于钟被撞后产生的波模式。当得知宇宙中的所有恒星都在演奏一种音时，我不禁露出了灿烂的笑容。我发现，一些天文学家已经开始运用日震学来研究恒星上的声波，以了解恒星的内部结构。我的音乐宇宙视角不仅仅是一种类比，我感觉它就要成为一种研究方法了。

早期宇宙中的波形产生了恒星，恒星在狂暴的元素聚变中又会产生类似乐音的声音。恒星自组织为更大的结构，如双星系统或者星群，这相当于音乐中的乐句。此外，星系中数以百万计的恒星自组织为自相似的分形结构，就像巴赫和利盖蒂·捷尔吉作品中的分形结构。宇宙结构的组织与音乐结构的相似程度令我非常惊讶。当一个类比远远超出了你的预期时，你就会忍不住怀疑这个类比是否就是事实本身。

在此，我引用革命作曲家约翰·凯奇（John Cage）[3]的名言作为本章的结尾：

> 音乐中的结构是从乐句到长句的连续部分的可分性。形式即是内容，内容即是连续性。方法是控制音符之间连续性的手段。音乐素材则是声音与静默。把二者整合起来，正是作曲的意义。



13

马克·特纳的量子头脑之旅

一天晚上，在前锋村（Village Vanguard）酒吧里，纽约最好的爵士萨克斯手在幕间休息时说了一些话，而这些话简直让我不敢相信。他说：“当我独奏的时候，每当我非常确定我要演奏的下一个音符时，那么再下一个音符的可能性就会变得更多。”此话出自我心目中的次中音萨克斯演奏大师马克·特纳（Mark Turner）之口。那是2002年的春天，在寻找了爵士乐即兴演奏与物理学之间更深层的关系多年之后，特纳的话让我确信了自己的想法并非幻觉。每当我和其他音乐家、科学家谈论科学概念及其与音乐的关系时，他们总是冷言冷语，但特纳的肯定给了我信心。特纳对即兴演奏中的潜在可能性的洞见，直接与早期宇宙中的量子力学不确定性相关。他的话让我对这个问题有了更深刻的理解：所有的物质、场，以及与之相伴的宇宙结构是如何从空无一物的状态中产生的？在毫无特征的早期宇宙中一定出现了某种“魔法”，初始的结构才得以形成。

海森堡不确定性原理

特纳的音乐家之路非常有趣。上小学时，他就开始吹奏竖笛。在大学里，有一阵子他喜欢上了商业美术。之后，他找到了自己的真爱——中音萨克斯，并考取了著名的伯克利音乐学院，最终移居纽约。在成为全职爵士乐手（主要担任伴奏）之前，特纳曾在曼哈顿的淘儿唱片公司（Tower Records）工作数年。自始至终，他都从事着音乐方面的工作。在众多号手看来，特纳最终变成了第二个“约翰·柯川”。

在柯川面前，许多爵士乐手都感到自惭形秽。柯川既有与生俱来的音乐才能，又付出了非同常人的努力——和查理·帕克一样，柯川经常一天练习14个小时！然而，将柯川推上神坛的是他风格的多样性，在音乐领域中，几乎处处都有他留下的足迹。《巨人的步伐》是

柯川标志性的硬博普乐杰作，展现了他在和声方面的天分。之后，他又探索了印度音乐的微分音系统和非洲音乐中的大量复节奏类型。不过，他所做的并不止这些。在生命中的最后阶段，他描绘了自由爵士乐的宇宙之声，专辑《至高无上的爱》（*A Love Supreme*）就是一个例证。他还发展出了和谐而丰富的纸片声——迅如烈火的琶音(16)，这种声音创造出了和弦的感觉。与柯川同时代的中音萨克斯手若想在历史上留下足迹，必然都会活在他的阴影之中。

特纳是继柯川之后少数能够创造自己风格的中音萨克斯演奏者之一。他通过转录(17)来练习，这使得他能够分析、解剖与融合一些大师的作品，主要是柯川、乔·亨德森（Joe Henderson）和德克斯特·戈登的作品。这并不是作弊，因为对音乐人来说，学习大师的作品不仅不可耻，反而是十分必要的，包括我在内的大多数音乐家都是这么做的。然而，通过研究沃恩·马什（Warne Marsh），特纳才真正形成了自己独一无二的风格。马什是一位次中音萨克斯演奏家，在爵士乐迷中非常有名，却不为公众所熟知。特纳将马什的“狂热”风格和柯川的纸片声结合起来[1]，最终取得了突破。

马什是作曲家、钢琴家伦尼·特里斯塔诺（Lennie Tristano）的学生。特里斯塔诺于1919年出生在芝加哥，在6岁时就全盲了。尽管如此，他还是考上了芝加哥著名的音乐学院，上课时由他姑妈为他做笔记。在移居纽约之后，特里斯塔诺创造了一套高度和声、即兴演奏的方法来演奏比博普爵士乐。在一次访谈中，他如此总结这种方法：“我并没有创作任何作品……这就是爵士乐与其他音乐形式的区别。音乐已经在你的头脑之中了，你所要做的就是在你听到它们的时候用双手把它们记录下来。所以，你所做的事情完全是自发的。”

我们不要被特里斯塔诺的话误导了。这件事情并没有听起来那么简单，尤其是当我们在即兴演奏的语境中思索“自发”一词的含义时。我第一次接触爵士乐时，曾天真地以为自发演奏就是随意地演

奏，即“想到什么就演奏什么，随便按动萨克斯上的按键，然后吹气”。从表面上来看，那些家伙的确是这样演奏的，但做到自发演奏并非一朝一夕之功，而需要多年的练习和记忆，并排除掉“错误”的音符。“音乐已经在你的头脑之中了。”特里斯塔诺的这句话就体现了即兴演奏的魔力。那么，一个成功的即兴演奏者是如何把音乐记在头脑中的呢？特里斯塔诺的方法是深刻理解乐理与和声，并把对乐理的理解具体化。他会让学生记住并演唱爵士乐大师的完整独奏曲目。这种方法能训练乐手的内耳，并让他们获得自发地创作出更有意义的音乐作品的能力。

特纳的话一直萦绕在我的脑海里，我不禁想知道即兴演奏中是否隐藏着某种科学。这也许是我试图解释即兴演奏的一种尝试。然而，在2002年时，我发现与其把音乐科学化，不如把宇宙音乐化。激发我在十几岁时吹奏小号的音乐与即兴演奏，一直帮助我理解量子力学和宇宙结构扩张的内部机制。然而，我需要一种催化剂的帮助，而特纳正是这种催化剂。

让我再次引用特纳的话：“当我独奏的时候，每当我非常确定我要演奏的下一个音符时，那么再下一个音符的可能性就会变得更多。”反过来说，他越不确定下一个音符是什么，那么再下一个音符的可能性就会变少。在听到这句话的那一刻，我突然意识到，如果我能早一点听闻这些，那么我将会从中受益良多。我难抑笑意，并且感谢了他。直到今天他都不知道我们之间的讨论对我来说有多重要，也不知道正是他的话让我对量子力学中最神圣的原则有了清晰的理解。这个原则就是海森堡不确定性原理，只有通过它，我们才能真正理解宇宙用量子力学的魔法创造行星、星系和人类的方法。我想，是时候把这些告诉特纳了。

世界充满了不确定性，但经典宏观物理学中的理想世界并不是这样的。根据支配宏观世界的物理定律和方程，比如电磁学和牛顿力

学，原则上我们可以“解出”物体未来的行为，无论参与相互作用的粒子有多少、相互作用有多么复杂。皮埃尔-西蒙·拉普拉斯（Pierre-Simon Laplace）是一位伟大的法国数学家，他阐明了其中的哲学原理：根据分析，当一个物理系统中物体的初始位置和速度确定时，其未来的轨迹就是完全确定的。我之所以说“原则上”，是因为当我们超越经典世界，进入量子世界时，不确定性就会成为一项基本原则。

当人们试图解释一些异常发现时，量子力学诞生了。这些异常发现一开始被认为是实验中的微小反常现象。其中之一是欧内斯特·卢瑟福（Ernest Rutherford）的金箔系列实验，这些实验确定了原子内部几乎是空的，但有一个带正电的大质量原子核，而原子核为一片带负电的云所围绕。一开始，科学家认为那片云中充满了旋转的电子，这就产生了一个问题：在宏观世界中，旋转的物体需要向心加速度。然而，当诸如电子等带电粒子加速时，它们会产生电磁波形式的辐射，从而损失能量。这种能量的损失会导致电子迅速地旋向原子核，所以稳定的原子无法形成。如果没有稳定的原子，那么世界上就不会有稳定的分子，也就不会出现生命，这可不是什么好消息。此外，现实世界中的原子和分子显然都是稳定的，这对传统物理学来说也不是什么好消息。

光子本质上还是一种波

让经典物理学的处境更加不妙的是，其他的实验结果都表明，当连续的光线照射进氢原子气体时，从中只显现出一系列离散的浅色光。这就像按下管风琴的所有按键，本以为能听到一连串的声音，结果却只冒出两个音符。电磁学理论无法解释这个现象。我们必须找到一种“像音符一样的”东西，并用它来替代原子中连成一片的旋转电子云。

解开这两个谜需要更多的信息。马克斯·普朗克（Max Planck）和爱因斯坦证明了，曾经被认为是纯粹波动现象的光也可以像粒子一样运动。他们提出，光不仅能以一种被称为光子的能量包的形式传播，还可以通过撞击金属产生束缚态电子，就像台球一样。然而，有一个疑难问题等待解决。在那时候，物理学家认为光束就像从水管中流出的水流，如果水的体积增大了，那么水就具有更大的动量。他们期望光波也有相同的行为。不过，在光电效应上，情况有所不同，不管光的强度有多大，逸出电子的数目都是一样的。然而，通过增加光的频率（本质上是让它变得更蓝），光可以撞击出更多的电子。我们可以从这个实验得出两个结论：

- 在不同的情况下，光要么具有粒子性，要么具有波动性；
- 光束传递给电子的动能与光的频率有关，而与光的强度无关。

这两个结论看起来非常奇怪。当时的很多物理学家都认为，光子本质上还是一种波，它的类似粒子的行为仅仅出现在那些波被束缚起来的时刻，就像布莱恩·伊诺应用傅立叶理念把波叠加起来得到尖锐的声音那样。然而，这种解释太过简单了，连爱因斯坦都说：“现在，每个人都认为自己了解光子，但他们都错了。”[2]

我一直很崇拜爱因斯坦抓住事物本质的能力。从这两个观测结果中，爱因斯坦发现了一种关于光的能量的优美的基本关系，它支配着光电效应。

$$E=hf$$

这个方程把光子的能量E、频率f，以及以物理学家普朗克命名的普朗克常数h联系在一起，并反映出光子是离散的束，而不是如我们想

象中的那样是连续的。普朗克研究了从处于热平衡状态的物体周围发出的辐射，即所谓的“黑体”（black body），并确定了必须根据方程$E=hf$对光进行量子化，以便解释那些观测结果。爱因斯坦用这个方程来反映光在光电效应中所能携带的离散能量，最终成功地解释了这些观测结果。

年轻的博士生、小提琴家路易·德布罗意（Louis de Broglie）脑中灵光乍现，用光电效应的研究成果解决了旋转电子的问题。德布罗意断言，既然爱因斯坦证实了波可以具有粒子行为，那么粒子为什么不能具有波动行为呢？德布罗意的解决办法的关键是把类似粒子的性质、动量与波结合起来，并把电子想象成一根弦上的驻波，而不是围绕原子核转动的小行星。

我们已经知道，弦可以经历振动或者周期性的波。两端固定的弦被拨动后，会以一定的频率发生共振。当弦上的波在两个方向上同时运动时，根据傅立叶理念，波会相互增强或者削弱，共振由此产生，还形成了节点固定、波峰周期性地上下移动的驻波。德布罗意猜想，电子的动量可能和驻波轨道的波长有关，就像光子的能量与其频率之间的关系。他用数学公式来描述这种关系：

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

在上面的方程中，p是电子围绕原子核中心运动时的动量，λ是波长。令人惊奇的是，这个方程是一种物理实在，因为它表明，电子的“轨道”波长（一种波动性质）与它绕原子核转动的速度相关，后者也即它的动量。波长越大，粒子运动得越慢，且粒子越轻，因为动量等于粒子的质量乘以其速度。

德布罗意的方程适用于所有形式的量子物质，而并不只是电子。普朗克常数设定了粒子波动性的尺度，它是一个很小的值，这意味着

我们在宏观物质中看不到波动性，因为与围绕原子高速运动的量子粒子相比，我们移动的速度太慢了。如果我们非常小，那么我们就可以看到自己身体内部的波动性。德布罗意提出的粒子的波长与其动量之间的关系，正是著名的不确定性原理的核心。海森堡精确地描述了这种关系。

为了更好地理解不确定性原理，我们可以想象一种频率完全确定的波，比如一个纯音。现在，我问你：“波在哪里？”具有多种周期性振动的波分布在非常大的距离上，这意味着一种频率确定的波会出现在任意位置。现在，让我们想象一个行波脉冲，它只持续很短的时间，比如一个节拍。我可以确定这个脉冲的位置，但它的频率不能被很好的定义，因为一个频率需要许多重复的循环，而一个脉冲的宽度太小，不足以确定一个频率。这就是海森堡不确定性原理：你知道的关于位置的信息越多，就意味着你知道的关于频率的信息越少，反之亦然。由于频率是与动量成正比的，所以我们知道的关于粒子动量的信息越多，对它位置所知的信息就越少，反之亦然。用数学公式来表达，就是：

$$\Delta X \backsimeq \frac{1}{\Delta P}$$

其中，ΔX表示位置的不确定性，ΔP表示动量的不确定性。

这是一个意义极为深远的公式。当科学家想了解自然的时候，他们会利用仪器来进行探测和测量。而不确定性原理表明，无论我们在测量的时候多么小心，无论我们的仪器多么精确，我们永远无法同时确定一个量子实体的粒子性质与波动性质，不管它是光子、电子、夸克还是中微子。在自然界，甚至宇宙中，不确定性原理是一个基本原理，无论我们是否进行测量，它都客观地存在着。

那么，改变了我对不确定性原理看法的是特纳关于即兴演奏的洞见中的什么呢？他说：“当我独奏的时候，每当我非常确定我要演奏的下一个音符时，那么再下一个音符的可能性就会变得更多。”让我们相应地重述一下不确定性原理：一个粒子的动量越确定，它的位置就越不确定。这就是量子力学的核心，不确定性只是量子粒子对特定物理属性限制较少的一种反映。

不确定性原理真正反映的事实是：一个量子实体既不是波，也不是粒子，但它同时包含了波和粒子的性质。这个原理的本质是傅立叶理念。我们可以通过叠加一系列频率确定的纯粹波来制造一个波脉冲。相似地，波动性质中也可以产生粒子性质（脉冲），反之亦然。

在量子力学中，毕达哥拉斯的“天体和谐论”最终得以实现，但只是在微观层面，而非宏观层面。在德布罗意的假说中，电子的每一条“轨道”都是一个与纯音对应的波。物质与波是一回事。对于物质同时具有粒子性和波动性这一理念，尼尔斯·玻尔（Neils Bohr）称之为“互补性”。为了真正理解这种波-粒互补性的起源，埃尔温·薛定谔提出了也许是物理学乃至所有科学中最重要的方程——薛定谔方程。

刚才我们所描述的不确定性原理的量子力学版本，在很大程度上已经能帮助我们理解宇宙结构的形成，但我们还需要让它与爱因斯坦的相对论相容，因为相对论给出了宇宙膨胀的发生机制。当我们将两者结合起来时，量子力学就拥有了两个特征——真空和反粒子，它们对于理解宇宙结构至关重要。

在量子力学和爱因斯坦的相对论形成的20世纪初，保罗·狄拉克开始研究围绕原子以接近光速运动的电子的量子理论。狄拉克转向了相对论，因为最初的量子力学只适用于非相对论和牛顿力学，在相对论领域则失效了。亚原子粒子通常都无法达到接近光速的速度，但早期宇宙是极端高能的，粒子就像打了激素一样运动，还是量子激素。

当电子以接近光速的速度运动时，参考系就出现了。在参考系中，电子看起来具有负能量。负能量粒子非常难处理，物理学家通常认为它们是非物理的。狄拉克却并不认同这种传统的观点。他灵机一动，把带有负能量的电子定义为一种新的粒子，它具有正能量和正电荷。他首次提出了反粒子的概念。一年之后，经实验证实，狄拉克所预言的正电子（电子的反粒子）的确存在，他因此获得了诺贝尔奖。相对论与量子力学的结合让每个粒子都具有一个反粒子。在此基础上，一个关于真空的具体理论诞生了。

如果电子与正电子相互碰撞，那么它们的总电荷就是零。它们会彼此湮灭，来自它们质量的能量会产生光子（图13-1）。

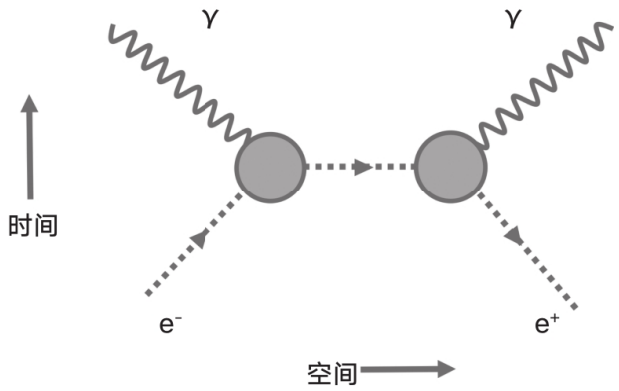


图13-1　费曼图

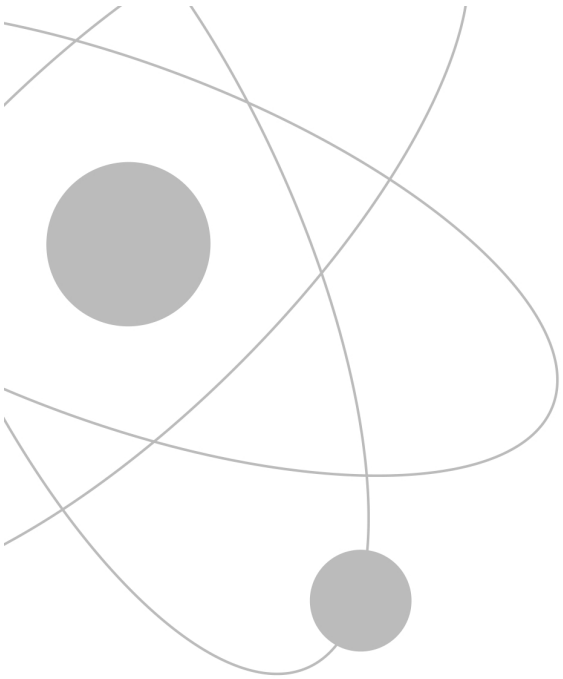
注：电子（e^-）与其反粒子正电子（e^+）彼此湮灭，并产生光子（γ）。虚线表示电子与正电子的运动，虚线表示光子的运动。

反过来，如果两个光子发生碰撞，且它们的能量是一个电子的两倍，就会在真空中产生一个正电子和一个电子。

其实，这样的事情时时刻刻都在自发地发生，因为根据海森堡不确定性原理，真空本身在最小的尺度上并不是空无一物的，也许这与我们对真空的直观印象不同。与位置和动量通过不确定性原理紧密相连一样，能量与时间也可以通过一个等价的公式联系起来：

$$\Delta E \backsimeq \frac{1}{\Delta t}$$

能量-时间不确定性告诉我们，量子过程发生的时间间隔越小，量子系统所能获得的能量范围就越大，反之亦然。当像人类这样的宏观物体观测空无一物的空间时，时间尺度实在是太大了，我们无法体验能量的不确定性，所以除了空无一物的时空之外，我们什么也感觉不到。如果我们的眼睛具有观测更小时间尺度的能力，就像有着高速快门的量子相机，那么我们就可以看到粒子和反粒子，以及它们之间的碰撞。量子场论的这一特征与我们对宇宙中第一个声音的起源的理解是等同的，而原始等离子体的音就是宇宙中的第一个声音。在早期宇宙中，我们要处理的事物处在非常小的时间尺度上。不确定性原理指出，宇宙中的能量相应地具有高度不确定性，持续不断地发生涨落。在宇宙的开端，这种扰动时空的涨落表现为粒子不断产生并相互碰撞的混乱景象，这正是20世纪的物理学家发现的宇宙微波背景辐射中各向异性的情况。宇宙在婴儿期是不均匀的，因为根据不确定性原理，宇宙在极短时间与极高能量的尺度上不可能是均匀的。哥白尼宇宙的均匀性和对称性被相对论尺度上的量子物理学打破了。



14

费曼的爵士风

——原始信息——

发件人：<唐纳德·哈里森>

收件人：<斯蒂芬·亚历山大>

时间：2012年6月1日，星期五上午8:42

主题：回复：爵士萨克斯

亲爱的亚历山大博士，我叫唐纳德·哈里森（Donald Harrison），我也吹奏萨克斯。我录制了一首名为《量子跳跃》（*Quantum Leap*）的曲子，就是它促使我给您发这封邮件。我附上了这首歌，以及评论家、音乐家和我对爵士乐这个概念的看法。请允许我先声明，虽然我还不是很了解您对这个概念的理解，但是我很想听听您对这种音乐的看法。我更多地是从直觉层面来理解这个概念，毕竟我的专业知识有限。尽管存在这种局限，我还是希望您能抽出时间听听我的这首曲子。热切地盼望着能得到您的评论。祝您一切安好。

非常感谢！

唐纳德·哈里森

这似乎是我在哈维福德学院执教的又一个平常的日子，然而当天又十分特殊，因为我收到了中音萨克斯传奇乐手哈里森的电子邮件。

我和哈里森进行了多次长谈。相比于我和马克·特纳做出的量子力学与爵士乐即兴演奏之间的类比，哈里森的见解帮助我把这个类比往前推进了一步。若想知道宇宙结构是如何形成的，就必须理解真空的结构，以及粒子和场在时空中的量子运动。有趣的是，根据费曼的发现，量子运动与爵士乐独奏非常类似。

想象你正站在舞台上，手中拿着你已经选好的乐器，比如小号。鼓声阵阵，立式贝斯的蓝调旋律在场中回响。这正是迈尔斯·戴维斯的《一片蔚蓝》（*All Blues*）。萨克斯手刚刚结束了他的独奏，现在到你了。你没有时间思考，开始演奏吧！你刚刚核实了应该吹奏哪个音符以接上刚才的和声，这个音符是正在演奏的歌曲的特征。你的耳边会回响着节拍和节奏，后者是每一小节重复的节拍。如果是蓝调，那么它的特征就会很明显且可分辨，所以你在任何时候演奏蓝调音乐的任意一个音符，至少你都会听到与乐队中其他人相和的声音。

爵士乐是一种语言

一位经验丰富的即兴演奏者如果能记住音阶中的所有音符，那么他就能理解音符之间相对和声的重要性。例如，蓝调音阶（图14-1）由西方音阶的12个音符中的6个组成，对A蓝调音阶来说，这些音符是A、C、D、E、降E和G。一个缺乏经验的即兴演奏者会随意地演奏其中一个音符，听起来似乎也还可以，但一位经验丰富的即兴演奏者会用这些音符开发出一个“词汇表”。温顿·马萨利斯（Wynton Marsalis）说得好：

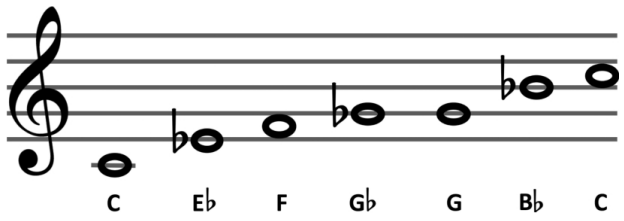


图14-1　C蓝调音阶的音符

> 在爵士乐中，即兴演奏并不是把一些东西随意地杂糅在一起。和其他语言一样，爵士乐也有自己的词汇和语法。没有对错之分，只有选择的好坏。[1]

爵士乐中的词汇与我们口语中的短语类似。我们用字母组成单词，然后把单词组合在一起构成短语或者句子。音符就像字母，音阶与和弦就像单词，爵士乐中的“乐句”或者节奏型则像口语中的短语。在独奏时，虽然简单地在一个音阶或者和弦上下演奏听起来可能并不太糟，但是有经验的爵士音乐家会从经典曲目和记忆中信手拈来很多乐句，并在独奏中得心应手地运用它们。与此类似，我们可以通过模仿语言大师的作品来提高自己的写作能力，譬如莎士比亚或者托妮·莫里森（Toni Morrison）的作品。毕竟，我们为什么要重新发明一遍轮子呢？埃里克·亚历山大（Eric Alexander）是一位次中音萨克斯乐手，我曾听他演奏过一段很长的连复段，那是他从乔治·科尔曼（George Coleman）那里学来的，他还让我勤加练习。即兴演奏虽然需要创新，但也体现了一个人从以前的大师那里学到了多少乐句——我称之为措辞。不过，我描述的只是即兴演奏的方法之一，从根本上说，即兴演奏有着更为丰富的内涵。

即兴演奏连续爵士乐段的方法有很多。在小心应用的前提下，简单的重复也能达到不错的效果。哈尔·克鲁克有关即兴演奏的著作《准备，瞄准，即兴演奏！》（*Ready, Aim, Improvise!*）是一块瑰宝，书中着重强调，爵士乐即兴演奏并不是一个随机的过程。它是记

忆和创造力的一种功能，对于像我这样的普通人来说，则是更多投入练习的结果。

桑尼·罗林斯（图14-2）是史上最伟大的即兴演奏者之一。他有一项技艺被批评家冈瑟·舒勒（Gunther Schuller）称为主题即兴演奏[2]。舒勒曾在一篇著名的文章中讨论了这一点，他分析了一首名为《蓝色7号》（*Blue 7*）的著名蓝调独曲奏目。罗林斯以一个三音符的主题开始了他的独奏，并以这个主题为框架发展出更复杂的独奏。随着独奏的进行，罗林斯把简单的主题转变成了复杂的节奏与和声变化。这个主题就像一个主导着罗林斯独奏演变的结构。还有一种重要的主题即兴演奏方法，即在独奏的过程中为曲子的旋律润色。演奏者迷失在一场独奏中是很常见的事情，简单地回到旋律上，或是在旋律的附近演奏，都会将其拉回到正轨上来。



图14-2　桑尼·罗林斯在演奏

注：图片提供者为约翰·阿博特（John Abbott）。

2015年冬天，我有幸与罗林斯进行了一场深入的对话。当我询问他有关主题即兴演奏的看法时，他说：“我非常欣赏舒勒的文章。我在练习时非常努力，但我在演出时并不演奏我练习的那些内容。你不

可能一边思考一边演奏。当我演奏的时候，我并不想演奏那些音乐，而是希望音乐来‘演奏’我。”

音符像是在跳一场量子之舞

现在，想象你正在独奏。在量子力学中，观测行为实际上会扰动系统，因为当电子没有被观测的时候，它会同时经历很多路径。根据我与罗林斯、哈里森的讨论，以及我个人的经验，在纯粹即兴演奏的状态下，有时演奏者并没有“观测”那些正在被演奏的音符，就像被量子力学支配的电子一样，那些音符像是在跳一场量子之舞。如果你没有演奏任何音符，那么这种状态就会持续下去，就像即便你无所事事地静坐着时，时间的长河依旧不可阻挡地向前流逝一样。每一次即兴演奏都是一次新的体验，不是对已经发生的事情的重复，而是对过去从未做过的事情的重复。我们或许对已发生的事情很熟悉，但只要超越了它，就将迎来一次新的旅程。和大多数人一样，在接触新事物时，你会谨慎行事。所以，你会把自己限制在蓝调音阶的7个音符上。一开始，你会慢慢地演奏它们，但很快你就会意识到，你的演奏听起来还不错。你的信心会随之增长。和所有爵士乐发烧友一样，乐队的成员会支持你，而不是评判你，他们给你足够的空间，让你和那些音符独处。你会从中得到乐趣。

在接下来的演出中，你会演奏自己完整记下的蓝调音阶，甚至是你从自己最喜欢的查理·帕克的独奏曲目中记下来的一些节奏型。在帕克的独奏曲目中，你找到了一些你喜欢的乐句，并把它们熟记在心。你发现，在独奏的整个过程中，所有7个音符都在你的掌控之中。更有甚者，这种熟悉意味着你非常明了如下事实：你要演奏的下一个音符取决于你演奏的前一个音符。至于最终演奏这7个音符中的哪一个，这取决于你的记忆以及已经背下来的曲目，而这个过程是实时发生的。特纳的见解变成了现实。

费曼的“即兴创作”

这种即兴表达是理查德·费曼以费曼图来表达的量子力学公式的核心。经典牛顿物理学中的粒子从某个初始时刻开始运动，穿过空间，并在随后的某个给定时刻静止下来，它经历了一个确定的、连续的一维轨迹。费曼发现，当一个量子粒子在两点之间运动时，两点之间的所有路径都在考虑范围之内，任意一条路径都存在量子力学上的概率，即便概率并不都一样。这就像一位音乐家在即兴独奏中吹奏下一个音符之前，会考虑某个音阶中的所有音符。把这些音符替换成量子粒子，把即兴演奏替换成概率，类比就建立起来了（图14-3）。

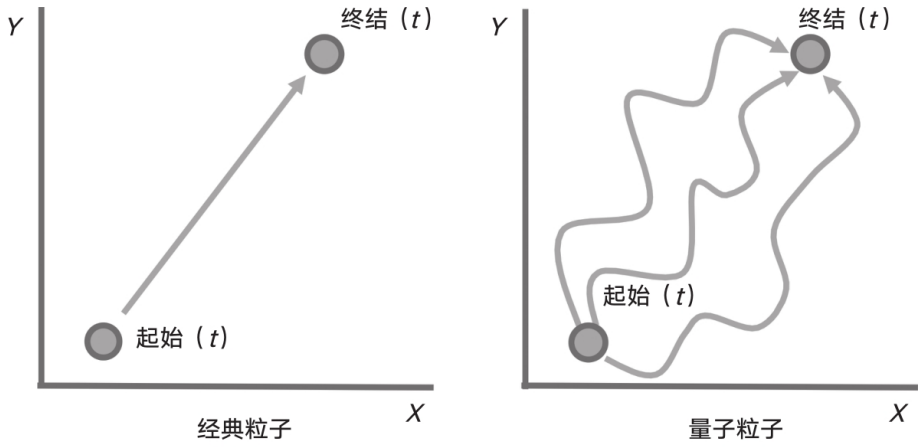


图14-3　经典路径和量子路径

注：左图是粒子通过一条确定曲线的经典路径。右图是量子路径，它包含了两点之间所有的可能路径。[3]

当爵士乐即兴演奏和费曼路径积分之间的类比出现在我脑海里时，我觉得我的精神可能有些不正常。因此，当哈里森给我发了一封电子邮件，告诉了我一个类似的想法时，我非常高兴能找到一个和我臭味相投的“疯子”。从爵士乐的角度来看，哈里森的邮件传达了一个关键理念：只知道开始和结束的音符，以及时间，对中间的事情一无所知。于是，音乐家即兴演奏出一条音乐之路，将这两个音符连接起来。结束音符或者“目标”音符是即兴演奏者经历路径的关键。在

《在院中玩耍》（*Playing in the Yard*）一曲中，罗林斯的独奏以D音开头，以目标音符G结尾，这两个音符通过纯五度和谐地连接在一起。音阶中的其他音符随着时间的流逝画出了一条曲线，把起始音符和结束音符连接起来（图14-4）。

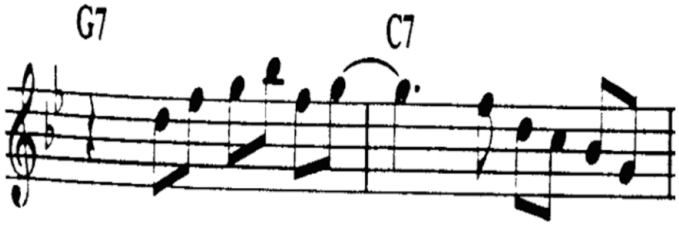


图14-4　罗林斯在一场独奏中经历的音乐路径

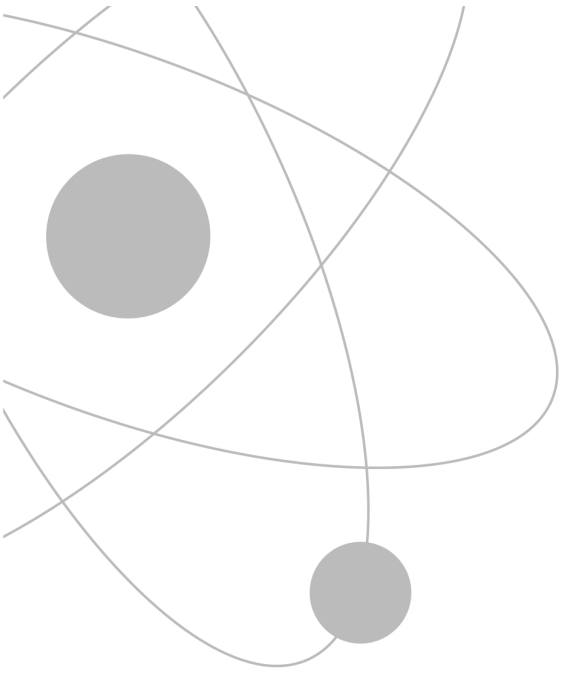
在真正演奏一段音乐之前，有经验的即兴演奏者会下意识地考虑所有可能的音符或者路径。虽然演奏出来的只是音符的其中一条路径，但它是所有概率的集合。

宇宙是如何“考虑”所有这些路径的？每条路径都有一个相对于其他路径的特定概率。将所有路径的概率叠加起来，我们就能得到最有可能被经历的实际路径，也就是我们实际观测到的路径。对经验丰富的即兴演奏者来说，他同样会“整合”每个音符的相对可能性。

在量子实在中，通过叠加所有概率得到的路径是很模糊的，这正是量子系统中内蕴的、海森堡指出的不确定性的体现。这种看上去像魔法一样的行为是如何成为可能的？其中的关键在于每条可能的路径都与一个量子波相关联，而这些波具有粒子所不具备的独特性质，即每个波都可以与其他量子波发生干涉而彼此增强或者削弱——古老的傅立叶理念又来了！大多数离真实路径很远的路径会在相互干涉中被削弱，最终不会被观测到。相似地，其他路径会彼此增强，从而增加了我们观测到的经典路径出现的概率。这拓展了刚才的类比，并引出了一个有趣的问题。由于音符也是一种波，所以在柯川、罗林斯、特纳和哈里森等“量子”爵士乐即兴演奏者的大脑中，这种波是否也发生了干涉，并且决定了在所有的可能音符中选择哪一个来演奏呢？这

个问题只有精密的脑部扫描才能解答，而这正是我的同事迈克尔·凯西（Michael Casey）的研究方向，即音乐家与非音乐家在应用音乐思维时的脑部扫描结果。

费曼路径积分是将量子力学概念化的一个重要组成部分，通过它，物理学家能更容易地从视觉和数学上理解粒子的运动路径，正如一些爵士乐手发展出了把将要演奏的乐段概念化的方法。费曼路径积分是一次关键性的思维跳跃，在它的帮助下，物理学家能够理解量子物质内蕴的波动性与粒子性是如何协同运作的，进而解释量子运动。费曼和他的合作者发现，在高能量的情形下，我们必须用场来替代粒子以及与之关联的波。路径积分也是量子场的框架，所以我们可以基于路径积分来描述量子粒子的运动，以及量子粒子在真空中的产生和消失。只有理解了量子场的功能在真空中的即兴性质，我们才能找到构成宇宙中的物质的基本单元，这些物质产生了等离子体，后者是由宇宙微波背景辐射中的光子、电子和质子组成的宇宙海洋。接下来，我们将讨论宇宙结构的另一个音乐性质。



15

宇宙的共振

随着对宇宙的声音本质和宇宙结构的起源的深入研究，我们会发现宇宙中的许多成分都来源于量子场的共振，就像音符来自振动弦的共振一样。量子场论是目前关于宇宙的基本统一范式。我们最为熟悉的关于场的例子是磁场。与一般接触力不同，两块磁铁无须接触就可以对彼此施加作用力，因为它们共同产生了一个无形的磁场。虽然场线是肉眼看不见的，但我们可以把磁铁放在一张纸上，并在其周围撒上小铁屑，使场线可视化。这些铁屑会从磁铁的一极到另一极连成一条曲线，标示出场线。这些线的弯曲程度越高，磁场的强度就越大。宇宙学中有一个未解之谜，即磁场甚至存在于星系之间[1]，而我们现在还不知道它产生的原因和原理。

如果仔细观察，你就会发现，磁场线在磁铁的北极和南极更为密集，这意味着它们在极点上消失了（图15-1）。因此，磁场的特征可以用一个数学函数来描述，在空间中的每一点上，这个函数都有一个方向（描述弯曲程度）和数值（描述强度）。这种函数被称为向量场（vector field），对一个磁场而言，我们用箭头来表示向量场的方向。与用一个点来描述的粒子不同，场是可以光滑地分布在空间中的整体。

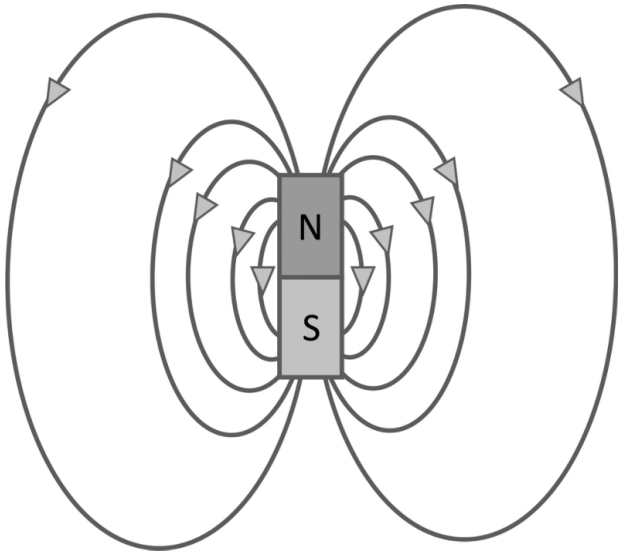


图15-1　磁铁的磁场线

注：这些线条表示条形磁铁附近磁向量场的方向。与引力场相似，磁场的强度与距离的平方成反比[(18)]。

声音宇宙的奥秘

在量子力学出现之前，物理学家已经知道了连续场（continuous field）的存在，比如电场与磁场。实际上，詹姆斯·克拉克·麦克斯韦（James Clerk Maxwell）已经把电场与磁场整合成了一个整体，这个整体被称为矢势（vector potential），是另一个向量场。原子中的电子要想在能级之间完成量子跃迁，就必须与光子相互作用，并发射光子。量子化任意场的物理学（包括电磁场的矢势和光子）与弦的简单正弦振动的原理相似。我们用傅立叶理念来表示复杂的弦振动，同样的方法也可以应用在矢势场上，并且把它表达为以不同的整数频率区分的无限个波的叠加。例如，给定频率的光子是具有量子化频率的纯粹正弦波矢势。因此，光子场（量子化的矢势场）将是具有整数值的光子的无限叠加。与伊辛模型中的量子自旋能相互作用以控制磁性的大小一样，不同的量子场也可以相互作用，从而形成我们所见到的缤纷世界。

通过用粒子加速器探索物质的结构，我们已经知道所有的物质和4种基本作用力的携带者都来源于场。对宇宙中的可见物质而言，场有两种基本类型，即费米子与玻色子。玻色子是携带着作用力的场，而费米子构成了实体物质。在原子的情形中，对应的费米子是电子，而玻色子是光子。在它们的相互作用下，电子在跃迁到低能级时发射出光子，在跃迁到高能级时吸收光子。除了电子和光子，还存在少量其他的费米子与玻色子。量子（或者说场的简谐振动）就是粒子。3种玻色子场分别对应着引力场、电-弱力场和强力场。更令人兴奋的是，一个弥漫在真空中的一般电子场的振动产生了所有的电子，包括那些在你身体里的、在恒星里的、在宇宙中分布着的。如果这幅图景是真实

的，那么宇宙中为什么没有充满了电子、光子与其他粒子呢？神奇的是，宇宙中可以充满了场，却没有充满粒子，所以必然有某种事物触发了场中的势能，使其转变成了粒子，就像推动一下雪球就可以让它滚下山，在这个过程中，它的动能会不断增加。

我们可以认为宇宙微波背景辐射中充满了粒子。然而，宇宙中最低的能态是真空状态，这也是宇宙可能具有的最为对称的情况。如果我们回到宇宙微波背景辐射存在之前，那时宇宙处于真空状态，而粒子以某种方式自真空中产生。在宇宙的早期阶段，能量-时间不确定性导致真空中产生粒子。然而，真空涨落既可以产生粒子，也可以产生反粒子，两者会迅速地彼此湮灭。因此，真空涨落无法让粒子长时间存在。

我们现在观测到的粒子既存在于星系中，也存在于我们的骨骼之中。要想形成这些粒子，真空涨落需要产生更多的物质，而不是反物质。达成这一目的需要一个重子产生过程（Baryogenesis），这是一个假定的过程，它在宇宙中创造了不对称性，所以最终得到的物质比反物质多。

我们已经知道，宇宙暴胀早于宇宙微波背景辐射存在时的辐射主导时期。暴胀发生在刹那之间，这段时间内不存在任何标准模型中的粒子。如果暴胀理论是正确的，那么在产生构成了今天的宇宙结构的可观测粒子方面，它一定扮演着极为重要的角色。在我撰写本书时，对于重子产生过程到底是什么，以及它具体是何时发生的，科学家还没有达成共识。目前的一些猜想大致可以分为三类：

- 重子产生过程发生在暴胀过程中；
- 重子产生过程发生在暴胀刚刚结束之后；
- 重子产生过程发生在电-弱力占支配地位的时期。

结果是，不管重子产生过程发生在什么时候，它都具有一些普遍的特征，如果具备这些特征，我们已经在宇宙中观测到的物质就会产生。这些条件是以苏联物理学家安德烈·萨哈罗夫（Andrei Sakharov）的名字命名的。萨哈罗夫是第一个提出早期宇宙中的物质产生自真空的必要条件的人。他提出的重子产生过程理论的核心在于否定了三种对称性的存在。在讨论萨哈罗夫提出的条件之前，我们先来进行一个重要的音乐类比，这将有助于我们理解重子产生过程的物理学原理。这个类比就是共振。

我们已经知道，一个周期性的外力施加在一个具有确定固有频率的物体上时会发生共振。当外力以物体的固有频率振动时，振动物体的振幅将会迅速增大。弦和乐器等更为复杂的物体具有更大范围的固有频率。因此，我们或许可以借助外力来生成一个大范围的共振频率。量子场就像一种广义的物体，比如一根弦，它能以多种共振频率振动，因为所有的量子场都可以相互作用，一个量子场可以表现为外力，另一个量子场可以在相互作用下发生共振。在受到驱动的情况下，真空中的量子场能以等于它静止质-能的频率振动。应用爱因斯坦的关系式：

$$E=hf=mc^2$$

我们可以得到一个量子场作用于另一个质量为m的量子场的驱动频率f，如果驱动频率$f=mc^2/h$，它就可以使量子振动产生共振。因此，粒子就是量子场的共振，我们可以将其理解为类似于音符从被拨动的吉他弦中产生的过程。拨弦的动作就是施加于相互作用的量子场的外力，产生的粒子可以类比为音符。不过，若想把这个类比应用于真实的宇宙，我们还需要稍微调整一下真空乐器，如此某些振动就不会出现，比如反粒子，而这种调整是与真空中的某种对称性破缺相关的。

现在，我们从萨哈罗夫的理论中来看看是真空中的哪种对称性需要破缺。当我们仔细审视基本相互作用的标准模型中的对称性时（即

费米子与玻色子之间的所有相互作用），我们得到了一些惊人的发现：在时间反演、空间反演（类似于照镜子）和电荷反演的共同作用下，所有的相互作用都保持对称。我们再来看看费曼图（图15-2）中的电子与正电子。我们先反演电荷，然后反演时间，最后把图像左右翻转（镜像反射）。令人惊奇的是，除非电子与正电子随着时间的逆流产生了光子，否则最后我们得到的图像能用以描述相同的物理现象。粒子加速器以极高的精度验证了这一点。萨哈罗夫找到的正是早期宇宙中必然存在的对称性破缺的组合。更令人兴奋的是，这些对称性破缺的实现需要新的物理学。

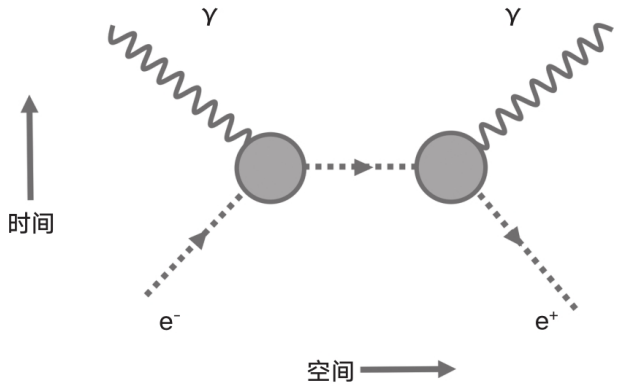


图15-2　费曼图

第一种需要破缺的对称性是重子流。重子流和导线中的电流类似，不同之处在于，重子流可以单独存在于空间之中。在标准模型中的真空里，重子流的速率恒为零，换句话说，总是存在一个大小相等、方向相反的重子流随之一起流入、流出真空，这两个过程是对称的。某些与重子流场共振的场可以影响重子流的对称性，让我们称之为B（重子对称性）。然而，这还不足以催生出重子产生过程。影响了重子流对称性的事物也会影响反重子流，因为真空也具有重子和反重子之间的对称性，也即保罗·狄拉克发现的物质与反物质之间的对称性。如果反重子出现了，那么它们就会和已有的重子彼此湮灭，最终什么也不会留下。因此，把粒子与反粒子联系在一起的对称性是一种

需要被去除的相互作用，我们将这种对称性称为C。最终，如果我们应用这种新的物理原理，同时违反B和C，这些在反重子上产生的重子就不能达到背景辐射中的热力学平衡，新产生的重子也就不会“融化”在热流中。现在已经出现了几种重子产生过程的模型，不过它们都建立在该过程发生在暴胀之后的假设上。也许，声音宇宙会指向某种来源于驱动共振的场的重子产生过程，它可以一次性满足所有的萨哈罗夫条件。

2005年的一天，我很不情愿地走在去斯坦福直线加速器中心（Stanford Linear Accelerator Center，SLAC）的路上，准备继续我的博士后工作。我已经好几个月没有新的想法了，这让我感到很沮丧。突然，我不由自主地想起了一年前在帝国理工学院时做过的一个梦，当时我把那个奇怪的梦告诉了克里斯·艾沙姆。在那个梦中，一位身着白袍的老人站在太空中，以闪电般的速度在黑板上写下一些方程。我沮丧地对老人说我太笨了，理解不了那些方程。接着，黑板消失了，老人慢慢地向一个方向旋转自己的双手。那时候，我并没有把这个梦当回事，艾沙姆却一直问我梦中的细节，比如那个老人的手的旋转方向。斯坦福大学的理论组一直致力于研究宇宙暴胀及其可能具有的固有对称性。我现在才意识到，老人的手的旋转方向提供了一种新的视角，它关乎如何打破宇宙暴胀中的对称性、生成重子不对称性。我走在棕榈大道（Palm Drive）上，一时间觉得苦尽甘来。我发现了一个从宇宙暴胀中得到重子产生过程的机会。

打开了一个潘多拉魔盒

我心里很高兴，于是在计算机科学系对面的一家咖啡馆喝了一杯啤酒。过了一会儿，我的博士后导师、斯坦福直线加速器中心理论物理组组长迈克尔·佩斯金（Michael Peskin，图15-3）走了进来，和他一起的是博士后中的一位明星。我向佩斯金打了招呼，并告诉他，

我已经在真空与重子产生过程之间建立了联系。那位博士后笑了笑，说：“你又有了一个疯狂的想法。”佩斯金总是会给一位理论家表达自己的机会，我们另约了时间详谈。

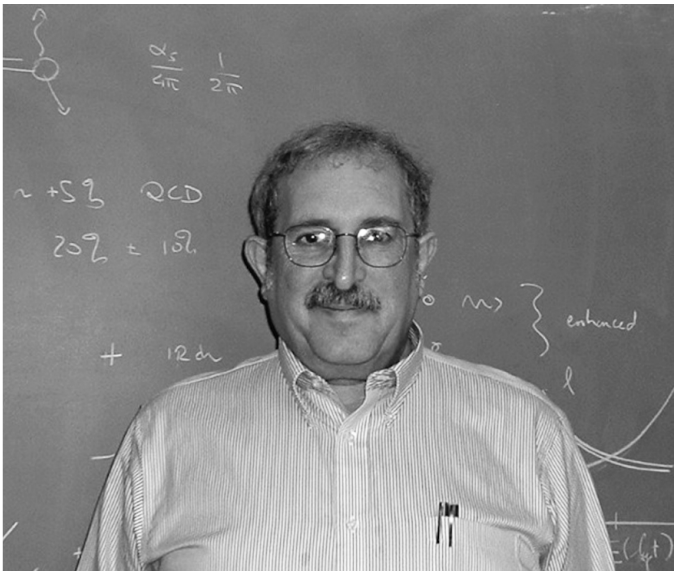


图15-3　迈克尔·佩斯金

注：佩斯金是我在斯坦福直线加速器中心的博士后导师，也是一位基本粒子物理学家。图片提供者为佩斯金本人。

在理论物理学界，佩斯金被称为“圣人”。他为人谦逊，戴着眼镜，蓄着胡子，拥有广博的物理学知识，对量子场论和超对称研究尤深。他的大多数博士后（包括我自己）都有点害怕和他交谈，并不是因为他很刻薄，而是因为与他讨论之后，我们总是会为自己在物理学上的无知而感到难堪。我第一次见到佩斯金是在研究生最后一年的一次暑期研讨会上，研讨会的主题是弦理论，他在会上做了关于粒子物理标准模型的演讲。一些理论物理学家之间流传着一个笑话：佩斯金就是物理学界的科伦坡中尉。年轻的读者可能不知道，《科伦坡》（*Colombo*）是20世纪80年代很受欢迎的电视节目，主角即为科伦坡侦探。衣冠不整的科伦坡侦探会对犯罪嫌疑人很礼貌，好像自己很天真一样，而实际上，他这么做是为了分散嫌疑人的注意力。科伦坡会问

一些看起来很愚蠢的问题，这些问题既会激怒嫌疑人，又会诱导嫌疑人说出前后矛盾的话，最后嫌疑人不得不招供。

斯坦福直线加速器中心是世界上最难开展理论研讨课的地方。我经常在研讨课上看到这个谦逊的男人礼貌地举起手，用真诚而尖锐的声音说：“抱歉，这里我不太懂。”做报告的人会立马落入陷阱，一开始他还会为可怜而“困惑”的佩斯金感到难过。接着，图穷匕见——当他意识到这个可怜而“困惑”的人让整篇报告都作废时，他的心情会迅速从同情变为恐惧。所以，想象一下做佩斯金的博士后整整三年，并且办公室就在他办公室旁边是一种什么样的体验吧！

当我和佩斯金提到我的新想法时，他表示很喜欢，并且让我做一些冗繁的计算——闭上嘴，低头算。后来我发现，这些计算实际上需要花费几个月的时间。我与同在斯坦福大学做博士后的莎因·谢赫-贾巴里（Shahin Sheikh-Jabbari）共同研究这个课题，他来自伊朗，是一位杰出的弦理论学家。那一年，我正在寻找一份终身教职，所以我非常想完成这个项目。每次我和贾巴里取得了一些进展，认为这个项目就快得到结论时，就会一起去找佩斯金，佩斯金则会说：“噢，斯蒂芬，很抱歉，我还是有点不懂。”就这样，11个月过去了，剩下的时间不多了。

经过几个月的研究，我们惊奇地发现是暴胀场让真空的CP对称发生了破缺。而暴胀之所以会导致CP破坏，正是因为它内部产生了共振。由于时空可以弯曲和伸展，爱因斯坦证明了时空的扰动可以产生一种以光速传播的引力的波，也即引力波。一般来说，宇宙暴胀会产生引力波，因为暴胀场就像扔进池塘的石子，它会扰动时空结构。

在大多数暴胀模型中，宇宙暴胀会产生两种引力波，一种是左旋的，另一种是右旋的，就像你用左手和右手往同一个方向投掷橄榄球，球的旋转方式是不同的。然而，我们首次发现，在暴胀阶段，相比右旋引力波，暴胀场与左旋引力波共振产生的振幅更大。其结果

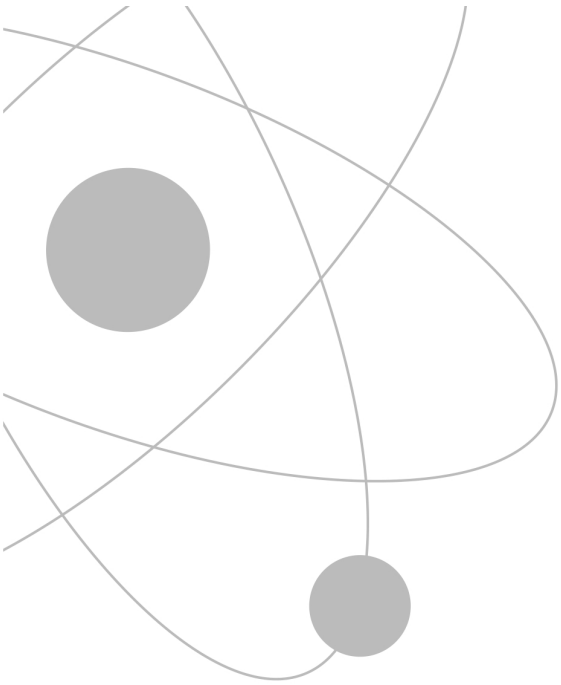
是，左旋引力波只与物质相互作用，右旋引力波只与反物质相互作用。最终，左旋引力波的更大振幅导致物质的共振比反物质的共振更强。这种情况同时产生了CP破坏的条件，以及来自引力波的重子数——暴胀同时满足了萨哈罗夫三个条件中的两个。最终，最后一个萨哈罗夫条件（处于非平衡态）自然地出现了，因为在暴胀过程中，空间膨胀的速度比重子产生的速度要快得多。

佩斯金的困惑似乎永无止境，而且总是令人感到沮丧，我和贾巴里不得不继续深入挖掘。佩斯金能明确地指出研究中存在的问题，正因于此，我们才能得到关于宇宙暴胀阶段的重子产生过程的新发现。我们不断地提升自己的技能，并跌跌撞撞地走向最终的完美独奏。我和贾巴里提出了一种新的重子产生过程机制，它将暴胀过程中的量子涨落作用于宇宙结构形成的机制，以及物质的起源（物质在数量上压倒反物质）联系在了一起。暴胀是如何通过量子舞蹈实现这一切的？我们需要借助一首特殊的歌曲来解答这个问题，而这打开了一个潘多拉魔盒。

The Jazz of Physics

第四部分

我们的音乐宇宙



16

噪声之美

行星、恒星和星系等复杂结构是由原始等离子体中的声波产生的。在产生这些声音的时候，宇宙就像一件乐器。然而，我们对音乐的类比就停留在“意识到宇宙制造了这些声音”上了吗？毕竟，直观地看，音乐显然不仅仅是声音。对人类的耳朵来说，周期性的波是最具音乐性且最令人愉悦的。不过，约翰·凯奇等作曲家持有不同看法：

> 我认为，声音的本质确实是和谐的……而且，我会把这一理念延拓到噪声上。世界上并不存在噪声，只有声音。我没有听过任何我听过一次就不想听第二次的声音，除了那些恐吓我们或者听起来感觉很痛苦的声音。我不喜欢有意义的声音。如果一种声音是无意义的，那么我会很喜欢它。[1]

我们通常将噪声视为一种无用的信号，并且希望消除它，所以好的耳机都具有降噪功能。科学研究中也存在着无用的噪声。为了搜寻到自己期望的无线电信号，阿尔诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊都渴望去除那些讨厌的噪声。颇具讽刺意味的是，那些他们试图消除的“无意义的噪声”正是宇宙微波背景辐射！也许，我们应该像凯奇一样聆听来自噪声的音乐。

聆听来自噪声的音乐

借助傅立叶理念，我们可以理解噪声的来源。简单地把全部频率、振幅相同的波叠加起来，我们就会得到一个无特征的白噪声信号。这种声音在进入我们的耳朵时会表现为“嘶嘶”声，因为没有一个主导频率，每个频率对声音的贡献都是相等的。因此，白噪声实际上是最“民主”的声音。

其实，宇宙学家正在构建一种关于早期宇宙的新理论。该理论认为，早期宇宙产生的噪声是构成那些大尺度结构的基础。现在摆在我们面前的问题是，我们不知道第一次振动是如何从空无一物的宇宙中产生的，而正是这种振动催生了原始等离子体。“第一个声音”的起源还没有完全被实验证实。现在已经形成了几种精妙的理论，但它们都需要经过修正才能符合现有的实验结果，更遑论做出新的预言了。所谓的“微调问题”，其本质是我们不知道自然界中的常数在宇宙中为什么取这个特定的数值。为什么光速是现在这个数值？为什么决定粒子相互作用强度的耦合常数是现在这个数值？我们的宇宙就像一件经过微调的乐器。观测是领先于理论游戏的，例如，通过绘制星系的旋转轨迹，我们得到了暗物质存在的间接证据。暗物质非常神秘，如果没有它，星系就不会形成。随后，科学家构建了许多关于暗物质的模型，但到底哪一个是正确的呢？更进一步探讨，在关于早期宇宙的理论中，哪一个才是正确的呢？

就目前的情况而言，宇宙暴胀是描述早期宇宙最好的理论，因为它一次性解决了标准的大爆炸理论无法解决的两个重要问题。第一个问题是我们已经讨论过的视界问题，它又引出了另一个问题，即宇宙微波背景辐射中的光子在彼此之间没有发生相互作用的前提下是如何达到相同温度的。正如我们讨论过的，通过提供一个宇宙中相距不是太远的各部分能够相互作用的时期，暴胀理论解决了这个问题。第二个问题是找到产生振动能量的正确的物理机制，而振动能量是形成原始等离子体声音的来源所必要的。

我们可以通过深挖暴胀机制的细节来寻找答案。在广义相对论中，我们把引力场（或者时空）视为一种弹性介质。当物质与引力场相互作用时，它会改变引力场的弹性。“宇宙暴胀理论之父”阿兰·古斯发现，在早期宇宙中，如果某种具有负压力的奇异物质（本质上是一种能产生斥力的能量）在时空中占主导地位，那么宇宙就会经历一个快速膨胀的阶段，其膨胀速度甚至会超过光速。这个理论并没有

违背爱因斯坦的相对论，因为相对论虽然不允许时空中的物质超光速运动，但对时空本身的膨胀速度并没有限制。

暴胀十分有趣，虽然它只是一种宇宙膨胀理论，但是它建立在量子场论和对称性论证的基础上。古斯认为，如果早期宇宙非常对称，那它将是不稳定的。它就像一支放在桌子上、笔尖朝下且还要保持平衡的铅笔。一支像样的铅笔具有多种旋转对称性，但即使是最微小的扰动也会使它落向任意一个指定的方向，这就打破了倒立的铅笔原本具有的旋转对称性。这个现象被称为对称性自发破缺，它在物理学中无处不在。让我们回忆一下我在库珀实验室中研究过的磁性伊辛模型。当一块金属的温度非零时，单一的自旋会指向随机的方向。而总的磁化强度为零。然而，铁磁体中最近的邻居更喜欢让磁场沿同一方向排列。因此，当温度低至零摄氏度时，自旋能量会降到最低，所有的自旋都将指向一个指定的方向。于是，对称性就破缺了。这种温度降低时对称性的降低正是一个对称性破缺的例子。

类似的现象也出现在量子场论中。不过，在量子场论中，控制对称性破缺的不是温度，而是宇宙学家称为的暴胀场。我大学时曾问古斯暴胀会不会做功，他回答时提到过这种场。在空间中暴胀场非零的区域，对称性会破缺，而暴胀场带来的负压力会导致这个时空区域以指数形式“暴胀”。这就是古斯的暴胀理论。

暴胀场正是我们宇宙的“导体”

随着宇宙以指数形式膨胀，神奇的事情发生了。我们知道，由于不确定性原理，量子振子永远不可能处于静止状态。暴胀场中的量子的行为非常像大量振子的集合，也很像一根正在振动的弦，不过，其与弦有一个主要的区别：小提琴的一根琴弦被拨动时，它可能会产生一系列泛音，这些泛音的振幅并不一定彼此相同。在暴胀的作用下，宇宙变成了一种特殊的乐器，其中大多数暴胀场量子的模式都是从相

同响度的真空中产生（激发）的。这是因为暴胀背景作为一种源，其对所有模式而言贡献都是相同的。然而，这还不足以产生宇宙的初始结构，因为宇宙的对称性太强了。我们需要消除一些对称性。

想象一支由100把小提琴组成的管弦乐队，彼此演奏不同的音符。如果每个小提琴手都以完全相同的音量演奏自己的音符，那么听起来就像频率处于两个频道之间的收音机发出的噪声。这种噪声的极端版本就是白噪声。暴胀时期的量子波发出的就是这种声音，如果你的耳朵能听到的话。此外，暴胀还有一些更重要的行为。每个波都有自己的相位，相位是一个数字，会随着波形中位置或者时间延迟的变化而变化。原则上，这些相位是各不相同的。这就像把一堆石子随机地扔向池塘中的不同地方，它们的相位会随机地取不同的值，所以那些波发生干涉时会相互抵消。然而，在暴胀阶段，这些相位是相同的。这就像开始时所有小提琴奏出不同的音符，形成刺耳的杂音，一旦被某种场（或者说导像管［conductron］）扫过之后，它们奏出的就是完全相同的音符。在这种意义上，暴胀场就相当于宇宙的“导体”（conductor）。

20世纪80年代，研究者发现，暴胀理论预言了原始波所具有的特性使得原始等离子体中能产生声波。原始等离子体也被称为暴胀量子涨落近规模不变功率谱。功率谱是一条曲线，表征的是连续频率范围内的响度，这与傅立叶理念以不同频率的纯粹波的集合来构造复杂函数完全相同。那时，人们还没有获得能证实或者证伪这一预言的观测结果。到了1992年，也就是古斯到哈维福德学院我所在的班级访问的那一年，宇宙背景探测器人造卫星测量了原始等离子体中的涨落，并找到了暴胀理论预言的谱。研究人员对宇宙微波背景辐射的测量持续了20多年，因此十分精确，比如由戴维·斯伯格和普朗克空间天文台

共同负责的威尔金森微波各向异性探测卫星，前者是我在普林斯顿大学的同事。迄今为止，所有的观测结果都与暴胀理论的预言一致。

根据暴胀理论，一小片由暴胀场支配的空间取代了大爆炸的地位。在140亿（14×10^9）年前的宇宙中，这个迷你宇宙小如微尘。暴胀场的量子振动随着空间的快速膨胀被拉长，并为宇宙微波背景辐射中声波的出现埋下了种子。最终，随着能量消耗殆尽，暴胀开始稳定下来。与振动的弹簧即将停在某处之前会在静止点附近做小阻尼振动一样，暴胀场依靠它的剩余能量继续振动。这些振动会激发在这个阶段与暴胀相互作用的物质场，并产生粒子。罗伯特·布兰登伯格与珍妮·塔森（Jennie Traschen）是最早描述这个阶段的宇宙学家，他们称之为“预热阶段”，标准模型中的大爆炸产物就产生于这个阶段。

通过应用广义相对论与量子力学效应，暴胀理论解释了早期宇宙中无处不在的白噪声的产生，而白噪声是宇宙结构的种子。暴胀结束后，这种噪声就像吹奏宇宙的“琴口”一样，在原始等离子体中转变成了声波，并激发了粒子的产生。暴胀理论自提出至今已经有30多年的时间了，令人惊奇的是，要想提出能解释噪声的替代理论是如此困难，但我们又确实需要替代理论，因为暴胀理论虽然非常成功，但并不完美。

暴胀理论存在的第一个主要问题是它对原始声音响度的假设。科学家分析了宇宙微波背景辐射功率谱中宇宙声音响度的测量结果，发现它偏离了等离子体平均能量约1/10 000。任何与观测到的响度的微小偏差都会使宇宙变得不宜居，因为宇宙中的结构不是形成得太快而使得生命没有足够的时间进化，就是根本不会形成。不幸的是，即使是最简单的暴胀模型（由零自旋暴胀场[2]的量子场论描述），也不能给出白噪声响度的正确值，暴胀场自身也不能。理论物理学家必须引入一个自由变量，以控制暴胀场与自身的耦合[3]。在最简单的暴胀模型中，自耦必须被人为地调整到一万亿分之一的精确度。任何对这个小

到有点荒谬的数值的偏离都会导致一个不宜居的宇宙。暴胀模型共有上百种，抛开它们之间的区别，其共性是任何一个模型都无法解决微调问题。更糟糕的是，暴胀理论没有解释这种调节为何如此微小。微调问题也存在于量子场论中，后者描述了标准模型中的3种基本力（电磁力、强核力和弱核力）。一个有趣的微调问题涉及控制着电磁力与强核力的相对强度的参数，如果这些参数与观测值稍有出入，那么恒星上就不可能产生生命的基石——碳元素。

暴胀理论存在的第二个重要问题是它的起源。这又是一个微调问题。如何设定初始条件，才能使暴胀场具有正确的性质（包括被负压力和具有正确势［correct potential］的场支配的早期宇宙），以驱动正确数量的暴胀呢？在暴胀理论提出之后不久，亚历山大·维连金（Alexander Vilenkin）指出，如果宇宙完全由量子力学描述，那么暴胀就可以始于纯粹的真空能量，后者被他称为“空无一物的状态”。宇宙的量子态将始于不存在时空的真空，并且会自发地经历一种被称为“量子隧穿效应”（quantum tunneling）的现象，进而产生一片暴胀的时空（图16-1）。根据维连金和其他物理学家的研究，这种量子隧穿效应可以发生不止一次，这让维连金的宇宙原初量子态有机会探索出许多不同的时空，每个时空都有着不同的“微调”常数。我们恰好居住在一个具有正确耦合常数的宇宙中，因为只有在这种宇宙中我们才能活下来，并且进行这种测量。这种推理方式叫作“人择原理”（Anthropic Principle）。许多物理学家都对人择原理不以为然，认为它不可证伪，所以是非科学的。大多数人认为，我们不可能观测其他宇宙。包括纽约大学的马特·卡勒班（Matt Kleban）在内的少数宇宙学家提出，早期的暴胀宇宙有可能与另一个泡沫宇宙发生碰撞，并在宇宙微波背景辐射中留下了一些我们或许能探测到的痕迹。

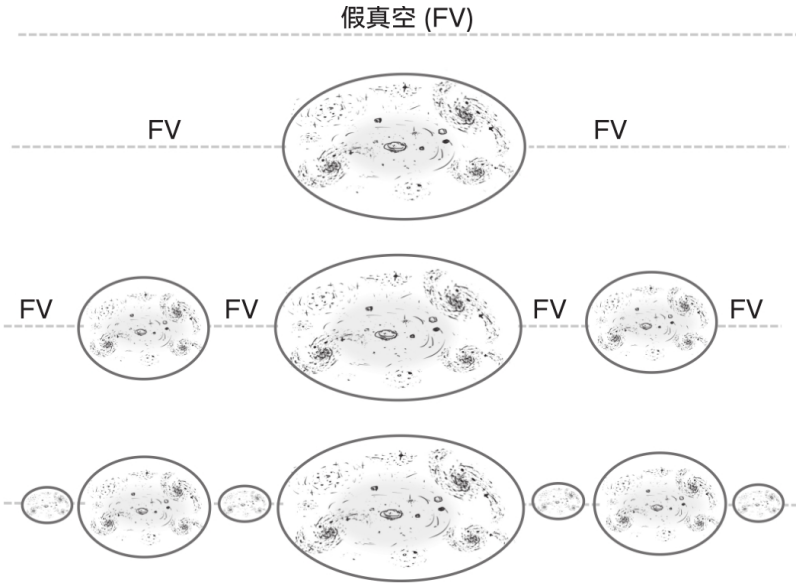


图16-1　从假真空的能量中演化出的暴胀宇宙

注：此图描述了从假真空的能量中演化出的暴胀宇宙。在这种情况下，最终形成的将是许多泡沫宇宙。这个过程将永远持续下去。

弦理论统一了4种基本作用力，并通过引入额外维，解决了为耦合常数分配数值的问题。我的同事李·斯莫林在与哈佛大学的弦理论学家安迪·斯特罗明格（Andy Strominger）讨论后，在他的著作《宇宙的生命》（*The Life of the Cosmos*）中前瞻性地指出了弦理论面临的巨大挑战，即它很难唯一确定自然界中的耦合，因为它所描述的10个维度能以多种方式卷曲起来，形成四维时空。斯莫林辩称，弦理论赋予四维世界的数不胜数的可能性将为耦合常数提供一个大“背景”，而对理论物理学家来说，从弦理论中找出自然界中的常数如此取值的原因几乎是不可能的。

2003年，当我还在斯坦福直线加速器中心做博士后时，伦纳德·萨斯坎德发表了一篇论文，改变了整个弦理论的格局。论文的题目是《弦理论中的人择景观》（*The Anthropic Landscape of String Theory*），摘要中说：“无论我们是否喜欢它，这种行为都支持着人择原理。”萨斯坎德所谓的“这种行为”意指他的观测，观测的结果是，弦理论允许多个具有各自耦合常数的四维世界存在，而不是给出

耦合常数的唯一解——这与斯莫林的期望是一致的。据萨斯坎德推测，弦理论会产生很多膨胀的气泡，它们充斥着背景，并生成不同的耦合常数。我几乎是立刻就知道了他的观点对我们这些年轻博士后的影响。一夜之间，我们的狄拉克之梦变成了梦魇。当我们从万物至理中寻找这个世界的唯一解已是徒劳无功时，还有什么是可以计算的呢？

由于萨斯坎德对我总是非常友好，而且非常支持我的事业，所以我很自然地问他：“现在我们要面对这个背景了，我们还能做什么呢？”萨斯坎德回道：“虽然我们有幸身处众多宇宙中的一个，但我们依旧需要在弦理论中找到一个实现暴胀的例子。”我虽然对这位我心目中的物理学领域的英雄无比崇拜和尊敬，但还是无法接受多元宇宙的理念。我最大的一个异议在于，弦理论不能预言微调常数的具体数值。因此，本着奥尼特·科尔曼的精神，我放弃了弦理论，开始寻找其他研究早期宇宙学的方法。

在过去的15年里，我既研究暴胀模型，也研究暴胀的替代理论。所有这些模型都存在一定的微调问题，因此，任何对早期宇宙的正确物理机制的洞见都需要处理微调问题。如果暴胀理论或者任何替代理论看到了成功的曙光，那就意味着我们必须理解自然界中的这些常数是如何出现的。

一次偶然的机会，我在巴黎的亨利·庞加莱研究所参加了一个M-理论（M-theory）新手训练营，为期3个月，日程非常紧张。虽然2000年时美国的政策在欧洲不受欢迎，但我还是在欧洲交到了许多物理学家朋友，其中与我关系最好的是克里斯·赫尔（Chris Hull），他是讨论班中的主讲之一，也是M-理论的共同创立者。赫尔与保罗·汤森（Paul Townsend）发现，相比其他描述点粒子的普通场论，弦理论具有更高的对称性，或者说自同构（automorphism）。1995年，爱德华·威滕在南加州大学做了一次历史性的演讲。基于赫尔的计算，威滕

推测，5种弦理论实际上都是一种潜在的十一维理论的不同表现。M-理论中的另一个关键之处在于，它不仅是一个有关弦的理论，还拥有更高维度的振动物体，即D-膜（D-brane，如图16-2所示）。

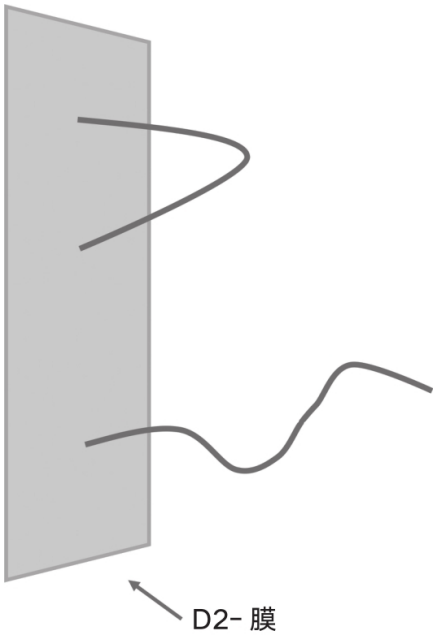


图16-2　D3-膜

注：一种特别有趣的D-膜是D3-膜，它是一种三维膜。在这个D3-膜里，与以这些膜为终点的振动的弦相关的标准模型中的场被约束在一起。因此，一个严谨的D3-膜可以作为宇宙的优秀候选者。其实这并不是一个新的观点，物理学家丽莎·兰道尔（Lisa Randall）和拉曼·桑卓姆（Raman Sundrum）就曾提出过[(19)]。

乔·波钦斯基（Joe Polchinski）发现，不同的弦可以共同地以多个维度的膜为终点。最简单且直观的例子是二维曲面，或者说2-膜。波钦斯基的发现之所以成为可能，是因为弦的终点可以在膜的表面上变动，而不是像吉他弦一样被固定住。令人欣喜的是，波钦斯基发现这些曲面是物理物体，因为它们解决了弦理论中两个存在已久的问题。第一，弦可以是伸展（开）的，也可以形成闭环，而只有闭弦（closed string）才具有目标空间二元性。通过引入D-膜，波钦斯基证明了开弦（open string）也具有目标空间二元性。第二，弦理论中的量子理论具有另一种荷，即拉蒙德-拉蒙德荷（Ramond-Ramond

charge），没有可识别的物体与之耦合。波钦斯基证明了D-膜正是载有拉蒙德-拉蒙德荷的物体，就像点粒子（0-膜）载有电荷一样。

有可替代的暴胀模型吗

我曾试图寻找一种直观的数学方法来实现弦理论中的暴胀，当然，我并不是在孤军奋战。尽管我研究了多种弦理论，但可怕的是，其他博士后比我研究得还要透彻。慢慢地，我开始从演讲与物理学讨论中抽离出来，自然地融入了巴黎的爵士乐现场。最后，我完全从那个声名卓著的M-理论讨论班消失了。我想，如果我不能在物理学上走传统的道路，那么我就要走出自己的道路。当我不玩音乐的时候，我会在沾上巧克力酱的湿纸巾上乱画图表和初步的方程。接着，我会切换到音乐频道，写下一些我正在研究的一个标准的和弦变换的记忆方法。在我的音乐休息时光里，有廉价又美味的当地红酒和巧克力酱香蕉薄饼陪伴着我。

在爵士乐的背景中，当我用D-膜的方程在餐巾纸上进行一场“独奏”时，一阵掌声突然打断了我。人们鼓掌的动作与D-膜融合在一起，我脑子里瞬间闪过一个念头：D-膜的碰撞有没有可能点燃大爆炸呢？宇宙学家有时会把大爆炸与宇宙暴胀混为一谈。

我会冒出这个想法并非出于巧合，因为那时我正在努力研究阿莎可·森（Ashoke Sen）有关碰撞膜的论文，他是一位杰出的印度弦理论学家。当粒子与反粒子碰撞时，它们彼此湮灭，并产生辐射。但阿莎可证明了，当膜与反膜碰撞时，它们也会彼此湮灭，但产生的是低维的膜。尤其值得一提的是，D5-膜与反D5-膜湮灭时会产生D3-膜。当时我正在探究D-膜的物理学，因为它们有可能解决暴胀中的微调问题。D-膜非常强大，因为在D-膜上终止的开弦的运动会在D-膜上形成量子场。因此，我们的宇宙和标准模型中的场可以存在于一张有着三个空间维度的膜，也即D3-膜上。更有趣的是，D-膜的弯曲与伸展控制

着耦合常数。又喝了几杯酒之后，我去拜访了那时我在弦理论领域最要好的朋友桑迦叶·拉姆古拉姆（Sanjaye Ramgoolam），他当时是这个领域的开拓者。他有可能会发笑，但不会评判我。我们是朋友。

我们在音乐厅的拱形建筑里见了面。“桑迦叶……我认为我找到了一种从弦理论中得到暴胀的方法。”我说。我画了一些图给他看，并告诉了他我大脑里不成熟的想法。拉姆古拉姆在很严肃但又有点怀疑的时候，会用他那双似乎能洞穿一切的眼睛凝视着你。“你脑子里总会冒出各种各样的想法，但现在我们还是先停下来……给我些方程，然后我们再谈。”我觉得这是一个好的信号。拉姆古拉姆通常带着严厉的爱，瞬间打消了我的想法，这次他也试图这么做，但我并没有轻言放弃。显然，多年的弦理论学习让我变得更强大了。我立即带着一大沓白纸回到了我的咖啡厅办公室，然后开始了计算。我处于一种难以言说的兴奋状态，彻夜不眠地工作。在狂喜中，我即兴演奏着我的计算，并坚信这些方程可以得出解。几个月之后，我完成了计算工作。当我把我的工作成果交给拉姆古拉姆审阅时，他言简意赅地说：“你搞定了！”简而言之，我提出了一个基于D-膜湮灭的暴胀模型。

阿莎可的关键发现是，于居住在D5-膜上的观测者看来，由D5-膜创造的D3-膜就像一根旋涡一样的弦，正如在三维观测者眼中一维事物就像一根弦一样。在这两种情况下，D5与D3、D3与D1之间的维数差均为2。所以，我们可以将旋涡推广到任意维数，只要维数差为2即可。在弦理论出现之前，宇宙学家试图构建一个暴胀发生在旋涡中心的暴胀模型，但由于微调问题的存在，他们没能成功。我在一系列“健康的”前提下解决了微调问题，并且证明了暴胀可以在D3-膜上发生。微调问题之一是耦合常数不能由该理论先验地决定。在我的模型中，耦合是由弦理论中内蕴的一个量决定的，也就是张力。我找到了暴胀3-膜宇宙的一个数学解，这个宇宙有着更为温和的微调，其优势在于耦合常数可以由理论决定。

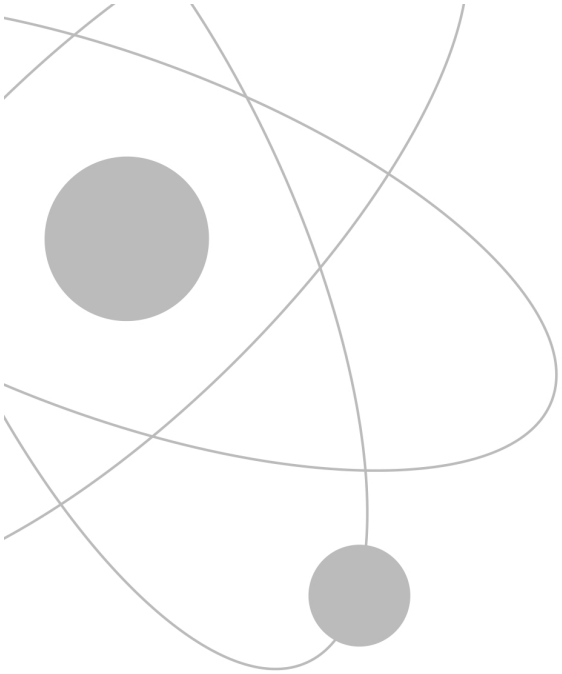
回到伦敦后，我便把我的文章草稿交给世界顶尖的弦理论学家阿卡迪·蔡特林（Arkady Tseytlin），让他帮我审阅。其他物理学家称他为“人形计算机”，文章中若有不严谨的地方，他都会发现，而我相信并不存在一个完美的理论。蔡特林谨慎地说：“把这篇文章投出去吧。”感谢上帝！在我投出文章两个星期之后，剑桥大学、麦吉尔大学和普林斯顿大学的一些理论物理学家也发表了类似的文章，即基于膜湮灭相互作用的暴胀模型。多年来，我一直梦想着能拥有一项属于自己的理论发明，现在我终于梦想成真了。这篇文章名为《基于反D-膜和D-膜湮灭的暴胀》（*Inflation from D-Anti D brane Inflation*），于2001年发表，被引用了200多次。

最终，我的文章为弦理论与宇宙学的子领域做出了巨大的贡献，但我以及经验更为丰富的弦理论学家都清楚地知道，我所提出的模型中的微调只是被另一种微调取代了，即需要一种多宇宙理论人为地在每个宇宙中确定耦合常数，这些宇宙是在多次暴胀的实现过程中产生的。这或许会被视为托勒密的“本轮论”的一个诡异的例子。我依旧对弦理论以及基于弦理论的更复杂的暴胀模型抱有兴趣，后者的灵感来自我之后的工作。在有幸遇到另一位爵士乐物理学家后，我找到了暴胀研究的新方向。

我是在斯坦福直线加速器中心做博士后时认识戴维·斯伯格的。他是威尔金森微波各向异性探测器科学团队中的领袖科学家之一，他根据探测器卫星实验结果发表的文章的引用次数居于物理学界之最。斯伯格是普林斯顿大学天体物理学方面的负责人，也是我们这个领域中的巨人。除此之外，外界对他知之甚少。我第一次见到他时，他和大街上的普通人没什么两样。那时，斯伯格蓄着时髦的山羊胡，穿着色彩鲜艳的夏威夷风衬衫、短裤和凉鞋。博士后们都非常敬畏他，我们中的大多数人都害怕与他对话。那时，我感觉自己是理论组中的边缘人物。有一天，斯伯格与几位教授和博士后外出时，我碰到了他。我紧张得不知道该说什么，嗫嚅着说了一些可笑的话——一个我正在

探究的疯狂想法。令其他教授惊讶的是，斯伯格严肃地回答了我的问题，并建议我启动这个项目。他有着在做计算之前就“看到”结果的能力，这与爱因斯坦的思想实验十分相似。

几年之后，我又与斯伯格联系了一次，同样的一幕再次上演。我向斯伯格表达了自己对暴胀模型太过复杂的不满。我们随意地开始了谈话，讨论着暴胀从已知物理学中产生的可能性。可能性最大的物理学到底是哪一种呢？对于这个问题，我们都感到很困惑。接着，“尤里卡时刻”[(20)]到来了，答案呼之欲出。正是光！电磁场载有能量。如果暴胀之前的宇宙中充满了光辐射，会发生什么呢？也许这些能量会让空间膨胀。斯伯格邀请我到普林斯顿大学做一年访问学者，那时我还在哈维福德学院，正在享受假期。我与我的博士后安东尼诺·马尔恰诺（Antonino Marciano）一起建立了一个简单的奥卡姆剃刀模型，这是基于光子与电子相互作用的暴胀模型。在这种情况下，标准模型之外的物理学并不是必需的。然而，宇宙必须始于一种不寻常的平坦状态。这个模型基于我们已知的正确的物理机制，是新一代暴胀模型的典型代表。它虽然还存在很多问题，但证明了一个原理，即暴胀可以不依赖于额外的量子引力理论。



17

音乐宇宙

物理学的所有领域都存在微调问题。若论典型的爵士乐物理学家，我首先想到的是乔奥·马古悠（Joao Magueijo，图17-1）。马古悠早年曾作为先锋古典钢琴作曲家接受即兴演奏训练，还是空手道黑带选手。在罗伯特·布兰登伯格邀请他到布朗大学参加一个讨论班时，我第一次见到他。在准备阶段，我们小组需要讨论一篇看起来颠覆了传统的论文，论文作者是马古悠和暴胀理论的先驱安迪·阿尔布雷克特（Andy Albrecht），论文题为《宇宙谜题的解决方法之光可随时间变化》（*A Time Varying Speed of Light as a Solution to Cosmological Puzzles*）。噢，爱因斯坦不是已经明确地说过，光速是不可超越的吗？是谁胆敢挑战伟大的爱因斯坦？马古悠和阿尔布雷克特证明了，如果光速在早期宇宙中可以是无穷大，那么宇宙微波背景辐射中的光子就有时间相互作用，从而解决视界问题。这样就存在一种机制，使得光速稳定在我们现在观测到的宇宙中的这个常数，就像温度可以控制磁性材料中磁性的产生一样。这意味着暴胀理论提出的视界的解存在一个替代理论。另外，它还具有解决微调问题的潜力，因为它包含了这样一种观点：一个理论可以在随时间变化的场之间产生耦合，这与在多元宇宙之间随机分布是截然不同的。



图17-1　理论物理学家马古悠

这又自然地引出了一个问题，即自然界中的其他常数是否会随时间变化。为什么只有光速会随时间变化？在一次组会上，布兰登伯格以他一贯对待替代理论的开放态度，提出基本常数在量子引力理论中无须保持恒定不变。他是正确的。爱因斯坦的理论指出，光在空无一物的空间中以最大的恒定速度传播。正是因为狭义相对论的数学对称性（即洛伦兹对称性），参照系之间的相对光速彼此之间才能保持定常速度。狭义相对论中有多个参照系，每个参照系中都有观测者。无论这些参照系相对于彼此的速度是多少，每个参照系中的光速都必须相同。换言之，如果一个观测者观察另一个参照系（比如一列行驶中的火车），他看到的光速依旧是一样的，即便这个参照系存在着相对运动。正是因为这种对称性，我们关于光的标准理论（或称电磁学）才不能与真空中变化的光速相容。然而，当光波在不同的介质（如玻

璃）中运动时，洛伦兹对称性就不复存在了，而且光速相对于真空是可以变化的。这就是马古悠的论点的本质。或许是时空中的量子效应从根本上影响了爱因斯坦钟爱的洛伦兹对称性，并导致了早期宇宙中光速的变化。正如结果所示，弦理论中额外维的形状确实会致使某些常数在整个时空结构中发生变化，光速就是其中之一。[1]

当我们走进讨论班的教室时，马古悠正坐在教室前面，他头发黑亮、五官俊朗，脸上挂着顽皮的笑容，穿着普通的黑色T恤和黑色牛仔裤。有一些人似乎是专程赶过来的，就为了看这个物理学“拉丁坏男孩”与穿着粗花呢衣服的年长者辩论。大多数教授都坐在教室前方，准备与他较量一番，看他是否敢于直面“光速是常数”这一宝贵的思想。然而，出乎所有人意料的是，也很可能让他自己也感到好笑的是，他并没有谈论自己向爱因斯坦的理论发起的挑战。

宇宙是音乐的

在量子宇宙学领域，马古悠的演讲被称为“拍摄宇宙的波函数”。等等，什么的波函数？量子力学一般是描述亚原子物质的。然而，我们已经知道，宏观世界的经典定律可以从量子力学中产生——宇宙中的压力波来自量子涨落，而后者是我们今日看到的所有结构的源头。因此，量子宇宙学的哲学就是将量子力学应用于整个宇宙。这意味着，在暴胀时期，我们不仅要量子化暴胀场，还要量子化时空本身。量子宇宙学贯穿了量子引力理论的所有领域，而这是它独有的特征。

演讲结束后，我与马古悠花了几个小时的时间讨论一些新的想法，这些想法关乎在弦理论的背景下实现他的光速可变理论。他让我想起了爵士音乐家桑尼·罗林斯、约翰·柯川、迈尔斯·戴维斯和奥尼特·科尔曼，他们都熟练掌握了传统爵士乐，并在此基础上将其推上一个新高度。他们都不在意权威人士的看法，或者专业人士的反

应。他们做出的变化有时是刻意为之，有时源自即兴演奏。本着这种精神，我接受了光速可变理论。在咖啡馆里，我和马古悠共同即兴演奏了物理学。此后，我与马古悠一直保持着联系。回到伦敦帝国理工学院后，马古悠与弦理论学家凯洛格·斯特里组建了一个团队，并雇我做他的博士后，让我和他一起把他的光速可变理论扩展到量子引力领域。

这种兼收并蓄与即兴演奏的方法让我找到了自己在物理学中的位置。我从物理学和音乐两个领域中的大师身上学到了两种价值观，这些大师包括丹尼尔·卡普兰、利昂·库珀、罗伯特·布兰登伯格、杰伦·拉尼尔和科尔曼。通过把物理学与音乐编织到一条思想的大道上，我学会了将音乐中的概念作为了解现代物理学与宇宙学的切入点。对我来说，类比法让物理学变得更容易理解、更令我兴奋。

探究我们祖先留下的足迹是很有趣的：伟大的古代思想家试图通过声音来理解物理学，并通过物理学来理解声音。毕达哥拉斯研究锤子与弦，试图探究悦耳的音乐从何而来，而开普勒则利用他“宇宙是音乐的”的直觉，在天文学、物理学和数学领域做出了巨大的贡献。

音乐与声音恒久存在，无论我们是否聚精会神地倾听，它们都是宇宙中不可或缺的一部分。音乐作品的对称性反映了量子场中存在的对称性，在这两种情况下，对称性的破缺造就了美丽的复杂性。在物理学中，我们可以通过对称性破缺得到自然中多种不同的作用力；在音乐中，我们则可以得到张力与决心。

同时知道粒子的位置和目的地的不确定性完美地反映了爵士乐即兴演奏。被暴胀放大的振动谱也即那些产生了今日的宇宙结构的谱，其与噪声的谱是相同的，这是多么不可思议呀！两者的基础都是波的傅立叶叠加。宇宙微波背景的和声结构源自量子噪声，正如不同的节拍与节奏产生自基本波形、振动、均匀的重复与循环。斯特拉瓦迪里（Stradivarius）小提琴之所以让琴师们梦寐以求，是因为它与众不

同。每件乐器都有着自己的声音和特征，宇宙也不例外。这正是物理学家把宇宙微波背景辐射的振动视为暗物质或暗能量的特征痕迹的原因。在我们今日所见的由星团和星系构成的超星系团中，振动继续以这些模式存在。

告诉一个孩子，宇宙刚刚诞生时，原始等离子体中的声音就创造了第一批恒星和星系，随后又产生了有着复杂模式的星系，以及以特定的共振频率“唱歌”的恒星。接着告诉他，宇宙中的事物远不止于此。所有的类比法都不再有效。然而，库珀曾告诉我，一个强大的类比可以让你发现一些新的事物，这是你通过理论本身无法获得的。将这些类比传授给孩子，他们长大后就会突破现有理论的边界。

如果我们把音乐与物理学之间的类比往前推进一步，会发生什么呢？马克·特纳对即兴演奏的认识让我理解了量子力学，音乐还能告诉我们什么呢？如果我们把宇宙与音乐之间的类比变成一种同构（一一对应），并推测宇宙是音乐的，且看一看这能带给我们什么，结果又会如何呢？这能催生新的物理学领域，或者在宇宙学的争论中指向一个更优的选择吗？接下来，让我们一起探索这些新的理念。

宇宙之声正是这件乐器，而这件乐器正是宇宙之声

围绕“宇宙是音乐的”这一概念的争论焦点，正是“音乐”这个词在宇宙领域中的应用。音乐被认为是一种人类的创造，它基于我们对声音的感知，并根据和声、节奏和旋律来组织声音。事实上，音乐也关乎用噪声和不协调的声音来创造节奏和张力，或是改变原所期待的乐段中的和声方向。当我提到一个音乐的宇宙时，我实际上是指这些元素，它们可以延拓到支持波现象的所有介质，也就是物理学和宇宙。如果宇宙是音乐的，那么从本质上说它就类似于波，可以表述为声波随时间的演化。现代作曲家斯潘塞·托佩尔（Spencer Topel）曾在一次私人谈话中对我说：

一千个人眼中有一千个哈姆雷特，所以我们几乎不可能定义音乐，但可以用一个复杂而混乱的波形来表示，其中也包含着美丽的结构。同样，当我们仰望天空时，我们既看到美丽，也看到混乱。宇宙与音乐都是由波的结构及其之间的关系所驱动，并都包含着我们几乎无法理解的复杂性，不过结构是可以分辨的，它赋予了我们所见与所闻的意义。

请记住：如果不存在宇宙的外部，而宇宙就像一件乐器一样运作，且拥有所有的音乐元素，那么宇宙这件乐器是可以自己演奏的。换言之，宇宙之声正是这件乐器，而这件乐器正是宇宙之声。构成宇宙的所有事物（包括时空）都必须振动。

只需将宇宙的膨胀速率作为一个参数，我们就可以把这个观点转换为物理理念。如果膨胀速率以一个纯音的频率振动，我们就可以得到一个我称为“节奏宇宙”（rhythmic universe）的宇宙，即循环宇宙（cyclic universe，如图17-2所示）。事实上，循环宇宙也是爱因斯坦的相对论的一个精确解。这种类型的宇宙绕开了一个令人费解的问题：“在大爆炸之前发生了什么？”答案是：宇宙经历了一个收缩和膨胀不断重复的过程，但并没有“开始”。不存在大爆炸的奇点，时间总是存在着。这是宇宙能演奏的最纯粹的音，这个声音本身就是宇宙尺度的振动。

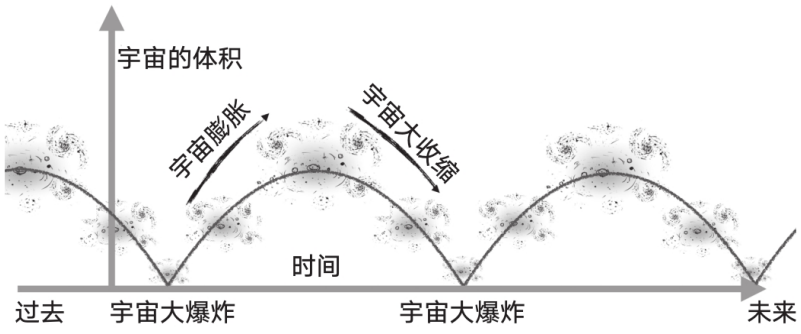


图17-2　节奏（循环）宇宙示意图

循环解法其实有着悠久的历史。循环宇宙学最早的一个版本来自古印度哲学。古印度人认为，宇宙在时间长河中永存，并以86.4亿年为一个周期，宇宙在一个周期内会经历从诞生到毁灭的全过程。

柯川对中国和印度的古代哲学与音乐的研究把他带向了现代宇宙学，而且走得比他想象的还要远。这很容易让人联想到柯川在《巨人的步伐》中的即兴演奏，这首曲子是一个循环结构，体现了循环宇宙不断膨胀与收缩的宇宙之舞。爱因斯坦的广义相对论允许振荡宇宙（oscillating universe）的存在，宇宙的时空在过去经历了无穷多的一系列膨胀与收缩。宇宙大爆炸正是无数次爆炸中的一次。与暴胀相似，循环宇宙有着自己的优势与不足，因此它依旧是宇宙学研究的前沿方向。循环宇宙理论面临的一大挑战关乎一种不祥的场的存在，这种场被称为“鬼场”（ghost field）。

为了得到一个循环宇宙，过去的收缩宇宙必须突变为一个膨胀宇宙，宇宙学家把这种现象称为“宇宙反弹”（cosmic bounce）。想象一下扔出一个球，它若想改变方向，就必须撞击地板，然后减速，直至速度为零，并且改变向下的速度。由于动量守恒，而且球具有弹性，所以这会自然地发生。相似地，减速宇宙的“速度”会有一个暂停，并在达到零速度之后又反弹回加速的状态。为了让这一切发生，我们需要一个能让时空表现得像一个“弹力”球的场，这个场就是鬼场，它是一个具有无穷多的负能量的“仓库”。物理学家不喜欢鬼场，因为它可以出于量子力学机制自发地转换为无穷多的光能量。而鬼场之所以能转换为光能量，是因为根据交换费曼图，光子（自然界中最轻的粒子）可以从鬼场中“窃取”负能量，以创造大量光子。我们从来没有见到过鬼场的这些迹象，所以如果循环宇宙是真实存在的，而且确实依赖于鬼场，那么鬼场应该已经找到了避免自身衰变为光子的方法。高等研究院（Institute for Advanced Studies）的尼玛·阿尔坎尼-哈米德（Nima Arkani-Hamed）及其同事提出了一种可

能的机制：鬼场缩小，把负能量限制在一个有限的值域上，以防止自身进一步衰变为光子。[2]

无论鬼场是不是让宇宙像凤凰一样从死亡中浴火重生的“幕后推手”，或许我们都还需要一些新的陌生事物。令人难以置信的是，无论在哪种情况下，爱因斯坦的理论都包含了一个像纯音一样振动的宇宙，这个宇宙的运行机制表面上看起来很简单，实则为其中可能具有的复杂性留下了空间。宇宙学家花了大约70年的时间才找到这种循环的可能性。早在20世纪20年代，爱因斯坦就考虑用振动的宇宙替代他的理论所预言的永远膨胀的宇宙。1934年，理查德·托尔曼指出了循环模型与热力学第二定律的相悖之处，即熵（entropy）(21)将永远随着时间的推移而增加。随着宇宙经历一个又一个周期，熵会不断增加，周期也会慢慢变长。[3]如果往回推，周期就会越来越短，最终回到了大爆炸的奇点——没有永恒的周期，一切又回到了起点。不过，暴胀理论的微调问题给了一些聪明的宇宙学家勇气，他们开始重新研究循环宇宙。

尽管许多宇宙学家不愿意接触像循环宇宙理论这样的奇怪理论，但几年前，约翰·巴罗（John Barrow）、达格妮·金伯利（Dagny Kimberly）和马古悠开始重新考虑循环宇宙的概念，以及由保罗·斯泰恩哈特（Paul Steinhardt）和尼尔·图罗克（Neil Turok）提出的托尔曼理论的解。巴罗、金伯利和马古悠研究的是当宇宙收缩到“大爆炸”区域时，两个电子之间的耦合强度是否会发生变化。答案是确实会。

多元宇宙猜想的问题在于理论物理学家很难进行可靠的数学计算，以描述泡沫宇宙（bubble universe）的真实产生过程。在节奏宇宙的情形下，由于存在正弦膨胀和收缩的精确解，所以我们得以绕开涉及产生婴儿宇宙的数学问题和概念问题，后者似乎需要一个成熟的量子引力理论，但目前还没有这样的理论。音乐类比展现了巨大的潜

力，为解决微调问题开辟了新路径。这种建立在振动和循环基础上的类比十分精妙。

在撰写本书时，我正在努力寻找爵士乐与宇宙学之间的同构。我找到了一种新的宇宙学机制，解决了微调问题，并摆脱了多元宇宙猜想。这始于用柯川的《巨人的步伐》作类比，并把这个类比转换为一种同构。让我们回到柯川的独奏上来。众所周知，柯川的独奏通常会持续很长时间，有时甚至长达几个小时。像《巨人的步伐》这样的曲子有两个内蕴的周期。第一个周期是和声周期，第二个周期是节奏周期。在大多数情况下，移动的调性中心有三个，就像一个绕着五度圈旋转的三角形。和声旋转随时间不断重复自身。这就是柯川即兴演奏《巨人的步伐》等曲目时所遵循的框架。所以我想象着，每次歌曲重复循环的时候，即兴演奏者就开始演奏新的独奏，或者是基于他们演奏过的独奏曲目的偶排列。如果我们把这些音符映射到耦合常数上，把节奏周期映射到周期性的收缩与膨胀上，结果又会如何呢？

为了使耦合常数能在循环宇宙的情境下发生变化，耦合必须像场一样运动，而这些场必须与引力本身相互作用。结果是，弦理论自然地具有与引力相互作用的耦合场，而这些场会在反弹时期发生变化。当我发现耦合常数在收缩-膨胀时期的变化时，我便告诉了同事马塞洛·格雷斯（Marcelo Gleiser），他十分吃惊。“我们把这个想法写成一篇文章吧。”格雷斯说。最后他写成了那篇名叫《用循环宇宙解决微调问题》（*A Cyclic Universe Approach to Fine Tuning*）的论文（图17-3）。

A Cyclic Universe Approach to Fine Tuning

Stephon Alexander, Sam Cormack, Marcelo Gleiser[1]

[1]*Department of Physics and Astronomy, Dartmouth College Hanover, NH 03755*

(Dated: July 6, 2015)

We present a closed bouncing universe model where the value of coupling constants is set by the dynamics of a ghost-like dilatonic scalar field. We show that adding a periodic potential for the scalar field leads to a cyclic Friedmann universe where the values of the couplings vary randomly from one cycle to the next. While the shuffling of values for the couplings happens during the bounce, within each cycle their time-dependence remains safely within present observational bounds for physically-motivated values of the model parameters. Our model presents an alternative to solutions of the fine tuning problem based on string landscape scenarios.

图17-3　论文《用循环宇宙解决微调问题》

在演算了存在变化常数的循环宇宙的广义相对论方程之后，我们得到了一幅漂亮的图景，进而得以深入探索微调问题的解决之法。当宇宙膨胀时，耦合场并不会变化；能量潜藏起来，变成所谓的势能——它做好了随时上场的准备，但并没有被应用。由于宇宙经历了收缩-膨胀振动，耦合场获得了大量的动能。在这种情况下，耦合场就像山脚下的一个球，踢一下它，它就可以越过势阱（potential well），并改变自身的值。然而，踢的这一下会使它随机取一个与原来的周期有点关系的值。当宇宙再度膨胀的时候，耦合场会失去能量，重新落回到阱中。物理学家能证明耦合场的动量在每次反弹中都是随机的。想象在遥远的过去，宇宙经历了几万亿次连续的反弹。在反弹中，耦合会随机地变化。因此，我们恰好生活在某个耦合正好适合演化出生命的时代。根据这个理论，数十亿年后，宇宙会再度收缩，而耦合也会随之变化，未来的定律可能不再适用于我们已知的生命形式（图17-4）。

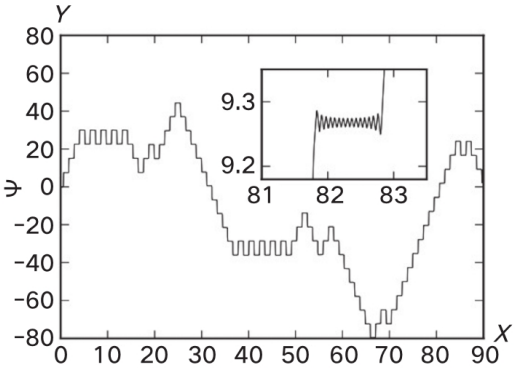
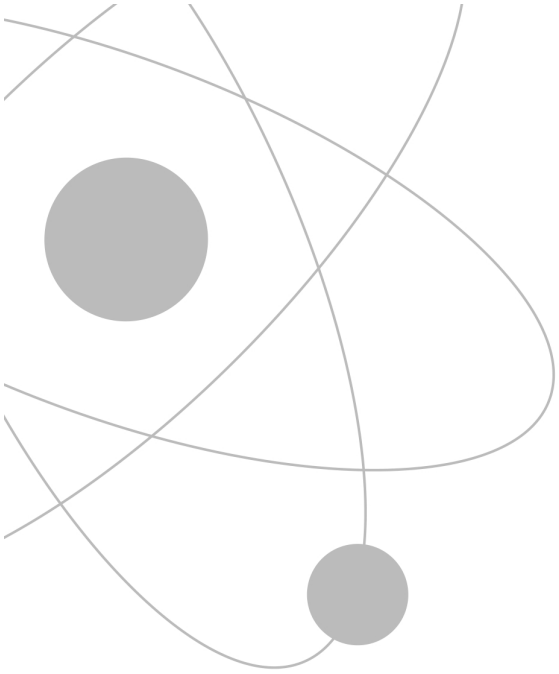


图17-4　耦合场的演化

注：一个关于耦合场如何在宇宙每一个周期的反弹中演化的数值解。*Y*轴表示耦合常数的数值，*X*轴表示宇宙时间。

我们的生命和赋予我们生命的事物——特殊的量子涨落、时空、行星与恒星，有可能是一个更大的整体的一个周期内的一部分，在某

种程度上这是一个非常动人的故事，而且足够令人满意。我们的宇宙可能只是简单地沿着某个循环运动，等待着下一次的即兴演奏。



18

星际空间

正是这些知识……在永恒的真理中，把我们与单纯的动物区别开来，并在科学中给予我们理性，提高我们对自身的认识……这些必要的、永恒的真理是所有理性认识的首要原则。它们是我们与生俱来的。自宇宙诞生开始，它们就是自然中的特定原则，因为它们体现了整个宇宙的本质。

——莱布尼茨

从构成核物质的夸克的对称模式到DNA的双螺旋结构，再到超星系团中的星系模式，宇宙中充满了各种各样的结构，甚至创造这些结构的物理定律本身也具有结构，这个结构由对称性原理和对称性破缺之间的连续作用所主导。在本书中，我们进行了一场声音之旅，讨论了宇宙中这些结构的展开有着音乐特征。和谐、对称性、不稳定性和即兴演奏的缺口共舞，共同协作以维持宇宙结构，这就像折叠的宇宙如柯川的独奏一样展开。宇宙结构的催化剂是量子场，它们在时空的收缩与膨胀之间趋于和谐。在整个时空背景中，这些场的原始振动就像一件乐器的振动体，创造了宇宙中的第一个结构。通过振动、共振和相互作用，微观世界与宏观世界联系在了一起。

爱因斯坦说得好：“宇宙的最不可理解之处，就在于它是可理解的。”物理定律、恒星、行星，乃至最终总结出这些定律的生命形式是如何形成的呢？当我们思索声音、即兴演奏和结构形成之间的联系，以及与最有趣的结构（即生命本身）之间的因果联系时，我们会不由自主地问：“宇宙是有目的地创造了这些结构吗？”当物理学家开始谈论目的时，我们就陷入了黑暗的泥沼。我撰写了这一章，而你们正在阅读我写下的这些文字。我们生而为人的意义之一，不就是为了寻找目的吗？毕竟，我们是数十亿年来结构形成的产物。在体现人类所付出的努力方面，音乐可能是最佳范例，一方面，它既有数学的根源，也有物理的根源；另一方面，它具有唤起强烈的情感和目的感的能力。探究音乐能深深地打动我们的原因是一件乐事，这是对我们

与宇宙之间的基本联系的一种听觉暗示。如果宇宙起源建立在声音模式的基础上，那么认为音乐本能地帮助我们探索宇宙的起源是否有些牵强呢？

我们已经知道，在大爆炸之后，声音模式的谱取决于自然界中的微调“常数”，就像试图让铅笔尖端向下以求得平衡，这些常数必须由未知的定律来微调，以形成有生命存在的宇宙结构。回想一下我们之前做的类比，宇宙就像一件乐器一样运作，它可以通过自我调节来演奏出恒星、星系乃至生命的宇宙之声，它必须掌握能实现这种自我调节的方法。通过这种音乐宇宙类比，我提出了一种和声（或称循环）宇宙理论作为微调问题的潜在解。如果宇宙像一个纯音一样经历了无限多的一系列收缩和膨胀，那么通过在收缩-膨胀的反弹之间即兴演奏新的数值，自然界中的常数就可以自我调节。当宇宙进入膨胀期（比如我们现在所处的时期）时，耦合场就被固定在反弹时期的数值。如果我们的宇宙在过去经历了很多个周期，那么这些耦合就会即兴演奏新的数值，最终将适合碳基生命的存在。不过，我们的疑惑依旧存在：在生命的形成和宇宙结构的演化背后到底隐藏着什么目的呢？在本章的剩余部分，我会通过一个思想实验来回答这个问题。约翰·柯川和他的曼荼罗将成为这个思想实验的主题。

把复杂简单化

柯川的勤奋是出了名的，有时他练着练着含着送气口就睡着了。他勤奋的动力源自他对宇宙意义孜孜不倦的探索。在晚年时，柯川将自己的乐器作为寻找音乐和宇宙之间的联系的工具，物理学家则利用实验仪器来做相同的事情。例如，柯川探索了无数种以II-V-I进行和弦演奏的方法，这在他的专辑《巨人的步伐》中体现得淋漓尽致。和布莱恩·伊诺一样，柯川也借助声音和音乐来揭示关于宇宙的永恒真

理。他把音调-时间的二维空间扩展到多维空间，后者包括声音处理，比如多音（同时演奏泛音）和纸片声。

爱因斯坦是柯川最崇拜的人之一。通过开展多学科研究，柯川努力寻找着现代物理学、东方哲学中的轮回、西方的和声与非洲多旋律之间的联系。爱因斯坦在物理学上的发现不仅受到物理学家的影响，也受到其他学科的影响。和爱因斯坦一样，柯川意识到，他必须超越西方经典爵士乐的典型风格，进而构造自己的音乐宇宙，并用音乐来表现宇宙。柯川应该成为科学家的灵感来源。通过自学，柯川从爱因斯坦的相对性原理中受益匪浅，并将其融入了自己的音乐。我们能从柯川的曼荼罗中看到物理学爵士乐的核心：爵士乐音乐家将理论物理学家的方法当作思想实验和战略工具，以进行即兴演奏。

在生命的最后阶段，柯川创作了三张专辑，分别为《恒星区域》《星际空间》《宇宙之声》。他研究了爱因斯坦的广义相对论和宇宙膨胀假说，并从中受到启发，创作了《星际空间》。他敏锐地意识到膨胀是一种反引力。在爵士乐队中，“引力”来自贝斯和鼓。柯川的独奏从《星际空间》中奔腾而出，并不断向远处扩张，最终挣脱了节奏乐器组的引力。柯川认为，宇宙的复杂性会渗入人类的行为，他练习了无数个小时，就为了成为这种宇宙之力与人类之间的纽带。在歌曲《木星》（*Jupiter*）中，柯川在自己的即兴演奏中从字面意义上沟通着木星卫星的轨道。

我还记得几年前在韦恩·肖特（Wayne Shorter）的75岁生日宴会上，我和柯川的儿子拉维·柯川（Ravi Coltrane）的谈话。我对拉维说，我正在探索他父亲的音乐和爱因斯坦的相对论之间的联系。拉维严肃地看了我一眼，然后说：“我父亲痴迷于数学与物理。”是什么让柯川对宇宙有着敏锐的直觉，并沉迷于其中无法自拔呢？

我有幸采访了声名卓著的作曲家、多乐器演奏家大卫·阿姆兰（David Amran），他曾与柯川讨论过后者对爱因斯坦的狭义相对论和

广义相对论的兴趣。1956年，他们在纽约西村（West Village）巴罗街上的波希米亚咖啡馆相遇。阿姆兰刚和迪齐·吉莱斯皮（Dizzy Gillespie）谈完，就来到坐在外面吃派的柯川身边。

> 阿姆兰问：“过得如何？”我说：“一切都好。”接着，他又问我：“你对爱因斯坦的相对论怎么看？”我并不认为他对我了解的知识多么感兴趣，我觉得他只是想与我分享他所掌握的知识而已。我脑中一片空白，而他则谈起了太阳系的对称性，后来又谈到空间中的黑洞、星座，乃至太阳系的整体结构，以及爱因斯坦如何把这些复杂性归结为一种非常简单的事物。然后他告诉我，他正试图在音乐方面做一些类似的事情，寻找一些来源于自然的东西，而这些东西关乎蓝调和爵士乐的传统。然而，对于音乐中什么是自然的，他有一种截然不同的看法。[1]

即使是那些理解了数学的纷杂之处的人，也会很容易就忽视了爱因斯坦的理论的核心：它是一个优美的物理理论，源自一个简单的原理，包含并联系着更复杂的定律。在狭义相对论中，“简单的原理”意味着光速不变性。我们所说的不变性是指一种有着不变量的变换。例如，我可以将自行车轮胎上的一个点旋转或变换到另一个点，而辐条的长度不会改变。对称性和不变量之间有着很深的联系。轮子是旋转对称的，因此，轮子的旋转变换不会改变轮子的形状。相似地，光速的不变性也反映了时空的基本对称性。无论一个观察者在时空中相对于另一个观察者的运动有多么复杂，光速始终被限制为不变量（常数）。

当这个原则体现在数学上时，它很自然地把电场与磁场统一起来。在这些彼此无关的方程中，所有表面上的复杂性都统一到了一组

简单的方程中，这组方程反映了光速的不变性。在此展示这组方程是很有必要的。我们来看看麦克斯韦方程组（图18-1）。

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$
$$\nabla \cdot B = 0$$
$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$
$$\nabla \times B = \mu_0 J + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$$

图18-1　关于磁场和电场的4个麦克斯韦方程

当我们考虑光速的不变性时，这4个方程都可以写成同一个：

$$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x^{\mu}} = J_{\nu}$$

在此有必要简单地讨论一下麦克斯韦方程组。正是因为时间与空间在四维时空连续体中的统一，爱因斯坦才得以构造出四维中的一种场。这种场又叫规范势（gauge potential），它描述了光子，以A_{μ}表示。在这种四维势场中，我们可以通过求导来定义电场与磁场，也可以定义规范场的四维导数d$va\mu$ - dμAv=$F\mu v$。

下标μ和v表示四维时空的方向，也就是μ=（t，x，y，z），由此我们可以定义四维导数 $d_{v} = (\frac{d}{dt}, \frac{d}{dx}, \frac{d}{dy}, \frac{d}{dz},)$。

方程$\frac{\partial F_{\mu\nu}}{\partial x^{\mu}} = J_{\nu}$的左边包含了电场与磁场的信息，但它们都被分组到了一个单一的事物$F_{\mu\nu}$里，$F_{\mu\nu}$即场强张量（field strength tensor）。右边的J_{ν}又叫4-电流，它与普通麦克斯韦方程组里的三维电流类似。因此，这个方程表示，四维场强张量是以四维电流为源的。这些四维事物的三维投影产生了不同的三维麦克斯韦方程。在三维中，光速的不变性并不是显而易见的，麦克斯韦方程只是光速不变性非常明显的四维事物的片段（影子）。这就像一个直立的自行车轮

胎投在地面上的影子，它看上去像一条线——圆周对称性不再明显。柯川意识到了这一点！从他与阿姆兰的对话来看，我相信他把这一点应用到了自己的音乐中。接下来，我会为此提供一些证据。

爱因斯坦对对称性的应用约束了时空中的场的相互作用。例如，在电磁场中，只有约束在四维光锥上运动的四维场才能相互作用，详见图18-2。为了更直观地理解这一点，我们可以想象自己被约束在一个半径为r的球体的表面。如果我们用坐标（x，y，z）表示球面上的一个点，那么只有满足$x^2+y^2+z^2=r^2$的值是被允许的，而不是x、y和z取任意值都可以。我们可以假设场的相互作用满足类似的四维方程，它们将场约束在四维光锥上。其他不在光锥上的相互作用都不被允许。

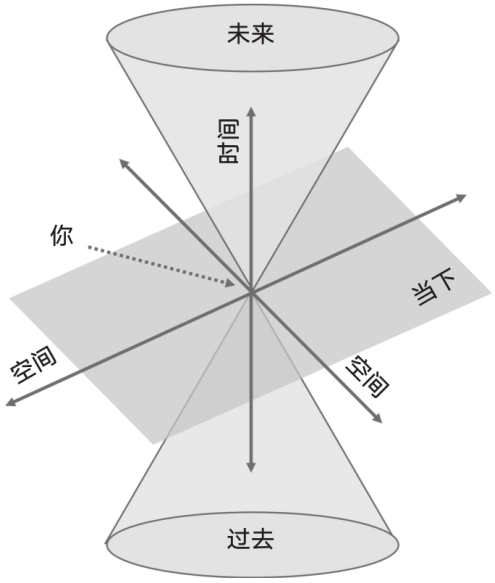


图18-2　闵可夫斯基空间中四维超曲面的时空几何

注：点在锥面上的变换使得光速恒定，或者说不变。

爱因斯坦对时空对称的应用还有一个作用，即规定曾经被认为彼此不相关的现象之间的联系。在此之前，相对性、时间和空间被太过简单地联系在一起，电场和磁场的情形与此类似。粒子可以随时间改变位置，但相对性把特定的空间长度和时间长度联系在一起，它们由

观测者本身的运动决定。对静止的观测者来说看上去像电场的场，对运动中的观测者而言也许像磁场。

我认为柯川把这些相对性的理念应用到了音乐上。我和尤瑟夫·拉蒂夫讨论过柯川的曼荼罗中暗藏的启示，这些启示给了我们线索。和爱因斯坦的光锥一样，柯川的曼荼罗是一种几何结构，统一了他在演奏曲目中使用的一些关键音阶与和声装置之间的关系。鉴于音乐练习是柯川音乐才能的核心，他的曼荼罗就相当于一种几何装置，揭示了音乐宇宙中的多种模式。当我意识到这一点时，我便开始以曼荼罗为工具，在曼荼罗模式的指导下构建音阶之间的联系。

在狭义相对论中，光速不变的事实会使其他的量发生“扭曲”，以保证在不同的参考系下光速的不变性。例如，对一列静止的火车来说，相对于静止的观测者，它在运动中的观测者眼中的长度会缩短。

类似地，如果我们在两个调上演奏相同的音符，那么这些音符听起来就会不同。它们不仅听起来不同，实际上在新的音阶中也占据了不同的位置。在C调上演奏A-B-C听起来像六度音阶、七度音阶和八度音阶，终止于分解的主音。如果在B调上演奏一组相同的音符，那么它们就会从七度音阶开始，经过主音，终止于高于主音小二度的音。它们与自己被演奏的调上的固定点（八度和五度）之间的联系完全不同。这些音符就像一列火车的长度，是单一固定的事物（音符A或者音符B），但在给定的调上被演奏时，它们就会根据主音的固定值以及调之间的间隔发生变化、扭曲。柯川的曼荼罗就体现了这种观点，但它更优美，其中的五度音阶、三全音和四度音阶之间的联系是固定的结构，这些结构像一个基点，把相对音阶彼此之间联系起来。

乍看上去，柯川的曼荼罗令人望而却步。为了找出它的基础结构，我们将它简化为一个描述不变性的框架。与狭义相对论类似，当我们得到了这个不变结构之后，我们就可以从被不变性决定的相互作用中生成动力学中的复杂性。我们首先要确定不变性，或者说让我们

忽略了音符本身的几何图形。我们立刻就会看到一块表，每个小时由一组3个音符表示。例如，在12点，我们看到一组3个音符（B、C、升C）作为1号。如果我们将每一个组标记为一个点，那么这一组3个音符可以进一步简化。由此我们得到只显示12个小时的表盘，它简化为了西方音阶中的十二音循环。柯川的曼荼罗中还有一个古怪的地方，即柯川把5个重复的音符C与一颗五角星连了起来。我们得到的是以下意义上的循环几何图形：如果你数数这些音符，会发现60个周期性重复的音符。在这个周期中，12个音符会在60音循环中生成5个音符C——这正是曼荼罗中的星星。因此，柯川的曼荼罗是一种循环中的循环（图18-3）。

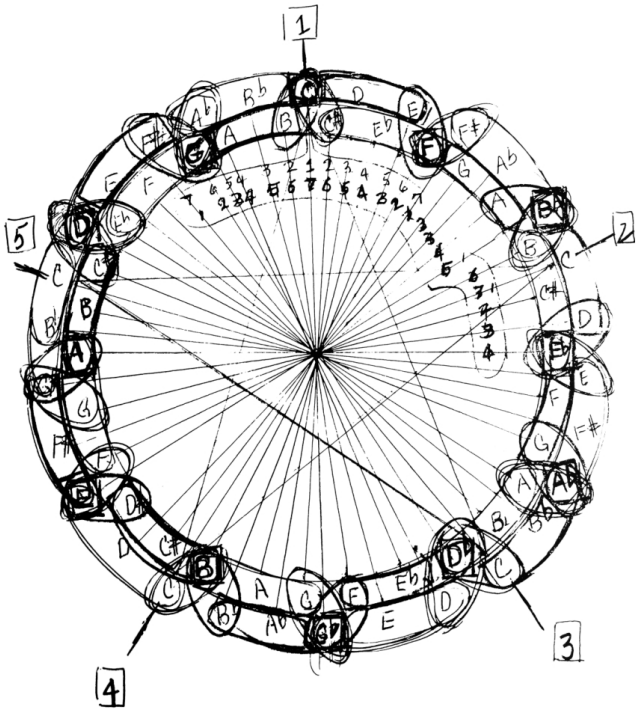


图18-3　柯川的曼荼罗

注：它揭示了60音循环中的五音循环的几何图形。图片提供者：拉蒂夫。

当确定了五角星上所有的音符C后，我们就得到了西方音乐中的十二音体系。然而，当我们把曼荼罗中的5个音符C看成1个时，信息就丢失了。此处的“信息”指的是几何图形，或者是60音循环中的五边

形。如果试着在十二音体系中保留这栋“五角大楼”，我们就会得到一个非常有趣的音阶——五声音阶。基于柯川和阿姆兰的对话，有人也许会猜测，他“正试图在音乐方面做一些类似的事情，寻找一些来自自然的东西，而这些东西关乎蓝调和爵士乐的传统”。实际上，世界各地的文化中都存在着五声音阶，甚至可以追溯到2 500年前的中国和希腊。在格列高利圣咏[(22)]、黑人灵歌（如《无人知道我的忧愁》[*Nobody Knows the Trouble I've Seen*]）、苏格兰音乐（如《友谊地久天长》[*Auld Lang Syne*]）、印度音乐、爵士乐标准曲（如《我找到了节奏》[*I Got Rhythm*]、《可爱的乔治亚·布朗》[*Sweet Georgia Brown*]）和摇滚乐（如《天国的阶梯》[*Stairway to Heaven*]）中，这种音阶广泛存在。柯川一直寻找的正是音乐中普遍存在的东西，而他的初衷是确定音乐的哪个方面在人类文明中是普遍存在的。他还说，他想要找到来自自然的音乐。五声音阶可以由5个纯五度构成。纯五度是傅立叶级数的二次谐波，它是自然生成的，所以满足了柯川所说的“寻找一些来自自然的东西”。

创造一个结构，它终将理解宇宙自身

然而，最具说服力的证据来自柯川最著名的两首曲子——《至高无上的爱》和《星际空间》，二者都是基于五声音阶（图18-4）。我的朋友斯泰西·迪拉德（Stacy Dillard）是纽约著名的次中音萨克斯手，他认为五声音阶是爵士乐即兴演奏的纲要。换句话说，与爱因斯坦的不变性理念一样，五声音阶是爵士乐即兴演奏的复杂性得以展现的基石。这并不意味着五声音阶是唯一的基石，不过它引出了一个问题：这种相对简单的音阶为何具有如此巨大的音乐潜力？

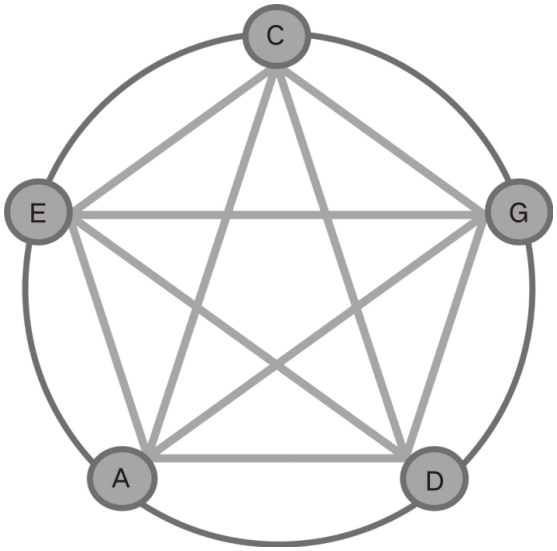


图18-4　C大调五声音阶的五边形对称性

柯川的曼荼罗还包含其他由循环几何得来的美丽关系，并与阿诺尔德·勋伯格（Arnold Schoenberg）和奥利维埃·梅西安（Olivier Messiaen）形成共鸣，他们也把集合论的理念应用于作曲中。在爵士乐即兴演奏中，三全音替代是一种非常重要的方法。这实际上意味着，在和弦与和弦之间的旅程中，我们可以用一个更简单的和弦来替代后面的和弦。我们已经知道，II-V-I进行是爵士乐与西方古典音乐中最普遍的进行之一。三全音只不过是12-调周期中的反射对称（图18-5）。所以在C调中，V是G-属和弦，其对G的镜像／三全音是D-降属音。因此，当我们从G属音转到C时，我们可以用D-降属音来代替G属音。这非常好，因为D-降属音离II（也就是D）只有半步。柯川的60音循环曼荼罗也包含这种具有三全音的反射对称性。

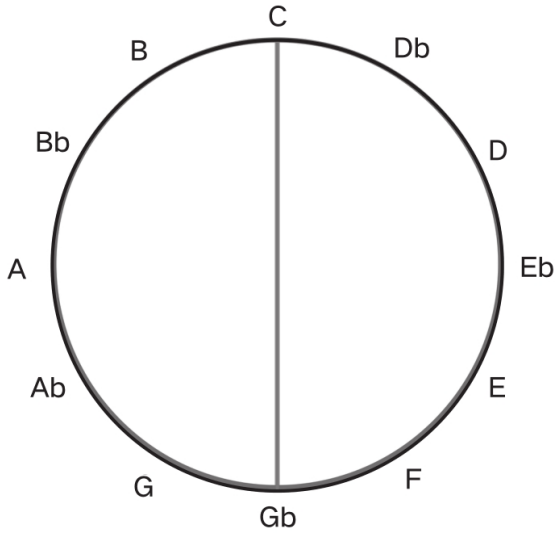


图18-5　某个音符关于其三全音的镜像反射

注：例如，C的三全音是F#，F#的三全音是C。

圆上的三音符组出乎意料地产生了神秘的全间隔四度音阶。例如，就数字1所在的位置，我们从音符C开始，并且追循圆上接下来的4个音符，我们会得到C、C#、E、F和F#，这就是一个全间隔四度音阶。澳大利亚钢琴家肖恩·韦兰（Sean Wayland）认为，全间隔四度音阶可以作为一种演奏《巨人的步伐》中和弦变换的手段。不止如此。注意，柯川勾勒出了一个正方形，其中包含三音符组。这些音符正好是五音循环，后者生成了五声音阶。最终，柯川概括出了一个最常用的对称音阶——全音音阶，它的音符占据了内环与外环。因此，曼荼罗是柯川创造的一幅令人惊叹的几何作品，它将这些普遍存在的重要音阶联系在了一起，就像时空变换把长度收缩与时间膨胀、电场与磁场联系在一起一样。

《宇宙的结构》这本书不仅涉及音乐与宇宙学之间的类比，也讨论了音乐和即兴思维在物理学研究中的重要性。理论物理学家举例证明了柯川的音乐之道。我们使用各种数学工具与概念工具，并通过大师（如爱因斯坦和理查德·费曼）提出的实例来进行练习。类似地，像柯川这样的爵士音乐家则通过无数个小时的练习来掌握经典。然

而，无论是对爵士音乐家还是理论物理学家来说，仅仅掌握已有的知识是远远不够的，还要进行创新。

人类是唯一能发现高等数学的生物，是唯一能创造并规范音乐的生物。如果宇宙中的美和物理学与音乐中的美和物理学是相互联系的，那么这种联系只存在于人类的大脑中。里克·格兰杰（Rick Granger）、捷尔吉·布扎基（György Buzsáki）和安妮·帕特尔（Ani Patel）等神经科学家仍在努力研究大脑是如何感知、学习、记忆、计划和预言的。然而，老鼠、狗和熊也能做这些事情。那么，是什么让人类的大脑与众不同呢？是什么让我们的大脑能完成非人类的大脑所不能做的事情，比如欣赏音乐、理解数学，以及创造新的事物——作曲、即兴演奏、发现关于宇宙的新的数学事实？

少数像柯川这样的音乐家具有与生俱来的即兴演奏能力，能发现和声里隐藏的模式和规律，并利用这些发现来创造全新的旋律序列。而少数像爱因斯坦这样的科学家则能发现一些新的规律，这些规律逃过了其他伟大科学家的法眼，比如把麦克斯韦方程组简化为一个统一的方程。

也许我们天生就有着和爱因斯坦一样的数学能力，以及和柯川一样的即兴演奏天赋，也许他们的独特之处就在于能把这些天赋推进到远超常人的地步。当神经科学家找到了感知与思维的基础，也许下一步就是去研究大脑的共性和差异，以及柯川和爱因斯坦的洞见与发现来自他们大脑中的哪一部分——也许这需要新的物理学。现在，一些关于大脑的研究正在破解这些难题：当我们感知到音乐的复杂时，我们的大脑中发生了什么？人类的大脑如何以不同于其他动物的方式来处理我们周围的环境，并给我们带来了数学、音乐即兴演奏和语言？

套用《动物农场》（*Animal Farm*）中那头声名狼藉的猪的说法，显然有些人的大脑比其他人的更独特。爱因斯坦和柯川向我们展示了一些其他人没能发现的事物。无论在狭义层面还是在广义层面，当我

们开始了解我们的大脑时，也许神经科学就将向我们展示音乐与物理之间的联系，以及我们人类这种独一无二的物理存在是如何寻获并理解这些联系的。

要想找到这些问题的答案，也许我们需要在物理学、艺术和神经科学的连接点上取得根本性进展。通过探究物理学和音乐是如何在人类的大脑中同时出现的，我们或许能揭示出音乐形式与物理形式之间的深层联系。毕竟，无论人类的大脑有多神秘，它都是宇宙中最复杂的结构。

莱布尼茨是微积分的发现者之一，他认为宇宙中的可约元素（单子）或许包含着宇宙的本质。源自并遵循物理定律的人类大脑是如何反过来理解物理定律的？至今这仍是一个谜。如果如我所说，宇宙的基本功能之一是即兴创作它的结构，那么当柯川即兴演奏时，他所做的事情和宇宙所做的事情就是相同的，即创造一个结构，它终将理解宇宙本身。

后记

在任何科学发现的背后都有着形形色色的人，与他们精彩纷呈的故事。于我而言，我即兴发挥、不拘一格的道路是由我的物理学和音乐导师们带领的。在过去的30年里，我很荣幸能在吉姆·盖茨的教导下，学习理论物理的秘密。在1969年时还是一个又高又瘦的年轻人的他，穿着喇叭裤、留着一头非洲式的发型走进了麻省理工学院那条“恶名在外”的无限长廊，开始了他成为一位物理学家和宇航员的梦想。那时，年轻的吉姆·盖茨还没有与殁于“挑战者号”航天飞机事故的宇航员罗纳德·麦克奈尔（Ronald McNair）成为朋友。在那个开创性的时代里，麻省理工学院物理系招收了一批黑人学生，包括雪莉·杰克逊（Shirley Jackson）与罗纳德·麦克奈尔，而这仅在约翰·肯尼迪总统要求立法“赋予所有美国人使用一切向公众开放场所的权利——包括酒店、饭店、剧院、零售店，以及其他类似的场所”，以及“对投票权更大力度的保护”。这些物理学家中的先驱为我们这一代科学家的蓬勃发展铺平了道路。

此后，吉姆继续他在麻省理工学院的学习生涯，并最终拿到了物理学博士的学位。他的学位论文是麻省理工学院第一篇关于超对称性的学位论文，之后这篇论文成了一本大部头的教科书，即《超对称的一千零一课》（*A Thousand and One Lessons in Supersymmetry*）。之后，他拿到了哈佛大学的教职，与迈克尔·佩斯金（正好是我的博士后导师）、爱德华·威腾和沃伦·西格尔（Warren Siegel）共享一间办公室。他们是这个领域中最优秀的代表人物。在那些年中，吉姆与我主要谈论物理学。当我在写这本书的时候，我与吉姆聊到他在哈佛大学度过的那段时光。他说，他与那时的办公室室友成了朋友，并且一直保持同事关系直到今天。然而，那时他被同事们的光芒所掩盖。



图19-1　左图：吉姆的学生时代。右图：吉姆与霍金合影

1977年，吉姆在哈佛大学工作期间收到了一封意料之外的来自阿卜杜勒·萨拉姆的信，后者彼时由于发现弱力与电磁力之间的统一而刚获得诺贝尔奖不久。萨拉姆是吉姆一代理论物理学家眼中的传奇人物，所以想想大家听到萨拉姆邀请吉姆访问自己团队时的反应吧！当时，萨拉姆正在从事超引力方向的研究，而吉姆是该领域的年轻先行者之一，所以他邀请吉姆加入自己的研讨会。在获得诺贝尔奖之后，萨拉姆建立了国际理论物理中心（ICTP），其任务旨在“发展高水平的科学项目，牢记发展中国家的需求，为各国科学家提供一个用于学术交流的国际论坛”。在这个论坛上，吉姆在自己的职业生涯中首次遇到了来自非洲、欧洲和中东各国以及中国等世界各地的物理学家。他意识到，物理学确实是一桩全球性的事业，而不仅限于欧美——这是主流媒体中常见的误导。

在研讨会结束后，萨拉姆与吉姆共进午餐时，吉姆的脑海中满是点子与问题想要与这位行业领袖分享。这时，萨拉姆蓦然对吉姆说：“总会有一天，人们会像做爵士乐一样来进行物理学研究。”

这是对这种即兴发挥、包容、文化与智力贡献的称为“爵士乐”的音乐多么高的称赞与认可啊！萨拉姆的言论体现出，一位创造了一

种像爵士乐一样动感十足、隐喻丰富的音乐文化的天才是如何促进物理学的发展的！学习如何演奏我们称为爵士乐的音乐是一个终生过程。在其有据可查存在的近百年中，这种音乐已发展成一个同时具有智力和艺术要求的系统。例如，比波普爵士乐99.9%是由诸如查理·帕克、迪齐·吉莱斯皮、巴德·鲍威尔、马克斯·罗奇（Max Roach）和瑟隆尼斯·孟克（Thelonious Monk）等伟大之人（仅举此几例）在音乐学院之外发展起来的。在这些艺术家生活的年代，种族歧视还是“事实上的法律”，私刑还在不时被动用。所以，这些音乐为什么可以如此伟大，以至于它后来被称为“美国古典音乐”，很可能是美国产生的最有代表性的艺术形式之一？在经典的《英雄与蓝调》（*The Hero and the Blues*）中，温顿·马萨利斯的导师之一艾伯特·默里（Albert Murray）指出，爵士传统的伟大背后是“对抗性合作”。在当时明尼苏达大学即将出版的《默里谈音乐》一书中，默里在与马萨利斯的对话中如此说：

> 让我们从拙作《英雄与蓝调》中借来另一个概念，即“对抗性合作”。在某种意义上，这个词汇自相矛盾，但它总归是一种非常实用的记忆方法。如果你没有足够多的反对意见，那么你就无法向前发展。若想成为一位伟大的冠军，你必须有着同样出色的竞争对手。若想成为一位伟大的屠龙英雄，你要先有龙可屠。

然而，即便存在着剧烈的竞争来促进大家的成长，爵士乐音乐家们也怀有包容心——任何人都可以走上舞台展现自我。如果你表现出色，那么下次就还会收到邀约。这一传统也是非常包容的。我曾是最不熟练的乐手，但依然受邀与威尔·卡洪（Will Calhoun）、马克·卡里（Marc Cary）与约翰·贝尼特斯（John Benitez）等伟大乐手同台演出（他们都是格莱美奖获得者）。即使我的独奏不是最精雕细琢

的，但有时也会妙手偶得一些有趣的，甚至怪异的片段，威尔都会注意到这些想法，并有时会将其结合到另一首歌中。

因此，当我听到萨拉姆的愿景，即会有一天，物理学可能看上去会像爵士乐一样，我是这样解读的：如果有一天，当物理学共同体像爵士乐共同体一样，能够抛弃自身信条、兼容并包来自所有人的贡献时，它将会达到新的高度，以及让我们能够解决曾经认为不可能解决的问题。我将爵士乐与物理学调和的路就是一个活生生的例子，展示了一小群物理学家是如何本着爵士乐传统的精神包容我，并让我与他们一同即兴创作物理学，并同时推动着我超越自己的极限。

致谢

特别感谢我的编辑T. J. Kelleher与Lara Heimert。感谢Basic Books与Perseus的全体工作人员：Helene Barthelemy、Sandra Beris、Cassie Nelson、Liz Tzetzo，是你们将这本书的出版付诸现实。永远感谢Dagny Kimberly Yousuf协助我将最初的手稿整理成形，以及从写作之初便不断赋予我灵感与支持。感谢Max Brockman与Brockman公司的员工，是你们促成了本书的付梓。

我还要感谢我的朋友、家庭成员以及同事，是你们为我提供了大量的灵感、反馈、创意以及鼓励：Rome Alexander、Steven Beckerman、Robert Caldwell、Will Calhoun、Steve Canon、Michael Casey、KC Cole、Ornette Coleman、Diego Cortez、François Dorias、Brian Eno、Everard Findlay、Edward Frenkel、Indradeep Ghosh、Melvin Gibbs、Marcelo Gleiser、Rebecca Goldstein、Mark Gould、Rick Granger、Daniel Grin、Sam Heydt、Chris Hull、Chris Isham、Beth Jacobs、Clifford Johnson、Brian Keating、Jaron Lanier、Yusef Lateef、Harry Lennix、Arto Lindsa、Joao Magueijo、Brandon Ogbunu、Steve Pinker、Sanjaye Ramgoolam、Erin Rioux、Tristan Smith、Lee Smolin、David Spergel、Greg Tate、Greg Thomas、Spencer Topel、Gary Weber。最后，还要感谢Salvador Almagro-Moreno为本书制作的图表。

注释

前言　以爵士之眼，透视物理学之奥秘

1．Yusef Lateef, *Repository of Scales and Melodic Patterns* (Amherst, MA:Fana Music, 1981).

2．Yusef Lateef, *The Gentle Giant: The Autobiography of Yusef Lateef*, with Herb Boyd (Irvington, NJ: Morton Books, 2006).

第一部分　当物理学与音乐相遇

01　巨人的步伐

1．有一种观点认为，鸟类的叫声如音乐一般也是为了听起来悦耳。

2．有些作者把音乐的“维数”扩大了。我向读者推荐一本美妙的书：*This Is Your Brain on Music: The Science of a Human Obsession*, by Daniel J. Levitin（New York: Plume, 2007），其中包含了对音乐知觉12个维度的完整介绍。

3．根据分形几何的先驱之一贝努瓦·曼德尔布罗特（Benoit Mandelbrot）的说法，“巧妙地组合在一起，这种组合应该是和谐的，就像海岸线那样”。有趣的是，在著作《分形学：形态、概率和维度》（*Fractals: Form, Chance, and Dimension* [San Francisco: W. H.Freeman, 1977]）中，曼德尔布罗特声称，星系自组织为分形结构。不久之后，天体物理学家卢恰诺·彼得罗内罗（Luciano

Pietronero）就发现星系系统确实具有分形结构，虽然这种说法还存在争议。

4. Malcolm Brown, “J. S. Bach + Fractals = New Music,” science section, *New York Times*, April 16,1991.

5. Charles W. Misner, Kips S. Thorne, and John Archibald Wheeler, *Gravitation* (San Francisco: W. H. Freeman, 1973).

02　寻梦物理学，无所畏惧地向最难的问题发起进攻

1. 这个模型也叫海森堡XXX模型，感谢爱德华·弗伦克尔（Edward Frenkel）指出这个问题。

2. 磁性材料具有滞后曲线，也即磁铁对外加磁场磁性的“记忆”。

03　通向宇宙结构的所有河流

1. 在爵士乐中，当独奏者即兴演奏时，歌曲的某一部分往往会不断重复。在这部分结束之前，会有一段和声运动（转场），以使这首歌曲回到开头阶段。

2. 与玛格丽特·盖勒的私人通信，2015年10月。

3. Margaret J. Geller and John P. Huchra, “Mapping the Universe,” *Science* 246, no. 4932 (November 17, 1989): 897–903, doi: 10.1126/science. 246. 4932.897, PMID 17812575, retrieved May 3, 2011.

4. 稍后，我们将讲到弦理论会解决这种无穷大问题。

第二部分　音乐与那些科学家的故事

04　弦论，审视美丽宇宙之声

1．Michio Kaku, “The Universe Is a Symphony of Strings,” Big Think, http://bigthink.com/dr-kakus-universe/the-universe-is-a-symphony-of-vibrating-strings, accessed November 28, 2015.

2．在物理学领域，尤其是在量子力学领域，有很多关于理论如何产生的阐释问题。有些物理学家认为不必进行主观解释，只要计算结果就可以了，因此才有了“闭上嘴，动笔算”一说。有人认为这个说法是保罗·狄拉克和理查德·费曼发明的，也有人认为是固体物理学家戴维·默明（David Mermin）提出的。

3．Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory: The Scientist's Search for the Ultimate Laws of Nature* (New York: Pantheon, 1993), 130. 狄拉克以对美的追求而著称，他后来意识到，当爱因斯坦的假设被纳入描述电子运动的方程时，一种隐藏的对称性就出现了。把正号变成负号在物理学上相当于改变电子的电荷。出乎他意料的是，这个结果在物理上与量子力学是相容的，这意味着一个先前未知的粒子的存在。一年后，这种与电子电荷相同、电性相反的反电子（正电子）被发现，狄拉克因此获得了诺贝尔奖。

4．在第11章中，我们将通过音乐理论中的理念来讨论对称性自发破缺的概念和数学理念。

5．David Demsey, “Chromatic Third Relations in the Music of John Coltrane,” *Annual Review of Jazz Studies* 5 (1991): 145–180; Demsey, “Earthly Origins of Coltrane's Thirds Cycles,” *Downbeat* 62, no. 7 (1995): 63.

05　毕达哥拉斯之梦

1. Marcelo Gleiser, *The Dancing Universe: From Creation Myths to the Big Bang* (Lebanon, NH: University Press of New England, 1997).

2. Jamie James, *The Music of the Spheres* (New York: Grove Press, 1933),64:“Musica instrumentalis is harmonious because it reflects the perfection of the cosmos in the world of ideal forms; an octave sounds harmonious to human ears because the rhythms of the music are in concord with our own internal rhythms . . . the musica humana.”

3. Gleiser, *The Dancing Universe*.

4. Willie Ruff and John Rodgers, *The Harmony of the World: A Realization for the Ear of Johannes Kepler's Astronomical Data from Harmonices Mundi 1619*, Kepler Label, August 3, 2011, compact disc.

5. Johannes Kepler, *The Secret of the Universe: Mysterium Cosmographicum*, trans. A. M. Duncan (New York: Abaris Books, 1981).

06　伊诺，音乐宇宙学家

1. “Generative Music: Evolving Metaphors, in My Opinion, Is What Artists Do,”a talk Brian Eno delivered in San Francisco, June 8, 1996.

07　在爵士乐中，打破物理学的界限

1. AAJ Staff, “A Fireside Chat with Marc Ribot,” *All About Jazz*, February 21, 2004.

2. www.allaboutjazz.com/a-fireside-chat-with-marc-ribot-marc-ribot-by-aajstaff.php, accessed November 28, 2015.

08 无处不在的振动

1. 这里有个小技巧，sin（t）的二阶导数是-sin（t）。

2. Larry Hardesty, “The Faster-Than-Fast Fourier Transform,” Phys. Org, January 18, 2012, http://phys.org/news/2012-01-faster-than-fast-fourier.html, accessed November 28, 2015.

3. 余弦函数可以由正弦波变换而来，它与正弦波一样基本。从技术上说，它也会在这里出现，只不过它是正弦函数的导数，所以简化后的方程满足了我们的目的。

第三部分 宇宙本身是否就是一件乐器

09 野心勃勃的物理学家们

1. P. W. Anderson, “More Is Different,” *Science* 177, no. 4047 (1972):393–396.

11 会发声的黑洞

1. “Interpreting the ‘Song’ of a Distant Black Hole,” Goddard Space Flight Center, NASA, November 17, 2003,

www.nasa.gov/centers/goddard/universe/black_hole_sound.html, accessed November 28, 2015.

12　声音与静默，宇宙结构的和谐旋律

1. 拉希德·苏尼亚耶夫（Rashid Sunyaev）与雅可夫·泽尔多维奇（Yakov Zel'dovich）同时也得出了这个结论。

2. 也有例外，比如即便这种基音在物理声谱中是缺失的，我们仍可以感受到其音高。

3. John Cage, "Forerunners of Modern Music," in *Silence: Lectures and Writings* (Middletown, CT: Wesleyan University Press, 1961), 62.

13　马克·特纳的量子头脑之旅

1. Devin Leonard, "Mark Coltrane Escapes the Shadow of John Coltrane," *Observer*, June 26, 2009.

2. Roger Highfield and Paul Carter, *The Private Lives of Albert Einstein* (New York: St. Martin's Griffin, 1995).

14　费曼的爵士风

1. www.azquotes.com/author/9502-Wynton_Marsalis/tag/jazz, accessed November 18, 2015.

2. Gunther Schuller, "Sonny Rollins and the Challenge of Thematic Improvisation," *The Jazz Review*, November 1958.

3. Jonah, “The Graphene Electro-Optic Modulator,” *The Physics Mill*, May 25, 2014.

15 宇宙的共振

1. Rhiannon Gwyn et al., “Magnetic Fields from Heterotic Cosmic Strings,” *Physics in Canada* 64, no. 3 (Summer 2008): 132-133. 我和合作者在一篇论文中提出，研究原始磁场起源的方法有可能来自杂化弦理论。杂化弦可以像导线一样载有电荷、生成磁场。如果早期宇宙中充满了由这种杂化的“宇宙弦”构成的匀质网络，那么就可以产生适当数量的原始星系磁场。

第四部分 我们的音乐宇宙

16 噪声之美

1. Allan Kozinn, “John Cage, 79, a Minimalist Enchanted with Sound, Dies,” *New York Times*, August 13, 1992.

2. 零自旋暴胀场由标量函数描述，比如$F(x)$。自旋为1的场（如电磁场）由矢量函数描述。矢量函数中矢量的指标提供了有关场极化的信息。

3. 在量子场论中，场通常会发生自相互作用。这往往关系着场从一个粒子中创造多个粒子的能力。自相互作用也描述了量子场中所储藏的势能。

17 音乐宇宙

1. 对于在弦理论中实现乔奥·马古悠的机制，我和希腊弦理论学家伊莱亚斯·科瑞兹斯（Elias Kiritsis）各自找到了更好的方法，但都要依靠D-膜。黑洞也可以存在于五维宇宙中。银河系的中心是人马座A*（Sagittarius A-star），它由一个超大质量的黑洞以及围绕其旋转的恒星构成。假定一个D-3膜宇宙正在围绕一个五维黑洞旋转，我和科瑞兹斯发现，膜宇宙中的光速将随着它与黑洞之间距离的变化而改变。

2. Nima Arkani-Hamed et al., “Ghost Condensation and a Consistent Infrared Modification of Gravity,” *Journal of High Energy Physics* 405 (2004): 74.

3. 如果宇宙的体积变得更大，那么熵也会变大，这意味着一个更长的周期。

18　星际空间

1. Ben Ratliff , *Coltrane: The Story of a Sound* (New York: Farrar, Straus and Giroux, 2007).

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的 “湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

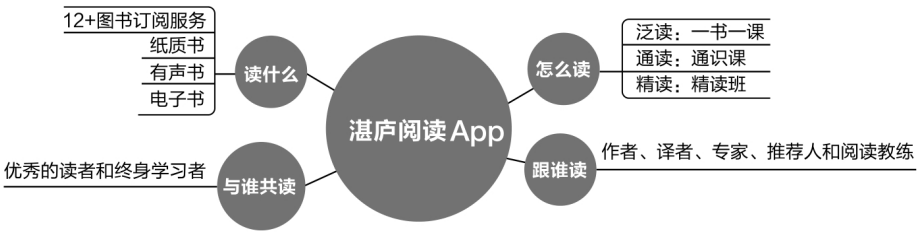
- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：

安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！



延伸阅读

《星际穿越》

◎ 诺贝尔物理学奖得主、天体物理学巨擘、同名电影幕后唯一科学顾问基普·索恩巨献，媲美《时间简史》，国家最高图书奖文津奖获奖图书。

◎ 基普·索恩教授写给所有人的天文学通识读本，用通俗易懂的优美语言、妙趣横生的电影拍摄故事，揭示电影幕后的科学事实、有根据的推测和猜想，解开黑洞、虫洞、星际旅行等一切奇景的奥妙。

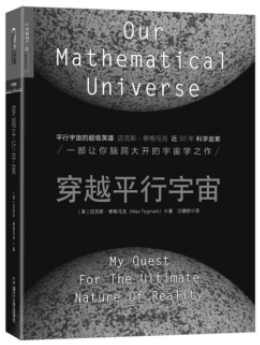


使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-06685-6
9 787213 066856

《穿越平行宇宙》

◎ MIT物理系终身教授，平行宇宙理论世界级研究权威迈克斯·泰格马克近30年科学追索，一部让你脑洞大开的宇宙学之作！关于平行宇宙的所有脑洞，这一本就够了！

◎ 一场关于现代宇宙学的盛大巡礼。跟随平行宇宙的超级英雄泰格马克教授穿越平行世界，共同找寻宇宙的本质，一探物理学前沿和哲学边界上那些令人叹为观止的奇景！

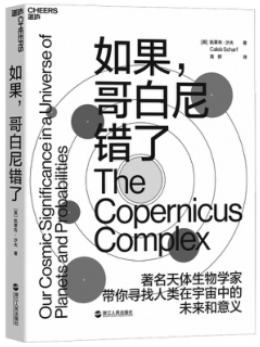


使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-07980-1

《如果，哥白尼错了》

◎ 著名天体生物学家凯莱布·沙夫重磅新作！作者用诗一般的语言和奇特的想象，带领我们进行一场科学探险，寻找人类在宇宙中的未来和意义。

◎ 《星期日泰晤士报》年度最佳科学图书，《出版商周刊》年度十大科学图书，爱德华·威尔逊科学写作奖获奖图书。



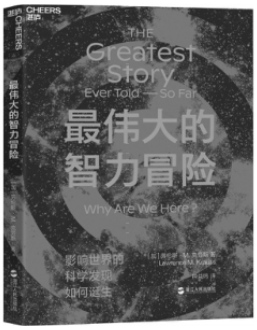
使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09390-6

《最伟大的智力冒险》

◎ 著名理论物理学家、宇宙学家，引力波领域研究专家劳伦斯·M.克劳斯重磅新作！

◎ 在本书讲述的伟大故事里，世界各地的科学家们竭尽所有的创造力、智力与勇气，一起探索我们无法感知的真实世界。情节起伏，千回百转，带领读者穿越了人类历史及科学发展史，激发出无穷的想象力。

◎　史蒂芬·平克、理查德·道金斯、马丁·里斯、布莱恩·格林等学界大咖联袂推荐。



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09502-3
9 787213 095023

---

(1)原文为“autophysiopsychic”，该词似乎是作者自造的词汇，此处根据三个构词部分直译。——译者注

(2)英文中“自由”与“免费”是同一个词，作者在这里玩了一个文字游戏。——译者注

(3)　“纸片声”一词由爵士乐评人艾拉·吉特勒（Ira Gitler）创造，形容柯川发展出的音乐风格：每分钟上百个音符如瀑布奔流，以达到声音质量“薄如纸片”。——编者注

(4)拉格是印度古典音乐中的旋律体系，被称为印度古典音乐的灵魂。——编者注

(5)连复段：短小、独立的音乐乐句。在摇滚和重金属音乐中很好辨识，是一首歌曲的支柱，节奏、旋律与和弦均来源于此。——编者注

(6)秒差距是一个宇宙距离尺度，1秒差距为648 000/π天文单位，约等于3.26光年。——编者注

(7)疑为作者笔误，第谷是丹麦人。——编者注

(8)盖茨比是司各特·菲茨杰拉德（Scott Fitzgerald）的小说《了不起的盖茨比》（*The Great Gatsby*）中的主人公。——编者注

(9)李·斯莫林被誉为“新时代的爱因斯坦”，是加拿大圆周理论物理研究所创始人之一。斯莫林关于量子引力的研究都写在了他的畅销书《时间重生》之中，该书中文简体字版已由湛庐文化引进，浙江人民出版社2017年出版。——编著注

(10)乌德琴是一种阿拉伯弦乐器。——编者注

(11)叮砰巷是一个地名，位于纽约第五大道和百老汇街之间，曾是流行音乐出版中心，后来成为流行音乐史上一个时代的象征、一种风格的代表。——编者注

(12)比博普是一种强调和声变化与个人即兴的爵士乐。——编者注

(13)良定义指无歧义的、不会导致矛盾的、符合其应满足的所有要求的定义。——编者注

(14)这里是在讽喻物理学家的某些模型太过抽象化与理想化，与现实问题脱节。类似的提法出自一个笑话：农场主请物理学家解决鸡场的瘟疫问题，物理学家经过一番测量与建模之后，说：“问题搞定了，但是我的理论只适用于真空中的球形母鸡。”——译者注

(15)开尔文是国际单位制中的温度单位，符号为K。——编者注

(16)琶音是一种和弦，其各个音符以升序或者降序排列。

(17)在爵士乐曲目的语境中，转录是指为爵士乐唱片中的独奏编写注释的行为。爵士乐的学习者会分析独奏的声音与和弦变换的关系，并记住独奏的部分内容，以丰富自己的音乐词汇。

(18)原书如此，此处存疑，磁偶极子的场强应该和距离的三次方成反比，而且远场情形才是如此。——译者注

(19)丽莎·兰道尔曾在其著作《弯曲的旅行》中对该观点进行了详细的论述。该书中文简体字版已由湛庐文化引进，浙江人民出版社2016年出版。——编者注

(20)源自希腊语“eureke”，指通过神秘灵感获得重大发现的时刻。——编者注

(21)熵指一个系统内在的混乱程度。——编者注

(22)格列高利圣咏是西方教会单声圣歌的主要传统，是一种单声部、无伴奏的罗马天主教宗教音乐。——译者注

CHEERS
湛庐

宇宙的起源

科学大师书系

[英]
约翰·巴罗 著
John Barrow
黄静 译

The Origin of the Universe

权威天体物理学家约翰·巴罗
为你揭晓宇宙起源之谜

天津出版传媒集团
天津科学技术出版社

版权信息

本书纸版由天津科学技术出版社于2020年6月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：宇宙的起源

著者：约翰·巴罗

电子书定价：62.99元

The origin of the universe / John D. Barrow

Copyright © 1994 by John D. Barrow

Published by BasicBooks, A Member of the Perseus Books Group

All rights reserved.

献给丹尼斯和比尔，

你们是宇宙学家，是绅士，是导师，

你们理应获得更多更美好的献词！

所见者美也，

所明者甚美也，

世间所未名者，

美之大成也。

——

尼尔斯·斯廷森

（Niels Steensen，1638—1686）

序言

宇宙的起源

人类正生活在宇宙的黄金时期，距离宇宙中发生的那些激动人心的事件已经过去很久了。在繁星满天的日子里遥望天空，你会看到数以万计的星星组成一条被我们称作“银河”的玉带，横跨黑暗的天空。这是古人对宇宙的全部了解。渐渐地，随着人们发明出倍率越来越大和分辨率越来越高的望远镜，一个难以想象的浩瀚宇宙开始进入我们的视野。大量的恒星聚集在我们称为星系的光岛之中，周围围绕着的是寂静的微波海洋——这是约150亿年前宇宙大爆炸的回声。时间、空间和物质似乎起源于一次爆炸性事件，在那之后，宇宙以一种整体膨胀的状态出现，同时也在逐渐冷却，不断变得稀薄。

最开始，宇宙是一个充满辐射的“炼狱”。它的温度太高了，导致任何原子都无法在其中生存。在发生大爆炸后的最初几分钟里，宇宙的温度便冷却到足已形成最轻的元素的原子核。在仅仅几百万年之后，宇宙就已冷却到足以形成原子，简单的分子也随之出现。经过数十亿年的复杂发展，物质凝聚形成恒星和星系。而后，随着稳定的行星环境的出现，一系列复杂的生物化学复合体以我们不甚了解的过程被孕育出来。这一系列复杂的过程是如何以及为何开始的呢？关于宇宙的起源，现代宇宙学家必须解答哪些问题？

从现代科学的角度来看，古代的各种创世故事都算不上科学理论，因为它们并未试图揭示任何关于宇宙结构的新认知，它们的目的仅仅是消除人类想象中的未知恐惧。通过从创世的角度定义人类所在的位置，古人可以将世界与自身联系起来，从而消除对未知或不可知的事物的恐惧。现代科学需要达到的目标远不限于此，它必须足够深刻，才能告诉我们更多未知的宇宙信息；现代科学的知识储备必须广

博到能够做出预测，以证明和解释当前的宇宙；现代科学还应该为我们指出隐藏在一系列不相关事实背后的内在连贯性和统一性。

虽然现代宇宙学家采用的方法很简单，但对外行人而言并不容易理解。这种方法就是，首先假设支配地球运转的法则，然后将其推广到整个宇宙的尺度上，直到某人发现这个法则并不适用，再对其进行调整。比较典型的例子是，宇宙中有一些地方处于极端环境中，比如拥有极高或者极低的密度和温度，尤其是在过去的某段时间里，但我们生活的地球没有这种情况。因此有时候，我们期望相关理论在这样的极端条件下仍能适用。虽然有时确实如此，但在一些情况下，我们研究的是近似真实的自然法则模型，相比于真正的自然法则，前者具有一定的限制性。因此，当我们达到这些极限时，必须尝试建立更接近真实的模型才能解释特殊的新发现。虽然许多理论能用于预测，但我们不能通过观测检验其对错。事实上，正是这些预测决定了未来天文台或者人造卫星的建造。

宇宙学家热衷于构建“宇宙模型”，他们希望通过模型对宇宙的结构和历史进行简化的数学描述，以找到主要特征。就像模型飞机重现了真实飞机的一部分但并非所有特征一样，我们不可能寄希望于一个宇宙模型就可以涵盖宇宙的每一个细节。我们的宇宙模型还比较粗略，它们将宇宙看成一个完全均匀的物质海洋，但忽略了物质凝聚成恒星和星系的过程。只有当研究者研究更具体的问题，比如恒星和星系的起源时，才会考虑这个完美均衡的模型的缺陷。不过，构建模型这一方法非常有效，因为宇宙最显著的特征就是，我们可以通过模型，用简单且理想化的方式描述宇宙中以物质的形式均匀分布的可见部分。

宇宙模型还涉及宇宙的某些性质，诸如宇宙的密度或者温度，后者的数值只能通过观测获得，而且只有一些特定观测值组合符合模型

的要求。通过这种方式，我们可以检验宇宙模型和真实宇宙之间的兼容性。

我们在宇宙的各方面探索上成就斐然。除了使用卫星、航天器和望远镜，我们还可以利用显微镜、原子对撞机和加速器、计算机以及人类的思维，来扩展对整个宇宙微观环境的认识。除了外太空的世界，比如恒星、星系以及宏大的宇宙结构，我们也开始研究微观世界深处错综复杂的精妙之处。在那里，我们发现了原子核的内部结构和组成部分——作为物质的基础组成部件，虽然数量很少，结构简单，但它们的结合组成了这个纷繁的世界，而我们也不过是其中特殊的一部分。

我们的两个前沿认知——关于物质组成的微观世界和恒星及星系组成的天文世界，在当代以一种意想不到的方式结合到了一起。它们原本属于不同的研究领域，由不同的科学家通过不同的方式来解答，现在他们的研究兴趣和方法紧密地交织在一起。通过粒子探测器对基本粒子展开研究，科学家很可能揭开星系形成的奥秘，这些基本粒子的特性也可能通过观测遥远的星光得到答案。通过重建宇宙的历史、寻找宇宙“青少年时期”的遗迹，结合宏观和微观的物理世界，我们对宇宙的统一性有了更加深刻和完整的认知。

《宇宙的起源》这本书的目的是，为初学者简明扼要地解说宇宙的起源。比如，关于宇宙早期的历史，我们有什么证据？宇宙起源的最新理论是什么？我们可以通过观测检验这些理论吗？我们自身的存在与它们有什么关系？这些是我们向着时间之始行进的旅程中可能会遇到的一些问题。我还将介绍一些关于时间的本质的最新理论，比如“宇宙暴胀”和“虫洞”理论，并在此过程中解释COBE卫星（宇宙背景探索者卫星）观测的重要性以及在1992年春天，它的观测给我们带来的欣喜。

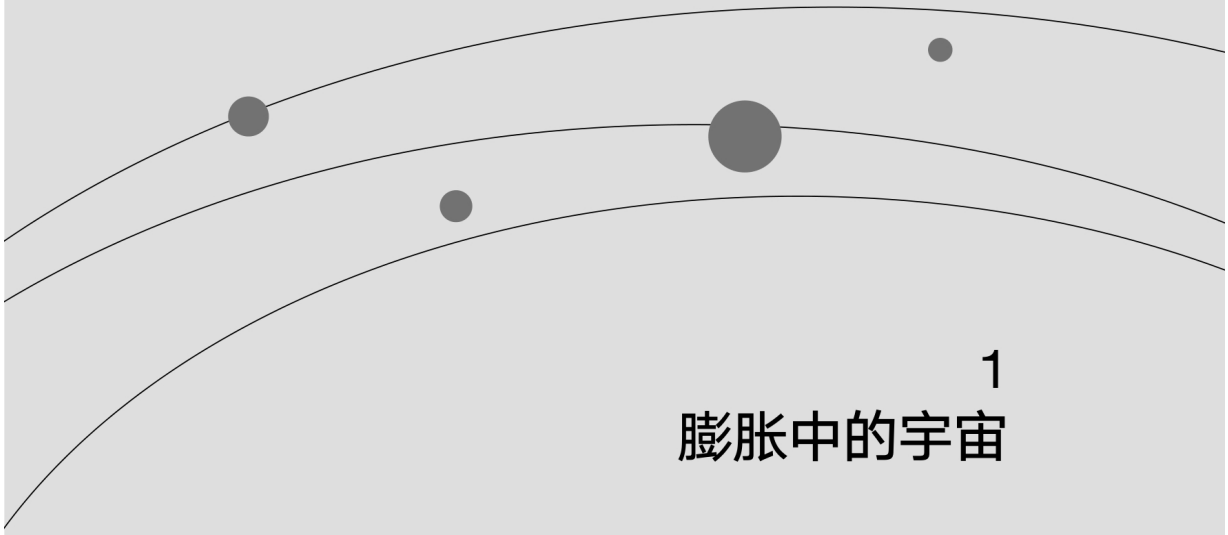
我要感谢从事宇宙学研究的同事以及合作者，他们的讨论和发现让我有机会讲述宇宙起源的故事。安东尼·奇塔姆（Anthony Cheetham）和约翰·布罗克曼（John Brockman）[(1)]对这本书的构想值得称赞。我还要感谢格里·莱昂斯（Gerry Lyons）和萨拉·利平科特（Sara Lippincott）的指导。我的妻子伊丽莎白也提供了大量的帮助，她让我迅速地完成了这本书的写作，而不是无限期拖延，我对她所做的一切一如既往地心怀感激。当然，我的另一些家庭成员——戴维、罗杰和路易斯对这本书就显得兴致索然了，他们最感兴趣的是夏洛克·福尔摩斯。

扫码下载“湛庐阅读”App，搜索“宇宙的起源”，获取本书趣味测试及彩蛋！

目 录

序言　宇宙的起源
1　膨胀中的宇宙
2　设想中的多种宇宙模型
3　宇宙有起点吗
4　宇宙的暴胀和粒子物理学家
5　暴胀和COBE卫星
6　时间——一段简短的历史
7　步入迷宫
8　全新维度

THE ORIGIN OF THE UNIVERSE



1
膨胀中的宇宙

宇宙是以何种方式、何种原因并从何时开始的？这样一个简单的问题驱动着人类开启了探索宇宙的征程。谜案的线索刚刚浮现，谁会是下一个破解迷局的福尔摩斯？

“我必须对你表示感谢，”夏洛克·福尔摩斯说道，“因为你让我对这个稍显有趣的案子产生了兴趣。”

——《巴斯克维尔的猎犬》（*The Hound of the Baskervilles*）

宇宙是以何种方式、何种原因并从何时开始的？它到底有多大？是什么形状？由何种物质构成？这些问题是任何一个拥有好奇心的孩子都可能会提出的，同时也是数十年来现代宇宙学家上下求索的。对于畅销书作家和记者而言，宇宙学的一个吸引人之处在于，该学科最前沿的许多问题都很容易表述；而其他前沿科学领域，比如量子电子学、DNA测序、神经生理学或者数学，专家提出的问题很难用通俗易懂的语言传达给大众。

20世纪早期，哲学家和天文学家尚未对“空间是绝对固定的”这一概念提出质疑。他们认为，在这个绝对固定的舞台上，恒星、行星和其他所有天体都只是沿着各自的轨道运转。但到了20世纪20年代，这种对宇宙的简单描述开始发生改变。首先是物理学家开始探索爱因斯坦的引力理论会带来什么结果，并获得相应的启发；其次是美国天文学家埃德温·哈勃通过对遥远星系中恒星光线颜色的观测，获得重大发现。

哈勃利用了波的一个简单性质：如果波源远离接收器，接收器收到的波的频率就会下降。如果你想观测这一性质，可以在一潭静止的水里上下摆动手指，看着波峰移动到水面的另一个点，然后将手指朝远离接收点的方向移动。相比于原先移动的那个点，此时接收器接收到的波的频率就会变低，而当你的手指靠近接收点时，接收到的波的频率就会增高。所有的波都具有这种性质。这一性质在声波中的体现就是火车鸣笛或者警笛的音调变化。光也是一种波，当光源远离观察者时，光波频率降低，这意味着被观察的可见光颜色会微微变红，这

种现象被称为“红移”。当光源靠近观察者时，接收频率增高，可见光的颜色则变蓝，这种现象被称为“蓝移”。

哈勃发现，星系发出的光呈现出系统性的红移现象。通过测量红移的程度，他可以确定光源后退的速度。同样，通过比较同一类恒星（内在亮度相同的恒星）的视亮度，可以推断出它们与地球的相对距离。他发现，光源距离地球越远，远离的速度就越快。这一趋势被称为“哈勃定律”，该定律用数据来说明如图1-1所示。

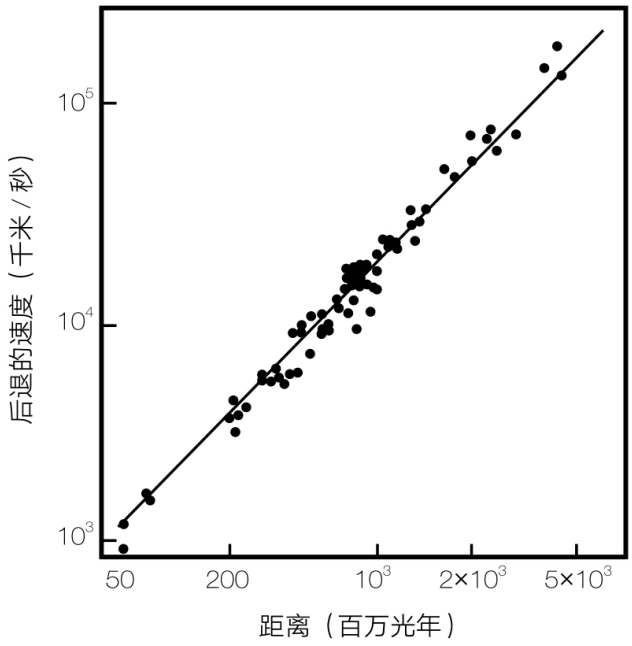


图1-1　“哈勃定律”数据示意图

注：这是哈勃定律的现代图解，表明星系后退速度的增加与它们同地球的距离成正比。

图1-2展示了从遥远星系接收到的光信号的例子，与实验室中相同原子发出的光相比，这些来自遥远星系的原子在光谱上向红色方向移动。

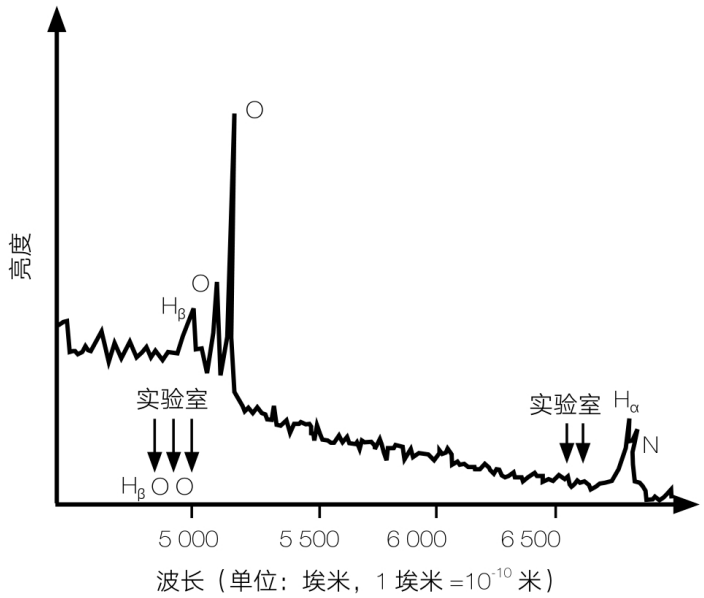


图1-2　一个遥远星系的光谱（被称为“Markarian 609”）

注：该图展示了在5 000埃米附近的3个光谱线（标记为H_β、O和O）和6 500埃米附近的2个光谱线（标记为H_α和N）是如何系统地移动到更长的波长上的（同在实验室测量的数据相比）。实验室中光谱线的位置用标以“实验室”字样的箭头表明；测量的位置是光谱图上的峰值标记。红移现象（红光的波长大约为8 000埃米）可以帮助科学家计算出星系后退的速度。

哈勃发现的是膨胀的宇宙。在这之前，人们认为宇宙是一个恒常不变的舞台，行星和恒星在其中进行着可观察的固定运动，而哈勃发现宇宙是动态的、变化的。这是20世纪科学界的最大发现，它证实了爱因斯坦广义相对论对宇宙的预言：它不可能是静止的。因为如果星系间不相互远离，彼此之间的引力会使它们聚集在一起。所以宇宙不可能是静止不动的。

如果宇宙正处于一种膨胀的状态，那么当我们倒转历史、回顾过去时，就应该能找到证据证明宇宙起源于一种体积更小、密度更大的状态——该状态的尺寸似乎为零。这个假设后来被称为“宇宙大爆炸”。

我们在宇宙研究方面的步伐迈得有点大。对于宇宙现阶段的膨胀现象，还有许多重要方面值得探究，因此，当下我们不应该一头扎进对宇宙过去的钻研之中。首先，我们要搞清楚到底宇宙中的什么东西在扩张。在电影《安妮·霍尔》中，伍迪·艾伦靠在沙发上表达他对宇宙膨胀的焦虑：“毫无疑问，宇宙膨胀意味着布鲁克林（纽约市的一个区）正在膨胀，你我在膨胀，所有人都在膨胀。”但值得庆幸的是，他的担忧是错的。我们没有膨胀，布鲁克林没有，地球没有，太阳系也没有。事实上，银河系也并未膨胀，甚至成千上万个星系聚集在一起被我们称为“星系团”的集合也没有膨胀。这些物质的集合在化学键力和引力的作用下紧密地结合在一起，它们的相互作用比宇宙膨胀的力更大。

只有当我们站在大规模的星系的尺度上时，才会发现宇宙的膨胀力超越了局部引力。例如，与我们相邻的仙女座星系正向银河系移动，因为仙女座星系和银河系之间的引力大于宇宙的膨胀力。星系群是宇宙膨胀的标尺，膨胀的并非星系本身。我们可以用一个简单的方式进行类比，比如位于正在膨胀的气球表面的尘埃。气球不断膨胀，表面的尘埃也会散开，但每个尘埃微粒本身并不会以同样的方式膨胀。尘埃的作用就是标记气球表面被拉伸的距离。同样，我们最好将宇宙的膨胀看作星系群之间空间的扩展，如图1-3所示。



图1-3　将宇宙的膨胀看作空间的扩展

注：气球表面的点代表一个个星系。虽然星系间的空间距离增加了，但星系本身的大小并没有发生改变。这类似于一个有着二维空间表面的宇宙，此处由气球的表面表示。在膨胀的表面上，任何一个星系都能看到其他星系正在不断地远离自己。需要注意的一点是，膨胀的中心点并不在气球的表面上。

我们可能会担心所有星系都在远离地球这一事实造成的后果。但星系远离的为什么是地球呢？如果我们对科学史有一丁点儿了解，就必然知晓，哥白尼证明地球并非宇宙的中心。如果我们认为宇宙的一切都在离地球远去，实质是又把地球置于了无限宇宙的中心位置。但事实并非如此。膨胀的宇宙不像大爆炸一样在空间中存在某个起点。宇宙并非从某个固定的背景空间开始膨胀，宇宙包含了所有膨胀的空间。

请将空间想象成一片弹性薄板，任何物质在这个可延展的空间上的存在和运动都会产生凹痕和弯曲。宇宙弯曲的空间就像四维球体的三维表面，这是我们无法直观看到的。但如果将宇宙想象成一个平面，一个只有两个维度的空间，那它就近似于一个三维球体的表面。

设想这个三维的球体表面正在变大，就像图1-3中膨胀的气球一样。气球的表面是一个膨胀的二维宇宙，如果我们在上面标记两个点，当气球充气时，这些点就会相互远离。如果在气球表面标记许多点后再充气，你就会发现，无论你将自己放在气球表面何处，当气球膨胀时，除你之外的所有其他点都会离你远去。

你也会发现哈勃的膨胀定律：与那些相距较近的点相比，相距更远的点之间在以更快的速度相互远离。从这个例子中我们可以看到，虽然气球的表面代表空间，但气球膨胀的中心根本不在表面。气球的表面不存在膨胀的中心，也没有任何边缘，因此你不可能从宇宙的边缘掉下去。宇宙不会膨胀成任何东西，因为宇宙就是一切。

至此，我们会产生一个问题：宇宙的膨胀是否会无限地持续下去？如果我们将一块石头扔到空中，它会被地球的引力拉回来，扔的力量越大，传递给石头的能量就越多，它在被拉回地球之前所能达到的高度就越高。现在我们知道，如果以超过11.2千米/秒的速度发射一个物体，它就能脱离地球引力。这便是火箭的关键发射速度，太空科学家称之为脱离地球引力的“逃逸速度”。

上述观点也适用于任何被引力阻碍的爆炸或者膨胀着的物质系统。如果物质向外的动量超过了引力内拉所产生的能量，该物质便会超越逃逸速度，继续膨胀。但是，如果引力在该物质各部分间产生的力较大，则这个正在膨胀的物体最终会重回原点，就像在地球上扔石头一样。膨胀的宇宙也是如此。宇宙膨胀之初也有一个临界启动速度，如果膨胀的速度超过该值，那么宇宙中所有物质的引力将无法阻止膨胀，并且宇宙将永远膨胀下去。相反，如果膨胀速度小于临界值，膨胀将停止并发生逆转，最终收缩到尺寸为零的状态，也就是它的初始状态。

这两种情况之间存在着所谓的“英国式的折中宇宙”（British compromise universe），它膨胀的速度刚好符合临界启动速度，即保持使宇宙永远膨胀的速度最小值（见图1-4）。关于宇宙的最大谜团是，它目前正逐渐逼近这个临界值，事实上，宇宙膨胀的速度太接近临界值，使我们无法肯定宇宙现今膨胀的速度到底是在临界值的哪一边，我们也不知道未来宇宙的膨胀速度将如何变化。

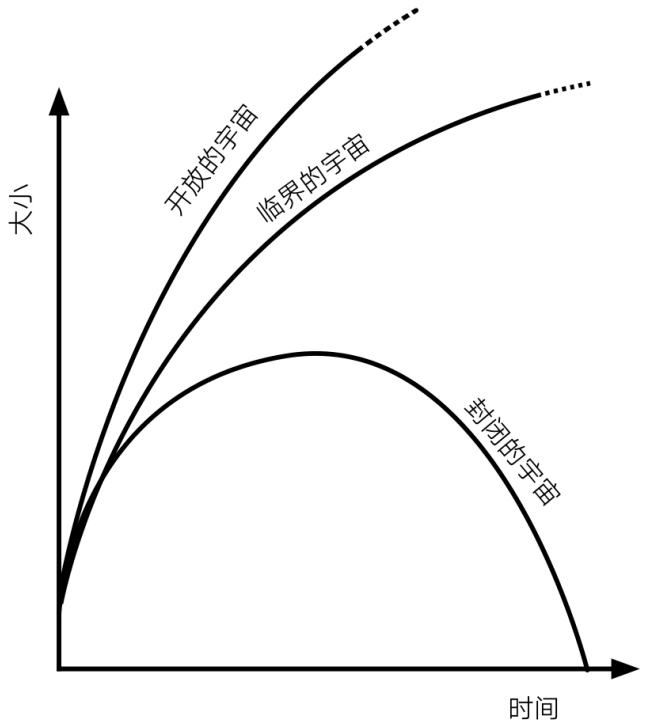


图1-4　三种膨胀的宇宙

注：开放的宇宙在一定程度上是无限的，并且会永远膨胀下去；封闭的宇宙是有限的，并将收缩到“大坍缩”状态。两者间的分界是临界的宇宙，在这种情况下，宇宙无限大且永远保持膨胀的状态。

宇宙学家认为，我们非常接近这一临界值，宇宙的这种特殊现象需要得到解释。令人难以理解的是，随着宇宙的膨胀和时间的流逝，如果它不是精确地以临界启动速度开始膨胀，那么它的速度便会日渐偏离这个分水岭。这给我们带来一个巨大的难题，因为宇宙已经持续膨胀了约150亿年，但它现在的速度仍然非常接近临界值，我们无法确定它的速度落在临界值的哪一边。

经过如此漫长的时间后，宇宙膨胀的速度依然与临界启动速度难分伯仲，这就要求宇宙的初始膨胀速度与临界启动速度的差别小于1/10000……000（1后面跟36个零）。为什么？后文我会介绍，科学家对宇宙最初膨胀时刻可能发生的事件所做的研究，为这种极不可能的问题提供了一个可能的解释。但在这里，我们只要理解为什么在百亿年的膨胀之后，任何宇宙的膨胀速度都必须与这一临界值非常接近，就已经足够。

如果宇宙膨胀的起始速度比临界启动速度快得多，那么引力就永远无法将同一区域的物质岛聚集在一起形成恒星和星系，而恒星的形成是当前可见宇宙演化过程中至关重要的一步。恒星是物质的聚合，随着聚合物质的不断增多，其中心就会产生足够大的压力，引起自发的核聚变反应。这些核聚变反应在漫长而平静的岁月中将氢变成了氦，这正是太阳正在经历的阶段，但在生命的最后阶段，恒星会遇到一场核能源危机。

每颗恒星都会经历一个快速变化的爆炸时期，在这个过程中，氦被转化成碳、氮、氧、硅、磷以及所有在生物化学过程中起重要作用的元素。当恒星以超新星的形式爆发时，这些元素便散落到太空中，

最终融入行星和人类体内。恒星是所有元素的来源，而这些元素也是生物化学复合体乃至生命赖以存在的基础，我们体内的每一个碳原子核都源于恒星。

因此，比临界启动速度膨胀得更快的宇宙永远无法产生恒星，从而也永远无法产生能够进化出复杂“生命体”所需的基本元素，而这些元素是人类或者硅基计算机所必需的。同样，如果宇宙膨胀的速度远低于临界启动速度，它的膨胀将会逆转为坍缩状态，恒星便没有足够的时间成形、爆发以及创造生物的组成元素，这样的宇宙便无法产生生命。

我们能够从以上分析中获得一个令人惊讶的结论：只有那些在数十上百亿年后仍然以非常接近临界启动速度膨胀的宇宙，才能产生足够多的物质，从而形成足以进化出智慧生命的复杂聚合结构（见图1-5）。我们不该惊讶宇宙膨胀的速度为何如此接近临界启动速度，因为我们不可能存在于以其他速度膨胀的宇宙中。

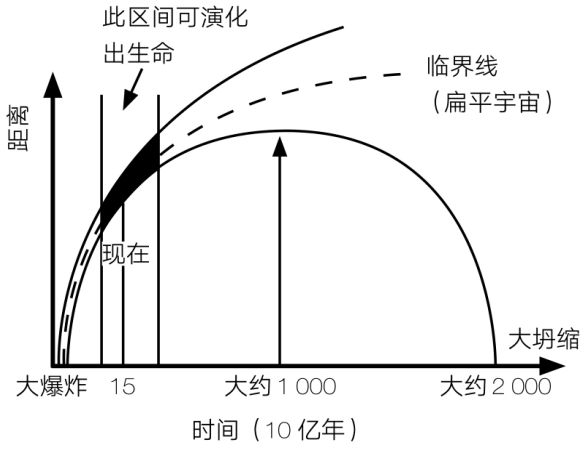


图1-5　宇宙膨胀会产生的各种结果

注：宇宙膨胀的速度如果远大于临界值，物质便无法聚合形成恒星和星系。因此，这样的宇宙无法产生生命。而如果宇宙膨胀的速度远小于临界值，在恒星形成之前便坍缩了。阴影区域表明了智慧生命得以进化的宇宙膨胀速度范围及时期。

在膨胀宇宙的研究及其历史的重建方面，我们的进展非常缓慢。20世纪30年代，比利时牧师兼物理学家乔治·勒梅特（Georges Lemaitre）在宇宙探索初始阶段的研究上发挥了主导作用，他的“原始原子”（primeval atom）理论是如今宇宙大爆炸模型的前身。最重要的宇宙研究进展发生在20世纪40年代末，移民美国的俄罗斯人乔治·伽莫夫（George Gamow）带着手下两名年轻的研究生拉尔夫·阿尔夫（Ralph Alpher）和罗伯特·赫尔曼（Robert Herman），开始认真思考如何运用已知的物理学知识阐释膨胀宇宙的初期状态。

阿尔夫和赫尔曼意识到一个关键点：如果宇宙在很久以前是从一个炽热且稠密的状态开始的，那么这个爆炸性的起点应该还残留有一些辐射。更具体地说，在宇宙刚诞生的几分钟，它应该已经处于极度炽热的状态，热到足以让核聚变反应在任何地方发生。这些重要的猜想后来被更加详尽的预测和观察证实。

1948年，阿尔夫和赫尔曼预测到，宇宙大爆炸后的辐射残余随着宇宙的膨胀在冷却，此前应该保持在比绝对零度(2)高5开尔文。然而，他们的预测却被湮没在物理文献中。15年后，其他几位科学家开始思考炽热的膨胀宇宙的起源，但没人看过阿尔夫和赫尔曼的相关论文，因为当时的通信并不像如今这么发达。

20世纪50年代和60年代早期，在大多数物理学家眼中，重建宇宙早期历史的细节并不是一件非常严肃的科学活动。但到了1965年，形势发生了改变。阿尔夫和赫尔曼的宇宙辐射场被阿诺·彭齐亚斯（Arno Penzias）和罗伯特·威尔逊（Robert Wilson）偶然发现。这种辐射场表现为微波噪声以相同频率从太空的四面八方传来。他俩是新泽西州贝尔实验室的无线电工程师，当时正负责校准一条灵敏的无线电天线以跟踪第一个“回声号”（Echo）卫星。

与此同时，在几千米外的普林斯顿大学，由物理学家罗伯特·迪克（Robert Dicke）领导的小组重新独立地计算出了阿尔夫和赫尔曼

在很久以前得出的结果，并开始着手设计用于搜寻宇宙大爆炸遗留辐射的探测器。他们听说贝尔实验室的接收器总是接收到无法解释的微波噪声，便很快认定这就是他们正在寻找的大爆炸残余辐射。如果该微波的源头确实是热辐射，则温度为2.7开尔文，这与阿尔夫和赫尔曼的估值非常接近。这种热辐射被称为“宇宙微波背景辐射”（cosmic microwave background radiation）。

宇宙微波背景辐射的发现标志着宇宙大爆炸模型研究的正式开始。渐渐地，其他观测结果进一步揭示了宇宙微波背景辐射的特性。它在每个方向上的强度基本保持一致，上下浮动不超过千分之一。大家在不同频率上测量宇宙微波背景辐射的强度时，发现其强度呈现出典型的随频率变化而变化的特征，而这正是纯热（pure heat）的特征。人们称这种辐射为黑体辐射。可惜的是，地球大气层中分子对辐射的吸收和发散，让天文学家无法确认辐射在整个光谱上是否均为热辐射。

然而，学界仍然怀疑，宇宙微波背景辐射并非产生于宇宙大爆炸，而是源于大爆炸过后很久才发生的某个剧烈事件。而这些疑问只能通过观测地球大气层以外的辐射才能解答。1989年，美国国家航空航天局（NASA）发射的COBE卫星取得了首个成就——从太空中测量到了宇宙微波背景辐射的完整辐射谱。这种辐射拥有自然界可见的最完美的黑体光谱，同时它也证明，宇宙曾经的温度比现今高千百摄氏度（见图1-6）。因为只有在这样极端的条件下，宇宙中的辐射才能以如此高的精确度符合黑体辐射的标准。

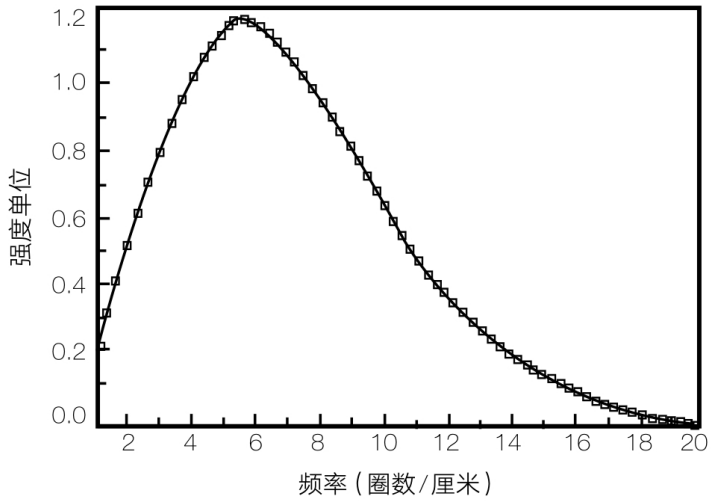


图1-6　宇宙微波背景辐射强度的变化

注：COBE卫星位于地球大气层上方，上图是它观测到的宇宙微波背景辐射强度的变化及其频率。观测结果（图中的小圈）完美地符合源于纯热辐射做出的预测（图中曲线），并且其温度也为2.73开尔文。

另一项重要实验同样证明了宇宙微波背景辐射并非起源于宇宙近期的某个事件，该实验在执行高空飞行任务的U2飞机上实施。U2飞机原本只用作战略侦察机，体型小巧但拥有巨大的翼展，这些特性让其成为非常稳定的观测平台。这次实验与以往向下的观察方向不同，科学家通过观察天际发现，天空中的辐射强度在各个方向上有微小但系统性的变化，正如之前的预测所言。如果辐射在遥远的过去就已经产生，就会出现这种变化。

如果宇宙微波背景辐射在宇宙早期就已经出现，并且形成了一个均匀膨胀的海洋，那就意味着我们会穿过它。地球作为一个整体，绕着太阳运转，而太阳绕着银河系运转；同样，银河系绕着它的邻居运转，这样的例子不胜枚举。这些运动意味着我们正朝着某个方向穿过宇宙微波背景辐射（见图1-7）。当我们顺着这个方向观测时，辐射强度将达到最大值，而在反向180度的方向上，辐射强度值最低，并且在两个极值之间根据角度的不同呈现出典型的余弦变化（见图1-8）。这

种现象就好比在暴风雨中奔跑一样，你的前胸最湿，而最干燥的部位是背部。雨就是我们谈论的微波，它对着我们运动的方向横扫过来。

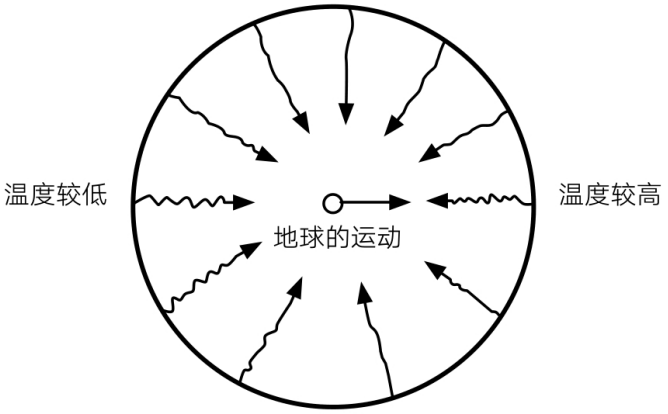


图1-7　各个方向上的辐射强度

注：我们穿过大爆炸产生的具有各向同性的宇宙微波海洋。我们测量了相同运动方向上宇宙微波背景辐射的最大强度，也测量了相反运动方向上宇宙微波背景辐射的最小强度，两个极值之间存在稳定的余弦变化。

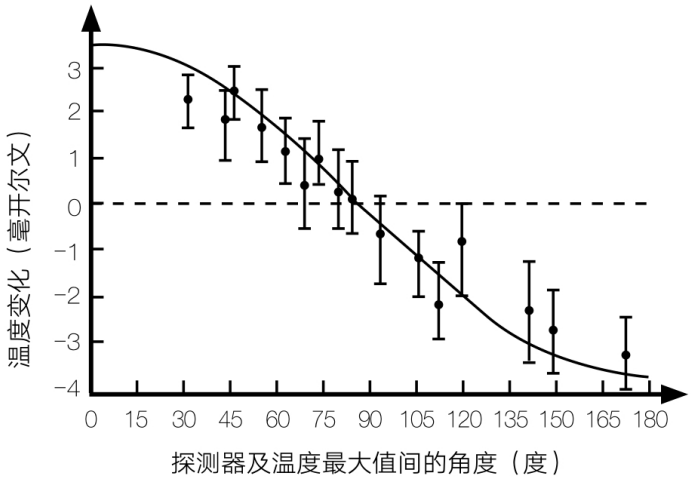


图1-8　宇宙微波背景辐射呈现出的余弦变化

注：“星空中伟大的余弦”显示了宇宙微波背景辐射在毫开尔文下的实际温差，当观测的角度改变时，辐射强度会随着变化从最大值转变为最小值。温差线显示了每个温度测量的精确度。

随后，几个不同的实验同样证实了后来被我们称作“星空中伟大的余弦”（The Great Cosine in the Sky）的发现。相对于宇宙的微波海洋而言，我们和所居住的星系群在不断移动。因此，辐射不可能产生于星系的内部，因为如果真是这样的话，辐射会随着我们的运动而运动，我们就将无法观察到其强度的余弦变化。

我们正在穿越始于大爆炸的宇宙微波背景辐射是影响辐射强度变化的一个因素，但并非导致其强度在不同方向呈现微小变化的唯一因素。如果宇宙在不同方向上以略微不同的速度膨胀，那么辐射的强度将会在扩张速度较快的方向上减弱（温度变低）。不仅如此，在某些方向上，物质的聚合会变多，而在另外一些方向上，物质难以聚合。物质密度在不同方向的区别同样也会改变来自这些角度的辐射强度。寻找这些变化则成为COBE卫星的使命。1992年，它们的发现震惊了全世界。

我们审视这些来自星空不同方向上的辐射强度值时，发现了一些关于宇宙结构的惊人事实。宇宙在每个方向上都在以几乎相同的速度膨胀，误差不高于千分之一。我们称这种膨胀特点为各向同性，也就是说，宇宙膨胀的速度在每个方向上都是一样的。如果一个人可以从某个所谓的“宇宙展览馆”中随机挑选可能出现的宇宙，那么能选出来的宇宙种类肯定不计其数，而且和当前的宇宙也各不相同。有些宇宙可能在某些方向上的膨胀速度比较快，有的宇宙或许在高速旋转，甚至有的宇宙在某些方向上收缩、在其他方向上膨胀。然而，我们的宇宙是如此特别：它似乎处于一种不可思议的有序状态，在这种状态下，它的膨胀速度在各个方向上都保持着惊人的一致性。这就好比你发现孩子们的卧室都保持着非常整洁的状态一样，这种情况出现的可能性是极低的。这时候，你会思考是否有什么外部因素促使了这一变化。同样，我们必须对宇宙膨胀呈现出的显著的各向同性给出一个合理的解释。

宇宙学家一直认为，宇宙膨胀的各向同性是一个巨大的谜团，必须对此做出解释，而科学家所采取的方法阐明了这个学科的思维方式。第一种解释认为，宇宙在膨胀之初就具有各向同性，而现在的状态只是它特殊起始状态的体现。这便是所谓的“天行有常”。

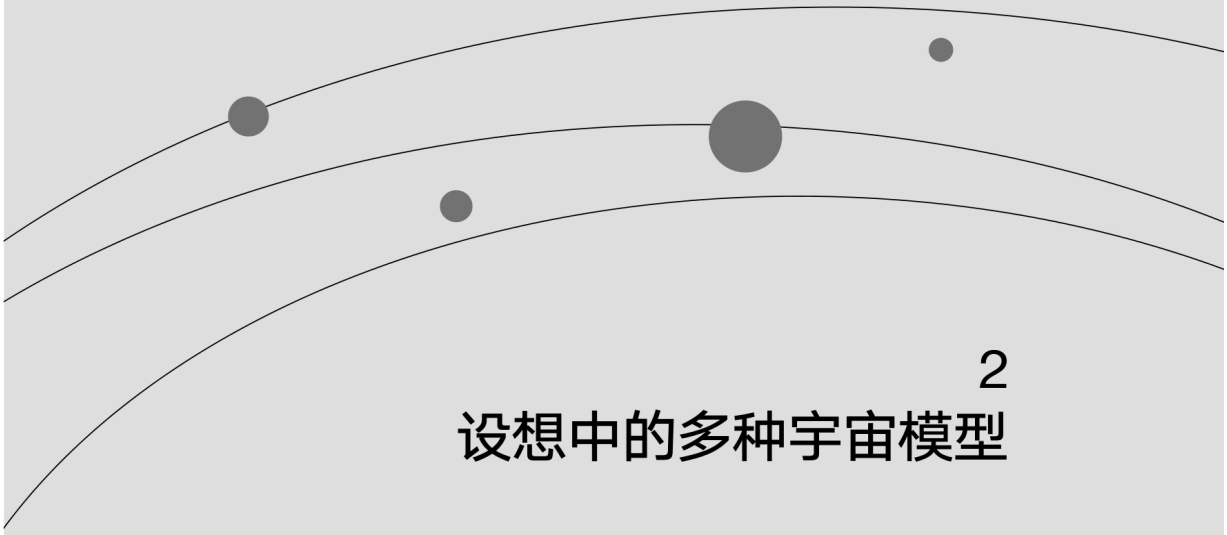
然而，从实际角度出发，这种解释并不是很有帮助。因为它没有解释任何东西，它的作用就好比用牙仙哄小孩一般(3)。当然，这个解释有可能是真的，但如果事实真是如此，那我们便希望能够找到一些更深层次的“原理”，以重现宇宙初始阶段各向同性膨胀时的状态。这种“原理”也许可以在其他更适合的地方显现。这种解释的缺点是将阐释宇宙目前状态的希望完全寄托在（对我们而言）未知的（也许是不可知的）初始状态上。

第二种解释认为，将目前的状态看作宇宙中某些物理过程的结果，而这个过程还在继续。因此，我们也许可以将宇宙的初始状态放在一边，无论它最初是多么不规则，但经过数十亿年的岁月洗礼，这些不规则的部分全被磨平，只留下了各向同性的膨胀状态。这种解释的优点是引出了可能的研究主题，例如，宇宙的这种演化过程是否可以消除膨胀的非一致性？达到这种一致性需要花费多长时间？到目前为止，这些过程是否能够消除宇宙膨胀中所有的不规则情况，又或者只能消除其中的一小部分？

第二种解释让我们确信，无论宇宙以何种方式开始，在它的早期阶段，都不可避免地出现了一些演化过程，确保宇宙在历经150亿年的膨胀之后，刚好呈现出如今我们所观察到的模样。

尽管第二种解释听起来很有吸引力，但它也有缺点。如果我们成功地证明宇宙当前状态的由来与其初始状态毫无关联，那么我们对其结构的观察将对宇宙初始状态的探索毫无帮助。

THE ORIGIN
OF
THE UNIVERSE



2
设想中的多种宇宙模型

只有模型才能让我们将种种线索串联起来，你要做的是不断假设、论证、推翻、再假设、再论证、再推翻……到最后，总会有一些金子在泥沙中闪耀！

旁人皆为专才，唯有他是全知全能。

——《布鲁斯-帕廷顿计划》（*The Bruce-Partington Plans*）

当阿尔伯特·爱因斯坦于1915年提出广义相对论时，并没有多少人相信宇宙是由巨大的恒星聚集，也就是我们所知的星系构成。当时的人们普遍认为，这些地球外的光源或者星云位于银河系中。天文学家或哲学家也都一致认为充满繁星的宇宙是静态的。

正是在这种认知背景下，爱因斯坦提出了引力新理论，包含且取代了牛顿的经典力学体系。与牛顿对引力的经典描述不同，即使宇宙在一定程度上是无限的，引力也具有描述整个宇宙的非凡能力。人们目前只找出了爱因斯坦方程式的最简单的解。但幸运的是，这个简单的答案已经很好地描述了我们所观察到的宇宙。

当爱因斯坦开始探索新方程式所揭示的宇宙时，他采用了科学家通常使用的方法——对所需解答的问题进行简化。真正的宇宙是一种复杂度远超于我们想象的存在。对我们而言，它就是一头极度复杂的“野兽”，难以应付。也正是因为如此，爱因斯坦对其进行了简化。他假设，宇宙中的物质在任何地方都是均匀分布的，也就是说，他忽略了不同区域的密度变化。他还假设，宇宙在各个方向上都保持一致。我们现在知道，这些假设都是对宇宙状态的极好诠释，宇宙学家今天仍然会在推导宇宙的整体演化情况时采用这种假设。

然而，爱因斯坦的极度苦恼也随之而来，因为他发现自己所推导的方程式要求宇宙必须随着时间的流逝不断膨胀或者收缩。这并不难理解，牛顿对万有引力的描述也符合该要求。如果你把一团尘埃粒子放入太空，由于相互之间的吸引力，粒子团会逐渐收缩，唯一能阻止这种情况发生的是某种爆炸，这样才能将粒子分开。宇宙无法保持静止的状态，除非有另外一种力量介入来对抗引力，在没有相反作用力的情况下，静态分布的恒星以及星系间的引力会使它们收缩。

爱因斯坦对自己的广义相对论推导出来的预测深感困惑。显然，他缺乏说出宇宙并非处于静止状态的自信。在当时，膨胀的宇宙是一种非常奇怪的概念。相反，他开始寻找方法来合理地修改自己的新理论，以阻止宇宙出现膨胀或者收缩的可能性。他发现，可以在数学中引入某个项来代表某种斥力，这种力与作用于物质的引力刚好相反。如果将这个他称为“宇宙常数”的项放入广义相对论中，便可以建立他想要的模型，其中，斥力正好抵消了引力。这就是我们所熟知的爱因斯坦静态宇宙（Einstein static universe）模型（见图2-1）。

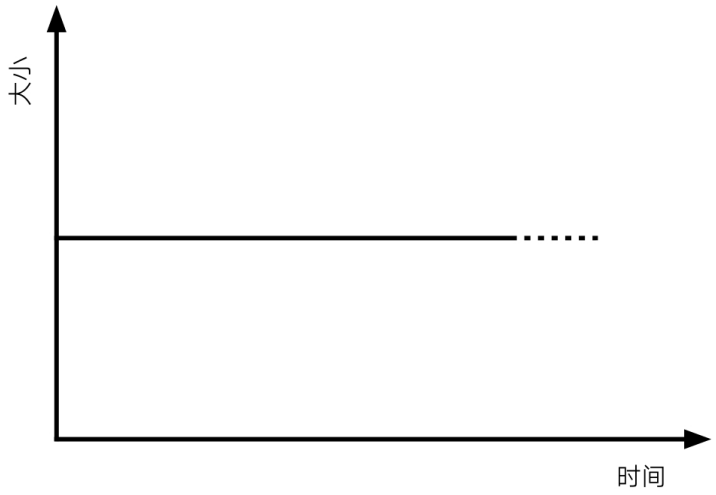


图2-1　爱因斯坦静态宇宙模型

注：静态宇宙的大小不会随时间改变，它没有起点也没有终点。

1922年，来自圣彼得堡的年轻数学家兼大气物理学家亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）对爱因斯坦的计算进行了研究，并发现这位大师的计算存在重大疏漏。静态宇宙虽然是修正方程式的一个解，但并非唯一的解。实际上，其他的解所描述的宇宙都是膨胀的，这也是最初广义相对论方程式预测的结果。爱因斯坦的反引力项无法阻止真实宇宙的膨胀。弗里德曼发现了所有符合广义相对论方程式的膨胀宇宙，并将研究结果转交给了爱因斯坦。

起初，爱因斯坦只是认为，弗里德曼犯了简单的计算错误，但很快，他就被弗里德曼的同事说服了。这位同事发现，包含宇宙常数的方程式推导出来的是一个不真实的静态宇宙：如果爱因斯坦的静态宇宙在最微小的程度上发生改变，就会开始膨胀或者收缩。这个宇宙的版本就如同使一根针在针尖上保持平衡，太过于脆弱。

许多年之后，爱因斯坦将自己对宇宙常数的坚持称为“一生中最大的错误”。宇宙常数的引入让他错过了一个震动世界的机会，即预测出宇宙正在膨胀。这一失误让光环落到了弗里德曼的头上。但可惜的是，弗里德曼没有活着看到他的预言得到实证。7年后，埃德温·哈勃的观测最终让全世界的人们相信宇宙是膨胀的。弗里德曼为了气象研究进行了许多危险的高海拔热气球飞行，曾一度保持热气球高空飞行的世界纪录。1925年，他死于高海拔飞行后遗症。他的早逝对科学界而言是巨大的损失。去世时，他只有37岁。

尽管爱因斯坦继承了传统的静态宇宙观，但这并不意味着他的前辈否认宇宙状态可能发生变化的可能性。尽管之前未曾有宇宙膨胀或者收缩的概念，但有很多人猜测宇宙可能正在逐渐变成一个无序且不适宜居住的状态。这种想法源于人们对热量作为能量来源的研究。工业革命为科学和工程带来巨大进步，其中最重要的是人们对机器和蒸汽机的设计和理解，这些发展衍生出了热能作为能量形式的研究。大家都知道，能源是一种守恒的“商品”，它既不能被创造也不能被毁灭，只能从一种形式变为另一种形式。

然而，事情并非这么简单。某些形式的能量比其他形式的更有用，衡量效用的方法是衡量能量存在形式的有序程度：无序程度越高，效用越小。这种被称为“熵”的混乱状态似乎在自然过程中不断增大。在某种程度上，这并没有什么神秘之处。比如，你的桌面和孩子的卧室会从一种有序状态变为一种无序状态，这种过程不可逆。有很多方式可以让事情从有序走向无序，而非相反，我们从实践经验中

完全可以确定这一点。这个想法也被写入了著名的热力学第二定律，该定律表明，一个封闭系统的熵不会减小。

对蒸汽驱动引擎的痴迷让鲁道夫·克劳修斯（Rudolf Clausius）[(4)]以及其他一些科学家将宇宙本身看作一个符合热力学定律的系统。这预示了多少有点令人沮丧的宇宙前景：宇宙中的一切似乎都在朝着无趣、无结构的状态前进，所有有序的能量形式最终都将被瓦解。为了将这些想法形成逻辑，克劳修斯引入了宇宙“热寂”（heat death）的概念。他预言，在未来，“宇宙将处于一种永恒的死寂状态”，因为熵会不断增大，直至它可能达到的最大值。此后，宇宙将再无任何变化。宇宙将会停在熵值最大的状态——一个毫无特点的辐射海洋，到处都一样，再没有像恒星、行星或者生命这样的有序的东西，只有热辐射变得越来越冷，直到宇宙达到终极平衡。

另一些人则开始研究这个想法能否推演出宇宙遥远过去的状态。该想法暗示着宇宙一定有一个起点，一个具有最高秩序的状态。1873年，具有影响力的英国科学哲学家威廉·杰文斯（William Jevons）声称：

我们无法无限地追溯宇宙的热量历史。对于一个特定的（即过去的时间）负数，公式得出了一个不可能的值。已知的自然规律表明，一些初始热量的分布无法从之前的分布中产生。现在，热力学（theory of heat）让我们陷入了进退两难的境地，要么相信宇宙始于过去的某个特定日期，要么赞成自然法则的运作发生了一些我们无法解释的变化。

引人注意的是，这一论证的提出比宇宙膨胀概念的提出早50年。20世纪30年代，爱因斯坦的引力理论推导出宇宙是膨胀的，这一点被哈勃望远镜证实了。在这样的背景下，英国天文学家亚瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）重申了这一观点。他写道：

倒转时间，我们会发现世界上有许许多多的结构。如果我们停留在宇宙早期阶段，就会回到物质和能量可能存在最大结构的时代。再往前追溯是不可能的。因为我们将到达时空的另一端——一个我们称为“起点”的地方。我能够接受现阶段的科学理论对未来的预测，也就是宇宙将变为热寂状态。也许这是数十亿年之后的事，但沙漏中的沙子终将耗尽，我们无法逆转。我没有对这个结论本能地产生退缩心理……奇怪的是，与宗教的渴求相反，人们总是将物理宇宙终将终结的看法视作一种悲观的观点。

20世纪30年代，爱丁顿和他的挚友天文学家詹姆斯·琼斯（James Jeans）所著的读物得到普及，越来越多人知道了宇宙热寂理论。宇宙膨胀理论和克劳修斯的热寂理论相结合，加剧了人们对“宇宙中的物质将退化为无结构的热辐射状态”这一观念的恐慌。这种观点给世人带来了悲观的情绪，并且渗透进当时许多神学和哲学的著作里，甚至出现在像多萝西·L.赛耶斯（Dorothy L. Sayers）这样的当代小说家的作品中。这种观点意味着，无论在地球上，还是在宇宙其他地方，生命的灭绝都将不可避免；同时也证实，世界末日就算离我们还很遥远，也终将会到来。

有趣的是，尽管当时没有人注意到，但杰文斯和其他人关于宇宙“起点”的观点并不完全正确。尽管热力学第二定律要求宇宙的熵在我们追溯过去时变小，但这并不意味着在经过有限的时间后，它会达到零的状态，如图2-2所示。熵可以随着时间的推移呈指数级增长，也可以无限接近于零，但不会真正达到零，如图2-3所示。

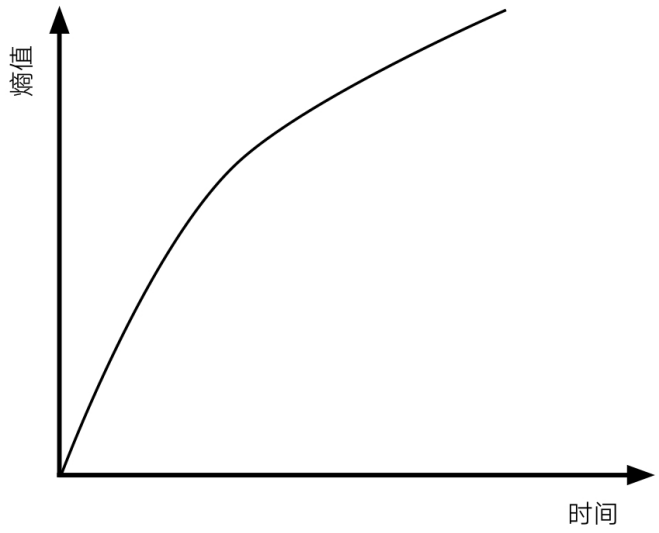


图2-2　熵随时间的变化而变化的趋势

注：上图显示的是熵从某个阶段开始的一段增量。如图可见，当时间倒回过去的某个点时，熵为零。

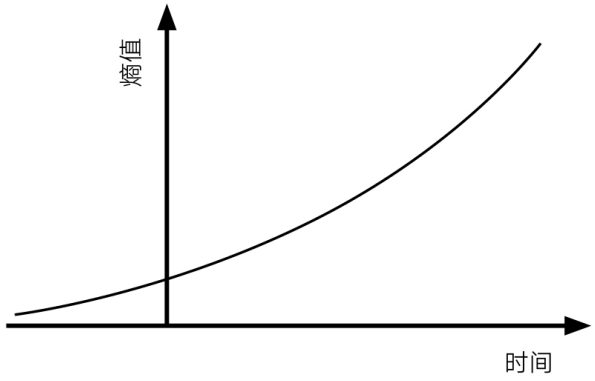


图2-3　宇宙的熵无限接近于零

注：在宇宙的另一种可能性中，熵会不断增大，回溯过去，宇宙的熵会无限接近于零却从未达到零。

另一种情况是，随着时间的推移，宇宙的熵会增大，但在局部区域里，熵会减小。这是目前在宇宙许多地方发生的情况。当地球的生物圈在局部变得更为有序时，熵的减量就超过了地球和太阳间热量交换时总体产生的熵增量。如果你打算用一些木头做一把椅子，那么在施工的过程中，木头的有序程度会提高，熵减小。然而，这些过程并未违背热力学第二定律，因为总熵，也就是能量的输出增加了，包括

储存于淀粉中的、储存于身体中的以及施工所耗费的能量。事实上，我们周围所看到的物质世界的复杂性是一种精妙的呈现，自然可以创造出局部的熵减少，这可以为我们带来当所有地方的熵都增大时所不能获得的平衡。

直到最近，宇宙学家才意识到之前提出的宇宙会毁灭的预言并不会发生，也就是说，在未来，当熵达到极大值时，膨胀宇宙不会陷于之前所预测的热寂状态。虽然宇宙的熵会继续增加，但在任何特定的时间下，宇宙所能拥有的最大熵值增长的速度更快。因此，熵可能达到的极大值和宇宙熵的实际极大值之间的差距在不断增大，如图2-4所示。所以，宇宙实际上离完全平衡的“热寂”状态越来越远。

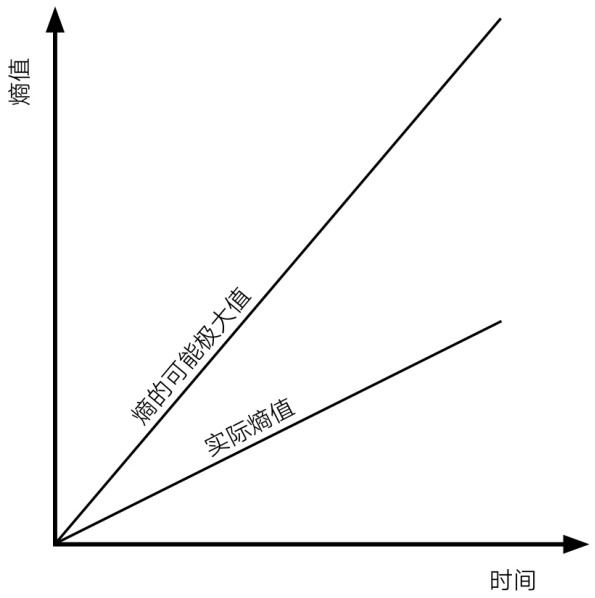


图2-4　当前的宇宙“热寂”观点

注：不断膨胀的宇宙的实际熵值会随着时间的推移而不断增大，但在一个包含等量物质的宇宙中，熵的可能极大值增加的速度更快。随着时间的推移，在达到熵的可能极大值时，宇宙将离完全平衡的“热寂”状态越来越远。

当我们计算宇宙当前的熵时，发现它的值低得惊人。也就是说，我们可以设想宇宙能量分布的方式异常无序。尽管宇宙以熵持续增加的方式膨胀了近150亿年，但它当前仍然处于高度有序的状态，其中的

原因仍是一个谜。这意味着宇宙的初始状态一定极度有序，因此当时的状态必定非常特殊，可能由某些对称或者极为有效的宏大规则支配。

然而，事实证明，我们不可能利用这些想法发现这一规则，因为我们对宇宙结构的了解还不足以支撑识别出所有有序和无序的方式。因此，我们也无法完整地计算出宇宙当前的熵。1975年，物理学家雅各布·贝肯斯坦（Jacob Bekenstein）和斯蒂芬·霍金证明了黑洞具有与深量子（deep quantum）相关的熵。英国数学家罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）推测，类似的熵也可能与宇宙的引力场有关。对未来的宇宙学家而言，全面理解引力在热力学领域的表现是一个难题。我们将在本书的末尾回到这个问题。

如果你不喜欢正在不断膨胀的宇宙，不希望它的熵在未来不断增大，可以选择另一个由弗里德曼提出的宇宙膨胀模型，其中有些宇宙模型膨胀的速度很慢，足以让物质的引力作用在遥远的未来将宇宙坍缩到大小为零的状态，这种最终状态将是极度猛烈的热寂：随着坍缩不断加剧，温度和密度将无限增大。这种宇宙的演化模型提出了循环宇宙的古老概念，即宇宙不断经历着重生，每一次都像凤凰一般从灭亡的灰烬中涅槃（见图2-5）。

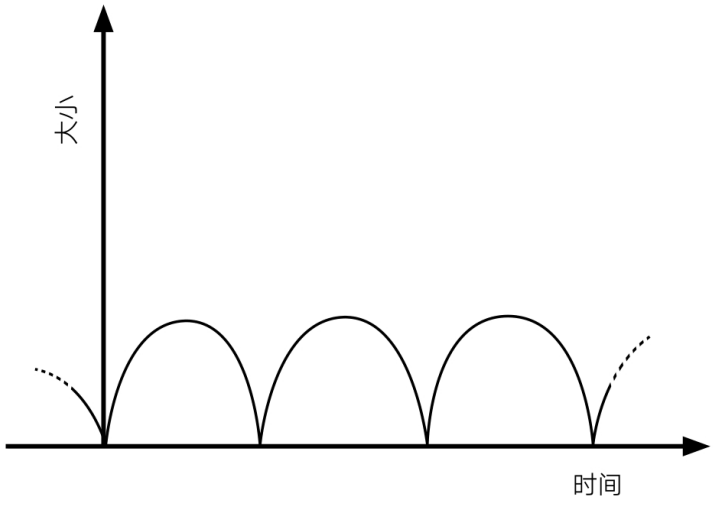


图2-5　循环宇宙模型

注：该图表示的是一个永恒循环的宇宙，在该宇宙中，每个周期的大小与它的前身相同。

根据这种观点，我们生活在一个循环宇宙的膨胀时期，它有着悠久的历史，同时也有着无限的未来。所有的行星、恒星和星系都会在宇宙陷入每一次“大坍缩”时被摧毁，然后宇宙又重新回到膨胀的状态。

尽管该模型在哲学上十分具有吸引力，并且不需要解释宇宙起源时发生了什么才导致现在的膨胀状态，但因为热力学第二定律，它也遭受了不少非议。

关于循环宇宙的反对论点是由美国物理学家理查德·托尔曼（Richard Tolman）在20世纪30年代提出的。他认为，宇宙的大小会在前一个宇宙的最大值上继续增大，因此宇宙的每个周期都大于上一个周期。这有可能发生，因为物质会逐渐耗散于辐射之中，导致对抗宇宙膨胀引力的力增大。因此，在接下来的循环中，膨胀会持续得更久。如果我们沿着一个不断增大的循环宇宙回到过去，它会变得越来越小。在当时以及之后的很长一段时间内，人们又都错误地认为，这意味着宇宙在有限的时间里从大小为零的状态开始膨胀；也可能在过去的时间里，宇宙经历了无数个周期，每个周期都比后来的周期小，但从未达到大小为零的状态（见图2-6）。

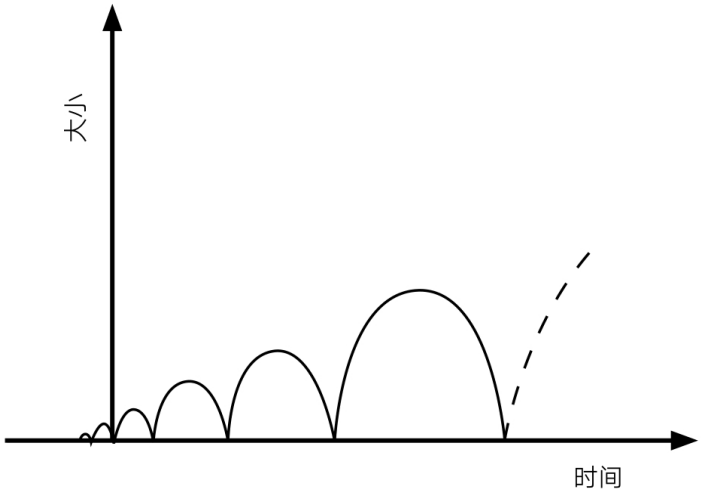


图2-6　不断增大的循环宇宙模型

注：同热力学第二定律相符，熵值随着时间的推移不断增大，这增加了宇宙中辐射的压力，使得每个周期随着时间的流逝而延长。

另一些人则认为，如果过去已经发生了无数个宇宙循环，那么熵的增大应该会导致现在的宇宙处于热寂状态。然而，由于没有人能够确定宇宙在每次重生时发生了什么，因此这个观点并不具有说服力。一些人推测，在每次宇宙重生的过程中，我们所谓的物理常数、熵值，甚至所有自然法则都可能会重新洗牌。如今，这类争论已经变得无足轻重，因为我们缺乏对宇宙熵值的充分理解。如果引力场以一种非同寻常的方式承载熵，那么宇宙熵值的持续增加很可能不会导致宇宙的大小从一个周期到下一个周期的稳定增长。

如果你和对宇宙学很感兴趣的人交谈，可能会发现，提到大爆炸理论就会让他想起宇宙恒稳态理论。事实上，恒稳态理论早在30年前就不是学界的主流了。尽管如此，作为大爆炸理论的竞争对手，这种理论仍然根植于大众的思想中。恒稳态理论是天体物理学家托马斯·戈尔德（Thomas Gold）、赫尔曼·邦迪（Hermann Bondi）和弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）的思想的产物。1948年，他们在剑桥大学看了一部以回归到开始状态为结局的电影——《死亡之夜》（*The Dead of Night*），之后就提出了这个模型。“如果宇宙真是这样的呢？”

他们这样问自己。他们虽然都知道宇宙在膨胀，但不喜欢宇宙应该有起点的想法，而这似乎正是膨胀的宇宙所暗示的。他们希望宇宙在任何时候，包括从无限过去到永恒未来之间，所呈现的整体外观都是一致的。所以，他们设计了这个模型，在其中，宇宙没有起点，并且从总体上看始终保持一致（见图2-7）。

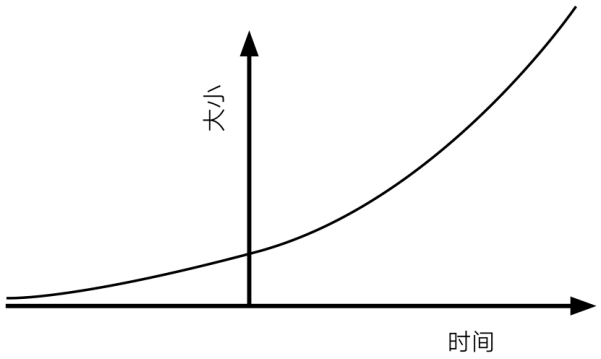


图2-7　恒稳态宇宙的膨胀

注：恒稳态宇宙的膨胀没有起点也没有终点。

他们认为，宇宙不是在过去的某个特殊时刻创造出的产物，而是不断地创造物质，并且以正确的造物速度发展，从而平衡由膨胀引起的密度稀释，最终保持宇宙物质密度的恒定。这种状态开始于无限远的过去，并将永恒地延续下去。相比之下，大爆炸理论下的宇宙膨胀导致其密度不断下降，它显然拥有一个创造物质的起点，而且造物过程并未延续下去。顺便说一下，恒稳态宇宙所需的造物速度极为微小，大约每100亿年一次，每立方米增加一个原子，而且我们永远不可能直接观测到如此微小的造物过程。造物速度如此之慢的原因是，宇宙中几乎没有物质。如果如今宇宙中的所有恒星和星系都变成统一的原子海洋，那么每立方米的空间中就只有一个原子。这可比地球上任何实验室所能产生的真空更空。外层空间实际上就是空无一物的房间——空间。

宇宙恒稳态理论的优点之一是具有确定性，对宇宙应该呈现的模样做出了非常肯定的预测，因此很容易被我们观测所得的结果反驳。事实上也的确如此。如果宇宙在所有的时期里都保持一致，那么就不存在所谓的特定的宇宙历史时期，例如，当星系开始形成，或是类星体普遍存在的时期。射电天文学起源于第二次世界大战时期对雷达的研究，这种新科学使天文学家能够以无线电波而非可见光的形式观察那些发射能量的物体。天文学家利用射电望远镜观测到了非常古老的星系，这些星系是无线电波的重大来源。他们观察这类星系以确定它们是否就像大爆炸理论所预测的那样，出现于宇宙的某个特定时期，抑或像宇宙恒稳态理论所预测的那样，一直保持同样的星系数量。20世纪50年代末，不断累积的观测结果表明，过去的宇宙与今天的宇宙大相径庭。在宇宙历史的不同时期，能够发射强烈的无线电波（射电星系）的星系数量并不相同。

当我们观察遥远天体发出的光线时，就好似回到了过去，看到的是光离开时这些天体的模样，所以当我们观察本质上相似但离地球距离不等的天体时，便能了解宇宙在不同时期的模样。当然，我们仍然可以对这些观测结果提出异议。射电天文学家发现，射电星系在过去的数量比现在多得多，当他们试图说服宇宙恒稳态理论的支持者时，引发了两个派系间的激烈争论。

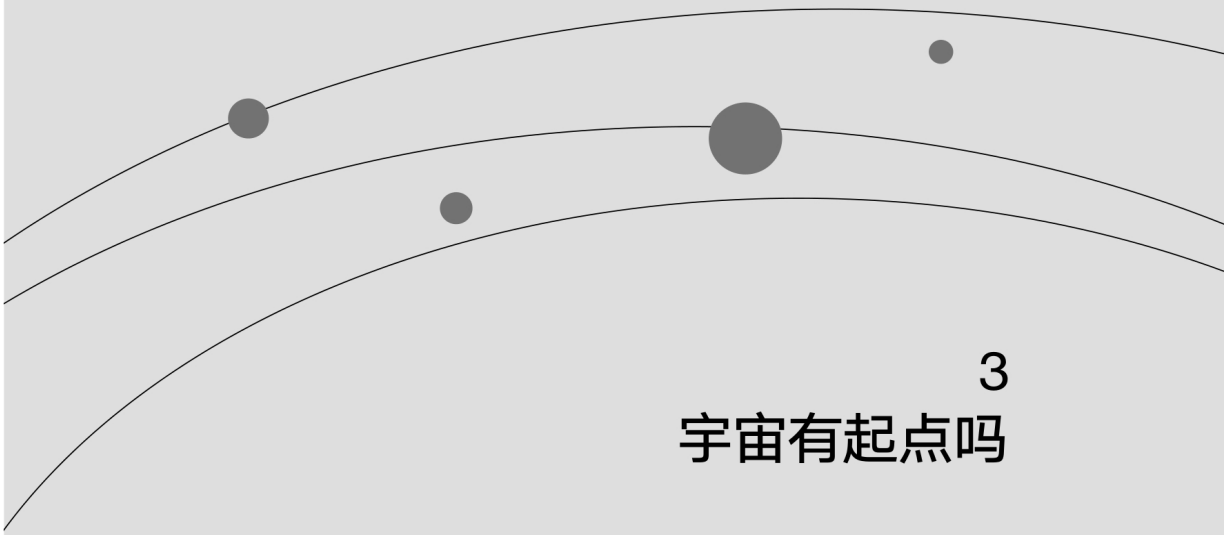
关于宇宙大爆炸理论与恒稳态理论的辩论给大众留下了深刻的印象。1950年由BBC推出的一系列电台节目奠定了舆论基调，该系列节目名为《宇宙的本质》（*The Nature of the Universe*），在当时非常受欢迎。弗雷德·霍伊尔是当时的主持人，他在节目中创造了“大爆炸”（big bang）这个词汇，对宇宙学做了贬义描述。他说宇宙起源于过去某个有限的时间，并从一个密集的状态膨胀而来。

这场激烈的辩论终止于1965年，因为在这一年，阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊发现了宇宙微波背景辐射。在一个稳定的宇宙中不

可能存在这样的热辐射，因为恒稳态宇宙从未经历过这样高密度且炽热的过去。相反，它通常是冷静而沉寂的。此外，科学家也观测到宇宙中存在大量的最轻元素，这一结果与大爆炸模型的预测相吻合，这些最轻元素诞生于宇宙膨胀之初的前三分钟出现的剧烈核聚变反应。恒稳态模型无法对这些物质的大量存在提出任何自然的解释，因为恒稳态宇宙从未经历过核聚变反应得以发生的高密度且炽热的早期阶段。

这两项与预测完全吻合的观测结果敲响了恒稳态模型的丧钟，尽管它的一些支持者仍试图以不同的方式来修补该理论，但它再也不能成为宇宙起源模型的候选。大爆炸模型成功地整合了我们对宇宙的观测结果，并确立了它在宇宙起源方面的稳固地位。但人们必须明白，“大爆炸模型”一词的含义只不过描绘了一幅不断膨胀的宇宙图景，它让我们知晓宇宙的过去比现在更加炽热、密度更高，除此之外再无其他。另外，学界还存在着许多不同的宇宙理论学说。宇宙学家的工作则是确定宇宙的膨胀历史，从而确定星系形成的方式，解释为什么星系以星团的方式聚集、为什么宇宙以现在的速度膨胀，解释宇宙的形状以及它内部的物质和辐射间的平衡问题。

THE ORIGIN OF THE UNIVERSE



3
宇宙有起点吗

宇宙有起点吗？是的，万物有终必有始，这本不必多言，真正迷人的是那些看似平常的表象之下潜藏着的种种暗流。

案子里的怪异之处总是断案的重要线索。越是平淡无奇、司空见惯的犯罪行为，就越难侦破。

——《博斯科姆比溪谷秘案》（*The Boscombe Valley Mystery*）

宇宙膨胀理论意味着过去曾经发生过一些创世性质的巨变。如果我们使时光倒流，回溯宇宙膨胀的历史，总是会发现宇宙有一个“起点”。在宇宙的起始阶段，所有的物质都相互凝聚在一起：宇宙中的所有质量都被压缩成一个密度无限大的状态，这个状态便是我们所知的“奇点”。它的存在为我们过去的历史投下阴霾，也引发了学界对现代宇宙学的各种形而上学和神学的猜测。

从目前观测到的宇宙膨胀速率和减速速率来判断，奇点距今只有大约150亿年的时间。我用了“只有”这个词是因为，虽然以人类的标准来看，这个时间尺度已经极度漫长，但实际上它并不比地球上其他生物的时间尺度长多少：恐龙在2.3亿年前还在阿根廷游走；地球上已发现的最古老的细菌化石约有30亿年的历史，格陵兰岛地幔中最古老的地表岩石约有39亿年的历史，而太阳系初期遗留下来的最古老的岩屑大约有46亿年的历史。人类距离地球起源的时间仅仅是距离奇点这个奥秘的时间的1/3。

20世纪30年代早期，许多宇宙学家不愿意承认宇宙膨胀的事实，因为这一事实将宇宙的起源指向一个具有无限大密度的单一起点。他们主要提出两个例子来进行反驳。第一，如果我们试着将一个气球不停地挤压到更小的尺寸，便会遇到阻碍，最终被气球里相互挤压的分子间的压力击败。当分子能自由移动的空间减少时，它们对边界的挤压力度会增大。宇宙也不例外，宇宙中的物质和辐射为了阻止被压缩到零体积，会对外界产生更大的压力。它们可能会反弹，就像一池相互碰撞的台球。第二，奇点这一概念之所以出现，是因为我们接受了宇宙在各个方向上以相同速率扩张的观点。因此，当我们回溯宇宙的

膨胀时，所有的物质都会同时收缩，最终汇聚成一个点。然而，如果膨胀出现些微不匀称（事实正是如此），当我们回溯宇宙的历史时，向内坍缩的物质并不同步，这种情况不太可能产生一个奇点。

当深入探讨这些反对的观点时，宇宙学家也未能推翻奇点存在的设想。事实上，反弹压力的增加实际上有助于奇点的诞生，因为爱因斯坦伟大的相对论表明，能量和质量是等价的（$E=mc^2$）。反弹压力只是能量的另一种形式，因此等同于质量；当质量变得非常大时，便会产生一种引力来对抗反弹压力。试图用抵抗压力的存在来否认奇点的观点是自相矛盾的，这种观点实际上反证了奇点的不可或缺。不仅如此，当爱因斯坦的引力理论被用来寻找宇宙中的其他可能性时，比如宇宙在不同的方向上以不同的速度膨胀，或者不同地区之间存在差异，奇点依然存在。它不只是对称宇宙模型的产物，而且似乎无处不在。

针对奇点这一概念的最后一项异议则较为微妙，直到1965年人们才对它有了充分的理解。我们以大家都熟悉的地球仪为例来诠释该观点。在地球仪上，地球是一个由经纬线组成的网络，经纬线可以定位地球表面上的任何一个点。当我们向两极中的任意一极移动时，经线开始收敛，且最终相交于两极（见图3-1）。所以我们看到，在地图的两极，地图坐标已经形成了“奇点”，但地球表面并没有出现特别之处。我们通过选择特定的地图坐标，人为地创建了一个奇点。我们也可以选择其他不同的坐标网格，但无论我们如何选择，地球的两极都没有发生特别的变化。所以，我们怎么知道，在宇宙膨胀的初始阶段显然存在的奇点不是一个用于绘制遥远过去情景的拙劣方法呢？

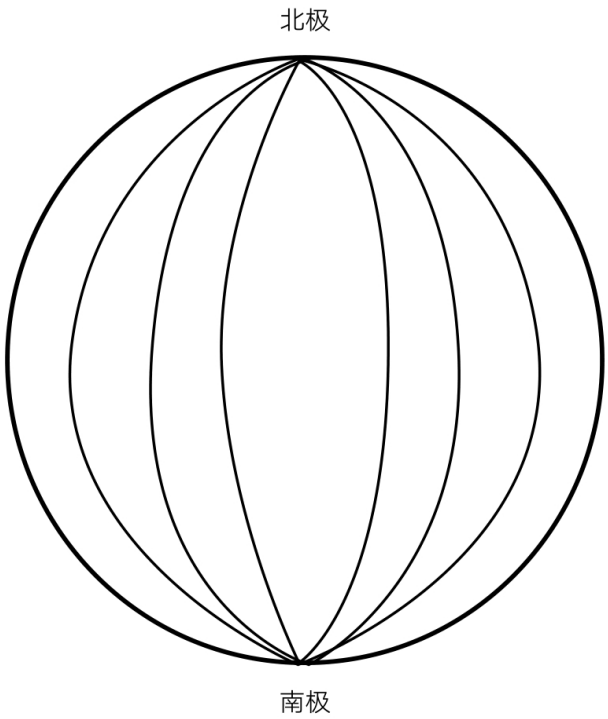


图3-1　地球表面的经线交汇于两极

注：奇点可能出现在宇宙边缘。这种处理方式巧妙地绕开关于宇宙形状和压力的问题以及同坐标类比产生的模棱两可。尽管这样的奇点可能会拥有极高的密度和温度，正如我们从直觉出发对膨胀的大爆炸宇宙描绘的图景，但它并不一定必须是这样的。

为了解答这个疑问，宇宙学家必须严肃地定义奇点。如果将整个宇宙的完整历史（所有的空间和时间）设想为一张展开在我们面前的巨大薄片，那奇点就是特定方位上的一个点，在这个点上，密度和温度变得无限大。假设我们切掉并移除了这些特殊的点，就会得到一个没有奇点的冲孔薄板，这将是另一种可能存在的宇宙。我们会觉得这种设想不切实际。毫无疑问，这样的宇宙在某种意义上是绝无仅有的。如果我们曾经发现过一个非常独特的宇宙，那么怎么知道它在演化过程中并没有以这种人为的方式“删掉”奇点呢？

若想解答这个难题，需要抛弃传统的关于奇点的定义，即奇点具有无限的密度和极高的温度。当任何光线穿过空间和时间的路径被完全终止，且不能继续时，我们称这个点为奇点。

还有什么能比这种爱丽丝漫游仙境般的经历更令人称“奇”的呢？在路径的终点，光线到达时间和空间的尽头，便从宇宙中“消失不见”。这种定义的美妙之处在于，如果在宇宙的某个点上，密度确实无限大，那么光线的路径会被迫中断，因为空间和时间已经不复存在。但是，如果这样的点已经从宇宙中移除，则宇宙的时空中会留下一个洞，当光线到达这个洞的周边地区时，光线也会停止传播（见图3-2）。

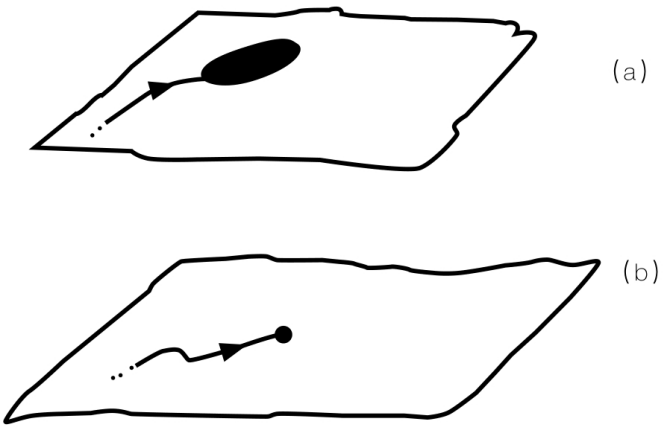


图3-2　关于奇点和光线的两种设想

注：两张图代表了空间和时间中的宇宙，其中光线的路径到达了终点。在图（a）中，宇宙中被切割出了一个洞，光线到达它的边界。在图（b）中，光线到达一个奇点，在该点上，空间和时间都不复存在。

关于宇宙的起源，还存在其他的情况，比如，它不需要同时发生在每个地方。如果追溯至宇宙的奇异起源，我们可能会发现穿越时间的不同路径可能始于不同时刻。目前宇宙中某些区域的密度较其他区域低，也许便是这一事实的体现，即密度较低的区域更早地从奇点处出发，相较于其他密度更高的区域，这些区域有着更为长久的膨胀历史。

20世纪60年代中期，彭齐亚斯和威尔逊发现了宇宙微波背景辐射，从此，大爆炸模型开始得到学界的认真对待。宇宙学家关注的焦点是，宇宙是否始于一个奇点。若想厘清宇宙的起始状态，即时空倒

转至不能再继续向前的那一个点，我们就需要研究清楚宇宙是否包含这样的奇点，即时间的起点。

罗杰·彭罗斯证明了这些问题能通过新的几何参数得到解答，在这之前，天文学家从未使用过这种方法。彭罗斯的数学背景及其令人叹为观止的几何直觉，让他能够运用强大的创新方法来解决光线如何运动以及它们能否穿越永恒过去的问题。后来，霍金和其他一些人也加入了他的行列，这其中包括物理学家罗伯特·杰拉奇（Robert Geroch）和乔治·埃利斯（George Ellis）。

彭罗斯指出，如果宇宙中物质所产生的引力一直存在，并且在所有地方都具有吸引力，而且宇宙中有足够多的物质，那么这种物质的引力效应会使人们不可能无限地沿着时间往回追踪所有的光线。

一些（也可能是所有）光线的溯源会止于一个起点，即奇点，这与我们对大爆炸的直观认知是一致的（见图3-3）。这些严谨的数学推论的美妙之处在于，它们避开了映射坐标和特殊对称性所具有的不确定性，也不需要我们了解宇宙结构的细节，甚至不需要知道万有引力定律。需要强调的一点是，这些推论仅是定理，而不是理论。如果它们提出的关于宇宙本质的特殊假设为真，那么我们仅凭逻辑推理就能确定奇点的确存在于过去。如果这些假设在宇宙中并不成立，我们也不能得出奇点不存在的结论，因为我们根本就不能得出任何关于宇宙起始阶段的结论，这些定理也就不再适用于宇宙。

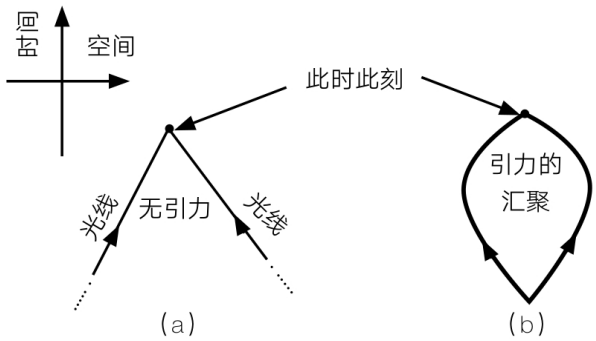


图3-3　光线的路径

注：（a）在无引力的情况下，光线以固定速度穿越时空的路径；（b）引力的作用让光线原本笔直的路径弯曲。如果宇宙中有足够多的物质，光线会在过去汇聚成一个奇点。

上文这两种假设，即无论何时何地，引力都具有吸引力以及宇宙中有足够多的物质，都极其令人着迷。尽管我们使用了数学语言来表述这两种假设，但它们可以通过观察得到检验。值得注意的是，新发现的宇宙微波背景辐射便能满足宇宙中存在足够多的物质这一假设。现在就只剩下一个需要检验的假设了。

20世纪60年代，学界认为这个假设是完全合理的。因为没有证据可以用来反驳，也没有关于物质在高密度状态下将做何表现的可靠理论来预测某些形式的物质可能出现反引力的情况。在所有我们所知的情况下，引力是物质具有正质量的结果，因此引力也是正密度的结果。

当我们遇到压缩到极高密度的材料，或是以接近光速c的速度移动的物体时，必定会再次想起爱因斯坦的方程式：$E=mc^2$。任何形式的能量E，都有与之相匹配的质量m，因此，它会感受到其他物质的引力。如前所述，压力是能量的一种形式（来源于分子运动的能量，比如气体中的分子受到挤压释放出的能量），因此也受到引力的影响。由于造成压力的粒子只能在三维空间中移动，引力具有吸引力的等式是，总量D等于密度d加上3倍的压力p，除以c的平方，结果必须为正：即$D=d+3p/c^2>0$。宇宙中所有常见的物质形式都是如此——辐射、原子、分子、恒星、岩石等。

20世纪60年代末，宇宙具有时间起点的观点被人们接受，并在70年代广为传播。当时，数学宇宙学家的大部分工作集中在此类问题上：神秘复杂的奇点附近发生了什么，奇点对附近的物质造成了什么影响？

有趣的是，关于时间起源的推论彻底推翻了循环宇宙理论，循环宇宙会周期性地出现大坍缩，接着进入一个全新的膨胀阶段。如果我们将宇宙的历史追溯到奇点阶段，在奇点面前，再没有所谓的“从前”。我们也无法将宇宙的历史追溯到某个更早的收缩状态，这个想法只能停留在科幻小说之中。

如果宇宙确实起源于一个具有无限密度和温度的物质（即奇点），那么宇宙学家在继续探索的尝试中会遇到许多问题。到底是什么决定了这个宇宙的类型？如果在奇点以前，时间和空间均不存在，那我们如何解释万有引力定律、逻辑定律或者数学定律？它们在奇点之前也存在吗？如果答案是肯定的（当我们将数学和逻辑应用于奇点本身时，似乎就已经承认了这一点），那么，我们就必须承认存在一种比物质的宇宙应用范围更广的理论。此外，若想了解宇宙目前的状态，我们就要明知不可为而为之——了解奇点本身。但奇点是一个独特的事件，如何才能用科学方法检验它呢？

起初，宇宙学家着手研究了我们之前提到的两种可行策略：寻找可能决定奇点性质的原理；或是尝试证明奇点无关紧要，无论宇宙当初如何开始，最终和今天的状态无甚差异。

我们已经重点介绍了宇宙学家关于宇宙的一些发现以及他们想要回答的一些问题。若想解释宇宙中的一些现状，例如，为什么星系以当前的形状和尺寸存在？我们就需要在时间上回溯，利用关于物质在超高密度和温度下形态变化的知识重构宇宙的历史。

我们需要利用过去事件在宇宙中遗留的痕迹，来检验我们的推论正确与否。可惜的是，事情并没有想象的那么简单。因为宇宙毫不留情地掩盖了它的过去，宇宙遥远的历史长河几乎无迹可寻。不过，更深层次的原因在于，我们并不知晓物质在极端温度和密度下的所有运动方式。我们在地球上进行的实验受经济、空间以及可用能量的限制，无法完全模拟宇宙在膨胀开始后的百分之一秒内的环境。

这就造成了一种相互矛盾的局面。一方面，宇宙学家寄希望于粒子物理学家提供物质和宇宙微波背景辐射在极高温度下如何运动的解释，这样，重建的宇宙历史就更接近其起始阶段。但另一方面，粒子物理学家仅利用地球上现有的资源无法做到这一点。因为地面粒子加速器无法再现大爆炸产生的能量，探测器也无法捕捉到缥缈的基本粒子。因此，粒子物理学家通过探索宇宙的早期时刻来检验他们的理论。例如，如果他们最新的理论推断出恒星或者星系不可能存在，那么该理论就可以被排除。不过，有一种微妙的平衡正在形成，部分通过验证（甚至未经验证）的物理学正被用于绘制宇宙诞生第一秒可能出现的情况。

读者最好把大爆炸后的第一秒看作宇宙发展的分水岭。因为学界相信，在发生大爆炸的第一秒之后，宇宙的温度已经低到地球的物理学能够适用的程度，并且各类现象能够通过实验来测试。不过，我们无法完全复制当时的物理过程，也无法重现在第一秒就决定了宇宙进程的基本粒子，这两个因素让我们无法确切地重建宇宙的历史。这一秒也是宇宙早期决定氦元素宇宙丰度(5)的时间，而它的丰度有助于我们探索宇宙在当时是如何膨胀的。

这并不意味着我们能知晓宇宙诞生一秒后发生的所有事件。我们所了解的是从那开始便控制宇宙运行的一般性物理原理和规律，但仍有一系列事件极端复杂，尤其是那些与星系形成相关的事件，我们目前还无法在细节上对其重构。这很像我们对天气系统的了解。即使我们知晓所有控制天气变化的物理原理，也可以解释过去任一气候的变化过程，但不一定能准确地预测天气，即使预测的是明天的天气。因为自然界中存在无数的影响因素在相互作用，它们共同决定了当天的天气状况。我们无法完全知晓当下的状态，所以预测能力就会受到限制。

到了20世纪70年代末，物质基本粒子的研究开始与天文学和宇宙学相关联。在通常情况下，如果存在某种未被发现的亚原子粒子，即使其作用力太弱而无法在粒子对撞机实验中得到显现，但它会在宇宙学上产生很大的影响力。这样，我们便可利用来自天文学的证据排除许多新基本粒子的存在。

日内瓦欧洲核子研究中心（CERN）的高精度实验所得的结果与描述宇宙诞生初期核聚变反应的宇宙学理论相互印证，这有力地证明了宇宙学和基本粒子物理学之间的共生关系。该中心的研究表明，有一种叫作中微子的基本粒子存在数种变体。中微子常被称作“幽灵粒子”，因为它们与所有其他物质的相互作用极其微弱，很难被探测到。事实也的确如此，就在当下的这一刻，有许多中微子正在穿过你的身体，而你却浑然不知。物理学家早就知道存在两种中微子——电子中微子和μ中微子，这两种中微子已经被无数的加速器实验直接探测到了。第三种中微子是τ中微子，我们不能直接对其进行观测，只能通过其他粒子的衰变间接地指明它的存在。因为产生一个τ中微子需要消耗很多能量，所以目前我们还不能对其进行直接探测。仅凭这些，我们就能够确定τ中微子真的存在吗？[(6)]世界上还存在其他我们尚未发现的中微子类型吗？

我们先来看看科学家是如何使用天文观测的数据来确定中微子的种类的。然后，我们可以将该结果同欧洲核子研究中心最近的实验进行比较，后者直接检测出了结果。

自20世纪70年代以来，宇宙学家一直假设中微子有且仅有三种，并在阐明宇宙年轻时代组成成分的主要理论模型中，将其作为一个具体构成部分。对宇宙学家而言，知晓自然界中中微子的种类非常重要，因为这个数据决定了宇宙早期辐射和物质的总密度，而这又反过来决定了宇宙膨胀的速度。宇宙学家充分利用这些信息来探索宇宙在1~1 000秒发生的所有细节。在宇宙的这段短暂的发展史上，膨胀的宇

宙具有足够高的温度产生核反应，将中子和质子以不同的方式融合在一起产生最轻质的元素。

在这段时间以前，宇宙的温度太高，以至于任何比氢元素重的元素（氢由一个质子组成）一旦形成就会被分解（氢原子核也会消失，当时宇宙距诞生还不到一微秒）。在最初的10秒内，由于被高温分解，轻元素的积累是很缓慢的，但在100秒后，这种积累在剧烈的核聚变反应中达到高潮，然后因温度和密度的降低被迅速叫停。1 000秒之后，一切都归于平静。

若想预测这些核聚变反应的结果，我们需要知道当时存在的质子和中子的相对数量。这个数字将决定由它们构成的原子核的最终丰度：氘，是氢的一种同位素，它拥有1个质子和1个中子；氦有2个同位素，其中一个拥有2个质子和1个中子（氦-3），另一个拥有2个质子和2个中子（氦-4）；还有锂，由3个质子和4个中子组成。

当宇宙的年龄小于1秒时，宇宙中质子和中子的数量应该保持一致，因为它们之间所谓的弱相互作用力会使质子和中子相互转换，数量保持平衡。但是，当宇宙诞生1秒之后，其膨胀的速度变得异常快，弱相互作用力将无法维持中子和质子之间数量的完美平衡。不过，将质子变成中子要比将中子变成质子困难一些，因为中子比质子的质量稍大一点儿，因此产生1个中子需要更多的能量。

随着弱相互作用力的停止，质子和中子的数量也趋于稳定：二者之间的比率是7:1。距大爆炸大约100秒之后，核聚变反应开始将这些中子与质子结合成原子核，形成氘、氦和锂。大约23%的物质最终成为氦-4，其余的几乎都成为氢，十万分之几的部分存在于氦-3和氘的同位素中，一百亿分之几的部分存在于锂中（见图3-4）。

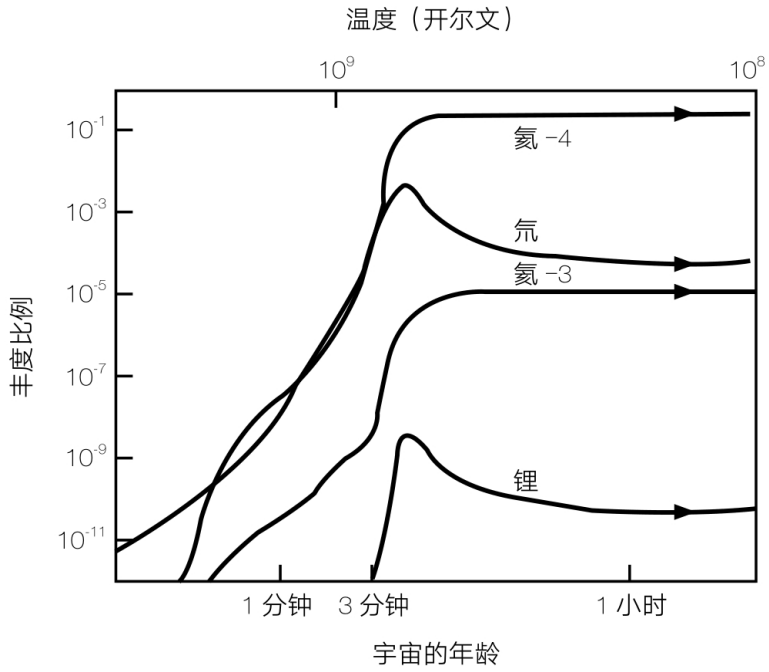


图3-4　宇宙中最轻元素的形成时间

注：宇宙历史的前3分钟，从质子和中子中产出的最轻的元素。当温度下降到10^9开尔文以下时，核聚变反应便迅速发生。随后，由于膨胀过程中物质的温度和密度迅速下降，核聚变反应终止。

天文观测证实了氦、氘和锂在宇宙中的上述宇宙丰度。最简单的大爆炸模型和我们的天文观测惊人一致。显然，这种一致性建立在自然界中只有3种中微子的假设基础之上。如果中微子的数量有4种，早期宇宙的膨胀率会增大，当弱相互作用力停止时，质子和中子的比率会下降。因此，从早期宇宙中产生的氦的最终丰度也会相应地增大。已经有非常详尽的研究将所有观测结果以及不确定性考虑在内。因此，宇宙学家声称，与我们所知的3种中微子相似的第四种中微子不可能存在（见图3-5）。

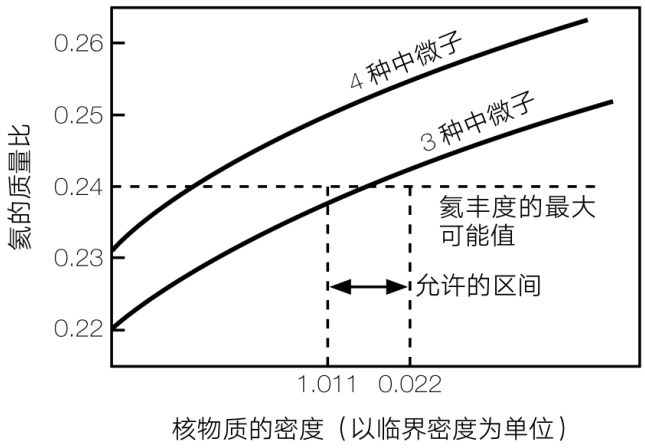


图3-5　氦-4在不同密度下的丰度

注：此图以“结束”宇宙剧烈变化时期的临界密度为单位，描述了早期宇宙所产生的氦-4在不同密度下的丰度。当存在3种或4种中微子时，氦的产生量如图3-5所示。宇宙中以氦-4形式存在的质量分数为0.22~0.24。当物质密度为临界密度为0.011~0.022时，氦-3、氘、锂-7的丰度也与所观测的结果保持一致。这个密度范围也与今天我们在恒星和星系中观测到的物质密度一致。4种中微子的存在意味着宇宙中氦的丰度比实际上限（0.24）高得多。只有当宇宙中只存在3种中微子时，观测结果与预测结果才保持一致，为0.235~0.240。

欧洲核子研究中心的实验也证实了这一预测。该中心监测了大量短寿粒子，即Z玻色子。每个Z玻色子的质量约为质子的92倍，它们会迅速衰变为更轻的粒子，比如中微子。如果中微子的种类大于三，则Z玻色子的衰变路径便会增多，那么它们消失的速度就会越快。欧洲核子研究中心的实验人员监测了大量Z玻色子的衰变，以确定它们衰变为多少种中微子。答案是2.98±0.05。考虑到实验的不确定性，宇宙中似乎真的只有三种中微子。

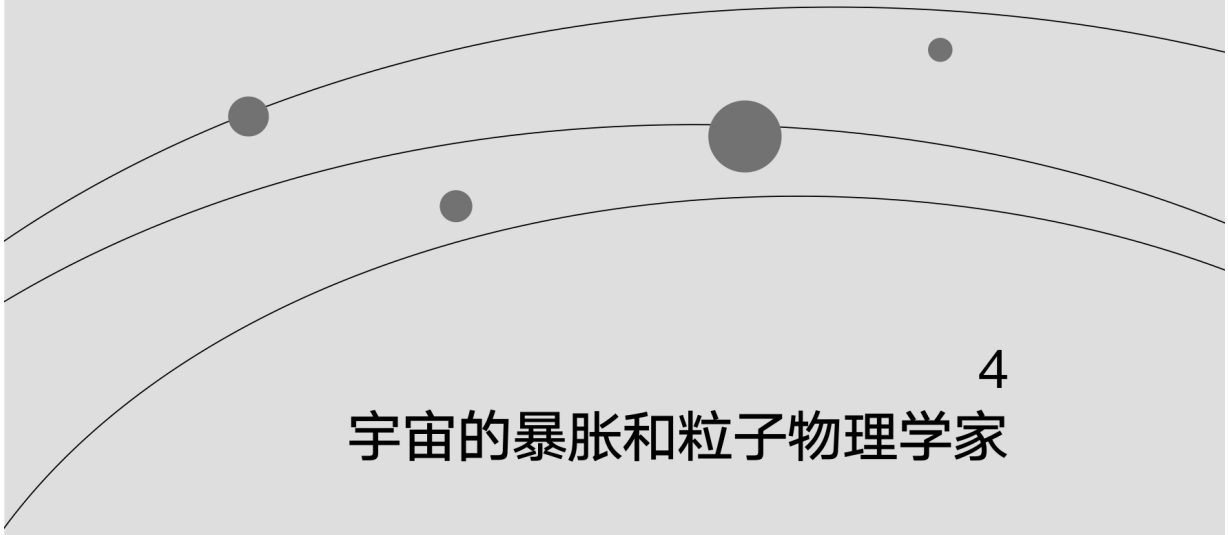
这是一个展现粒子物理学和宇宙学如何互补的完美例证，它丰富了我们对整体宇宙的理解。对最轻元素丰度的正确预测是宇宙大爆炸模型的最大成就。这些预测捕捉到了宇宙刚诞生一秒时结构的微小变化，使我们能够推断出当时宇宙的可能状态。例如，如果宇宙以不同的速率向不同的方向膨胀，或者在整个空间中包含强磁场，那么膨胀速率就会增加，氦的丰度将大大超过我们现在所观测到的结果。根据

观测，相比于宇宙微波背景辐射，太空中的最轻元素可以追溯到更久远的过去。因此，太空中的最轻元素是我们探索宇宙在膨胀开始一秒后可能状态的最强大探测器。

通过对宇宙初始核聚变反应的研究，我们得出了一个更为深刻的结论：计算早期宇宙中所形成的元素的丰度，其实并不需要知晓宇宙的初始状态，只需知道质子和中子间的弱相互作用力停止时宇宙的温度即可，因为它们两者间的相对丰度由此决定。

这是大爆炸宇宙的显著特征。热平衡的状态确保其温度精确地决定了不同粒子的丰度和辐射强度。而这一事实直到1951年才得到学界的充分认可。在此之前，许多宇宙学家认为，宇宙早期的元素丰度取决于宇宙初始状态下质子和中子的相对数量。但事实并非如此。在宇宙诞生1秒之前，质子和中子的数量是相等的。无论过去如何，有些事物都会演变成现在的样子。

THE ORIGIN
OF
THE UNIVERSE



4
宇宙的暴胀和粒子物理学家

你的进展如何？不要心急，魔鬼就藏在你忽略的细节里。看到那些虚无缥缈的尘埃了吗？它们才是你要找的关键证据。

长久以来，我的座右铭就是，不起眼的小事情往往无比重要。

——《身份问题》（*A Case of Identity*）

20世纪70年代中期，宇宙学开始朝新方向发展。1973年，粒子物理学家发现了一个能够解释物质在极端条件下如何运动的有效理论。在此之前，他们认为，物质之间的相互作用力将随着能量和温度的增加而变得更强烈，同时也会变得更为复杂。因此，他们热衷于研究大爆炸发生后第一秒宇宙的环境到底如何。解决问题的需求变得迫切起来。然而，他们对基本粒子之间高能的相互作用力的研究成功地表明，随着温度和能量的上升，这些相互作用力会变得更弱，也更简单，这种性质被称为“渐近自由”（asymptotic freedom），因为如果外推的能量处于无限大的状态，中性粒子之间的相互作用力将不复存在。

研究基本粒子的物理学家开始将4种基础的自然力（引力、电磁力、强相互作用力和弱相互作用力）纳入某种统一的理论之下。1967年，科学家首次发现，理论中的弱相互作用力（表现为某种放射性物质）和电磁力相互缠绕。但直到1983年，欧洲核子研究中心发现的两个新型基本粒子才证明了“电弱统一理论”（electroweak theory）的正确性，因为该理论预测了这两种粒子的存在。现在，科学家正在寻找将强相互作用力（使原子核结合在一起的力）纳入已有体系的方法，从而形成一个只缺少引力的“大统一理论”（grand unified theory）。

乍一看，这些将各种力统一起来的尝试注定会失败，因为自然界的这些基础的自然力所具有的能量大相径庭，并且作用的粒子群也各不相同。这些完全不同的东西怎么可能具有相同的本质呢？答案是：自然力的强度会随着温度的变化而变化。

所以，尽管自然力在我们所生活的低能量世界中的表现各不相同，但当我们向更高温度的环境探测时发现，它们的性质会慢慢发生改变。被学界认可的理论预测，强相互作用力和电磁力在极高的能量下将趋于相等，这个能量值为10^{15}吉伏特，对应的温度约为10^{28}开尔文，超过地球上所有地面粒子对撞机产生的温度，该温度大致等同于早期宇宙在诞生10^{-35}秒时经历的能量强度。

我们或许能够通过探索大统一理论在宇宙学方面的影响来检验它是否具有物理学上的意义。此外，宇宙学家可能也会发现，这些关于基本粒子行为的全新预测揭示了某些我们无法解释的宇宙特性。

如前文所述，因为自然力的强度随温度的变化而变化，大统一理论克服了不同强度的力的统一问题（见图4-1）。不过，还有一个问题必须克服，即每个力作用的基本粒子分属于不同的类别，为了实现这些力的完全统一，不同的粒子必须实现彼此间的相互转化。这就需要存在质量巨大的中介体，它的质量大到只有当宇宙处于粒子能够相互碰撞的温度时，才会大量地显现。

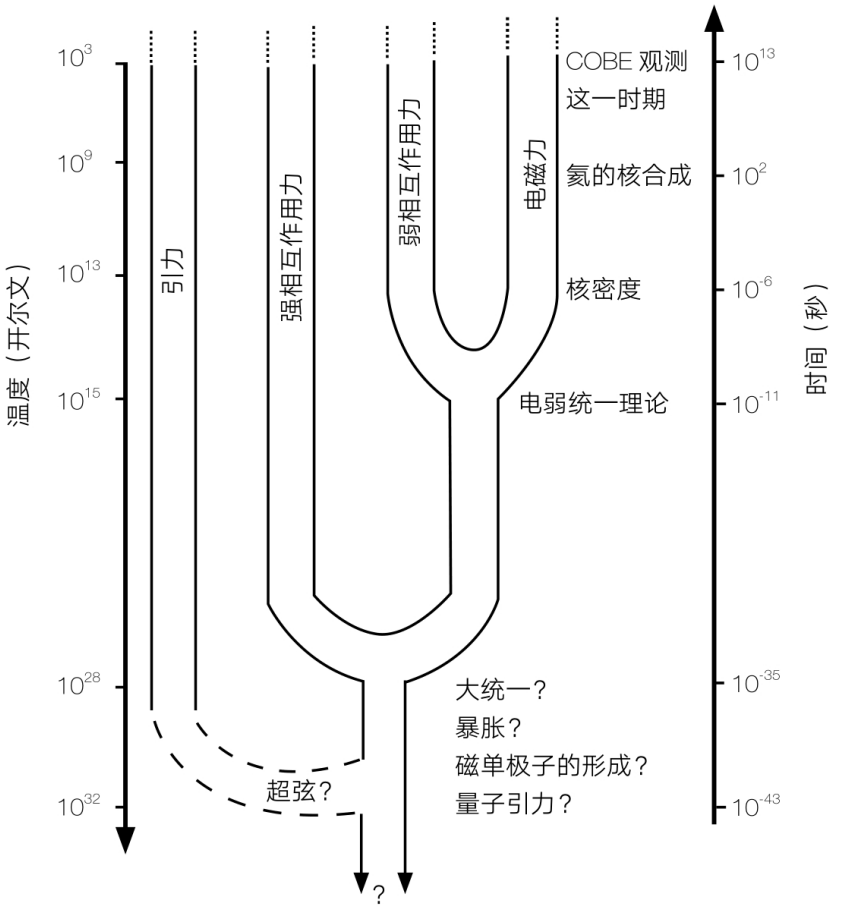


图4-1　宇宙第一个100万年的温度变化

注：当你沿着宇宙的历史往回追溯得越来越早时，预期会见到的宇宙早期温度的演变。当温度增高时，自然力的有效强度也会增大，预期将会出现各种力的统一。

大统一理论预测，必定存在两种新型重粒子。第一种粒子我们称为X粒子。它与任何已知的基本粒子都不同，可以将物质转变为反物质。这种特性使大统一理论能够解释存在于宇宙中的奇怪的不平衡。

自然界中，除了光子以外，所有基本粒子都具有一个相对应的反粒子，它的属性与该粒子完全相反，就好比磁铁的正极和负极是相反的一样。尽管粒子物理学家在实验室中已经成功地造出了粒子和反粒子，但当观测太空或者收集宇宙射线时，只发现了地外正物质存在的证据，而地外反物质存在的证据难以搜寻。

这样看起来，宇宙似乎是由物质主宰的。如果宇宙的现状便是如此，宇宙学家便会推断，宇宙的起点也必定是如此，因为似乎不存在反物质转化为物质的渠道。换句话说，宇宙的起始阶段一定有一个不对称的初始状态，这样才能解释目前我们观察到的不平衡。然而，通过假设一种特殊的初始不对称状态来解释当前的不对称，似乎对探索宇宙毫无帮助。我们可以想象到的唯一自然的“初始状态”似乎就是正物质和反物质数量相等时的状态。然而，这种状态似乎无法转变为我们现如今所观察到的不平衡。

这就是大统一理论需要X粒子发挥作用的地方。X粒子在强弱电力的统一中起到了中介作用，它允许物质转化为反物质。然而，X粒子及其反粒子的衰变速度并不相同。因此，在宇宙非常早期的时刻，一个完美平衡的初始状态（正物质和反物质数量相同的状态）可以通过衰变向一个不平衡的状态转变。

1977—1980年，正反物质的不对称性问题引起了粒子物理学家探索早期宇宙的极大兴趣，他们都想找到可能的解决方案。但也有一些坏消息，人们却对此视而不见。请记住，在宇宙的最初时刻，X粒子是不可避免地产生的两种粒子之一。虽然X粒子很快便衰变为夸克和电子，并且居于我们今天周围的原子之中，但第二种粒子却是多余的，并且不会消失，它就是被称作“磁单极子”的一种粒子。

若想产生一个像我们这样的宇宙，一个包含我们熟悉的电磁力的世界，则磁单极子这种无用粒子是任何大统一理论所必需的，由于与电和磁有着联系，这种无用粒子不能通过对理论结构的修正得到消除。相反，一旦磁单极子形成，我们必须找到某种方法将其从宇宙的早期时刻移除，因为目前还没有证据能够表明它们存在于当前的宇宙。更糟糕的是，如果它们继续存在，对宇宙密度的贡献值将是恒星以及星系中所有普通物质总和的10亿倍。这样带来的结果就是，我们生活其中的宇宙将不复存在。因为数量如此庞大的物质，无论它以何

种形式存在，都将导致宇宙的膨胀减速，并在数十亿年前坍缩成一场大爆炸。

如果宇宙真的以这种方式演进，则星系不复存在，恒星不复存在，更遑论人类的存在。问题到此变得非常严峻。我们如何才能在大统一理论中摆脱这些多余的磁单极子，或是以何种方式抑制它们的产生呢？这个问题的答案将掀开我们思考宇宙的新篇章，不仅如此，对该问题的思考也将彻底改变我们对宇宙起源的理解方式。为了理解这一变化带来的深远影响，我们需要探索今天所看到的宇宙是否就是宇宙的全部，为何它目前以如此神秘的形式存在。

当我们谈论宇宙时，必须搞清楚一个重要的区别。宇宙的确存在，万物皆包含于此。就大小而言，它可能是无限的，也可能是有限的。我们对此其实并不明了。此外，可能存在一个可见宇宙，它是宇宙中有限的一部分，自宇宙开始膨胀以来，光有足够的时间到达地球（见图4-2）。我们可以将可见宇宙想象成一个半径为150亿光年的假想球，地球位于球的中心。随着时间的流逝，可见宇宙将变得越来越大。



图4-2　可见宇宙模型

注：可见宇宙的定义是，自宇宙开始膨胀以来，光能够到达地球的一个球形区域。当前这个球体的半径是3×10^{27}厘米。

我们来追溯一下构成当前可见宇宙区域的历史。可见宇宙一直在参与宇宙的膨胀，所以它所包含的物质（足以构成今天的1 000亿个星系）在过去被囊括在一个比现在小得多的区域之中。当这个区域的半径随着宇宙的膨胀而增大时，它内部的辐射温度与其大小成反比，这符合大众知晓且经过测试的热力学第二定律。这也意味着我们可以用辐射温度作为度量标准，去衡量当前可见宇宙在过去的大小。如果它的大小翻倍，则辐射温度就会减半。

我们选择一个非常早期的时间点，将其当作三大基本自然力实现大统一的时间点。

这是宇宙温度大到足以产生X粒子和磁单极子的时期。当时的温度相当于3×10^{28}开尔文，此时是宇宙开始膨胀后的10^{-35}秒。

经过10^{17}秒的膨胀，今天的宇宙辐射温度已经下降到3开尔文。自早期那个时刻以来，温度已经改变了10^{28}个量级。当前可见宇宙内的所有物质在当时被包含在一个比当前的可见宇宙小10^{28}个量级的球体之中。当前可见宇宙的半径由它的年龄乘以光速得出，如图4-2所示，这个半径大约是3×10^{27}厘米。因此，在大统一时期，可见宇宙中的一切在刚开始时都被囊括在一个半径为3毫米的球体之内！

虽然这个数字看起来非常小，但它实际上大得惊人。因为，在这个时刻，光自宇宙膨胀开始以来走出的距离是：3×10^{10}厘米/秒，乘以10^{-35}秒，得到的距离为3×10^{-25}厘米（见图4-3）。这是自宇宙膨胀开始以来，任何信号所能达到的最大距离，我们称为视界距离（horizon distance）。

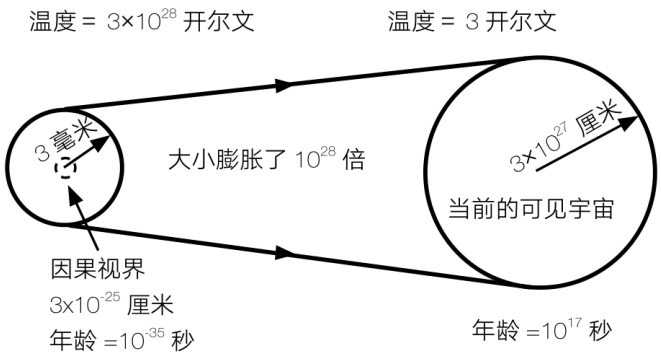


图4-3　可见宇宙的膨胀历史

注：如果追溯可见宇宙的膨胀历史，在它刚诞生10^{-35}秒时，整个宇宙是一个半径为3毫米的区域。虽然听起来小得不可思议，但在这个阶段，光只传播了3×10^{-25}厘米。这就定义了此时的“因果视界”（causal horizon）。

如果起着摩擦或平滑作用的过程正在消除宇宙初始状态中的任何不规则现象，那么视界决定着任何时候这种平滑作用的最大限度，因为这些过程的速度不可能超过光速。问题是，在早期时刻，那个膨胀成当前可见宇宙的区域比视界距离要大得多。难题和麻烦就此产生。

难以理解的是，如果说原先的宇宙是由数量巨大且彼此完全独立的区域拼合起来的（因为从某种意义上来说，自宇宙诞生以来，光还没有足够的时间从一个区域穿梭到另一个区域），我们如何解释如今所处的宇宙，它的每一处以及从天空望出去的每个方向都能展示出令人难以想象的一致性。

如果没有足够的时间进行热量或者能量的传递以实现彼此之间的一致性（宇宙微波背景辐射的各向同性说明了这一点），它们是如何达到相同的温度和膨胀率的呢？我们似乎只能得出这样的结论：最初的状态就是这样的，宇宙创世的最开始，每个方向的状态便是完全一致的。

我们需要搞清楚的问题是磁单极子的普遍性。这些粒子出现在早期宇宙中能量场指向失配的地方。只要这些能量场的指向存在某种失配，就会形成一个能量结，即我们所说的“磁单极子”。此时的视界

大小为3×10^{-25}厘米，这说明这些能量场可以实现均衡，从而避免失配的发生。但在当时，那个将要膨胀为当前可见宇宙的区域是该视界的10^{24}倍。因此，这其中应该包含了大量的失配，导致今天可见宇宙中存在数量难以估计的磁单极子。这就是所谓的“磁单极子问题”。

还原这些细节以及思考当时发生的情况是非常有意义的。物理学家已经设计出关于物质在高温下如何运动的详细理论。

这些理论被应用于探索宇宙的初始状态。我们用它们重现宇宙诞生最初的瞬间时，取得了令人雀跃的新发现，比如，该发现解释了宇宙是如何青睐正物质而非反物质的。这个理论也预测了宇宙中存在大量新物质粒子，这些粒子被称为磁单极子——一种并不存在的假设物质。

科学家预测，磁单极子数量庞大的原因在于，当前的可见宇宙在扩张的初期便是从一个距离远大于当时光所能传播的距离的区域扩张而来，因此必然会包含很多能量失配现象，从而产生大量磁单极子。

大统一理论取得的成功给了物理学家相当大的自信，所以，他们非但没有在磁单极子问题面前望而却步，反而将这个问题搁置一边，继续探索这些理论的其他性质，希望能够像米考伯先生[(7)]那样，等到转机的出现。最终结果确实不负所望。

1979年在斯坦福直线加速器中心（Stanford Linear Accelerator Center）[(8)]，年轻的美国粒子物理学家艾伦·古斯（Alan Guth）偶然发现了解决这个问题的方法，并使大统一理论与我们已知的宇宙相容，这个方法就是宇宙暴胀理论。从那时起，古斯的这个理论就成为早期宇宙的研究焦点之一，并发展成为一门独立的学科，以研究他的基本思想如何实现。

磁单极子问题是早期宇宙中存在极小视界的结果。大统一时期的视界范围本应是从之前的极小视界扩大到一个直径不超过100千米的区

域。若想将这个视界扩大到今天可见的大小，宇宙就需要在早期以更大的速度膨胀。这便是古斯的暴胀理论提出的内容。该理论认为宇宙在早期阶段经历了一个短暂的加速膨胀阶段。这个阶段非常短暂，大致从10^{-35}秒到10^{-33}秒就已足够（见图4-4）。

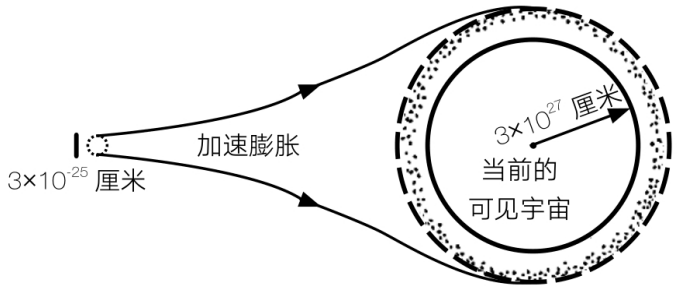


图4-4　宇宙加速膨胀的过程

注：暴胀使早期宇宙快速膨胀，使大小仅为3×10^{-25}厘米的区域膨胀到当前可见宇宙的规模。可以将此图与图4-3中宇宙缓慢的膨胀历史进行比较。

如果这种加速确实存在，那么当前的整个可见宇宙便是从一个非常小的区域暴胀而来的，这个区域在膨胀之初小到光可以轻易穿越。宇宙的平滑性以及各向同性问题也因此得到解决。最重要的是，磁单极子大量存在的问题将不复存在，因为可见宇宙是从一个非常小的区域暴胀而来的，而这个区域在最开始的阶段小到最多可以包含一个磁单极子失配的产生。这样，磁单极子的问题便得到了解决。

可见宇宙的均匀性问题并非是由于新理论的提出，或是通过一些理论规定宇宙在初始状态便以这种精心有序的形式存在，它之所以呈现出惊人的一致性，仅仅是因为它只是暴胀宇宙极小的一部分，这个部分由于其狭小的面积，在当时从炽热变为冷却的过程中，受到携带巨大能量的平滑作用的影响，从而促使该区域的一致性保留至今。其实，宇宙的不均匀性可能仍然存在，只是存在于我们的视野之外。它们没有就此消散，只是被宇宙的演进“扫”到了我们看不见的地方而已。

虽然短暂的暴胀时期只是对整个宇宙历史的一个小注解，但它却有着重大而深远的意义。我们已经讨论了罗杰·彭罗斯、霍金、罗伯特·杰拉奇和乔治·埃利斯的奇点理论，该理论建立在这样一个假设之上：无论何时何地，物质都会对其他物质施加引力。我们还描述了引力是如何要求总量*D*为正，即宇宙中的密度和压力之和为正。

如果事实确实如此，那么整个宇宙的膨胀都会减速，这是所有大爆炸模型在膨胀理论提出之前的预期。无论宇宙在膨胀开始时的速度有多快，无论它们是无限膨胀下去还是走向大坍缩，引力的作用都在减缓膨胀的速率，因为所有物质都在对其他物质施加引力。所以，如果一个理论想让早期的宇宙经历短暂的加速膨胀，引力在当时就必须充当暂时的斥力，因此总量*D*就必须暂时为负。

这是暴胀宇宙理论的基础：它在解释了宇宙均匀性的同时，解决了磁单极子的问题。该理论建立在反引力物态存在的基础之上，它们的存在为大爆炸发生后短暂的加速膨胀创造了条件。如果在自然界，我们无法找寻到这种物质存在的证据，这个理论便是不成立的。不过，它们确实存在。在下一章，我们会介绍一些与其有关的远古遗迹，它们还留存在宇宙之中，作为过去暴胀时代的见证。

20世纪60年代，科学家理所当然地认为，所有形式的物质都具有引力而非斥力。然而，到了20世纪80年代，宇宙学家开始相信，高密度的物质具备斥力产生的条件。而产生这种大反转的原因同样源自粒子物理学家开启的粒子物理学新天地，他们的理论预测出存在某种新物质形式，它们能够产生非常大的负压。这些负压产生的力足以超过由密度产生的引力，万有斥力便由此产生（即总量*D*为负值）。

如果这种形式的物质不仅存在于科学家的草稿纸上，而是真实存在于现实之中，那么当宇宙膨胀时，它们的强度会随着膨胀非常缓慢地增加，最终对膨胀施加反引力效应。因此，膨胀将开始加速，宇宙将发生暴胀，直到与此相关的物质场衰变为更普通的物质形式，或者

衰变为仅具有万有引力的辐射形式。然后，宇宙的膨胀将恢复到暴胀开始前的减速状态，也就是现如今我们所经历的状态。这就是暴胀宇宙在极早期宇宙演化过程中的本质（见图4-5）。

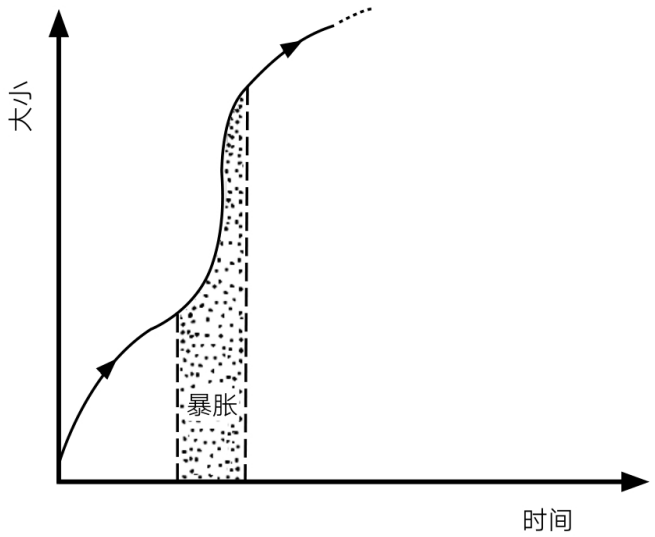


图4-5　膨胀宇宙的半径随着时间的变化

注：宇宙暴胀的周期在这幅图中被大大地延长了。在实际情况中，它只需要从膨胀开始的10^{-35}秒持续到10^{-33}秒。宇宙现在的年龄大约是150亿年。这幅图显示了宇宙膨胀是如何以减速的方式开始，然后在暴胀发生时出现一段时间的加速，直到暴胀结束后重新回到减速膨胀的状态。

这幅关于宇宙的历史演化图对宇宙学家具有巨大的吸引力，原因有很多。比如，暴胀理论解决了磁单极子的问题，不仅如此，它也让我们在最大观测尺度上理解宇宙的均匀性。同时，暴胀理论还对可见宇宙的现状做了两个预测，它们将决定该理论到底是对还是错。

为了解决磁单极子的问题，暴胀持续的时间必须达到当时宇宙年龄的70倍，就是这直径仅有1毫米的早期宇宙产生了当前可见宇宙所需要的东西。这种暴胀带来的一个重要结果就是，宇宙膨胀的速度加快，持续的时间也变得更长。

如果没有暴胀的发生，宇宙在收缩之前只会自然地膨胀一小会儿。但如果发生暴胀，则这种膨胀很容易持续超过万亿年。暴胀使不

断膨胀的宇宙非常接近之前所说的临界点，即区分永远膨胀的宇宙与注定回到大坍缩的宇宙之间的分界点。因此，暴胀理论为可见宇宙奇异地接近临界点的现象提供了一种自然的解释（见图4-6）。

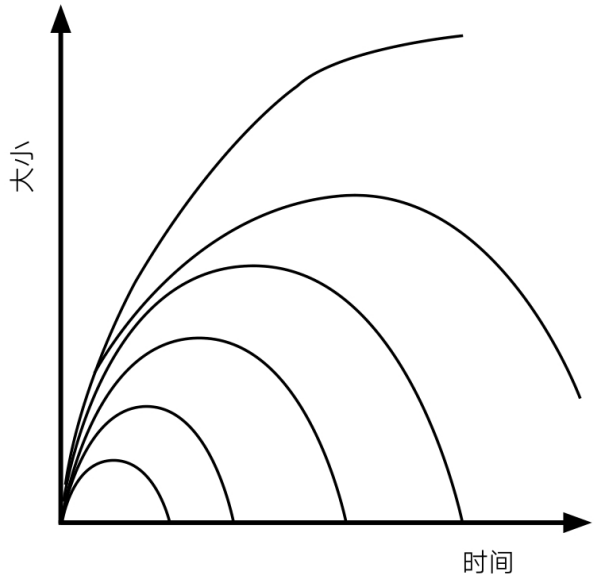


图4-6　不同封闭宇宙及其生存周期的组图

注：宇宙膨胀的时间越长，就越接近临界值。

如果暴胀的时间长到足以解释为什么我们没有发现任何磁单极子，那么我们应该会发现，目前的膨胀速度与临界值的差距不超过百万分之一，也就是可见宇宙的平均密度与临界值的差距不超过百万分之一，即不超过2×10^{-29}克物质/立方厘米。

这个数据十分有趣，原因有二。第一，如果宇宙的密度非常接近临界值，我们将永远无法确定当前的宇宙是处于开放还是封闭的状态，因为我们无法以百万分之一的精度测量宇宙可见部分的密度。但更有意思的是第二个原因——目前观察到的发光物质的密度至少小于临界值的10倍。

如果宇宙暴胀理论是正确的，则意味着宇宙中可见部分的大部分物质必须以某种不发光的形式存在，而非以闪亮的恒星和星系的形式

存在。这个结论备受学界的欢迎，因为长期以来，宇宙学家一直饱受这一问题的困扰：对恒星和星系运动的观察表明，这些物体的运动速度超过它们本该被附近发光物质施加的引力造成的移动速度。很明显，它们周围存在着大量黑暗的、无法看见的物质，它们对星系和恒星施加的引力决定了我们所看到的恒星和星系的运动轨迹。

对于上文提到的数据，我们的第一反应是，假设恒星和星系之间存在更多的暗物质，它们或许以微弱的星光岩石、气体、灰尘和其他碎片的形式存在，但没有整合到恒星形成的过程之中。这意味着仅凭一张宇宙光线分布图并不能很好地说明宇宙中的物质分布情况，这种情况我们并不陌生。

举个例子，如果我们从太空中看地球，并绘制一张夜间灯光分布图，便会发现，它并不能非常准确地对应全球的人口密度分布。相反，它反映的是财富的分布。西方的大城市在夜晚灯火通明，繁华无比，但第三世界的人口中心则一片漆黑。

然而，在宇宙中，事情并非这么简单。尽管我们认为，“宇宙中存在大量的普通原子和分子物质，并且以非发光的形式散布在宇宙各处”，但大自然似乎并不同意我们的观点。而宇宙膨胀理论的基石之一就是，我们有能力详细预测在宇宙诞生几分钟之时发生核聚变反应的系列结果。

这些计算结果与我们所观测到的氢、锂、氘以及氦的两种同位素的丰度惊人一致。这告诉我们，参与这些核聚变反应的物质的密度必须不超过临界密度的1/10。如果实际密度大于这个值，核聚变反应将会把大量的中子合并到氦-4中，这样的结果就是，作为副产品遗留下来的氘和氦-3原子核将比我们今天观察到的数量少得多。

氦-3和氘的丰度是衡量宇宙中核物质密度的敏感指标。它们告诉我们，如果宇宙中隐藏着使其接近临界密度的暗物质，这种物质就不能以任何形式参与核聚变反应。这也意味着暗物质必须以类似中微子

的形式存在。中微子不带电荷，因此不受电磁力的影响。这种物质也不会受到强相互作用力的影响，只能受到引力和弱相互作用力的影响。

宇宙中有三种不同类型的中微子，但从未发现哪一种中微子的质量不是为零。不过，相应的证据并不充分，因为中微子的相互作用力极其微弱，对它们开展质量测量的实验异常困难，而且中微子可能拥有的质量太过微小，检测的仪器的灵敏度也会跟不上。但是，粒子物理学家能带来的可远不仅于此。

例如，物理学家尝试统一所有的自然力，因此预测宇宙中存在弱相互作用大质量粒子（Weakly Interacting Massive Particles，简称WIMPs），这种粒子我们尚未在实验中发现。日内瓦新粒子对撞机建设的目标之一就是发现这类大质量粒子。

如果三种已知的中微子的质量之和不超过90电子伏（一个氢原子的质量约为10亿电子伏），宇宙中所有的中微子将会导致宇宙密度超过临界值，那么宇宙将走向“闭合”，也就是说，在未来它注定会走向坍缩。同样，如果弱相互作用大质量粒子的确存在，而且质量为氢原子的两倍，则大爆炸理论预测，它们的累积密度之和将等于“闭合”宇宙所需的密度。

然而，如果宇宙主要由这些弱相互作用大质量粒子组成，我们可能会提出疑问，为什么不能直接探测到它们，然后一劳永逸地解决这个问题。很可惜，我们无法对已知宇宙中的中微子进行直接探测，因为它们的质量太小，导致它们与我们的探测器的相互作用太过微弱而无法观测。

所以，我们能做的就是在实验室中测量中微子的质量。利用能量的撞击，使它们对其他粒子施加的影响被仪器观察到，同时也测试它们会与发光物质的集群发生什么反应，通过比较聚集过程的计算机模拟，测试我们对此的预测是否正确。然而，如果组成暗物质的正是这

些弱相互作用大质量粒子，那么事情就更令人兴奋了。这些粒子的质量是已知中微子的10亿倍，它们应该能够以更大的能量撞击探测器。事实上，如果这些粒子的数量大到足以构成暗物质，我们就有能力探测到宇宙中由这些粒子形成的海洋。

位于英国和美国的几个实验小组建造了地下探测器，为的是发现弱相互作用大质量粒子的宇宙海洋。当其中一个粒子撞击到晶体中的原子核时，它会使原子核反冲，并利用沉积下来的能量对晶体进行轻微的加热，从而留下信号。如果我们在这类情况下只监测1千克的物质，那么每天应该会发现这种信号1~10次。

如果屏蔽掉所有其他信号(9)，那么就有可能确定弱相互作用大质量粒子是否存在于我们周围。这种屏蔽通过将探测器深埋于地下实现，同时还要置于冰箱内部将其冷却到绝对零度左右，并在冰箱周围放置吸附性材料（见图4-7）。

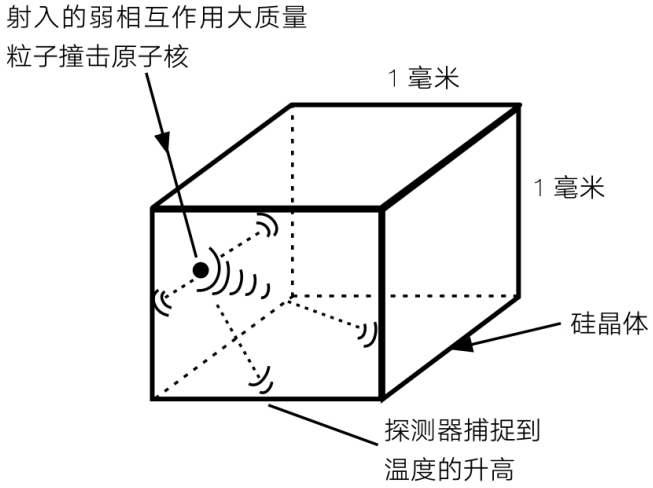


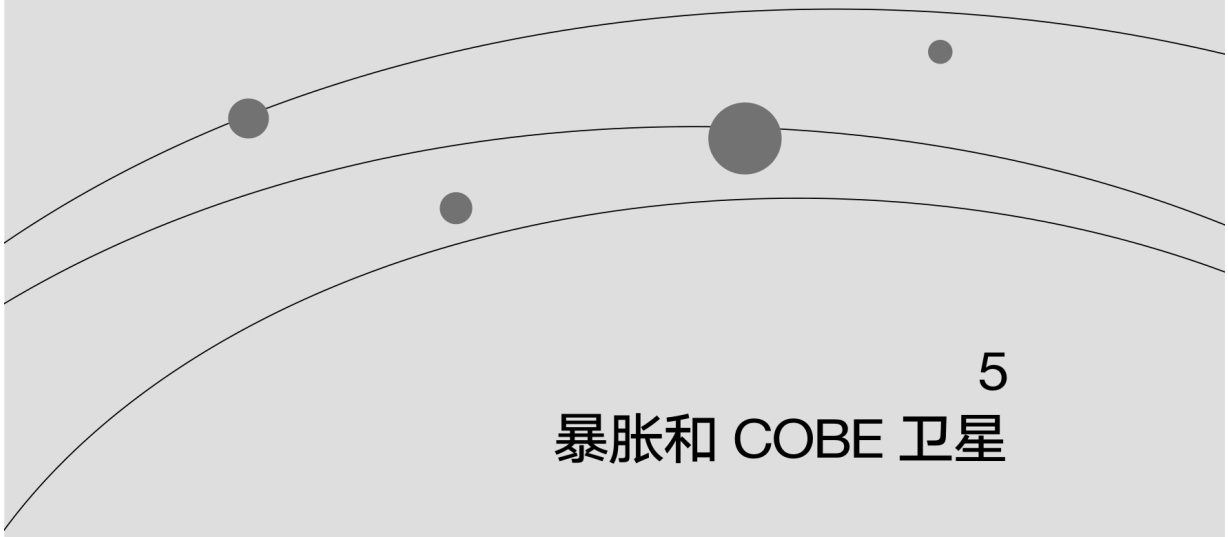
图4-7　探测弱相互作用大质量粒子的物理过程

注：一个边长为1毫米的小晶体被冷却到绝对零度以上的百分之几开尔文，射入的弱相互作用大质量粒子撞击晶体中的原子核，原子核反冲，但速度很快减慢，然后以冲击波的形式释放出反冲产生的能量。这个冲击波使晶体升温，虽然幅度很小，但却能够被探测器捕捉到。

在接下来的几年里，我们希望看到此类实验的第一个成果。它将以意想不到的方式揭开宇宙的神秘面纱。宇宙到底是开放的还是封闭的题，可能取决于最小物质粒子的性质，也可能取决于地球上矿井底部的情况，而不是取决于观察天空的望远镜。大星系可能只是宇宙浩瀚物质海洋中的一滴水珠。

这些物质中的很大部分也许足以使空间弯曲成闭合状态，其形式也可能与我们在粒子加速器中发现的任何物质截然不同。这将是地球在物质宇宙中地位的最后一次改变。地球不仅不是宇宙的中心，甚至构成地球的物质都不在宇宙中占主导地位。

THE ORIGIN OF THE UNIVERSE



5
暴胀和 COBE 卫星

工具，别忘了你随身带着的工具，要知道，它们可不只是一些样子怪诞的装饰品。

这是一个相当棘手的问题，我希望你能在50分钟内保持沉默，不要和我说话。

——《红发会》（*The Red-headed League*）

1992年春天，美国国家航空航天局的COBE卫星探测到宇宙微波背景辐射温度的微小变化，这一消息使全世界的新闻媒体兴奋不已。通过监测地球大气层上方的辐射，COBE卫星避免了大气变化造成的虚假浮动，因此获得的结果比任何在地球上进行的类似实验都更为精确。

COBE卫星要做的就是，以大于10度的角度不断地来回切换对准天空的探测器（为了比较，对准满月的角度比对准天空的要少半度），确定不同方向的宇宙微波背景辐射的温度差。这些微小的温度变化到底意味着什么呢？为什么每个人都对这个消息如此兴奋？一些夸张的评论员甚至声称COBE卫星的这项数据是有史以来最重要的科学发现。

利用对物理基本原理的了解，我们可以理解恒星和行星等的结构。但当涉及星系时，我们的理解就有些模棱两可。因为我们不知道用类似的方法来确定不同自然力之间的平衡，是否足以解释星系和星系团为何具有它们所显示的质量、形状和大小。答案是我们无法确定。星系和星系团是由物质组成的岛屿，其中物质的密度远远大于外部宇宙的平均密度。

例如，银河系的平均密度大约是宇宙平均密度的100万倍。这种不规则的存在并不是什么神秘的现象。如果我们将物质完全均衡地分布，并引入一个微小的不均匀性，它就会像滚雪球一样，变得越来越明显。因为任何物质稍微过剩的地方都会产生更大的引力，从而吸引更多的物质，而代价是密度稍小的区域的密度会越来越低，而且这个代偿将会不间断地继续下去。

这个过程被称为“引力不稳定性”（gravitational instability），300年前，牛顿首次发现了这个现象。无论宇宙膨胀

与否，引力不稳定性都在发挥作用。尽管在膨胀的宇宙中，物质的聚集需要花费更长的时间，因为膨胀往往会把聚集的物质拉开，但随着宇宙年龄的增长，聚集物与宇宙的其他部分相比会显得尤为密集，所以它们不会跟着宇宙的膨胀继续膨胀（见图5-1）。

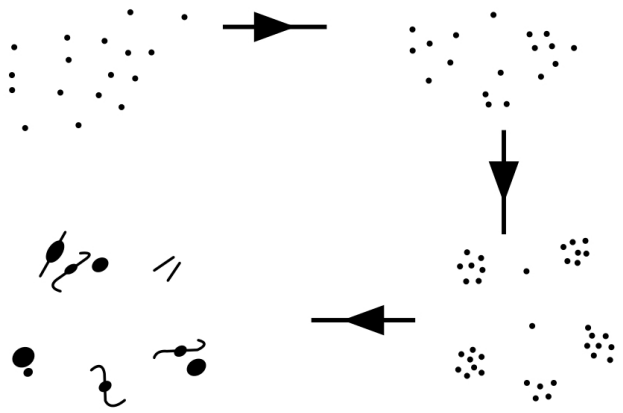


图5-1　引力不稳定性的作用

注：引力不稳定性的过程逐渐将不太均匀的物质分布转变成密度不断增大的聚合式分布。

相反，聚集物内部组成物所产生的内引力和一致运动产生的外压力之间形成一种平衡，从而形成了稳定的物质岛屿。然而，如果想通过引力不稳定性来解释星系和星系团的起源，我们就需要了解宇宙膨胀开始时或开始不久之后的一些情况。这些不规则现象在一定时间内达到的密度水平取决于它们在宇宙膨胀刚开始时的密度水平。

我们对最遥远的星系及其可能的前星系体的天文观察表明，当宇宙膨胀到目前规模的1/5时，今天我们所看到的那种超高密度星系就已然存在。但我们真正需要知道的是，当宇宙只有大约100万年的膨胀历史，且大小只有现在的1/1000时，这些星体的密度有多大。COBE卫星观测到了一些蛛丝马迹。当时，这些聚集体还远不能称为超高密度星系和星系团。COBE卫星收集到的数据是宇宙早期阶段的“遗迹”，不

会受到后续事件的影响，而且这些数据现在得到了地面高精试验结果的补充。

宇宙在早期炽热阶段的辐射随着宇宙的膨胀而逐渐冷却，当膨胀持续了大约100万年后，辐射冷却到一定程度，整个原子和分子开始在原子核和电子中聚集起来。在更早期的时候，它们在遇到周围高能辐射光子时会立即解体，光子携带着它们缘起的信息开始自由地在空间和时间中穿梭，成为宇宙微波背景辐射。

在密度略高于平均水平的地方，辐射温度下降的速度要比密度较低的地方慢一些。这意味着，今天宇宙微波背景辐射的温度变化为我们提供了宇宙形成几百万年时物质分布的快照，成熟的星系在当时还未形成。

宇宙学家花了多年时间，利用地面探测器寻找宇宙微波背景辐射的温度变化，却以失败告终，而COBE卫星终于找到了它们。这些变化非常微小，只有十万分之一。这个数字告诉我们，引力不稳定性需要将刚开始的不均匀性放大很多倍，才能在宇宙存在数十亿年时变得足够强大，创造出第一个星系和星系团。

宇宙微波背景辐射温度的变化有助于确定星系形成中间阶段的具体情况。这些辐射波动的发现虽然令人兴奋，但宇宙学家对此并不感到十分惊讶。他们会惊讶于这类波动的缺失，因为如果真是如此，我们将不得不假设星系最初的形成并没有受益于密度的不规则分布。这样，星系的形成就不是引力不稳定性的简单过程所产生的结果。

宇宙微波背景辐射的波动也为我们提供了一种检验宇宙膨胀理论的方法。若想知道这是如何实现的，我们需要更仔细地思考一下宇宙暴胀这一现象。

在宇宙暴胀理论引入之前，星系和星系团的起源是一个非常棘手的问题。因为没有任何原理可以告诉我们，物质和辐射密度的波动在

最开始如何产生遗迹以及何时产生，或是在辐射与物质解耦时它们有多大。我们所能做的就是，假设引力不稳定性的确存在，并从现在的星系模式回溯，以确定在任何给定的早期阶段所需要的不规则水平。

不幸的是，宇宙在任何时候都可能存在随机波动水平过低的现象，无法产生我们今天所看到的星系结构。

不过，宇宙暴胀理论为这个谜题提供了一个新的解决思路。如果一个小的区域经历了一段时间的加速膨胀，随机的波动也会随之膨胀，并在我们可见宇宙尺度的内外成为不规则的种子。波动的水平是由物质的反引力形式（总量*D*为负）决定的，这种形式负责膨胀的加速。

如果物质有确定的数值，就可以预测宇宙暴胀时出现的波动水平。我们在探索星系和星系团的起源问题上向前迈出了一大步。虽然我们不需要知道宇宙如何开始，却需要确切地知晓哪些反引力物质引发了宇宙的暴胀，因为不规则产生的程度很敏感地依赖于其物质本身，同时也与该物质同自身以及其他物质（普通形式的物质）相互作用的强度息息相关。

如果宇宙暴胀曾经发生过，COBE卫星的信号强度就能够告诉我们这些相互作用力有多强。幸运的是，COBE卫星捕获的信号中包含着更多的信息，这些信息并不那么严格地依赖于驱动宇宙暴胀的反引力物质到底是什么。

当我们在绘制星系和星系团在宇宙中的分布图时发现，星系团的不规则程度取决于测量时选用的尺度。当我们观察宇宙中越来越大的聚集体时，会发现这种聚集逐渐变薄。所以当我们谈论宇宙中的不规则程度时，必须确定想要了解的尺度。这种随尺度产生的变化我们称为不规则的“光谱斜率”。它可以通过观测来确定，或通过观察星系集群的模式，或通过观察天空中某些角度上宇宙微波背景辐射的温度变化来确定。

暴胀理论吸引人的一点在于，它预测了一个最可能出现的特定光谱斜率。相对温度的变化（天空中两个方向上测得的温度差除以天空的平均气温）不应该随着这两个方向之间夹角的增加而改变，我们称这种光谱斜率为“平的”。

COBE卫星的观测具有极其重要的意义，原因在于发现了来自早期宇宙的、尚未充分发展的波动，这种波动日后被放大，促使形成了星系和星系团。

不过，对于宇宙学家来说，最有趣的前景是波动的光谱斜率是否符合最简单的暴胀理论预测。COBE卫星在过去几年收集到了不同时间段的大量数据，这些数据需要经过复杂的处理才能删除原始数据中具有已知影响的环境因素，比如卫星电子信号、月球和地球的距离，这些因素会造成统计结果的不确定性。

第一轮观测结果发表于1992年，它以70%的精确度告诉我们，光谱斜率为-0.4~+0.6（平坦的光谱斜率为零）。1994年年初，研究人员进一步对COBE卫星的观测数据进行处理，并且利用更多的计算机程序对原始数据进行重新分析，最终发现所有数据的光谱斜率均为-0.2~+0.3，精确度达到70%。进一步的数据分析应该能缩小光谱斜率的范围。如果这些数据精确到零值，就能显著地证实最简单的宇宙暴胀模型是正确的。

COBE卫星只能通过测量超过10度角距的宇宙微波背景辐射温度来检查光谱斜率的范围。为了能够测量更小的角度，需要一个比进入太空所需尺寸还要大得多的实验装置。目前，有实验小组在地球的某些地方开展更高精确度的观测，这些地方包括加利福尼亚州的欧文斯谷、加那利群岛的特内里费以及南极。之所以没有从地面上以更大的角距探测天空，是因为地球大气层在这些角距上变化太大，获得的数据也会受到相应的影响。1994年1月，特内里费岛研究小组公布了4度

角距以上的温度波动证据。报告的数据与COBE卫星的保持一致，均显示光谱斜率大于-0.1。

总结而言，被我们称作“暴胀”的短期加速膨胀必然会导致宇宙密度在不同方位上产生微小的变化，这种变化以特定光谱斜率的方式呈现。这种光谱斜率在宇宙微波背景辐射中留下了印记，我们可以通过COBE卫星观测到的光谱斜率来验证宇宙暴胀理论是否正确。

到目前为止，观测结果都同暴胀理论预测的保持一致。因此，我们便有了一个直接的物理观测手段，在它的帮助下，我们能够知晓在宇宙诞生10^{-35}秒时可能发生的事件。我们应该思考在探索的道路上为什么会有这么好的运气，宇宙没有理由为了给我们行方便而做出这样的设计。人类能否探明所有的自然规律，或者人类能否仅凭自己的智慧解开这些隐藏在规律最深层次的数学结构。

假设我们真的做到了，真的找到某个实验方法验证这些设想，那将是我们的幸运。为什么要有来自宇宙最初时刻的遗迹好让我们验证与之相关的设想呢？我们目前所知的关于宇宙深层次的结构以及与宇宙遥远过去有关的重要信息只是沧海一粟，但令人惊讶的不是这样遥远的遗迹难以寻觅，而是这样遥远的遗迹竟然真的存在。

我们已经大致了解了与宇宙暴胀有关的一些概念及其相应的观测结果。到目前为止，关于宇宙在早期是如何膨胀的探索仍然有着光明的前景。未来对宇宙背景探测器收集的数据的处理，再加上地面实验的补充数据，我们便能够证明，宇宙暴胀理论的预测是否与宇宙微波背景辐射温度的变化相一致。就像乐观的理论家想的那样，假设暴胀理论的方向是正确的，并且坚持求证下去，直到我们撞到南墙才放弃。那么宇宙暴胀理论对于我们理解宇宙的起源到底能带来什么启示呢？

首先，我们应该回顾一下发生暴胀的条件：存在总量D为负的物质形式，并且恰好与彭罗斯、霍金、杰拉奇和埃利斯在奇点理论中提出

的假设相反。在一个暴胀的宇宙中，奇点理论完全不适用，我们根本无法由此得出关于宇宙起源的结论。也许，宇宙有一个特别的开始，但也可能这个开始并不存在。然而，尽管存在这种不确定性，宇宙暴胀理论却能以相当不寻常的方式丰富我们对宇宙可能模样的见解。

当我们讨论宇宙暴胀的起始阶段时，就好像这个过程在宇宙的任何地方都以相同的方式发生一样。实际上，从宇宙的一个地方到另一个地方，情况可能会略有不同。假设宇宙在前暴胀阶段被划分为若干个区域，每一个区域都很小，暴胀开始时光线都可以穿过它们。

在这些区域中，温度和密度会有略微的不同（由于随机波动），甚至会有很大的差异（由于起始状态的不同），其结果是各个区域暴胀持续的时长会有所不同。某些微观区域可能会发生巨大的膨胀，大小将达到至少150亿光年，而其他区域暴胀几乎没有发生（见图5-2）。

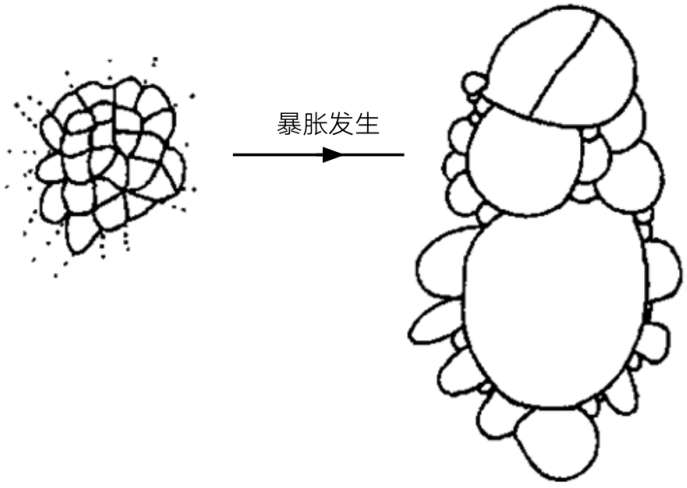


图5-2　混沌的暴胀状态

注：宇宙早期的不同小区域经历了不同程度的暴胀。只有那些暴胀到足以产生至少90亿光年大小的区域，才能产生稳定的恒星、碳和生命体。

我们可以想象宇宙在初始状态下的混沌无序状态——宇宙在某种程度上是无限的。在空间的某些区域，条件允许暴胀发生，膨胀的倍

数足以形成我们今天所看到的可见宇宙。而在另一些区域，暴胀则没有发生。

如果我们能看到宇宙可见部分之外的区域，可能会遇到一些其他类型的暴胀区域，它们的密度和温度可能与我们现处的区域截然不同。更有甚者，当人们考察某些暴胀宇宙模型时，发现了更根本的差异，例如，在宇宙的不同区域，空间维度可能会有所不同。

这种模型被称为混沌暴胀宇宙，最早由美籍俄裔物理学家安德烈·林德（Andrei Linde）于1983年提出。该模型为宇宙研究引入了一个新的思路。我们在上文已经解释过，当前可见宇宙的巨大规模及其上百亿的年龄并非巧合，这是生命这种生物化学复合体存在的必要条件。在所有经历了不同暴胀程度的微小区域中，只有暴胀到能够增长到数十亿光年大小的区域才会产生恒星，才能诞生生物化学复合体所必需的重元素。

我们从这种认知中学到了重要一课。即使我们知晓不是每个区域都将经历这种大规模的暴胀，但也无法排除这种可能性，因为我们只能居住在这样一个不大可能的大区域中。此外，如果宇宙本身是无限的，那么肯定存在各种各样的区域，包括那些暴胀到足以产生一个类似于当前可见宇宙的区域。

林德注意到，这种混沌的暴胀还具有一个不同寻常的特点。一些暴胀的区域会产生内部的随机波动，从而使其子区域开始暴胀，而这些子区域反过来又会产生可以进一步促进子区域的暴胀，如此反复，无穷无尽。所以，一旦暴胀开始，就会永远持续下去。在我们的视野之外，一定还存在一些仍在暴胀的区域。这种暴胀的进程也许没有所谓的“起点”。这也仍是一个尚待解决的问题（见图5-3）。

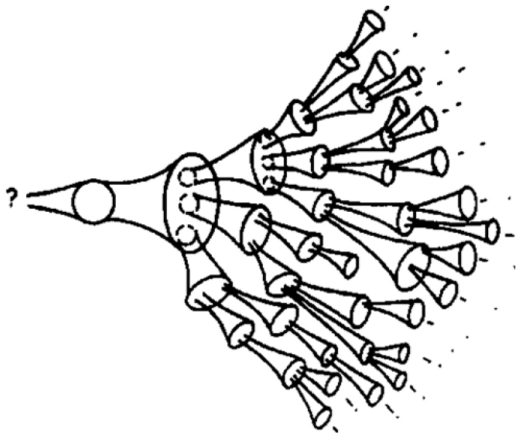


图5-3　永恒的暴胀

注：每个暴胀区域都为它的子区域的暴胀创造条件，以此类推，直至无穷。

混沌暴胀和永恒暴胀这两种场景展现了暴胀理论如何扩展了我们对空间和时间的认知。这些认知告诉我们，所谓的“可见宇宙”只是真实宇宙中的极小一部分，而真实的宇宙远比这一小部分复杂得多。

在宇宙暴胀理论引入之前，这些可能性只是作为形而上的推测来讨论。暴胀宇宙模型建立在特定粒子物理模型的基础之上，它将这些形而上的推测变成了在早期宇宙中合理条件下演变出的可能结果。在暴胀理论提出之前，我们认为可见宇宙是宇宙其他部分的相似分身。现在这种假设不再需要，也不再有效。

尽管暴胀理论带来了令人着迷的可能性，但它却被不确定性的阴影笼罩。暴胀理论使我们在不清楚宇宙本身是如何起源的情况下，帮助我们理解了为什么可见宇宙会显示出它所具有的各种特性。暴胀理论的强大之处在于，使我们可以在不必了解过去一切的基础上预测现在，但它也有一个缺点。如果我们的推演不严格依照宇宙起源的细节，就无法通过当前的可见宇宙来反推当时的细节，而暴胀理论直接斩断了这个关联的桥梁。

但是，如果暴胀从未发生呢？又或者说，如果我们关注的只是某个暴胀区域的暴胀前史，又会发生呢？如果我们顺着暴胀的历史回溯

过去，可能会发现什么呢？我们仍然可能追溯到一个密度和温度都无穷大的奇点，我们至少可以得出4种完全不同的可能性，它们都与我们所知的宇宙知识保持一致（见图5-4）。

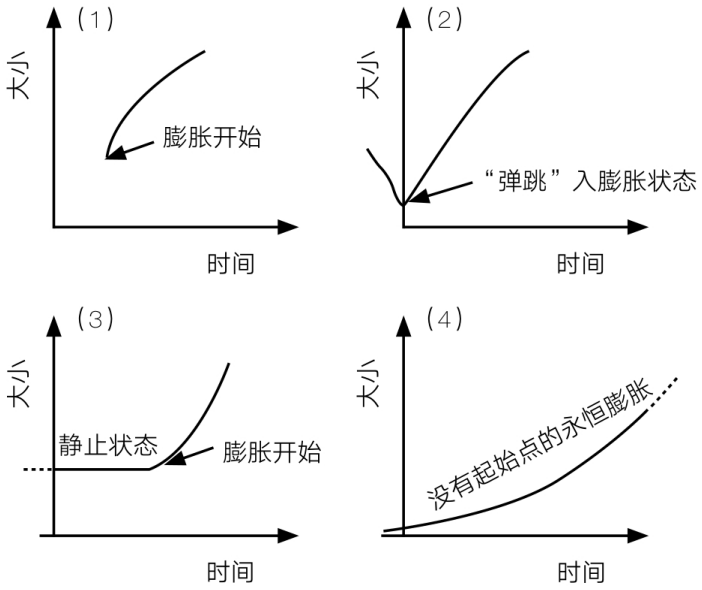


图5-4　关于宇宙膨胀起点的一些假设

注：（1）宇宙的空间、时间和物质并非始于无限密度的状态，相反，它们产生于有限的密度，并以膨胀的状态存续；

（2）宇宙从之前有限收缩的最大值状态“弹跳”入膨胀状态；

（3）宇宙突然从原先无限的静止状态开始膨胀；

（4）倒溯宇宙的历史，它随着时间的倒流越变越小，但永远不会达到大小为零的状态。宇宙没有一个所谓的起点。

为什么我们所知的信息具有这样的不确定性？为什么我们很难利用理论推演出最开始的那段时间，确定宇宙是否具有明确的起点？在上文中，我们勾画了宇宙膨胀史上的一些关键阶段。膨胀开始的一秒后，宇宙的温度已经冷却到足以运用地球物理学进行描述的程度，因此，我们从那时起，便拥有直接的证据来验证我们对宇宙的重建工作是否正确。回看宇宙膨胀开始后的10^{-11}秒，便会遇上与当今最大粒子对撞机内部相似的情况。

时间再往前的情况超出了能在地球上进行部分模拟的条件范围。不仅如此，我们对这些能量级所涉及的自然规律也不清楚。因为我们仍在试图建立一个与基本物质粒子有关的完备理论，囊括控制基本粒子的力量是什么以及它们对宇宙膨胀的进程有何影响。而所有这些研究都建立在爱因斯坦的引力理论是正确的基础之上。爱因斯坦广义相对论得出，宇宙以整体的形式在膨胀。这个理论以令人瞠目的方式成功通过了目前我们完成的所有观测实验。

但这种成功并不会一直继续，比如当讨论宇宙膨胀的初期阶段时，便遇到了问题。就像牛顿对引力的描述一开始都很完美，直到物质接近光速运动时以及在强引力场中遭遇分崩离析一样，我们期待爱因斯坦的完美理论也将遭遇“滑铁卢”。如果我们试图探测宇宙膨胀之初的10^{-43}秒发生的具体状况，就会遇到这种情况。在这个被称作“普朗克时间”的时刻，整个宇宙都被量子的不确定性支配，只有当我们找到一个能包罗万象的“万物理论”，一个能将引力与其他三种自然力结合在一起的理论时，才能对当时的情况进行全面的描述。如果我们想确定宇宙是否具有起点，必须了解引力在这个时间段内的表现形式，而这种形式正好反映了物质的量子特异性。

普朗克时间的奇异之处在于，我们可以观察微观世界的量子图景，这幅图景的大量细节已经在过去的70年里得到了完善。这既是物理学中最精确的部分，也是我们身边的技术奇迹，从计算机到CAT扫描仪，都建立在量子力学的基础之上。当我们试图观察非常小的物质之时，观察行为本身就会极大地扰乱被观测物质的状态。因此，在测量某物时，其位置和运动的精度都会受到限制。

在微观世界中，我们无法测量数据或者其他交互作用的确切结果，只能预测特定观测结果出现的概率。通常情况下，微小如粒子的物质和光在某些情况下能够表现出波的特性。我们可以将这些“粒子波”比作情绪波而不是水波，也就是说，它们能够存储波。如果有一

股情绪的波浪席卷了你的社区，就意味着你更有可能在周边发现这些情绪行为。同样，如果电子波到达你的探测器周边，就意味着你有更大的可能在附近探测到电子。量子力学告诉我们，每一个物质粒子的波行为是什么，因此我们有可能探测到它们的一种或者另一种性质。

每一个物质粒子都有一个与它的波状量子相位相关联的特征波长。这个波长与物体的质量成反比。当某物质的质量远远大于它的量子波长时，我们就可以完全忽略它的量子性质所带来的不确定性。对于你我这样的大物体，量子波长非常小，所以当我们开始过马路时，可以安全地忽略汽车位置的波状不确定性。

我们可以将这些知识应用于可见宇宙之中，宇宙的质量比其量子波长大得多，所以我们在描述宇宙结构时可以忽略量子不确定性带来的微小影响。但当我们回溯过去时，宇宙的大小随着时间回溯的增加而缩小，在宇宙的年龄为T时，可见宇宙的大小是光速乘以时间T。

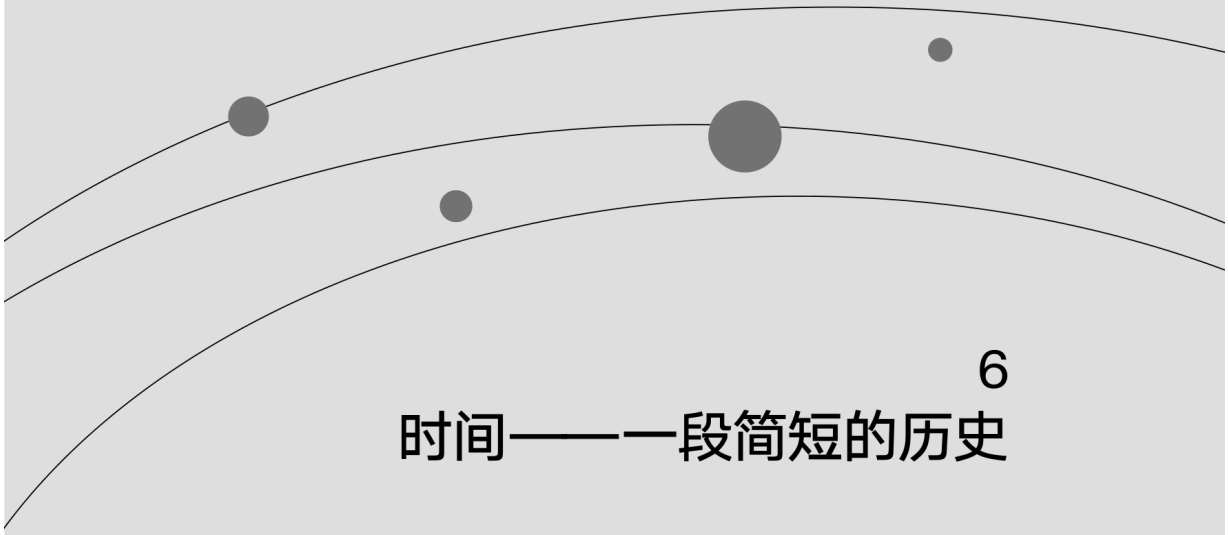
10^{-43}秒这个普朗克时间非常关键，因为当我们回溯到这个非常早期的时间点时，可见宇宙变得比其量子波长更小，因此这时，整个宇宙都被量子的不确定性笼罩。当量子的不确定性超越一切时，我们无法知晓任何东西的位置，甚至无法确定空间的几何形状。这就是爱因斯坦的引力理论全面崩盘的时刻。

这种情况激发了宇宙学家试图创建一个新引力理论的热情，他们希望在新理论中包含量子引力，并利用这个理论寻找到可能存在的量子宇宙。我们将从这些大胆的设想中选出几个进行讨论。这些新理论尚未到达理论的终点（也可能只是最终理论的很小组成部分），但最终理论必定会完全颠覆我们的认知，就像我们对宇宙概念的转变那样猛烈。

在可见宇宙何时开始膨胀的各类图景中（见图5-4），我们展示了在不同的时间段，宇宙的大小可能会发生什么变化。一些假设认为，时间、空间以及所有的一切都开始于一个奇点；而另一些假设认为，

空间和时间永恒存在。但是，还有一种更加微妙的可能性。假设我们追溯到普朗克时间时，时间的本质也发生了变化。这样，宇宙起源的问题就与时间的本质问题联系在了一起。

THE ORIGIN
OF
THE UNIVERSE



6
时间——一段简短的历史

是时候让自己放松一下了，想想那些无关紧要的事情，有时候太过专注不一定是一件好事，偶尔走神说不定会让你有新的发现！

麦考夫兄弟要来了。

——《布鲁斯-帕廷顿计划》（*The Bruce-Partington Plans*）

关于时间的本质，长期以来一直存在着一个疑惑。在数千年的历史长河中，不同文化中的思想家都被这个疑惑困扰。这个疑惑就是：时间究竟是一个不变的、超验的背景舞台，各类事件在其中演绎，还是说时间和事件本身具有相同的性质，如果没有宇宙，时间就不复存在？

这两种假设的区别很有趣，因为第一种假设引导我们去讨论宇宙在时间上的创造，而第二种假设将时间看作随宇宙产生的产物。宇宙所谓的“开始之前”并不存在，因为在那之前，时间也不复存在。

在日常生活中，我们用一系列自然事件来衡量时间，比如利用地球引力场摆动的钟摆、地球自转时太阳在日晷上投射的影子或者铯原子钟的振动。除了衡量方式，我们无法谈论时间到底是什么。我们通常用事物变化的方式来定义时间。如果这是一种正确的方法，那么当大爆炸最初时刻存在异常条件时，时间的本质会发生非同寻常的变化。

17世纪，牛顿赋予时间一种超然的地位——时间不可逆转地、日复一日地流逝，完全不受宇宙事件和宇宙物质含量的影响。不过，爱因斯坦对时间有着截然不同的看法。空间的几何形状和时间的流动速度都是由宇宙的物质含量决定的。就像爱因斯坦对空间本质的观点一样，他的时间观也建立在这一前提之上：任何人观测到的宇宙与他人相比，都不占有特殊的优越地位。因为无论你在哪里，如何移动，都会从自己所做的实验中推导出同样的物理定律。

在爱因斯坦的广义相对论中，这种对待观测者的民主方式意味着，宇宙中不存在对时间的最优解释。没有人测量过绝对的时间现象，所测量的不过是宇宙中某些物理变化的速率，可能是蛋形定时器

里沙子掉落的速度，钟面上指针移动的速度，或者水龙头的滴水速度。有无数变化的现象可用于定义时间的流逝。例如，在宇宙的尺度上，观测者可以利用宇宙微波背景辐射温度的下降来判定时间。没有哪种特别的衡量方法会比其他方法更为重要。

在考察一个完整的空间与时间的宇宙，即爱因斯坦理论中的所谓“时空”时，有一种具有启发性的方法，将“时空”看作一叠片状空间[(10)]，每个切片代表整个空间在某个特定时间上的显示。时间只是整叠时空中每个空间切片的识别标签（见图6-1），时空可以以各种不同的方式进行切割，也就是说，可以从不同的角度切割。每一种可能的切割方式都会给我们带来一种不同的定义时间的方法。不过，时空本身的组合不受所选时间切片的影响，因此，比起分别关注空间或者时间，时空的堆叠是一个更为基础的实体。

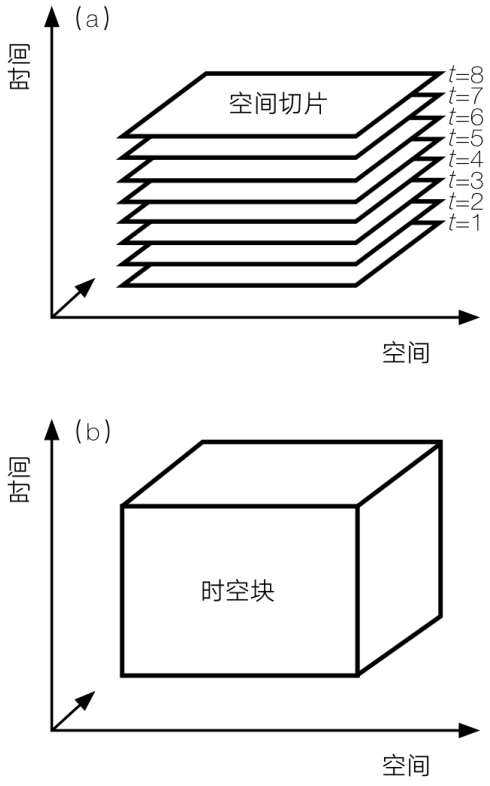


图6-1　时空模型

注：（a）在不同的时间点所截取的一段空间切片，并按 t=1到 t=8进行标注；

（b）此图是由所有的空间切片组成的一整块时空。这个时空块可以用许多不同于图（a）中选择的切片方式进行切割。

在爱因斯坦对时空的描述中，时空的形状取决于其中的物质和能量。这意味着时间可以用每个空间切片中的一些几何特性来定义，比如每个切片的曲率，因此也就可以根据切片中物质的密度和分布来定义，因为这两个因素决定了空间切片的曲率（见图6-2）。因此，我们开始探索将时间（包括它的起始及结束）与宇宙物质的某些性质联系起来的可能性。

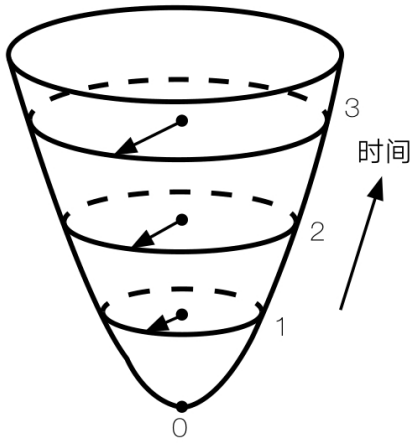


图6-2　带有曲率的空间切片

注：这个圆锥状的时空由一系列半径不断增大的圆盘组成。每个圆盘都可以用其半径标记一个自己的“时间”，所以当我们从圆顶的点0向上移动到点3时，这个几何上的“时间”就会随之增加。

尽管引入了这些关于时间本质的细节，广义相对论还是没有详细说明宇宙最初的模样。空间切片集合总会存在第一个切片，这个切片决定了它之后切片的模样。

在量子理论中，时间的本质成了一个更大的谜。如果根据宇宙的其他性质来定义，那么量子的不确定性会影响我们对这些性质的了解，这将间接地影响到对时间的定义。用量子理论来描述宇宙会使我

们对时间产生不同的结论，其中最不寻常的结论之一是，它允许宇宙从无到有。

简单的宇宙模型（忽略现实的量子本质）可以从某个确定的时刻开始，这个时间点用特定类型的时钟定义。决定宇宙未来行为的初始条件必须在初始的那一刻就做好规定。宇宙学家利用这些模型描述宇宙的现状，因为量子力学对当今宇宙的影响微乎其微。但如果我们想要在接近普朗克时间的时间段使用这些模型，就需要了解量子效应对时间的影响。

在量子宇宙学中，时间并非以显性的方式出现，而是由宇宙的物质及其结构组合而成。相关的方程式能够告诉我们，当我们从一个空间切片移动到另一个空间切片时，这些结构将发生何种变化。在这种情况下，“时间”就显得多余了。这种情况与摆钟很类似，指针在钟面上的位置仅仅记录了钟摆摆动的次数。因此，我们便没有必要再提及一个叫作“时间”的东西，除非真的需要。同样，在宇宙学的设定中，我们借由塑造每个切片的物质结构区分空间切片集合中的切片。但是这个关于物质分布的信息是通过量子理论从统计的概率上得来的，即当我们测量某个物体时，发现它可以是无限可能状态集合中的任意一个，量子力学只告诉我们它处在每种状态下的概率有多大。决定这些概率的信息包含在一个被称作“宇宙波函数”的数学实体中，我们称之为$\mathbb{W}$。

宇宙学家相信他们有办法找到$\mathbb{W}$的形式，但最终可能会证明这种寻找其实是一条死胡同，就算找到，也可能是以一种过分简化的方式。更乐观地说，我们至少希望这种方法能够帮助我们更好地接近宇宙的真相。宇宙学家尝试用美国物理学家约翰·惠勒（John A. Wheeler）和布莱斯·德威特（Bryce DeWitt）最先发现的一个惠勒-德威特方程来寻找$\mathbb{W}$的形式。这种方程是在欧文·薛定谔著名的普通量子力学波函

数方程基础上的一个改版，在其中加入了广义相对论的弯曲空间特征。

如果我们知道W的当前形式，惠勒-德威特方程就会告诉我们，可见宇宙具有某些大尺度特征的概率。对于特定的、不断膨胀的巨大物质以及辐射结构而言，这种可能性极其大，这就如同尽管量子力学存在极小的不确定性，但日常生活中的大物体仍具有确定的属性。

如果最具可能性的值确实与宇宙学家所观察到的情况保持一致（例如，通过预测星系集群的某些模式或者宇宙微波背景辐射中的某些温度变化），那么许多宇宙学家将会满意地认为，我们的宇宙模型是所有模型中最“接近”真实宇宙的模型之一。然而，若想使用惠勒-德威特方程找到适用于我们当前所观测到的低温、低密度宇宙的W，就需要知道当宇宙达到最大密度和最高温度时，也就是在宇宙的“起始”阶段，W是什么。

在W的研究过程中，最有用的是跃迁函数（transition function），它告诉我们宇宙状态发生特定变化的可能性。我们用T表示跃迁函数，如果宇宙存在更早的时间点t_1（t_1由决定宇宙状态的其他参数确定，比如平均密度）以及该时间点下的状态x_1，则$T[x_1, t_1 \rightarrow x_2, t_2]$的函数能让我们知晓，在时间点$t_2$时宇宙所处的状态$x_2$。

在非量子物理学中，自然定律规定，一个特定的未来状态将产生于某个特定的过去状态。在这个背景下，我们不讨论概率。但在量子物理学中，正如美国物理学家理查德·费曼（Richard Feynman）所说：“未来的状态大致取决于历史通过空间和时间的所有可能路径的平均值。”其中一条路径可能是由非量子自然定律决定的路径，我们称为“经典路径”。在某些情况下，量子物理学中有一个由经典路径决定的跃迁函数，而其他路径会相互抵消，就像相位错开的波峰和波谷相互抵消一样（见图6-3）。

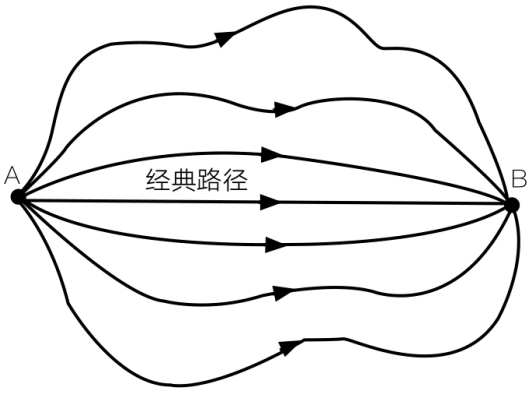


图6-3　A和B之间的可能路径

注：牛顿运动定律采用的是“经典路径”。量子力学给出的是从A到B的路径概率，即从A到B的所有可能路径的平均值，我们将其中的一些可能路径标注在图中。

对于密度非常高的量子宇宙来说，是否所有可能的初始状态都能诞生出如今这样的宇宙。这是一个深奥的问题。当前的可见宇宙是一个量子不确定性很小的宇宙，因而人们在日常经验中能够清晰地感受到“时间”的流逝。我们身处的这个宇宙，这个允许生命存在的宇宙，其诞生要求可能会异常严格，这标志着我们身处的宇宙在所有可能出现的选项中是特别的。

在实践中，$\mathcal{W}$在空间切片集合中的哪个切片里，由宇宙中所有物质和能量的结构以及这个切片的某些内在特征（比如它的曲率）决定，这些特征有助于我们有效地识别切片集合中的某块切片，对其进行有效且唯一的标记。然后根据惠勒-德威特方程得出，一个固有时间值的波函数与另一个固有时间值的波函数在形式上存在何种关系。

当可能性最大的路径接近经典路径时，波函数的这些特征可以直接作为对普通经典物理学的小补丁。但是，当可能性最大的路径与经典路径远离时，就更难用量子理论解释时间，也就是说，利用惠勒-德威特方程叠加起来的空间切片集合并不是一个完整的时空。尽管如此，仍然可以找到能告诉我们宇宙从一种状态转变到另一种状态的概

率的跃迁函数。这样，波函数的起始状态问题现在变成了寻找宇宙起源的量子模拟问题。

跃迁函数告诉我们宇宙从一种物质的几何构型跃迁到另一种几何构型的概率。从一个构型到另一个构型的转化如图6-4所示。

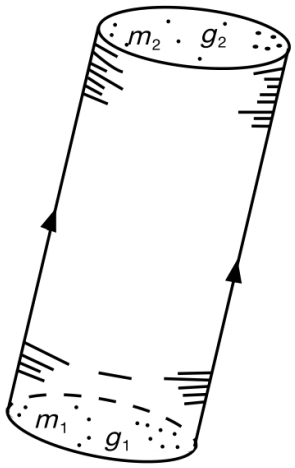


图6-4　第一种时空路径

注：这种时空路径的边界由两个曲率分别为g_1和g_2的三维空间构成，其中的物质分别为m_1和m_2。阴影部分为边界区域，三维圆柱体的两端是二维平面。

我们可以设想宇宙始于一个点，而不是某个初始的空间切片。因此，时空整体看起来是锥形而非圆柱形。我们可以在图6-5中直观地看到这种假设。

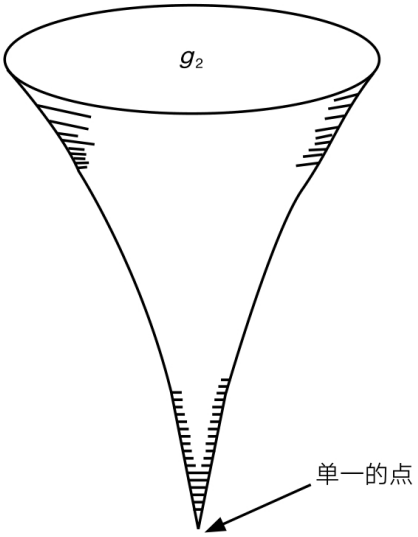


图6-5　第二种时空路径

注：这种时空路径的边界由一个弯曲的三维空间g_2和一个单一的初始点组成。

然而，这并不是什么真正的进步，因为非量子宇宙学模型中的任何奇点都将表现为经典路径的某种奇异特征，而我们只是在选择某种特殊的初始条件，它恰好描述了宇宙诞生于一个事先存在的点。这种选择其实毫无根据。

接下来我们设想一种比较激进的路径，但这种路径很可能只是空洞的猜想，不具有任何物理意义，它是由美学引导的某种信仰产物。请看图6-4和图6-5，注意我们对初始条件的规定与图中的g_2点的空间状态相关联。也许g_1和g_2的构型边界可以通过某种方式进行组合，这样它们就可以形成一个平滑的空间，如图6-6所示，这样，令人讨厌的奇点便不复存在。

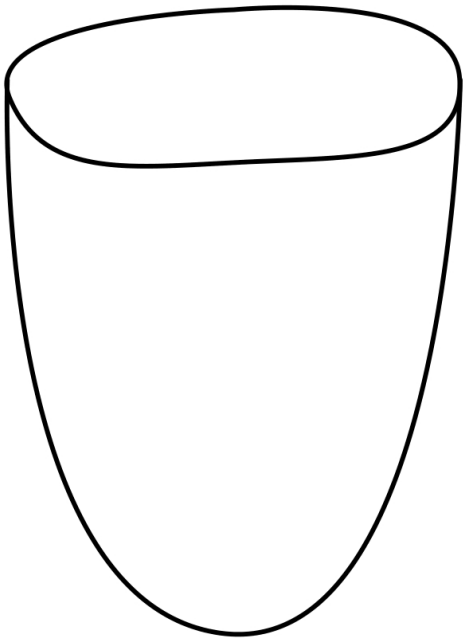


图6-6　第三种时空路径

注：这种时空路径的边界变得平滑圆润，这使它能够由单个三维空间组成，底部没有像图6-5中的路径那样的顶点。因此，它的跃迁概率可以解释为宇宙从无创生。

举个二维空间的例子，比如球的表面，它是平滑的，不存在像圆锥顶点那样的奇异点。因此，我们可以将四维时空的整个边界不想象成g_1和g_2，而是想成三维空间中的一个光滑曲面，它就像一个存在于四维空间中的球的表面。

球的表面有一个有趣的特征：大小有限但不存在边际。虽然球的表面积有限（它只需要有限的油漆涂料），但当你在上面移动时永远不会遇到边界或者顶点，例如锥形体的顶点。对于球面上的居住者而言，这个球的表面不存在边界。宇宙的初始状态可能也存在类似的情况。这就是一种激进的设想：球占据了一个三维空间，且拥有一个二维的表面。

据此，我们可以为量子宇宙设计一个存在于四维空间（不是四维时空，假定真实的宇宙就是如此）中的三维表面。1983年，霍金和美

国物理学家詹姆斯·哈特尔（James Hartle）提出，我们平常关于时间的概念在量子宇宙理论背景下被超越，成为空间的另一个维度。

这并不神秘，物理学家经常用这种“将时间变为空间”的方式来解决普通量子力学中遇到的某些问题，尽管他们并不是真的将时间想象成了空间。在演算结束的时候，一切又可以简单地恢复到原来的情况（即存在一个时间维度和三个性质不同的空间维度），这就如同暂时使用另外一种语言讲话。

关于“将时间变为空间”这一概念，最具挑战性的一件事是，如何用语言很好地描述正在发生的事情。霍金于1988年出版的《时间简史》一书正是对这个挑战的首次尝试。科普工作意味着需要用简单、可视的图片或者类比的方法将复杂的数学简单化。科普作家经常将基本粒子之间的相互作用比作台球之间的碰撞，或者将原子描述成微型太阳系，等等。

事实上，19世纪末，一些法国数学家批评了物理学家，因为物理学家坚持用机械的图景来描述各式各样的物理现象，比如借助滚动的小球、轮子和弦等。而科普作家运用的方式是，将宇宙深奥的运作方式与存在于我们日常经验中的事物进行简单的类比。然而，“时间成为空间的另一个维度”这一观点似乎没有人们所熟悉的东西可类比。当人们看到这句话时，能够理解所有字的意思，但不懂所传达的意思。

对于《时间简史》的读者来说，缺乏现成的类比可能是这本书艰涩难懂的原因之一。我们希望关于宇宙最深层次构建的知识，比如与基本粒子的内部空间或者星系及黑洞的外层空间相关的知识会有简单的类比。但事实可能并非如此。不过，缺乏类比可能是一个好迹象，因为它表明我们正在触及一些绝对的真实，而不仅是重新利用我们熟悉的陈旧概念。

这种从量子理论的角度看待时间的方式，其根本特征在于，在大爆炸的终极量子引力环境中，将时间当作真正的空间。如果一个人从一开始就站在宇宙的起点，可能会看到量子效应相互干扰，就像波峰遇到波谷一样，渐渐地，宇宙会以越来越精确的方式沿着经典路径运行。时间的传统特性，即在性质上区别于空间的特性，在普朗克时间之后的初始时刻开始出现。相反，如果一个人从现在回溯到宇宙最开始的时刻，时间的鲜明特征就会逐渐消失，时间与空间变得难以区分。

宇宙的这种原始量子状态的无时间性是由哈特尔和霍金提出的，因为它非常省事，而且避免了初始状态出现奇点的情况。由于这些原因，它被称为“无边界条件”（no-boundary condition）。更准确地说，无边界条件规定，宇宙的波函数是由具有单一、有限、光滑边界的四维空间（类似前文讨论的球面）的平均跃迁决定的。

通过此构想得出的跃迁概率具有这样的特点，宇宙没有所谓的前初始状态。因此，无边界条件通常被描述为“无中生有”，因为它是一幅这样的图景，变量*T*提供了某种类型的宇宙从无到有的概率。由于“时间变为空间”的假设，所以并不存在宇宙诞生时刻或者起点。

我们对这类量子状态的起点的总体认知是，当回顾那个被称为时间“零点”的时刻时，时间的概念便会消失。这种类型的量子宇宙并不一定存在，它的形成就像具有奇点的非量子宇宙一样，但它并不始于大爆炸，因为大爆炸的各类物理数量是无限的，所以需要进一步确定其初始条件。无论是单一的大爆炸创世，还是量子创世，关于宇宙从何以及为何诞生，我们都无从得知。

哈特尔和霍金的观点十分激进。该观点由两个部分组成：一是“将时间变为空间”；二是无边界条件。这种观点是解释宇宙状态的一种方法，既包含了初始条件，又包含了普通物理学中的传统法则。

即使你选择了第一个部分，也可以有很多选择代替无边界条件，最终指向宇宙从无到有的状态。

如图6-7所示，在无边界条件的情况下，或者在另一种可能的边界条件下，宇宙波函数*Ψ*的波动与宇宙的密度（即“时钟”）有着截然不同的性质。美国物理学家亚历克斯·维兰金（Alex Vilenkin）就是这样认为的。*Ψ*的高值对应高概率。因此，在无边界条件下，宇宙以高密度存在的可能性几乎为零，而维兰金的条件使这成为可能。一些无边界条件的批评者认为，无边界条件不太可能产生一个密度足够大、温度足够高且足以承受膨胀的极早期宇宙。

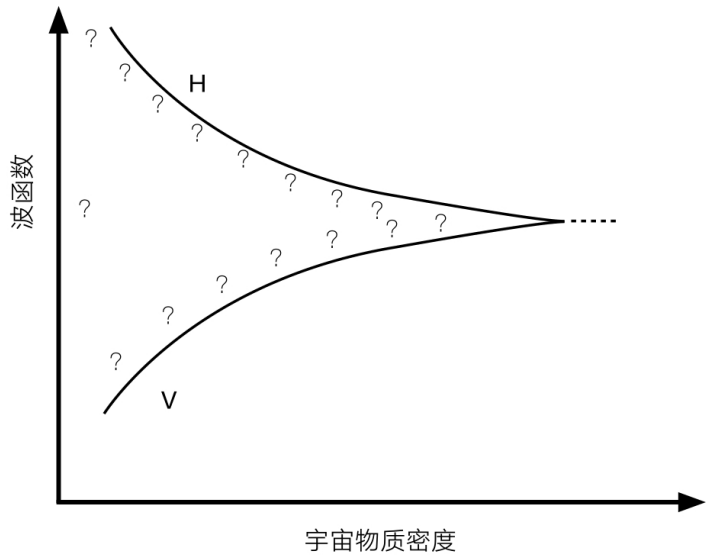


图6-7　宇宙波函数随宇宙物质密度变化可能产生的变化

注：波函数的高值对应发生的高概率。该图展示了哈特尔和霍金（H）以及维兰金（V）对波函数的设想。其他可能的状态介于这两条曲线之间（即“？”所在的区域）。但当密度极高时，这个理论就变得非常不靠谱（如图中的点所示）。

对宇宙波函数的研究尚处于起步阶段，在得到完善之前，还会在许多方面发生变化。无边界条件还有待改进，因为它还没有明确说明星系形成所需的微小不均匀性，它还必须补充与宇宙中的物质及其分布有关的其他信息。也许无边界条件的假设是对的，也可能正误参

半，也可能是个彻头彻尾的错误观点，甚至悲观主义者可以认为它的对错我们永远无从得知，因为宇宙的形成方式可能抹去了量子起源的所有痕迹，抑或这些痕迹太过微小我们无从观测，无法用事实来检验。如果暴胀的确发生过，我们也很可能无从得知。

我们需要从中吸取的重要经验是，我们对于宇宙演化的传统思考方式，即从受变化规律影响的起始条件开始思考，可能并不正确。这种思考方式可能是我们所经历的自然领域的人工产物，在这样的日常中，量子引力的效应微乎其微。选择用无边界条件以及其他有说服力的理论来解释宇宙的状态，部分原因是它们方便我们进行思考和计算，而并非量子宇宙内部的逻辑要求。

在讨论整个宇宙的初始状态时，我们必须重新评估初始条件独立于自然法则的观点。一方面，如果宇宙是唯一的（因为它是逻辑上一致的唯一可能性），则意味着宇宙的初始条件也是唯一的，因此该条件也就成为自然法则本身。另一方面，如果我们相信还有许多可能存在的宇宙（实际上，这种可能性确实存在），那么宇宙的初始条件就无须特殊的要求，它们都能在某个地方实现。

“初始条件的解释属于神学，而变化规律才是物理学家的思考领域”这一传统观点正在被现实动摇，至少在目前这种情况下，宇宙学家正在研究宇宙在初始条件下是否存在一些可行的“规律”，无边界条件的观点只是其中的一种可能。这个观点虽然有些激进，但也许它和真实的初始条件相比还不够激进。令学界担忧的是，现代量子宇宙理论中的许多概念，比如“从无到有的创世”“随宇宙诞生而来的时间”，也许只是沿袭已久的人类直觉和连中世纪的神学家也甘之如饴的种种思想的精炼翻版。

不过，这些传统理念引出了许多以数学形式展现的现代宇宙学概念。哈特尔和霍金提出的“将时间变为空间”的观点是宇宙学中真正激进的思想之一，我们无法从过去几代的哲学或者神学思想遗产中找

到该观点的蛛丝马迹。于是人们开始怀疑，是否只有摒弃这些习惯性的概念，宇宙起源的真实图景才能够浮出历史水面。

尽管一些现代宇宙学家已经满怀信心地回答了有关宇宙起源的问题（诸如《从无到有：宇宙的诞生》之类题目的研究论文的发表），但人们还是应当保持谨慎。因为，所有这些理论需要在一开始假定，宇宙中存在着比我们日常生活中的“无”多得多的东西，这样才能发表一些令人感兴趣的内容。在宇宙诞生的初始阶段，自然规律（此处指的是惠勒-德维特方程）、能量、质量、几何的规律必然存在，它们的存在支撑起无处不在的数学和逻辑世界。

在能够对宇宙的构建以及持续发展做出完整的解释之前，我们需要一个相当完善的理性基层。当被问及上帝在宇宙中的角色时，大多数现代神学家强调的正是这种潜在的理性，他们不认为神仅仅是点开宇宙膨胀开关的金手指。

科学家试图解释，宇宙的存在是“绝对的空无”这一前状态产生的结果。这种想法与我们根深蒂固的观念，比如“世界上没有免费的午餐”等此类观念大相径庭。非科学家理所当然地认为凭空造物是不可能的。如果有人提出要用科学的方法来解释宇宙的诞生，最直接的反对意见便是，宇宙的确是从虚无中诞生的，而且它必须创造出一个拥有能量、角动量和电荷的宇宙。但这违反了我们熟知的自然法则，自然法则规定了这些量的守恒。因此，宇宙从无到有的创世不可能是这些法则的结果。

这个论点令人非常信服，直到有人开始探究宇宙的能量、角动量和电荷到底是否存在时，才发生了动摇。如果宇宙本身具有角动量，那么在最大尺度上，膨胀就兼有旋转。最遥远的星系在远离我们的同时，也会旋转。尽管这种横向的运动速度太慢以至我们难以观测，但任何宇宙的旋转都有其他易于察觉的特征。比如，地球自转带来的影

响是地球的两极略微扁平。所以，如果宇宙也在旋转，类似的现象也会发生，即沿着旋转轴方向的地方会比其他方向膨胀得更为缓慢。

因此，如果宇宙微波背景辐射来自旋转轴的方向，那么它的温度最高，而与旋转轴呈直角的方向则温度最低。事实上，辐射温度在各个方向上都保持一致，该数据可精确到十万分之一。这意味着如果宇宙确实在旋转，那么它的旋转速度是它膨胀的速度的一万亿分之一。这个比例太过微小，足以表明宇宙的净旋转和角动量并不存在。

同样，也没有证据表明宇宙中存在任何整体性的净电荷。如果宇宙中的任何结构因其中质子和电子的数量不平衡而具有电荷，这将对宇宙的膨胀产生巨大影响，因为电磁力比引力强大得多。事实上，爱因斯坦引力理论的一个重要反推结论便是：宇宙是封闭的，即一个未来会坍缩成奇点的宇宙，其总电荷数必须为零。也就是说，宇宙所有包含的物质的电荷数总和必须为零。

宇宙的能量又如何解释呢？说到凭空造物的不可能性，这是一个我们最为熟悉且直观的例子。但值得注意的是，如果宇宙是封闭的，那么它的总能量也一定为零。原因可以追溯到爱因斯坦的方程式：$E=mc^2$。根据此公式，质量和能量可以相互转换，所以我们应该考虑的是质量和能量之间的守恒，而非仅单独考虑能量或者质量守恒。重要的一点是，能量，即以质量以外形式存在的能量，有正负的变化。如果我们把一个封闭宇宙中的所有物质的质量加起来，它们将对总能量有很大的正值贡献。

但是这些质量也在相互施加引力。这个引力与负能，或者我们所说的“势能”相等。如果我们手里拿着一个球，它便具有这样的势能：当球往地上掉落时，便产生了一种以势能为代价的正向运动能量。引力定律证明，宇宙中质量之间的负引力势能在数量上正好与这些质量的能量之和相当，因此，总能量永远为零。

这种情况其实非同寻常。冥冥之中，那些看起来与宇宙从无到有的诞生方式相违背的三大守恒量在宇宙中的值很可能都等于零。这其中包含的意义尚不明确。不过，自然的守恒定律并不会成为宇宙横空出世的阻碍，也不会阻碍它消失于虚无之中。自然法则也能够用于描述宇宙诞生的过程。

为了结束“宇宙诞生于虚无”这个充满分歧的讨论，我们应当回顾一下我们讨论过的另一个观点，即宇宙始于时空的一个奇点。量子宇宙学的无边界条件回避了这种灾难性的起点，因此这种理论在宇宙学中甚是流行。然而，我们应该对这样的情况保持警惕：量子宇宙学的许多研究工作，动机都是设法避免出现初始密度无穷大的奇点，所以研究者更愿意关注并认同符合该需求的理论，甚至不顾宇宙真的存在奇点这种可能性。

值得我们注意的是，从严格意义上来说，宇宙大爆炸模型（即始于一个奇点）也是始于绝对的虚无，其中的原因我们无从知晓，也没人反对和限制。奇点以前，没有时间，没有空间，也不存在物质。量子宇宙理论的研究者希望，通过某种不可避免的量子状态来描述一个极有可能的宇宙，我们便能了解为什么当前的可见宇宙拥有这么多不同寻常的属性。可惜的是，这些属性可能都产生于宇宙诞生不久后的暴胀阶段，而暴胀可能归因于各种各样的初始量子状态。

THE ORIGIN
OF
THE UNIVERSE

7
步入迷宫

勇敢地走进去吧，带着你的种种疑问和不解，是时候找出恶魔了，前提是你要义无反顾、拼尽全力。

这可是一个大胆的猜测，华生，可以说是非常大胆了！

——《白额闪电》（*Silver Blaze*）

我们周围存在的物质，从卷心菜到国王，都有自己的密度和硬度，因为宇宙结构的某些方面是恒定不变的。这些不变的方面被称作“自然常数”，诸如引力的强度、基本物质粒子的质量、电荷和磁力的强度以及真空中的光速等，它们都有着自己的固定值，如果有些固定值不能用自然常数来表示，我们就称其为“基本常数”。大多数数值都能够用非常精确的方式进行测量。

宇宙物质的常数值是区别我们所处的宇宙与想象中遵循相同物理定律的宇宙的标志。然而，这些常数尽管出现在我们所有的自然法则当中，却是宇宙结构中隐藏最深的奥秘。为什么它们有着特定值呢？物理学家一直希望有一天能提出一套完整的物理理论，预测或者解释基本常数的值。许多伟大的科学家都做过此类尝试，但都铩羽而归。

最近，通过量子来描述宇宙及其初始状态的尝试出人意料地提供了一种可能解释自然常数的值的方法。詹姆斯·哈特尔和斯蒂芬·霍金提出的寻找宇宙波函数的总体思路是，假设宇宙在其量子属性占据统治地位的极端密度下像一个四维的球体。但是，一些宇宙学家随之发问：如果球体的表面并不均匀光滑，将会发生什么呢？假设用一些管子连接球体表面的两端（见图7-1），这些管状连接被称为“虫洞”，它们是连通不同时空区域的桥梁，如果没有虫洞的存在，这两个时空区域将无法连通。



图7-1　一个有虫洞连接自身的宇宙

提出这种精巧理论的目的主要有两个。第一，物理学家想要修补我们对当前宇宙的认识，从而发掘新的事物以解释自然界的未解之谜。第二个目的更加具体。存在于普朗克时间（10^{-43}秒）前后的时空状态是量子不确定性主导的湍流泡沫（turbulent foam），虫洞的直径相当于光在这段时间（10^{-43}秒）走过的距离（大约10^{-33}厘米），这类大小的虫洞的存在，很可能是空间无序互联状态的结果。

随着我们对宇宙整体性质认识的加深，宇宙的复杂性又增加到令人难以置信的程度。宇宙可能由大量（甚至是无数）的扩展区域组成，这些区域通过虫洞彼此相连，如图7-2所示，图中有许多相互连接的“婴儿宇宙”（baby universe）。

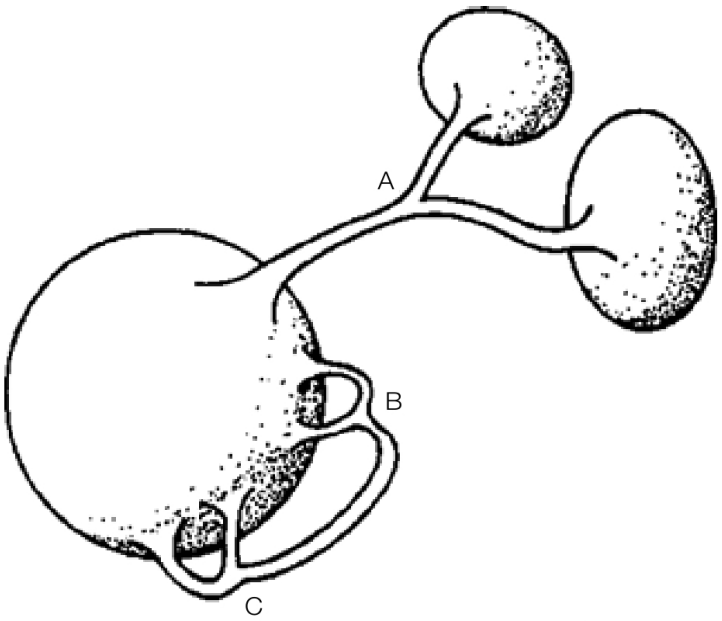


图7-2　虫洞网络

注：虫洞从母体宇宙中分裂出来，在A处形成两个婴儿宇宙。虫洞在B和C处与其他虫洞相连接，从而连接到母体宇宙。

为了更好地理解在这种情况下到底会发生什么，我们先只考虑最简单的虫洞连接类型，即虫洞只连接一个婴儿宇宙。这种简化方式被称为“稀薄虫洞近似”（dilute wormhole approximation），因为这种方法同描述普通气体行为时采用的简化假设“稀薄气体近似”相似。稀薄气体近似的前提是，气体分子在两次碰撞之间的运动时间比碰撞过程中的时间长得多。当条件发生改变时，比如，当气体凝结成液体时，这种行为就更具有互动性。而稀薄虫洞近似是对婴儿宇宙之间的相互作用所做的简化，这种简化假设，虫洞只连接大面积的平滑区域，并且虫洞不会分裂成两个通道或者与其他虫洞连接（见图7-3）。

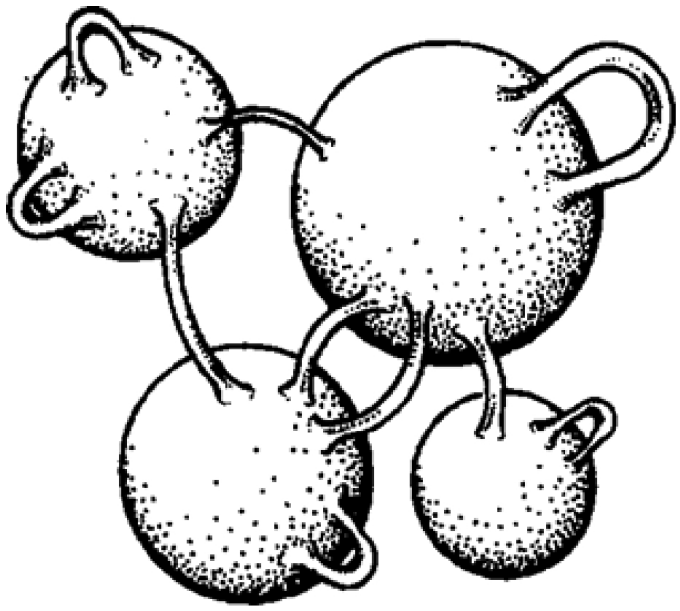


图7-3　许多由虫洞连接的婴儿宇宙

注：这些婴儿宇宙本身也有与自身相连的虫洞。这些虫洞不会与其他虫洞相连，也不会分裂成两个或者两个以上的虫洞，这种状况被称为“稀薄虫洞近似”。

这种假设看起来一切都好，如果它只是为了概括而简化，便不具备深挖的意义。不过，从之后的结果来看，虫洞的想法为我们提供的思路远不限于此。现在，存在于宇宙任何大区域中的自然常数的值都可以由与该区域相连的虫洞网络的波动来决定。但由于虫洞的连接包含量子不确定性的所有属性，因此这些常数的值并非由虫洞直接确定，在统计学上只是受虫洞的影响。

最容易研究的常数便是著名的“宇宙常数”。爱因斯坦为了建立静态宇宙模型将这个常数引入广义相对论方程式中，但后来又将其抛弃。宇宙常数定义了一种长期存在的斥力，这种斥力与同质量之间的引力的方向相反。尽管我们可以像宇宙学家通常会做的那样，忽略在引力定律中增加这个常数的可能性，但我们没有任何已知的理由能够说明，为什么这个常数不应当出现在爱因斯坦的方程式中。这个结局并不理想。即使它无法阻止宇宙的膨胀，但它仍然可以改变当今宇宙膨胀的速率。

对宇宙膨胀速率的天文观察显示，宇宙常数如果真的存在，其数值也极小。若想用纯数字表示，它必须小于10^{-20}。这个数字实在是太过微小以至于宇宙学家开始推测可能存在某种未知的自然规律，决定宇宙常数的数值为零。然而，在所有关于早期宇宙中存在的基本粒子以及能量场行为的研究中，情况却完全相反。这些研究不仅预测了宇宙常数的存在，还得出该数值比当前观测到的数值要大得多，甚至可能是当前数值的10^{120}倍。

1988年，美国理论物理学家西德尼·科尔曼（Sidney Coleman）取得了一项惊人的发现。如果宇宙在诞生之初就存在一个同引力相对应的宇宙常数，那么它对虫洞的影响是创造出一个反向的压力，这种压力将抵消其自身带来的反引力效应，从而达到固有的量子确定性的水平。利用包括虫洞波动在内的信息，科尔曼预测到，当一个婴儿宇宙开始变大（如同当前的可见宇宙）时，那么包含于其中的宇宙常数最可能的值是0（见图7-4）。

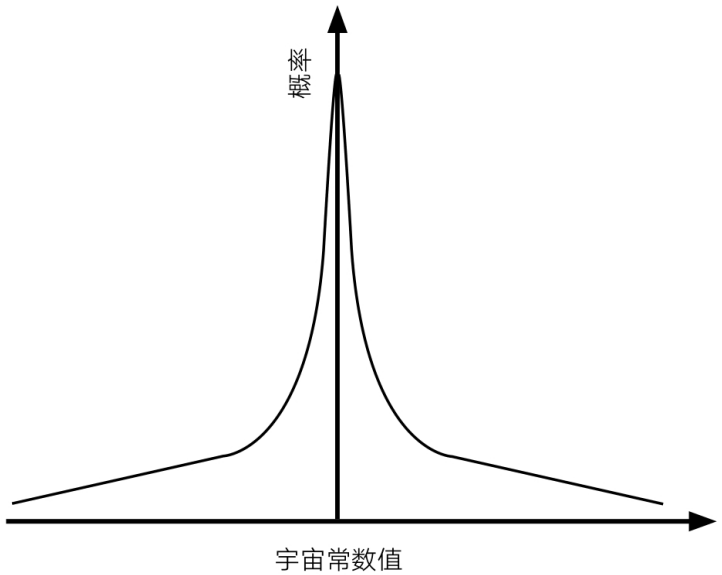


图7-4　宇宙常数因虫洞波动而具有特定值的概率

注：宇宙常数值在0附近达到可能性的峰值。

到目前为止，虽然这个预测还没有成功地预测到自然界中的任何一个非零的自然常数（例如电子或者电荷的质量），但思考这种预测的本质对我们具有很大的启发性。

假设我们能够计算出一个自然常数在现今宇宙中的概率分布，比如，电磁力的强度，其结果可能与图7-5中所示的任意一种情况相类似。

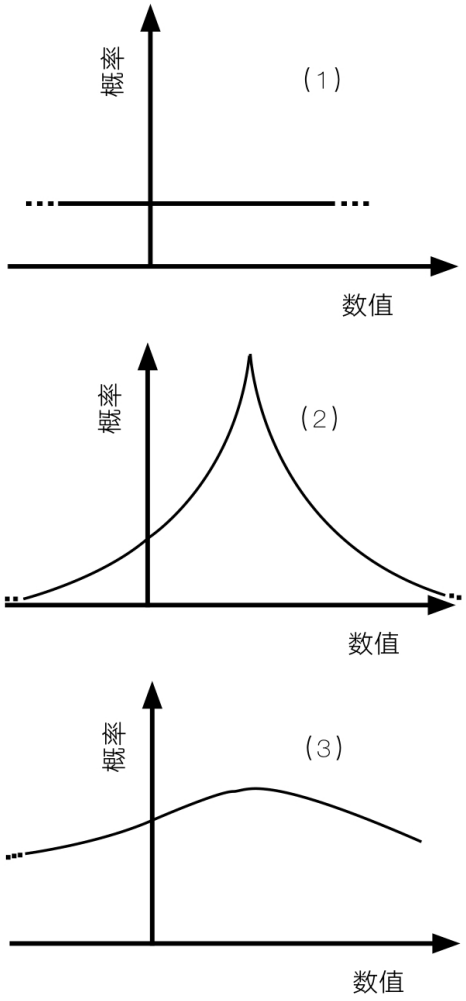


图7-5　自然常数的预测观测值

注：根据虫洞理论预测的自然常数观测值：

（1）任何值的可能性均相等；

（2）存在一个明显具有更大可能性的值；

（3）可能性分布在许多数值上，没有很明显的可能性峰值。

在第一种情况下，常数的所有值都有相同的可能性，虫洞理论并没有对此做出预测，所以没有可以与观测值进行对照检验的预测值。在第二种情况下，常数很可能在图的最高处存在一个值。大多数宇宙学家将这样的波峰解释为我们应该观测的情况，因为它为我们确定了最大可能的数值。

如果牛顿引力常数期望值的概率分布在观测值附近达到峰值，我们会认为这是虫洞理论的一个惊人成果，也就可以使用自然常数的观测来探测普朗克时间之前的量子引力理论。然而事实证明，从理论上做出这样的预测太困难了。

许多物理学家认为，宇宙中必然存在一种能够统一描述所有自然规律的理论，它能将我们所知的引力、电力、磁力、放射物质以及核物理中的各种不同力统一起来。这种对自然规律的系统性描述被称为万物理论（theory of everything），物理学家对它寄予的希望之一是，存在一套自然常数且它们具有一组逻辑一致的值。如果我们真的找到了万物理论，它应该能够告诉我们基本常数的值，这将是对这一理论的终极检验。

然而，即使万物理论确定了每个婴儿宇宙和母体宇宙中自然常数的初始值，它们之间的虫洞连接也会产生不可预测的波动，从而改变这些常数的值。因此，自然常数的观测值也会偏离从一开始就被赋予的理论值，也就是说，当前观测到的自然常数值不会与万物理论确定的值相符。

接下来我们看一下图7-5中的第三种情况。在这种情况下，数值的概率均匀地分布在一个较大的可能范围内，其中有一个最具可能性的值，但也只是最具可能性而已。这给我们带来各种各样的尴尬问题：为什么要把对宇宙的观测结果与宇宙的最可能模型的预测进行比较呢？从量子理论的角度考虑，我们是否应该期望当前的可见宇宙是最

具可能性的宇宙之一呢？然而，我们有充分的理由认为，可见宇宙并不在最可能存在的宇宙行列之中。

我们已经介绍了膨胀宇宙的概念，也展示了这样的一个宇宙：它的年龄与智慧生命的进化密切相关，年龄足够大的宇宙是产生恒星的必要条件，因为只有这样，漫长的岁月才能产生比氦元素重的元素，才会有后续的生物化学复合体的进化。同样，我们也可以考虑，为什么像我们这样的智慧生命（甚至与我们不同类的智慧生命）的存在意味着自然常数的值必须与所观测到的数值差距不大。

如果引力的强度稍有不同，或者电磁力的强度稍有扰动，那么稳定的恒星就不复存在，因为原子核、原子和分子等这些维持生命精妙平衡的特性就会被破坏。生物学家认为，生命的自发进化需要碳的存在，而碳异乎寻常的灵活性使其成为DNA和RNA的基础。宇宙中碳的存在不仅取决于宇宙的年龄和大小，而且还取决于决定着原子核自然能级的那些自然常数值之间惊人的巧合，它们决定了原子核的能级。

当恒星中的核聚变反应将两个氦原子核结合在一起产生铍时，距离碳的生成仅有一步之遥，那就是添加另一个氦原子核。但这个反应太慢了，无法生成宇宙中后续事件所需的碳。但我们又确实存在于此，在这一事实的推动下，弗雷德·霍伊尔在1952年做出了一项惊人的预测——碳原子核的能级可能比氦原子核和铍原子核的总和还要大。这便是第一个惊人的巧合。

这种情况会产生一种特别快的氦铍反应，因为这两个原子核的结合造成了所谓的“共振态”——这正是人们所期盼的能产生自然能级能量的情况。结果证明，霍伊尔是对的。核物理学家惊奇地发现，碳原子核的能级与霍伊尔之前的预测完全一致，而这一能级在此前无人知晓。加州理工学院的物理学家威廉·福勒（William Fowler）在天体物理学领域做出了巨大贡献，因此获得诺贝尔奖，他曾说过，正是霍伊尔的预测让他相信自己可以在这个领域继续研究。如果有人仅仅

通过对恒星的思考就能告诉他，在哪里可以找到这样一个核能级，那么在天体物理学这门学科中一定存在着某种隐藏的东西在支配一切。

如果自然常数稍有不同，氦、铍和碳的共振就不复存在，我们也将不复存在，因为宇宙中的碳含量几乎为零。

第二个巧合是，一旦碳被制造出来，它就可以通过碳和氦原子核之间的核反应全部转化为氧。但是这个反应没有共振，也就是以一种更加精准的方式，因此碳得以保存下来。

这些例子告诉我们，宇宙中的复杂结构的存在是由自然常数值的明显巧合组合而成。如果这些常数的值稍有改变，像人类一样有意识的智慧生命的进化便全无可能。我们不能从这种幸运的情况中得出任何伟大的哲学或者神学结论，也不能说宇宙“设计”的目的就是诞生有生命的观察者，同样，我们也不能说宇宙“设计”的目的就是让生命存在、让生命必须存在于宇宙的某个地方，或者让生命延续。

这些猜想都有可能是对的，也有可能是错的，以我们目前的能力根本无从判断。我们需要认识到的是，若想让宇宙诞生出像我们这样的智慧生命，甚至诞生出组成智慧生命的原子或者原子核，所有自然常数（至少是其中大多数常数）的数值需要与所观测到的非常接近。

考虑到这一点，我们需要再来看看图7-5的第三种情况。将常数的可能范围缩小到允许后续生物发生复杂进化的程度，并重新思考。允许智慧生命存在的常数范围应该非常小，很有可能会远离理论所预测的最具可能性的值（见图7-6）。目前我们很难将理论数值和观测数值进行比较。我们对常数最可能出现的值并不感兴趣，而感兴趣的只是能够让智慧生命完成进化的那个最具可能性的值。说得夸张一些，如果引力强度最可能的值致使宇宙仅存在十亿分之一秒，那么显然，我们就不可能生活在这种最具可能性的宇宙之中。

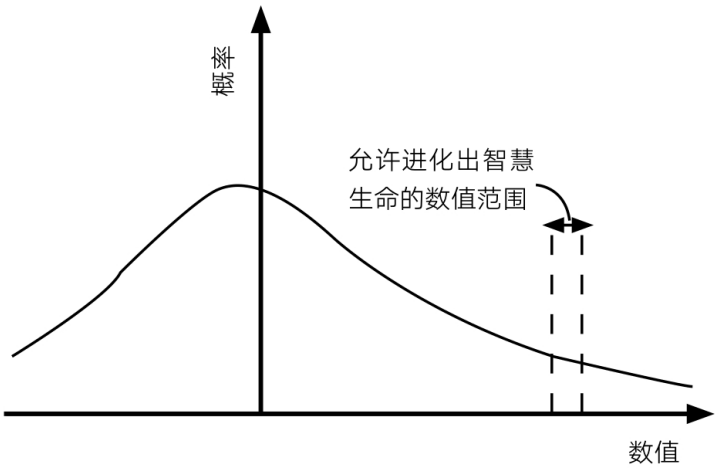


图7-6　常数的概率预测

注：这是在当前可见宇宙中找到具有特定值的自然常数的概率预测。其中还指出了允许智慧生命进化的数值范围。对于自然界中的大多数基本自然常数而言，这个范围看起来很狭窄，也可能远离最具可能性的常数值，就像我们在图中展示的这样。

我们已经学到了非常重要的一课。当我们提出一个关于宇宙的理论时，它能够对这个从量子状态起源的宇宙结构进行统计学上的预测。然后，为了验证这些预测与实际的观测是否一致，我们必须知道智慧生命进化所必需的所有常数的值以及进化方式。实际上，这个允许生命进化的数值范围非常狭窄，可能性极低。

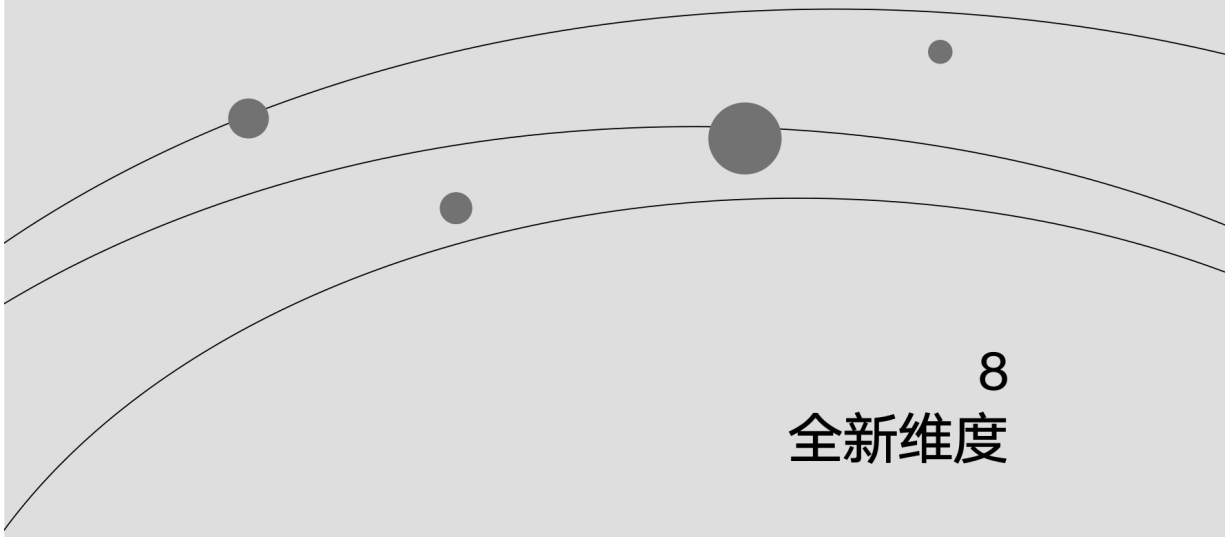
然而，我们确实存在于这样一个几乎不可能的宇宙之中，因为我们不在其他宇宙里。我们穿越虫洞迷宫，回到时间的起点，这段曲折的旅程让我们认清了一个极其简单的事实，那就是，我们的存在就是寻找宇宙起源及其各种非凡属性的重要论据。

摆脱这些结论的唯一方法便是假设生命的诞生是一种普遍现象，无论自然常数的值是多少，它都会以各种方法出现。但这种假设很难与我们所拥有的知识以及生活经验相符，特别是有意识的生命的进化，它不同于复杂分子的演变，即使在常数值存在的情况下，也是一件相当不稳定的事情。生物学家更加强调，许多进化途径最后都走进

了死胡同。我们并不否认在茫茫宇宙中有许多其他生命以不同形式存在的可能性，但我们坚信，如果它们的进化是自发的，那么一定也是基于原子，并且以碳基生命的形式存在。

其他形式的生命肯定也存在。比如，我们正在试图创造基于硅的简单生命形式。目前，“人工生命”（对应于“人工智能”）研究是个快速增长且吸引人眼球的科学领域，它汇集了物理学家、化学家、数学家、生物学家和计算机科学家来研究新型复杂系统的特性。这些系统中存在与生命相关的一些或者所有特性。这些研究大多利用高速计算机图形学，以模拟复杂系统与其环境的交互、增长以及复制等行为。它们是否真的具有生命还有待观察。最终，这些研究一定能对有意识的生命的结构是如何出现的带来重要启示。

THE ORIGIN OF THE UNIVERSE



8
全新维度

我知道你还在怀疑，排除一切合理怀疑之后，无论多么难以置信，留在你面前的就是真相，你要习惯它。

我跟你们说过多少次，当排除了所有不可能的因素后，剩下的无论看起来可能性有多低，都一定是真相。

——《四个签名》（*The Sign of Four*）

自20世纪80年代中期以来，对万物理论的探索一直被超弦理论（superstrings）主导。早期，对粒子物理终极定律的探索主要集中在数学描述上，在该理论框架下，最小的实体是没有大小的点。与此不同，超弦理论以能量线或者能量环作为最基本的组成部分。“超”指的是这些弦所具有的特殊对称性，这种对称性让它们能够在描述物质的基本粒子与自然界中不同形式的辐射时达成统一。

根据超弦理论，最基本的粒子像小小的环，这种想法听起来似乎有些奇怪。这些小环更接近于橡皮筋，它们具有一种张力，而且这种张力受环境温度的影响。在低温下，这种张力很强，导致小环产生收缩，类似于一个点。因此，在如今相对温和的宇宙环境下，弦具有高度精确的类点行为，与类点基本粒子一般，符合低能量物理学的各类预测。

然而，当物理学家将点状基本粒子的理论推广到温度或者能量极高的条件下时，没有得出任何有意义的结果。除此之外，这个理论完全无法将引力与其他三种力（电磁力、强相互作用力和弱相互作用力）协调起来。相比之下，超弦理论在高温下有着完美的表现，而且引力能够与其他自然力结合起来。这样，无意义的回答将不复存在，基本粒子物理学的所有可观测性质在原则上都可以从这个理论中计算出来（尽管还没有人具备足够的聪明才智完成这项伟大的使命）。

虽然超弦理论听起来很理想，但也有一个缺陷。若想弦具备这些备受追捧的特性，前提是它们所处的宇宙必须具备比我们所熟悉的三维宇宙更高的维度。为此而构造的首批模型需要有9个或者25个空间维度，然后探索发生在普朗克时间附近的自然过程，这要确保宇宙在开

始时就有9个均匀膨胀的空间维度，其中的六维陷入某种困境，所以仍然保持当时宇宙的大小，即10^{-33}厘米，而另外的三维持续扩张，直到扩张到六维的10^{60}倍大（见图8-1）。目前，根据这一理论，其他几个维度仍然在普朗克尺度上，所以它们所能产生的影响我们无法分辨，不仅在日常经验中无法分辨，而且在迄今为止高能物理实验中所创造的事件中也是如此。

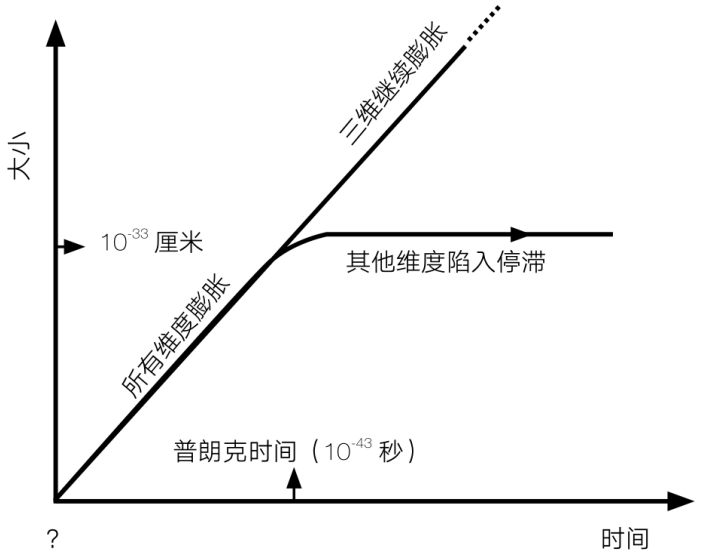


图8-1　超弦宇宙的膨胀类型

注：在构想的超弦宇宙中，空间的各个维度随时间的变化产生不同的膨胀。在宇宙刚诞生的时刻，所有维度都以同样的速度膨胀，但在普朗克时间，即10^{-43}秒之后，只有三维继续膨胀，最终成为当前的可见宇宙，大小至少是3×10^{27}厘米，这些三维构成了可见宇宙的整个空间。其余的几个维度则被困住，大小保持不变。我们发现不了这些空间，因为它们的大小只有10^{-33}厘米。到目前为止，还没有任何观测证据能够证明这些维度的存在。

六维空间为何出现这种困境仍然是一个有待解决的问题。如果真是这样，会给早期宇宙的研究增添许多困难。也许宇宙中存在某种隐藏至深的自然法则，要求三维空间不断膨胀至极大，就像当前可见宇宙的大小。又或者，膨胀空间的维度数是以相当随机的方式确定的，甚至维度数可能在宇宙的不同区域都有所不同。

空间的维度数与宇宙中可能发生的事情有着密切联系。值得我们注意的是，三维空间的宇宙非常特殊。如果维度数在三个以上，稳定的原子就不可能存在，也就不可能有围绕恒星稳定运行的行星轨道。波在三维空间中以一种独特的方式运动，如果空间的维度数是偶数，比如二维、四维或者六维，那么波信号就会产生混响，也就是说，在不同时间发出的波信号可以同时到达某处。而在奇数的维度空间中，这种情况就不会发生，因为波信号是无混响的。然而，在除了数量为三的所有奇数维度中，波信号都会失真。只有在三维空间中，波才能以一种尖锐、不失真的方式传播。基于这些原因，智慧生命似乎只能存在于大型的三维宇宙中，因为在其他维度的大型结构里，连接任意结构（如原子）的电磁力和强相互作用力不复存在。

如果因为某种深刻的自然法则才出现三维空间，那么我们非常幸运。如果宇宙的维度数只是时间开始时附近事件的随机结果，或者在可见宇宙视界之外的地方随着地点的变化而变化，那么这种情况就更像由虫洞波动决定的自然常数。我们能确定找到三维空间的概率无论有多小，它最终都存在。因为我们观测的正是三维的大型宇宙空间，不过也没有其他宇宙能让我们完成这样的进化。

前沿宇宙学和高能物理学正在探索新的数学理论分支，并且已经勾画出当代宇宙学的一个总体特征：它并不完全符合科学的传统定义。像卡尔·波普尔（Karl Popper）这样的科学哲学家强调，如果某个看法具备意义或者可以被称作“科学”，就必须能够以某种方式进行验证。在以实验室为基础的科学中，这不会产生什么问题。原则上，一个人几乎可以开展他所选择的任何实验，尽管在实践中，他可能会受到经济、法律或者道德方面的限制。

在天文学中，情况大不相同。我们没有在宇宙中进行实验的自由。我们虽然可以用多种方式进行观测，但不能直接在宇宙中开展实验，只能寻找事物之间的关联。比如，当我们观察星系时，会注意到

是否所有体量大的星系都非常明亮，螺旋形的星系是否含有最多的气体和尘埃，等等。在宇宙学里，情况也不同于陆地科学，因为我们对宇宙的观测偏见不能仅通过在不同条件下开展重复的实验就能得到纠正。

科学家已经解释了为什么我们必须生活在宇宙膨胀开始的数十亿年后以及为什么我们只能看到整个宇宙的（可能是无限的）一小部分。我们还提到，宇宙性质因地而异的一个结果是，智慧生命只能在特定的区域完成进化。宇宙学是一项研究，在这项研究中，可用的数据总是达不到期望，而且已收集的一些数据往往具有片面性。明亮的星系比暗淡的星系更容易被观测到，可见光比X射线更容易被探测到。若想成为一名优秀的天文学家，关键在于理解数据收集过程中的哪些方面可能给观测结果带来偏差。

由于宇宙学的这些特点，关于宇宙起源的研究越来越受欢迎。我们在前文介绍了两种观点的对比，一种观点试图用宇宙形成时的样子来解释当前可见宇宙的结构；另一种观点则试图表明，无论宇宙在过去是如何形成的，目前的结构都是已经发生的物理过程的必然结果。宇宙暴胀理论是第二种观点的最充分展现。该理论认为，无论宇宙当初以何种方式开始，总是存在一个足够小的区域，可以通过物质和辐射之间的相互作用保持平稳，而这个区域可能经历了一段加速膨胀的时期。

这样的结果便是，形成一个与当前的可见宇宙极其相似的宇宙——古老、庞大、没有磁单极子，而且膨胀的速度十分接近所谓的临界点，即将“开放”的宇宙与“封闭”的宇宙分隔开来的膨胀速度分界线。但是近几年来，人们开始关注第一种观点。科学家已经开始研究是否存在相应的自然法则在宇宙的诞生阶段就决定了其初始状态。实际上，科学家需要的是一种新的自然法则，不是支配世界从上一分钟到下一分钟状态变化的法则，而是一种支配初始条件本身的法则。

类似的有趣理论还有詹姆斯·哈特尔和斯蒂芬·霍金提出的无边界条件。该理论对初始状态有着不同的规定，这些不同将产生完全不同的结论。亚历克斯·维兰金提出的理论见图6-7。我们也可以想象在另一种意义上看起来顺理成章的宇宙初始状态，即一个完全随机的状态。

罗杰·彭罗斯也提出了一种理论。

有一种可以测量宇宙引力场的无序程度的方法，那就是一种符合热力学第二定律的普遍“引力熵”。事实上这样的熵很有可能存在。霍金已经证明黑洞的引力场具有热力学性质，但黑洞没有像当前的可见宇宙一样随着时间的流逝而膨胀，我们也尚不知晓到底是什么决定了膨胀宇宙的引力熵。

对于黑洞的引力熵问题来说，答案很简单：黑洞边界的表面积决定了它的引力熵。彭罗斯和其他人提出，对宇宙的规律性及其面积的某种测量可以得出它的引力熵。如果膨胀速率在每个方向以及每个地方的大小都一样，引力熵就会很小。如果膨胀速率在不同地方以及不同方向上都是混乱不同的，引力熵就会变得很大。

无论引力熵的确切指标是什么，我们可以确定，如果它随着时间的推移而增加，那么在宇宙的初始状态，引力熵的值应该是非常低的，甚至为零。如果我们能准确地判定引力熵由宇宙的哪方面性质决定，就能推断出它在宇宙诞生阶段保持极低数值所带来的影响。到目前为止，我们还没有能力做到这一点。

所有关于宇宙起源的理论都无法解决宇宙学的终极问题。这些理论都是高度投机、基于某些观点之上的想法。然而，任何试图从理论上解释当前可见宇宙结构的尝试，都附带着一个重要条件。

回想一下，我们已经将宇宙这个整体与其有限的部分区分开来。自宇宙诞生以来，光传播到地球的距离，就是我们所说的可见宇宙。

可见宇宙的大小是有限的。当我们说想解释宇宙的结构时，实际表达的意思是想解释宇宙可见部分的结构。然而，宇宙的范围可能是有限的，也可能是无限的，我们永远不会知道。如果它拥有无限的范围，那么可见宇宙只是整个宇宙中一个无穷小的部分。

可见宇宙是从宇宙初始状态的一个点开始，以光速膨胀而来的。宇宙中所有得到观测的部分均由那个点的初始条件决定，而不是由整个初始状态的平均条件决定，而整个初始状态本身又由控制初始条件的一些“法则”决定。

这些局限性又对决定宇宙初始状态的终极法则的效用提出了疑问。在我们设想的宇宙膨胀图景中，可见部分从初始状态的某个点或者某个极小区域开始膨胀，如图8-2所示。

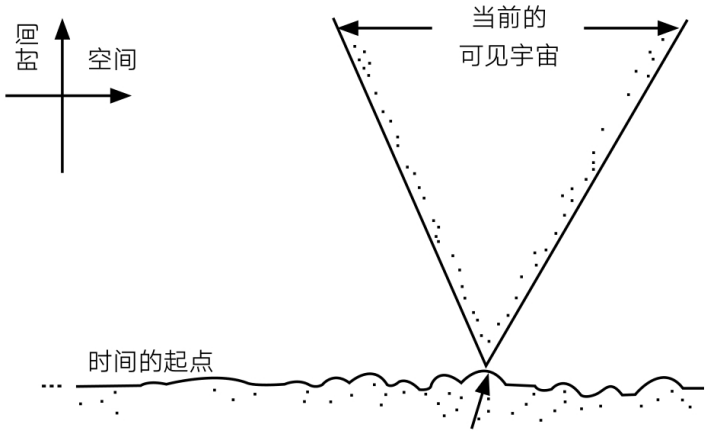


图8-2　可见宇宙始于某个点

一方面，当前可见宇宙的结构由初始状态中的某个微小区域扩展而来。另一方面，我们所说的宏大原理（grand principle）对整个宇宙的初始状态进行了笼统的解释。这个解释也许是正确的，但它并非是我们理解可见宇宙所需要的。我们需要知道的是，在最初形成可见宇宙的微小区域中，存在怎样的局部特定状态。这一区域可能在某种

程度上并不具备典型性，因为它最终扩张成了一个能够进化出智慧生命的宇宙。

我们已经看到，智慧生命的进化要求所在的区域拥有许多非同寻常的特性。宇宙可能是在最小引力熵的状态下诞生的，但这还不大可能用于解释当前可见宇宙的结构，因为可见宇宙很可能产生于异常波动的膨胀，而非最小熵条件下规定的平均状态。除此之外，我们对宇宙的经验知识局限于可见区域，这意味着我们永远无法对宇宙的整个初始状态进行验证，因为我们只能看到初始状态内一小部分区域的演化结果。也许有一天，我们能够揭示可见宇宙邻居的起源，但永远无法得知整个宇宙的起源。宇宙最深的秘密将永远埋藏在宇宙的最深处。

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的 “湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：

安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！



快速了解本书内容，
湛庐千册图书一键购买！

大咖优质课、
献声朗读全本一键了解，
为你读书、讲书、拆书！

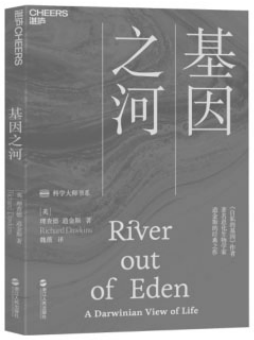
你想知道的彩蛋
和本书更多知识、资讯，
尽在延伸阅读！

湛庐CHEERS

延伸阅读

《基因之河》

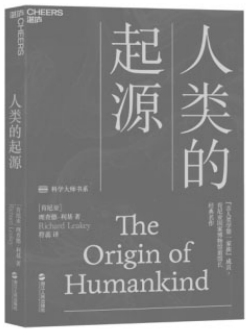
◎ 关于基因，没有人能比理查德·道金斯写得更好！《基因之河》是继《自私的基因》之后，理查德·道金斯的又一经典名作！生命的“复制炸弹”——基因从何而来？它又将走向何方？阅读本书，我们将通过一位热情、睿智、理性的科学家的视角直面基因的亘古谜题，获得对于生命的全新看法！



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09485-9

《人类的起源》

◎ 理查德·利基以直立人骨架“图尔卡纳男孩”这一20世纪古人类学最重要的发现为起点，清晰明了地勾画了人类进化的四大阶段：700万年前人科的起源；两足行走的猿类的“适应性辐射”；250万年前人属的起源；现代人的起源。除此之外，《人类的起源》还将带领我们利用有限的证据，提出种种出人意料的假说，推断人类的艺术、语言和心智起源之谜。



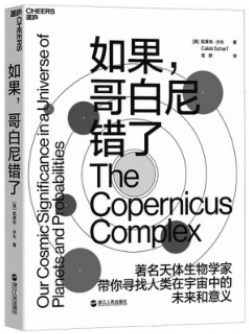
使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09300-5

《如果，哥白尼错了》

◎ 著名天体生物学家凯莱布·沙夫重磅新作！作者用诗一般的语言和奇特的想象，带领我们进行一场科学探险，寻找人类在宇宙中的未来和意义。

◎ 《星期日泰晤士报》年度最佳科学图书，《出版商周刊》年度十大科学图书，爱德华·威尔逊科学写作奖获奖图书。



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09390-6

《人类为什么要探索太空》

◎ 《纽约时报》《华尔街日报》《自然》重磅力荐。天体物理学家、畅销书《给忙碌者的天体物理学》作者尼尔·德格拉斯·泰森，科学记者、畅销书《50亿年的孤寂》作者李·比林斯，英国著名科普作家、萨塞克斯大学天文学访问学者约翰·格里宾，科幻作家、美国国家航天协会本·波瓦一致强荐！



使用“湛庐阅读”App，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09462-0

---

(1)美国著名文化推动者、“第三种文化”领军人，“世界上最聪明的网站”Edge的创始人，该网站每年都会让100位全球最伟大的头脑坐在同一张桌子旁，共同解答关乎人类命运的同一个大问题，开启一场智识的探险，一次思想的旅行！湛庐集结策划出版的“对话最伟大的头脑系列”就是布罗克曼主编的Edge系列书籍，它们会带你认识当今世界上著名的科学家和思想家，洞悉那些复杂、聪明的头脑正在思考的问题，从而开启你的脑力激荡。——编者注

(2)绝对零度是热力学的最低温度，单位是开尔文。绝对零度，也就是0开尔文约等于零下273.15摄氏度。——编者注

(3)牙仙是欧美等西方国家传说中的精灵。传说中，小孩子脱掉乳齿后，将乳齿放在枕头底下，夜晚时牙仙就会取走，换成一个金币，象征小孩将来会换上恒齿，成为一个大人。——编者注

(4) 1850年热力学第二定律的发现者以及“熵”这个术语的首创者。

(5)宇宙丰度是描述天体性质的一种重要物理量。丰度是指一种化学元素在某个自然体中的重量占这个自然体总重量的相对份额。——编者注

(6) 2000年，美国费米实验室发现了第三种中微子——τ中微子。——编者注

(7)米考伯是《大卫·科波菲尔》中的人物，他性格乐观又爱慕虚荣、喜好挥霍，负债累累，还因此而入过狱。但他也有善良正直的一面，因勇敢地跟黑恶势力斗争，揭露他们的阴谋，使获救者免于受害，为了感谢他，获救者资助了他一大笔钱帮他在事业上取得了成功。——编者注

(8) 2008年10月正式更名为“SLAC国家加速器实验室”。——编者注

(9)比如宇宙射线、放射性衰变以及其他地球事件的信号，这些信号将淹没我们的探测器。

(10)为了将其可视化，请将空间想象成只有两个维度而不是平时所熟知的三维空间。

CHEERS
湛庐

如果宇宙可以伸缩

[英]凯莱布·沙夫 著 [英]罗恩·米勒 绘
Caleb Scharf Ron Miller
高妍 译

The Zoomable Universe

浙江教育出版社
ZHEJIANG EDUCATION PUBLISHING HOUSE

10^{27}到10^{-35}米全尺度下的63个宇宙

An Epic Tour Through Cosmic Scale, from Almost Everything to Nearly Nothing

版权信息

本书纸版由浙江教育出版社于2020年5月出版

作者授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：如果宇宙可以伸缩

著者：凯莱布·沙夫

电子书定价：98.99元

THE ZOOMABLE UNIVERSE: An Epic Tour Through Cosmic Scale, from Almost Everything to Nearly Nothing by Caleb Scharf; Illustrations by Ron Miller

Text copyright © 2017 by Caleb Scharf

Illustrations copyright © 2017 by Ron Miller

Infographics copyright © 2017 by 5W Infographics

Published by arrangement with Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, New York.

All rights reserved.

献给所有的探索者，

过去，

现在与未来

前言

宇宙是一张可伸缩的地图

很久以前，原子遍布在直径达几万亿千米的空旷宇宙中。过去的几十亿年里，没有任何迹象表明，这些原子最终会组合在一起，成为你的眼睛、皮肤、头发、骨骼，或是你大脑中的860亿个神经元。

这些原子中有很多来自恒星的深处，也许是好几颗恒星，它们之间相隔几万亿千米之远。当这些恒星发生爆炸时，它们向外喷射出灼热的气流，气流裹挟着一些物质向外扩散，并填满了一个星系的一小部分，这个星系存在于一个直径几乎达10^{24}千米的时空中，而在这个时空中，与它相似的星系有数千亿个。

尽管这些原子零散地分布在宇宙中，但它们最终演变成了我们的世界，成了我们地球的一部分。它们逐渐冷却，慢慢聚集在一起，因重力而沉降，形成新的物质，其密度几乎比它们飘浮在宇宙中时的密度大了10^{21}倍。经过大约45亿年，它们渐渐变成了各种不同的样子。

这些原子中的一部分形成了最早一批复杂生命的微观气泡，那时，那些复杂生命仍栖身于空空荡荡的海洋和大陆之中。而正是这部分原子遨游在整个地球环境中时，不断地被释放，被吞并。

它们存在于一只，也可能是几千只三叶虫的壳上。它们存在于生物的触须中，根茎上，脚上，翅膀上，血液中，以及这之间的无数细菌上。当1亿年前，这些生物向外看向太空时，有些原子就飘浮在它们的眼前，而另外一些可能在恐龙蛋的卵黄中扎了根，或者附着在冰河世纪时期一只生物呼出的气体上。对其他一些原子来说，这是它们第一次被整合进活的有机物中，而在这之前的漫长岁月里，它们一直在

海洋和云朵中、在几万亿滴雨滴或者几十亿朵雪花中穿行。现在，在这一瞬间，它们就在这里，构成了你。

每个原子本身都是一种直径约一百亿分之一米大小的化合物，恰好处于一个宇宙的边缘，处于我们肉眼看得见的现实世界和看不见的量子世界之间。电子占据了原子空间的大部分区域。质子和中子聚集在原子核周边，原子比它们大10万倍，而它们本身由其他更小的东西组成：夸克和胶子。我们可以说电子不具备实际意义上的大小，也可以说原子核比电子大1 000万倍。在138亿年前的某一刻，所有原子构成的所有化合物都被挤压在一个极其狭小却拥有巨大能量的时空源头中。虽然这个源头现在已经扩大了很多，但我们人类仍然处于这个封闭空间之中，与那些可能存在于10亿光年之外的东西一起存在于此。然而，我们并非与外界毫无联系。

这是一个相当离奇的故事，它并非虚构，关于过去138亿年里究竟发生了什么，这是我们所能做出的最好的推测与讲述了。《如果宇宙可以伸缩》试图挖掘出这个故事的更多部分，让你能够认识到人类关于整个自然界知道（或不知道）些什么。为了实现这一点，我们将会采取一种行之有效的方法，也就是做一个简单的假设：用放大了10倍的视野来观察宇宙，从宇宙可观测的边缘直达现实最深处。

“游历于不同尺度下的自然界”这一奇思妙想并非新近才出现的，这一想法在科学上的实现最早可追溯至1665年出版的罗伯特·胡克（Robert Hooke）的著作《显微制图》（*Micrographia*）。类似的作品还有1957年基斯·博克（Kees Boeke）的开创性巨作《宇宙观：40级跳跃中的宇宙》（*Cosmic View: The Universe in 40 Jumps*），1968年加拿大国家电影局（National Film Board of Canada）发行的短片《宇宙伸缩》（*Cosmic Zoom*），1977年查尔斯·埃姆斯和蕾·埃姆斯导演的《十的次方》（*Powers of Ten*），以及随后的众多衍生物，它们充分展示了人类对宇宙之旅的普遍热爱。

现在似乎到了拿出一些成果的时候了，我们不仅需要引入全面更新的核心材料，还应将重心聚焦于宇宙错综复杂的连接性上。与我手里的原子相关联的，可能是另一边的原子，或者另一颗行星上的原子，又或是横跨大半个宇宙的原子。在我们身上起作用的物理原理，在其他尺度上、其他宇宙时间中也同样有效。我们日常生活中出现的形态和层展现象（emergent phenomena），会以无数种惊人的方式在自然界中共享同样的规则与特质。

无论是描述手指和脚趾的数量，还是使用现代数学与测量单位，我们都能看到“10的幂”这种概念在10的次方和10的负次方之间来回变换。将这些连续的量级放在一起，我们就拥有了一种语言，用来表达远在人类日常经验之外的宇宙连续性与相关性。“10的幂”使人类在宇宙万物与空无一物之间自由穿梭。

《如果宇宙可以伸缩》只是一个概要，如果你愿意的话，叫它备忘单也行。这本书并不能详述宇宙的历史以及其中的每一个细节。相反，它会把我们所知的现实世界看作一张可伸缩的、有着预设途径的地图。用电子游戏来比喻的话，本书就像一个“铁轨射击游戏”（rail shooter），只不过这条轨道是沿着宇宙的物理尺度铺展开的，它从顶端开始，一直缩小到底部。

在书写这段旅程并以图表展现出来之前，我们不断地苦苦思索该如何建设这条铁路。宇宙有着三维的空间，还有一个棘手的维度，我们称之为时间。在这一路上，有无数有趣的东西值得一看。而我们试图在“总览全线”与“确保观赏了绝妙景点”之间找到平衡。

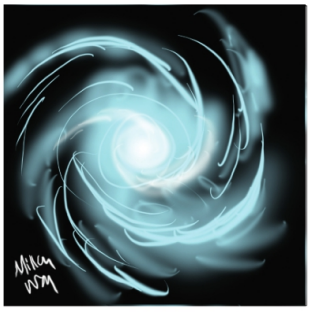
在这段旅途中，某些地方真的很有挑战性，甚至在第1章，你就需要辨别暗物质、扩张的宇宙，以及一些更奇怪的东西，比如多维宇宙和多维版本的你；在第3章，你会看到太阳系的宏伟起源；到了第6章，你会困惑于意识的本质；而在第9章，你需要了解量子力学的阐释

方式。别担心，书中精美的插图和信息图表将会照亮你的前路，为你指引方向。

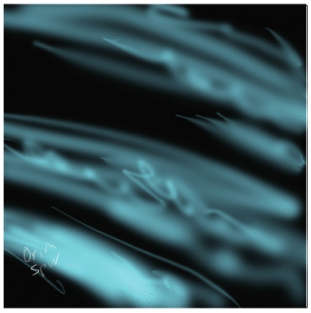
人们对现实的种种观感融合在一起，形成了光怪陆离的数据与知识。我们希望，在找寻自己与这些数据、知识间的关联时，你能乐在其中。记住，这是所有人的宇宙，当然，也是你的宇宙。



10^{22} 米



10^{21} 米



10^{20} 米



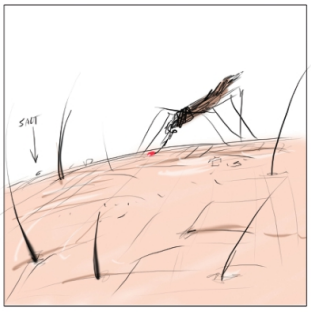
10^{8} 米



10^{0} 米



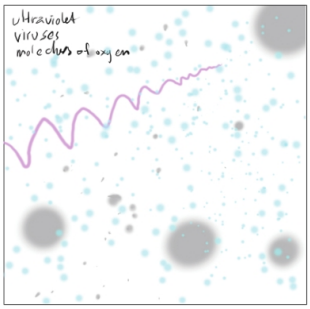
10^{-1} 米



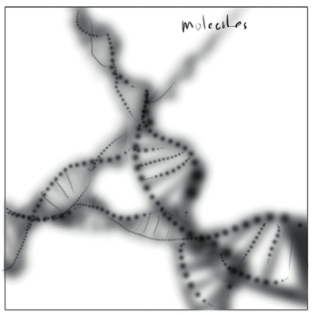
10^{-2} 米



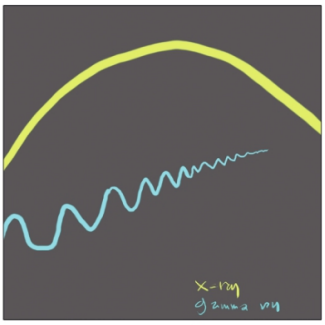
10^{-3} 米



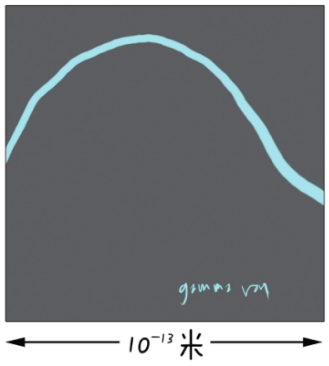
10^{-7} 米

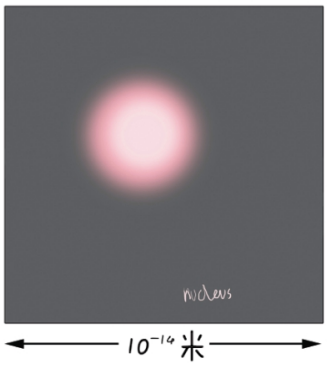


10^{-8} 米



10^{-12} 米

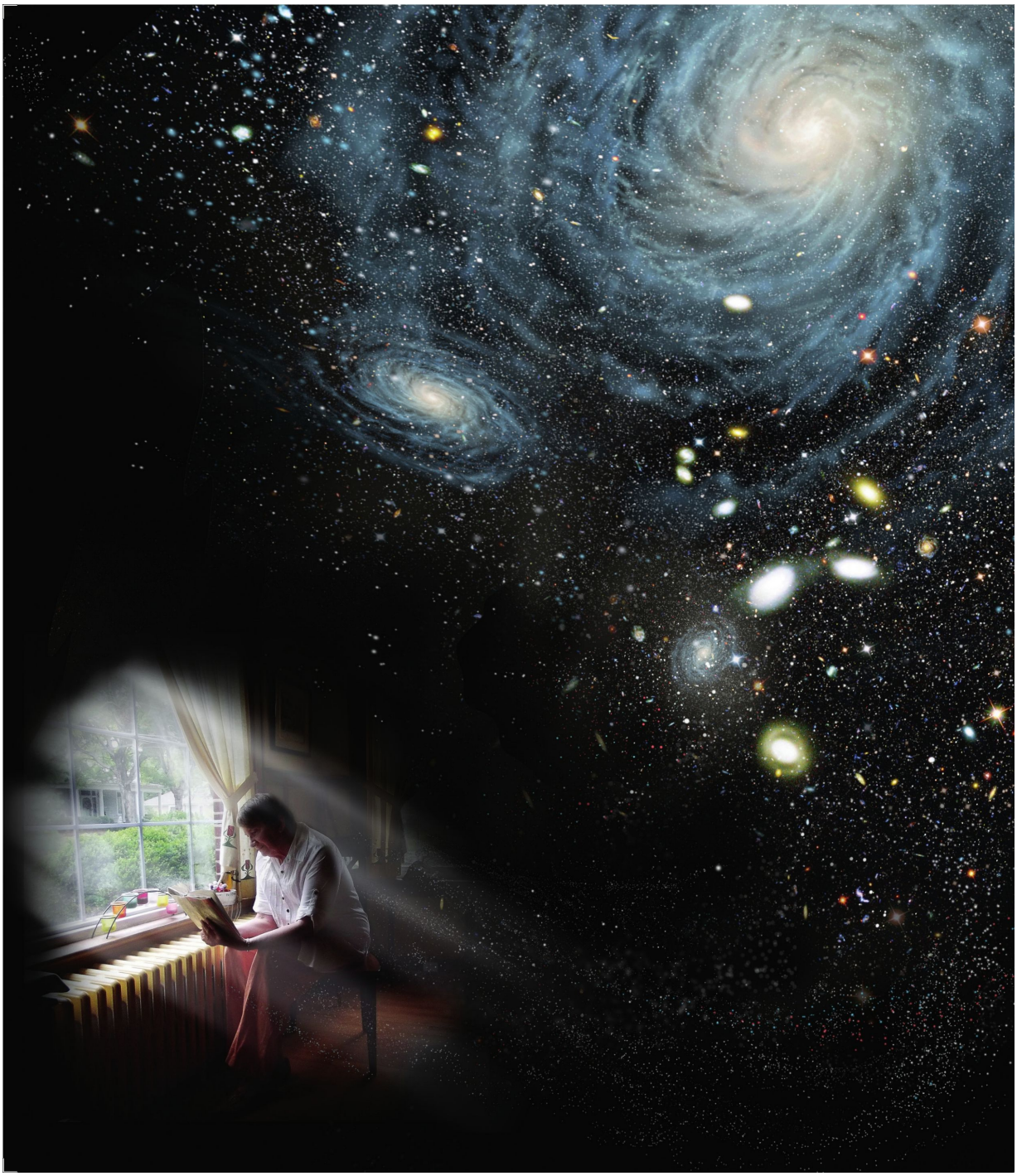

10^{-13}米


nucleus
10^{-14}米

目 录

前言　宇宙是一张可伸缩的地图
PART 1　10～10米的14个宇宙：包罗万象的浩瀚远景
1　从一颗散发着微光的尘埃到整个星系
2　看不见的黑暗与空白
3　万物，过去和现在
PART 2　10～10米的15个宇宙：生命存在的现实世界
4　行星的生存家园
5　我们称之为地球的世界
6　生命的法则，未曾停止的探索
PART 3　10～10米的34个宇宙：万物从有到无的虚空
7　消失在宇宙背景中的物质碎片
8　亚原子世界，开启尺度颠覆之门
9　难以置信的空洞
10　时空深处的旅程终点
知识链接
注释
致谢

PART 1
10^{27}～10^{14}米的14个宇宙：包罗万象的浩瀚远景



1
从一颗散发着微光的尘埃到整个星系

10^{27}米，10^{26}米，10^{25}米，10^{24}米，10^{23}米

从大约930亿光年到1 000万光年

从宇宙视界的直径到星系群的大小

这是一个夏日的早上。你坐在一间铺满阳光的屋子里，手中拿着书，一页页地翻看着，正准备开启一段穿越宇宙的旅程。

抬头看时，你注意到，透过窗户照进来的光束中满是细小的、散发着微光的尘埃。这些明亮的尘埃在气流中上下翻飞，像是一群奇特的生物。这些尘埃是非常微小的，但如果把整个房间看作宇宙，那么每一粒尘埃就相当于宇宙中的一个完整星系。

现在，让我们追随其中一个小颗粒。这就是我们的星系——银河系。它是2 000多亿颗恒星的家园，而银河系中行星的数量至少也有这么多。这些恒星和行星分布在一种宽达10万光年（超过90万兆千米）的结构上。如果按人类的步行速度计算，你需要20万亿年的时间来横跨这一天体。

深藏在这亿万个天体之间的一颗特殊的行星，被我们称为地球。这颗星球是一颗小小的岩石星球，有一层薄薄的结晶层覆盖在炽热的内核之上，结晶层上方是水和大气。地球围绕着一颗单独的恒星旋转，我们把这颗恒星叫作太阳。身处于100亿岁的星系中，太阳自身却只有45亿岁。

现在回顾一下你生命中了解和经历过的一切：你的家人、朋友、狗、猫、小老鼠、马、房子、沙发、床、比萨、苹果、橘子、树、花、昆虫、灰尘、云、水、雪、雨水、泥巴、阳光……还有满天繁星的夜晚。

再来想一想所有那些曾经活过的人（生物学上的现代人类，总数大约为1 100亿）以及他们在自己的一生中认识的人。所有这些人，数以亿计的人，用几个世纪、几十年、几年、几个月、几天、几小时、几秒甚至一眨眼的时间，感受着他们周围的环境。

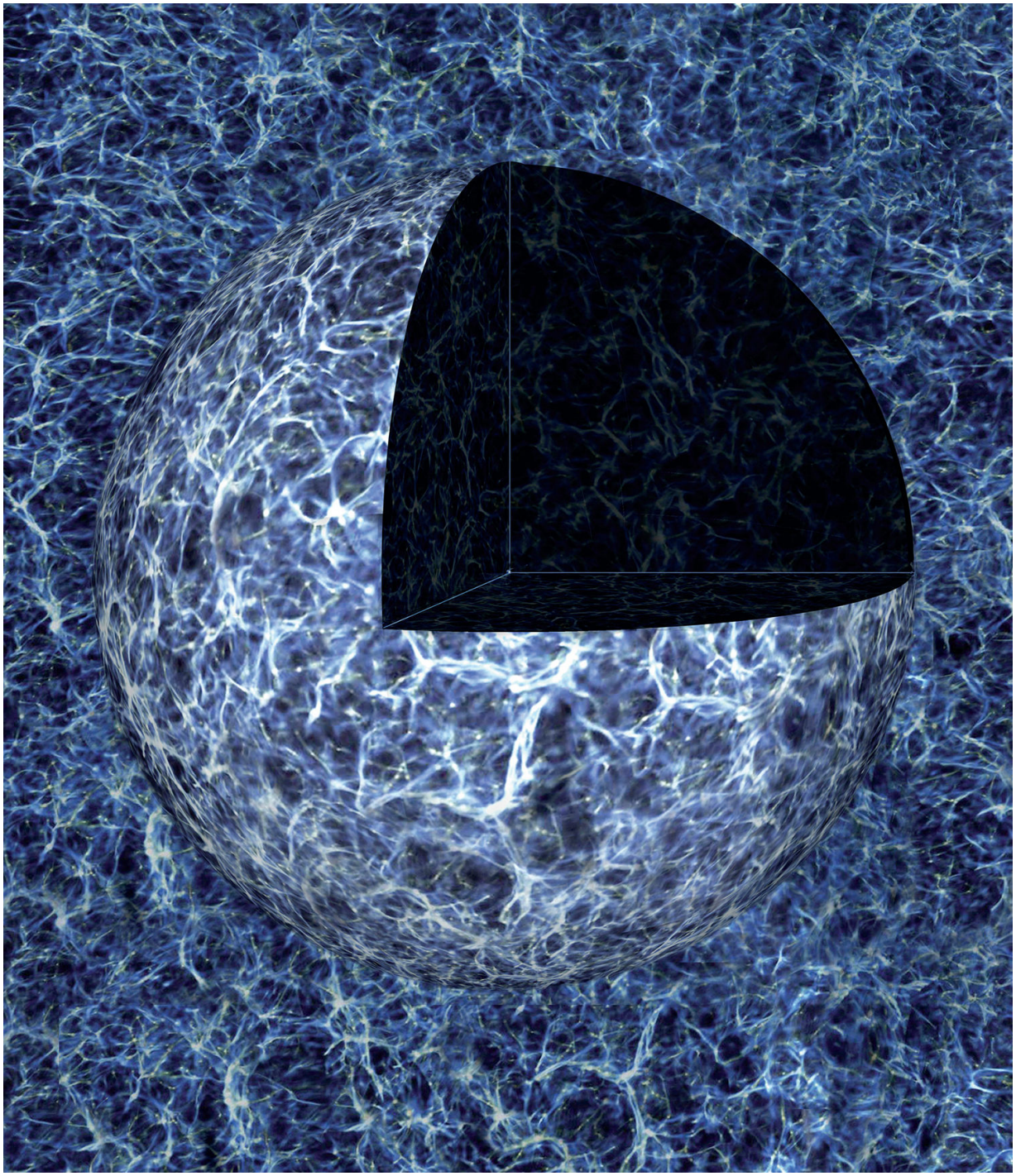
对人类来说，有很多特殊的时刻存在。但在35亿年前、人类出现之前，地球上的生物已变得丰富起来：从细菌和古细菌到多细胞集群，从三叶虫到昆虫，从恐龙到头足纲，亿亿万万的生命实体蜿蜒分布在每一个你能想到的生态位上，通过改变化学能电位和概率而成为现实存在。在那漫长岁月中的每一个时刻，每个生物都被自然选择改造着、筛选着，并被永不停歇的分子力学推动着前行。

所有这一切，以及其中每个微小的部分，都存在于这个世界上，存在于无数矿物点中的一个难以察觉的小矿物点中，存在于充满阳光的房间里你所看到的飘浮在空中的一粒小小尘埃上。这就是我们所知的宇宙。

这个小小的、被我们称为银河的尘埃星系，只是一片满是涟漪的网状物质大海中的很小一部分。这片海洋中有超过2 000亿个其他星系，它们有大有小，有些是独立的，有些处于混乱的碰撞中。所有这些，不过是距离我们130亿光年之内的星系，它们处于我们的“视界”之内，这个“视界”即光的行进范围，就如同你房间内可供行走的范围。

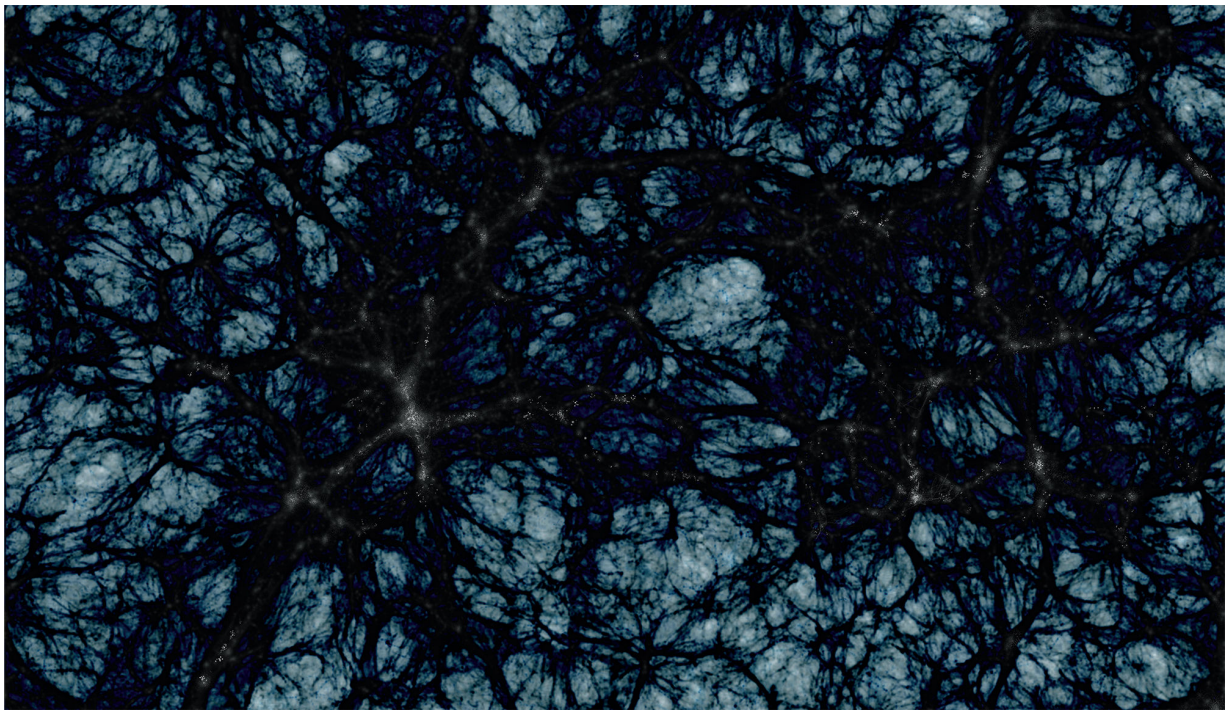
宇宙扩张也充斥着电磁辐射，这种能量既能以波的形式存在，也能以粒子的形式运行。这两种形式结合在一起构成的无质量单元被称为光子，它们在宇宙空间中快速地穿梭。某些光子来自早期的一些炙

热之地，我们将这些地方统称为宇宙；其他光子则来自一些特殊的、独立的地方：恒星、超新星、温热发光的年轻行星、宇宙碰撞和冲击波，甚至可能是（或者不是）技术文明之间的信息传递。



可观测宇宙的视界。

10^{27}米



宇宙物质网的暗面。

把我们宇宙视界中的所有可见物质，比如质子、中子、电子以及其他亚原子物质加起来，粒子数目的总和大约是1080。虽然这已经是一个非常巨大的数字了，但这些物质真的只是沧海一粟，因为仅是在我们身边穿梭的光子，数量就达到了这个数字的10亿多倍。在可观测的宇宙中，这些携带电磁能量的粒子总数大约是100 000 000 000

更奇特的是，所有这些可见物质和暗物质都在一个充满微观量子现象的时空结构中涌动。这些缥缈的量子现象实在是太渺小、太短暂，也太奇特了，除了不断积累而又骇人听闻的暗能量效果外，它们甚至很难被我们注意到。天文学家认为暗能量是导致宇宙不断扩张的头号嫌疑人。时空，也就是宇宙整体的基本结构，随着时间的流逝而不断地膨胀。

而这在本质上，就是万物的真正含义。

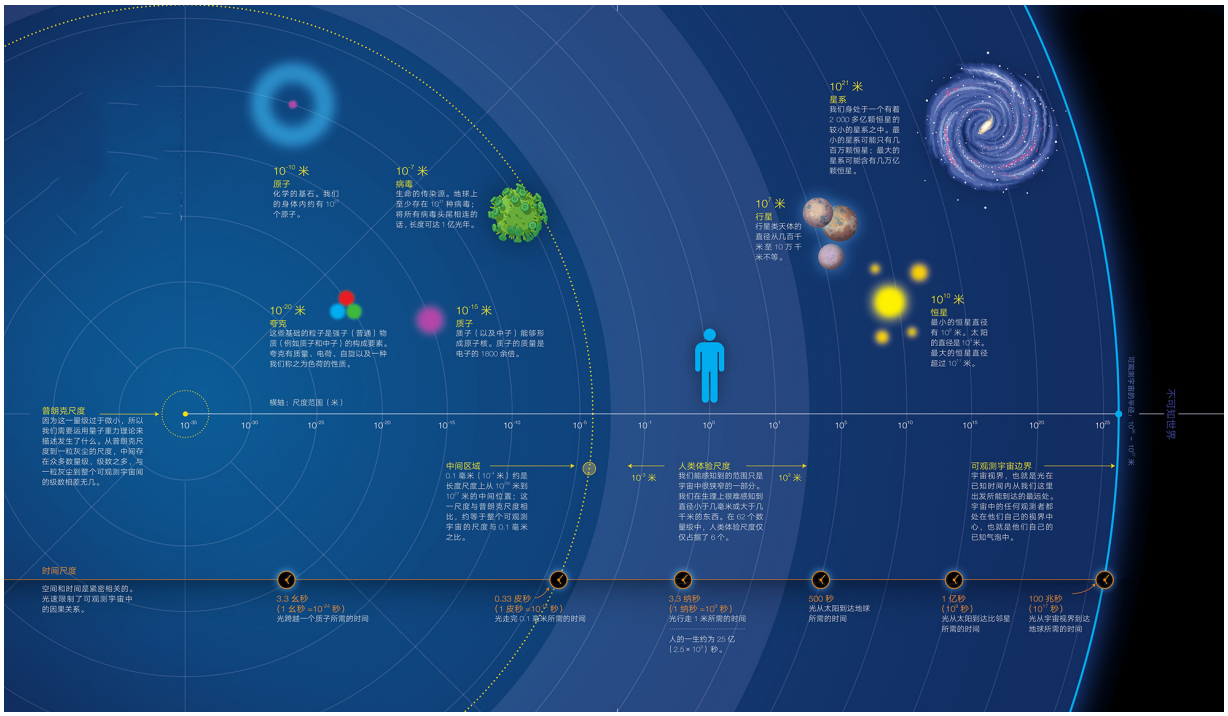
你是否想问，接下来会发生什么？在我们称之为宇宙的空间之外，在所有事物之外的是什么？在我们观测到的现实，即“满是阳光的房间”外面会有什么？这些都是好问题。目前，在我们能够真实地感知到万事万物的宇宙之外的一切，只能被简单地称为“非宇宙”。

在所有已知尺度上展开的现实之旅，以及本书的阅读之旅，均起始于已知和未知边缘。这是一个在我们的宇宙视界内外不断徘徊的地方，而宇宙视界是光在宇宙已知的存在时间内行进的距离所决定的范围，是进入你“房间”的大门门槛。在宇宙视界之内，是可观测的宇宙，而在这之外，是仍为谜团的迷宫。

可观测的宇宙

10^{-35}米是物理学中最短的有意义距离，光走完这段距离大约需要10^{-44}秒。相对而言，某些微波辐射的光子耗费了138亿年时间才撞到你身上，而这些光子走过的距离现在已经扩大到10^{26}~10^{27}米。在“物理学中的最短有意义距离”和“光子行进的距离”这两个尺度之

间，就是我们能够观测到的（可能也是我们所知道的）一切。



从单一宇宙，到多重宇宙

事实上我们认为，我们的宇宙在已知视界之外势必还有延续。来自视界之外的那个宇宙的光还来不及抵达我们，而那个宇宙可能比我们所能看见的宇宙要大得多。基于已知的时空几何分析，人们做出了一些预测：在现有宇宙视界的基础上，若想获得一个“完整的”宇宙，可能还要将视界范围扩大至少250倍。另一些预测认为，根据宇宙最初的快速扩张（或膨胀），真实的宇宙可能比我们历来所看到的、所估计的还要大10^{23}倍。

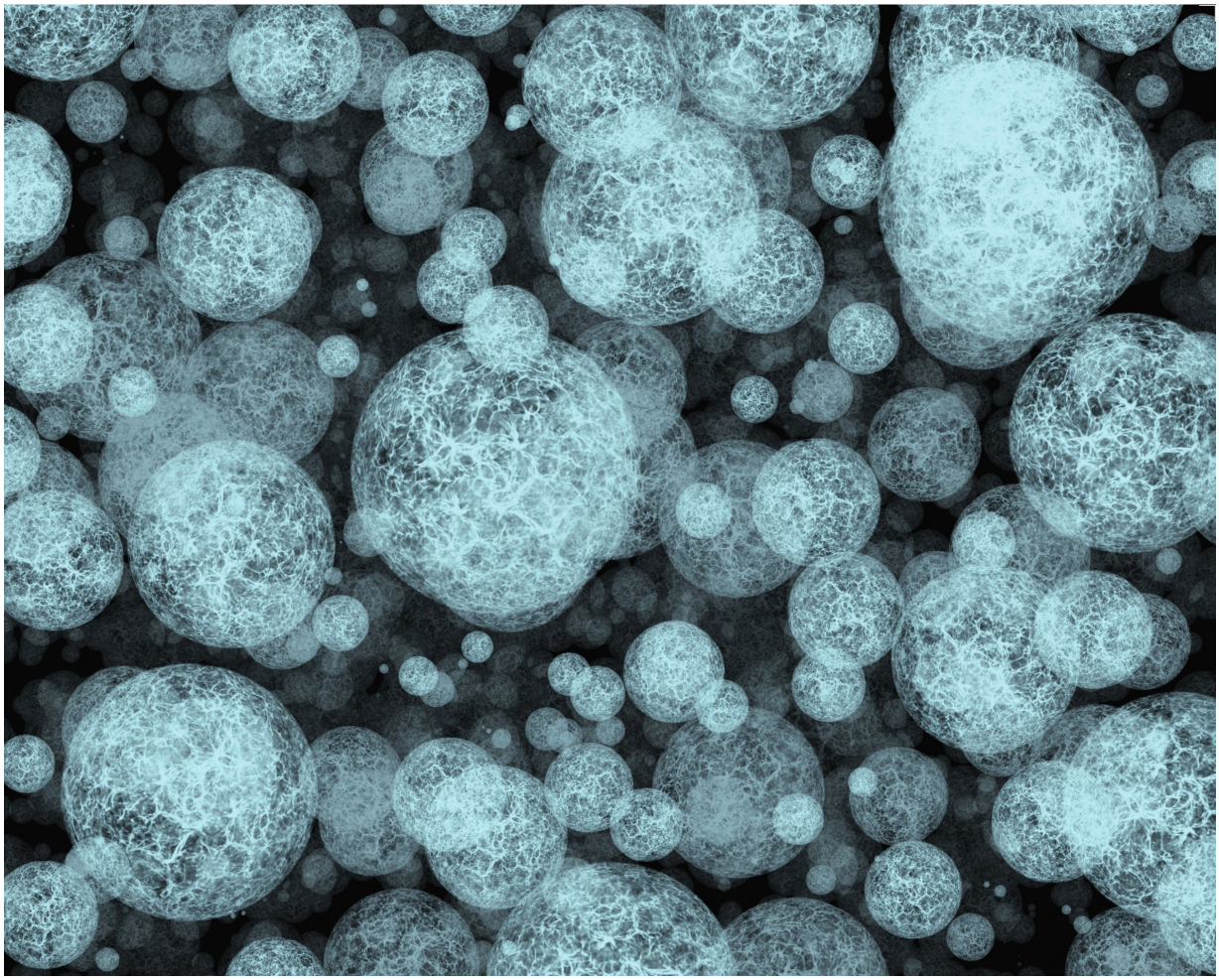
如果这是真的，那么宇宙中很可能存在对人类诞生之地的复刻。甚至连太阳系、行星、生命形式都可能有其翻版，与我们熟悉的那些概念有着不可思议的相似之处。

这是一个尚未被证实的猜想，翻滚的宇宙骰子可能已拥有足够的时间来复制地球和地球的历史。不过，与之相比，我们关于宇宙本质和物理起源的猜想更为神奇。



存在于可观测宇宙之外的另一个世界？

为了演示我们观测到的宇宙（包括时空的“形状”以及宇宙在最大尺度上表现出的相对一致性）是如何生成的，科学家们提出了宇宙膨胀现象。很久以前，在宇宙大爆炸后的短短一瞬，约10^{-36}秒之后，时空迅速扩张了几万亿倍，直到时间指向了10^{-32}秒。这就像是你皮肤上的一个小毛孔迅速膨胀到银河系那么大，而用时仅是人类计时设备所能测量出的最短时间间隔的10^{-17}倍（约十万兆分之一秒）。



口袋宇宙

物理学家们提出了一种观点，认为这一膨胀制造出一系列“口袋”宇宙，其数量极其可观；宇宙的数量10倍又10倍地增长，直到出现了10^7个宇宙；有无数与我们所在的宇宙相似的宇宙，也会有无数不一样的宇宙。如果这是真的，“多重宇宙”就会孕生出其他版本的我们，演化出我们的分身。

退一步说，这种可能性会产生一些令人不安的问题。这意味着你做出的任何决定，无论好与坏，都有可能在其他地方、以不同形式被决定了很多次。这样一来，当几万亿其他版本的“我”在多重宇宙中的某个地方几万亿次捡起一片垃圾，我捡不捡起它还有什么意义呢？

如果我们的宇宙只是众多宇宙之一，而并非我们曾认为的独一无二的存在，我们是否还应该花费时间来揭露宇宙的秘密呢？

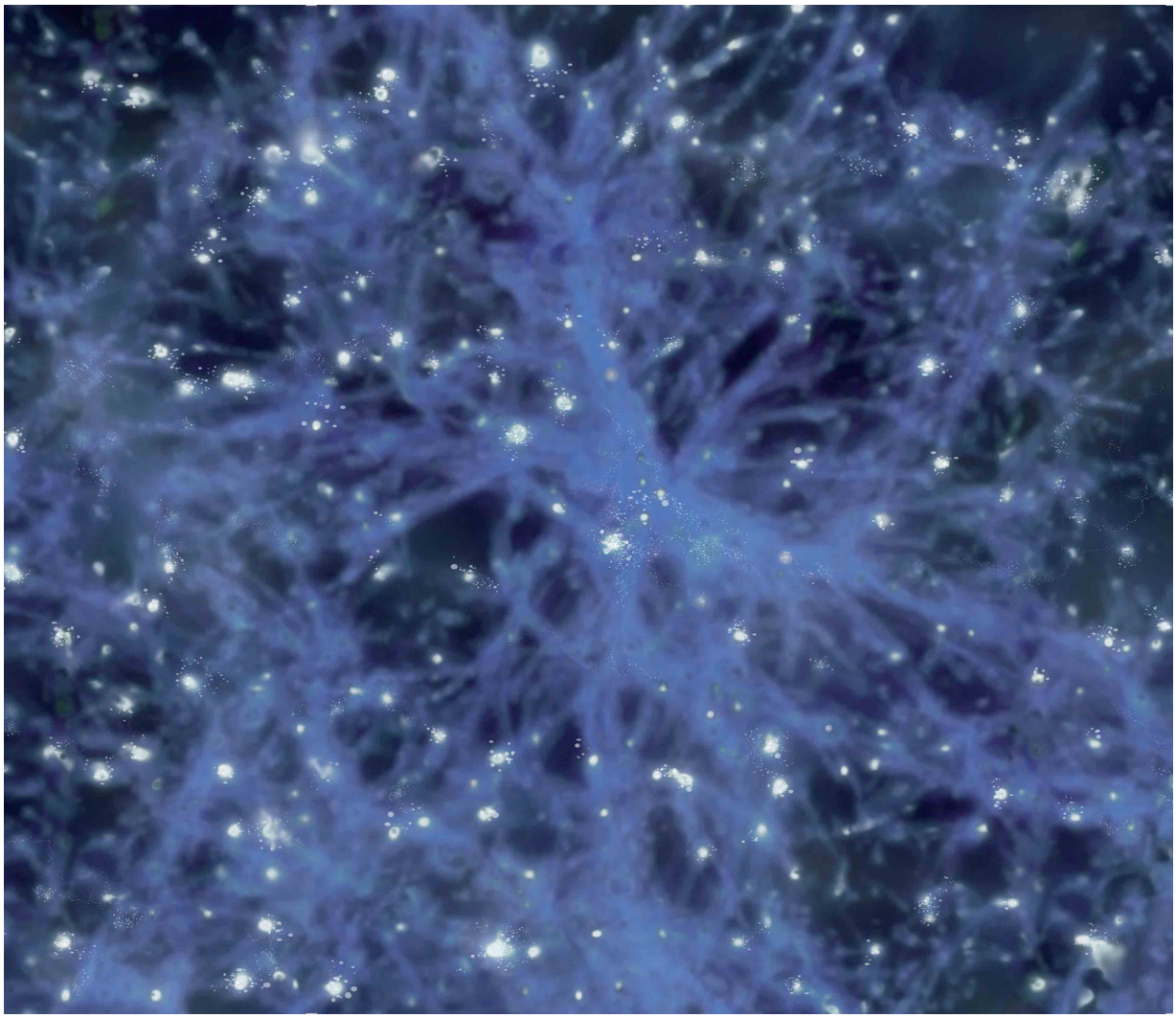
让我们暂时保留这一疑惑，先去喝杯茶吧。

从遥远的天际观看

在这本书中，我们的旅程起始于人类现有的知识范畴：我们将从10^{27}米（an octillion meters）这样一个尺度开始我们的深潜。之所以选择这一尺度，是因为如果能够在这一刻、在宇宙视界边界之内测量宇宙的物理直径以及宇宙的范围，我们就会发现，这一数值约为910亿光年，更具体地说是860 951 000 000 000 000 000 000千米，也就是约10^{27}米。

如果你思维敏捷，你可能会对这一数值感到好奇。宇宙的年龄也不过才138亿岁，这一数字怎么会比光在已知时间内所行经的距离还要大呢？答案就是宇宙扩张，即时空膨胀。因此，在这一刻，测得的数值会比预测的要大。

事实上，我们可以绘制出宇宙视界的一面。宇宙在扩张的过程中逐渐冷却，由于光子在空间里穿梭，光波的波长延伸，并失去了能量。如果能够回到过去，我们会在回溯的过程中发现，宇宙变得越来越热，直到宇宙来到约379 000岁时，它的平均温度高达2 726摄氏度（4 940华氏度）。这个温度实在是太高了，致使电子无法被束缚在原子内。在空间中穿梭的光子不断被这些自由电子驱散开来，使得我们年轻的宇宙成了一团无法被电磁辐射穿透的“雾气”。



下一步，坠入宇宙之网。

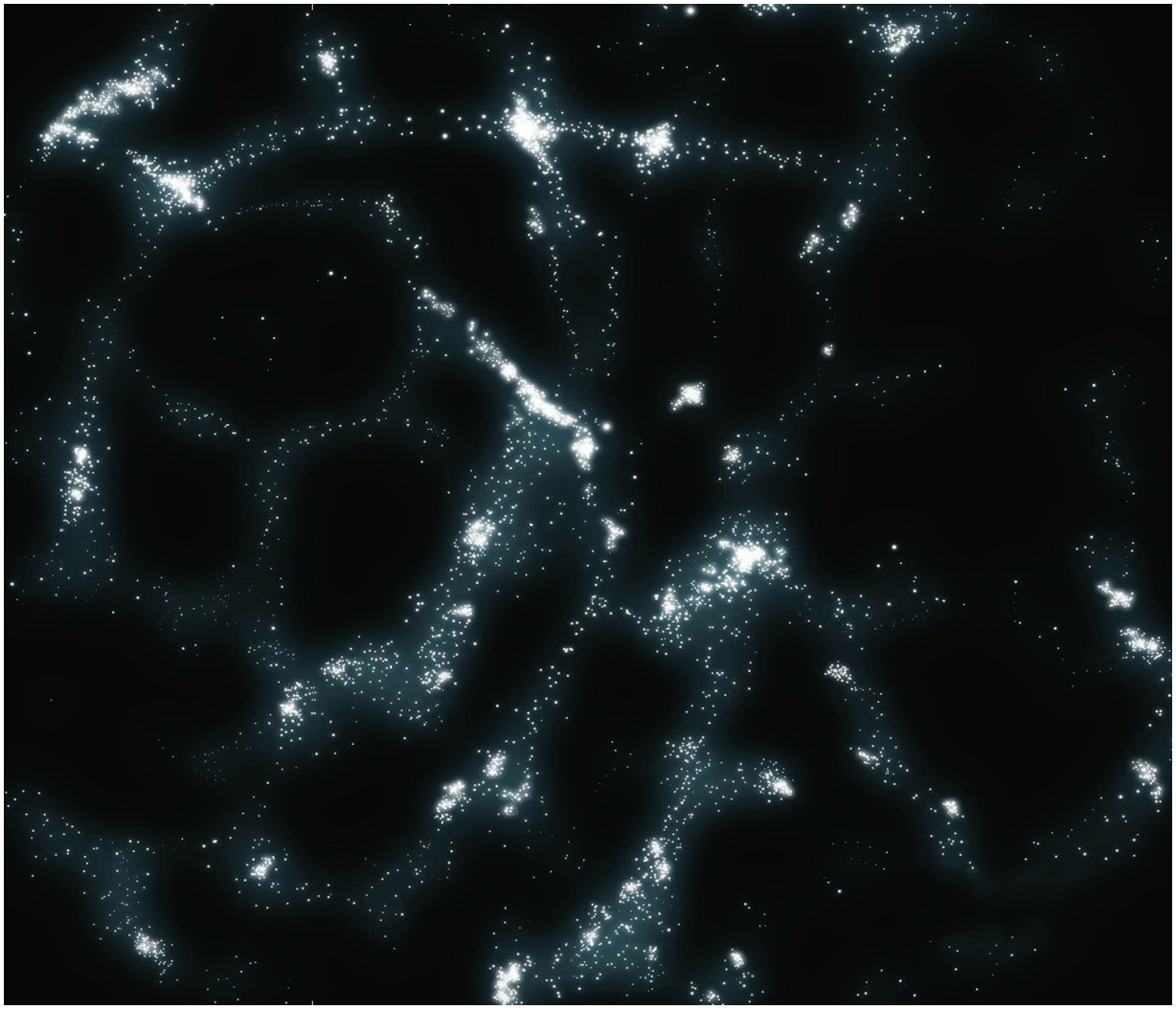
10^{26}米

但很快，随着宇宙冷却，电子和质子能够结合起来，形成中性的氢原子，几乎不会再造成可见光的散射。“雾气”散开了，光子得以在不与任何粒子发生相互作用的情况下穿梭自如。直到今天，我们还能检测到这些光子，不过现在它们的波长已经非常长了，而且带有空间背景里不可避免的微波噪声。事实上，背景噪声就是宇宙视界的缩影。这就是我们所能看到的最远处。

使用最敏锐的望远镜，我们能够凝视宇宙深处，找到最早的那批恒星和星系（几乎存在于130亿年前）。这些尚在襁褓中的凝聚物是早期膨胀宇宙中的微小异常所播撒的种子，这里的异常是指通过拉取更多的物质而逐渐增加的引力。从这些星系雏形到与我们共享宇宙一隅的众多星系，所有这些形态，帮助我们成功地创建了这幅宏伟的宇宙景观地图。

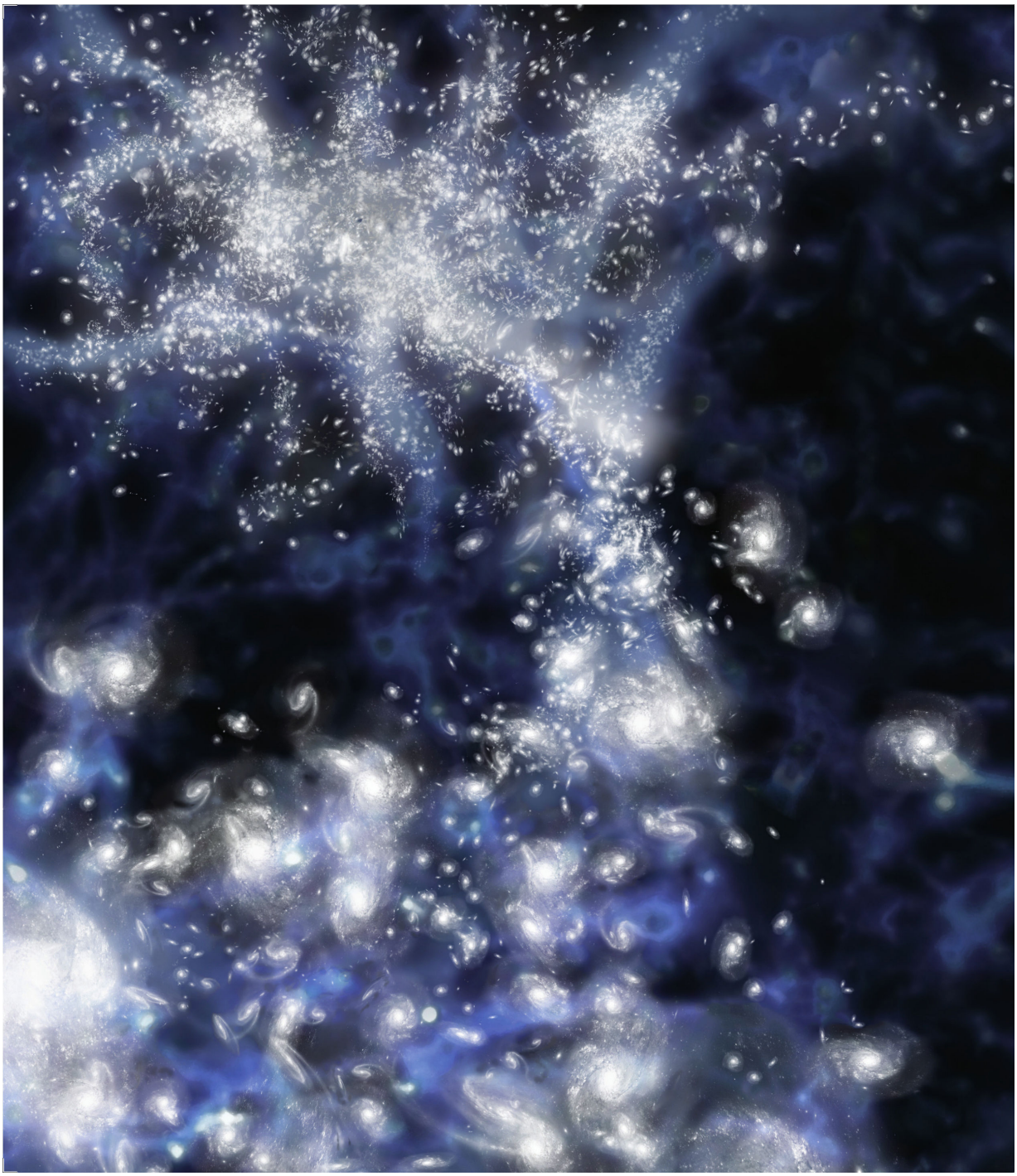
这幅地图告诉我们，宇宙既是泡沫状的，也是由颗粒组成的，有点像是正在排空的浴缸或水槽中残留的肥皂泡残渣，泡沫的轮廓清晰可见，由一张三维的暗网及发光的物质组成。

附着在这张网上的是紧缩的凝聚物，在这里，引力远远超出时空扩张的力量，到处都是直径达几万亿兆米或者几亿光年的星系组成的超星系团。在这些超星系团中，分布着彼此截然不同的星系族群，辽阔而深邃的重力井能使几百或几千个星系群全都围绕着中心运转，此外，还有大量的热气池和冰冷的暗物质分布在距中心几千万光年的范围内。



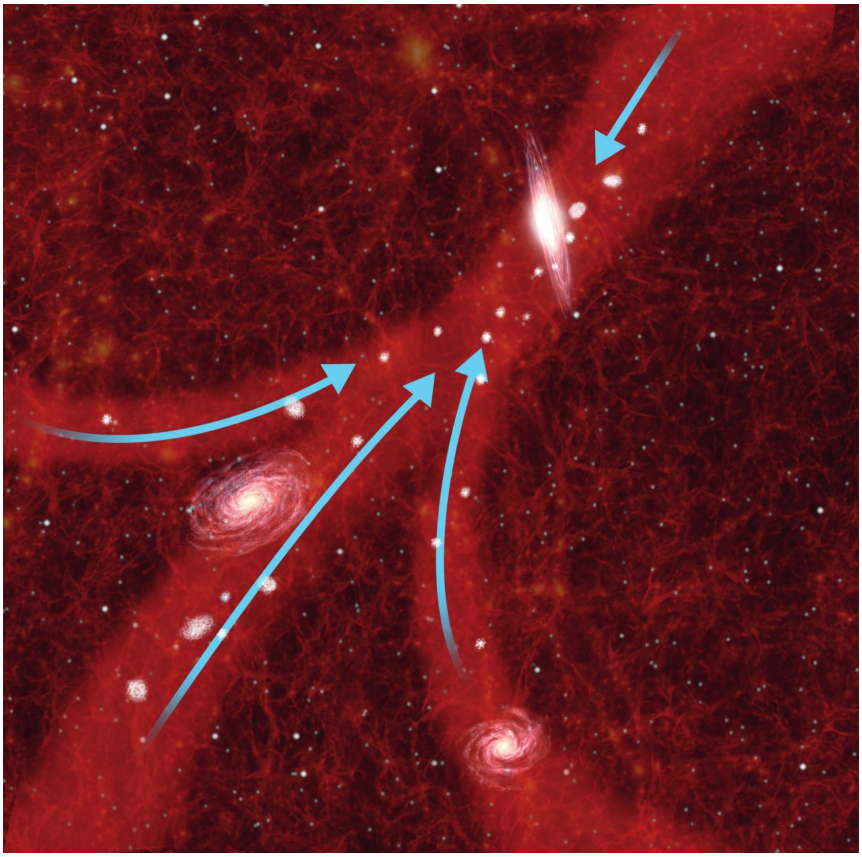
星系微粒。

10^{25}米



星系沿着大范围的纤维结构分布。

宇宙中有小型星系、大型星系以及超大型星系。在这些星系中，分布着密密麻麻而又极为微小的恒星和其他恒星残留物，以及宇宙中密度最大的物体：黑洞。黑洞的质量是太阳质量的10倍到上百亿倍。



大型引力结构中的物质流。

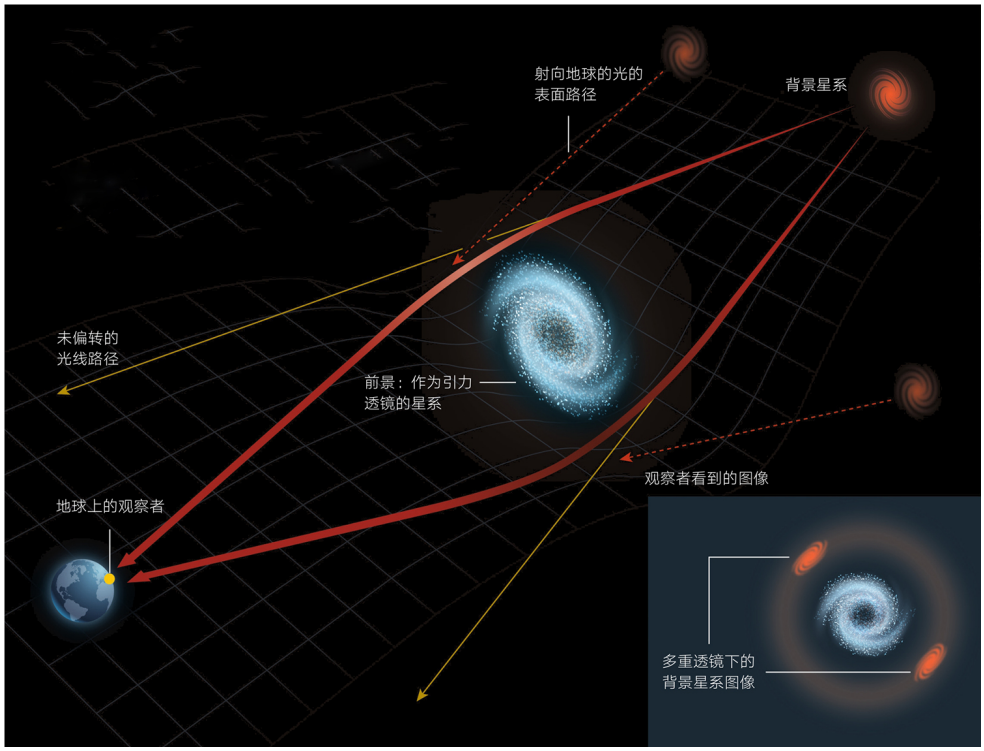
值得注意的是，在10^{27}米到10^{23}米这段尺度的旅程中，仅仅跨越了5个量级，我们便能够从可观测宇宙的规模（宇宙视界）缩小至我们的邻居——本星系群（Local Group galaxies）的规模。

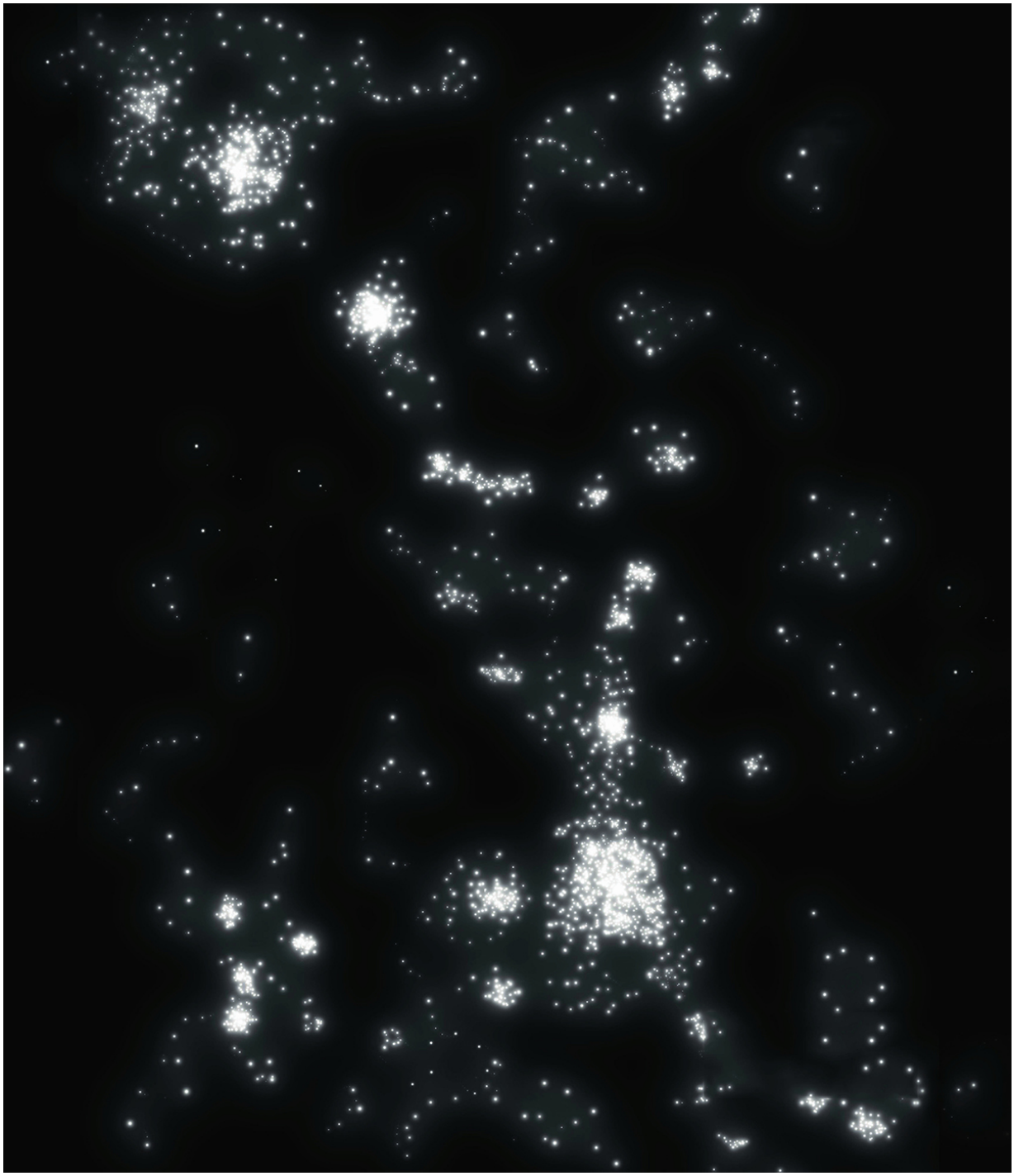
换一种说法，我们从一个几乎包含了万事万物的空间（拥有超过2000亿个星系），来到了我们周边的一个包含50～60个星系的空间。

引力透镜

广义相对论告诉我们，物质使得空间弯曲，而空间引导物质行进的方向。弯曲的空间同样会引导光的路径。因此，来自遥远物体的光能够被介于其间的物质

改变方向并放大，这便是透镜效果。我们通过一系列宇宙透镜看到了宇宙。





星系只是一些小点。

10^{24}米

或者，我们可以比较一下1千米的距离（可能就是你早起锻炼所走的距离）和你口袋里一枚硬币的大小。这就是整个已知宇宙的跨度与其中星系的跨度之比。

此刻，你才刚踏上这趟宇宙之旅。这本书余下的部分构成了另一段旅程，其间我们需要穿越57个量级。你准备好了吗？那么我们开始吧！

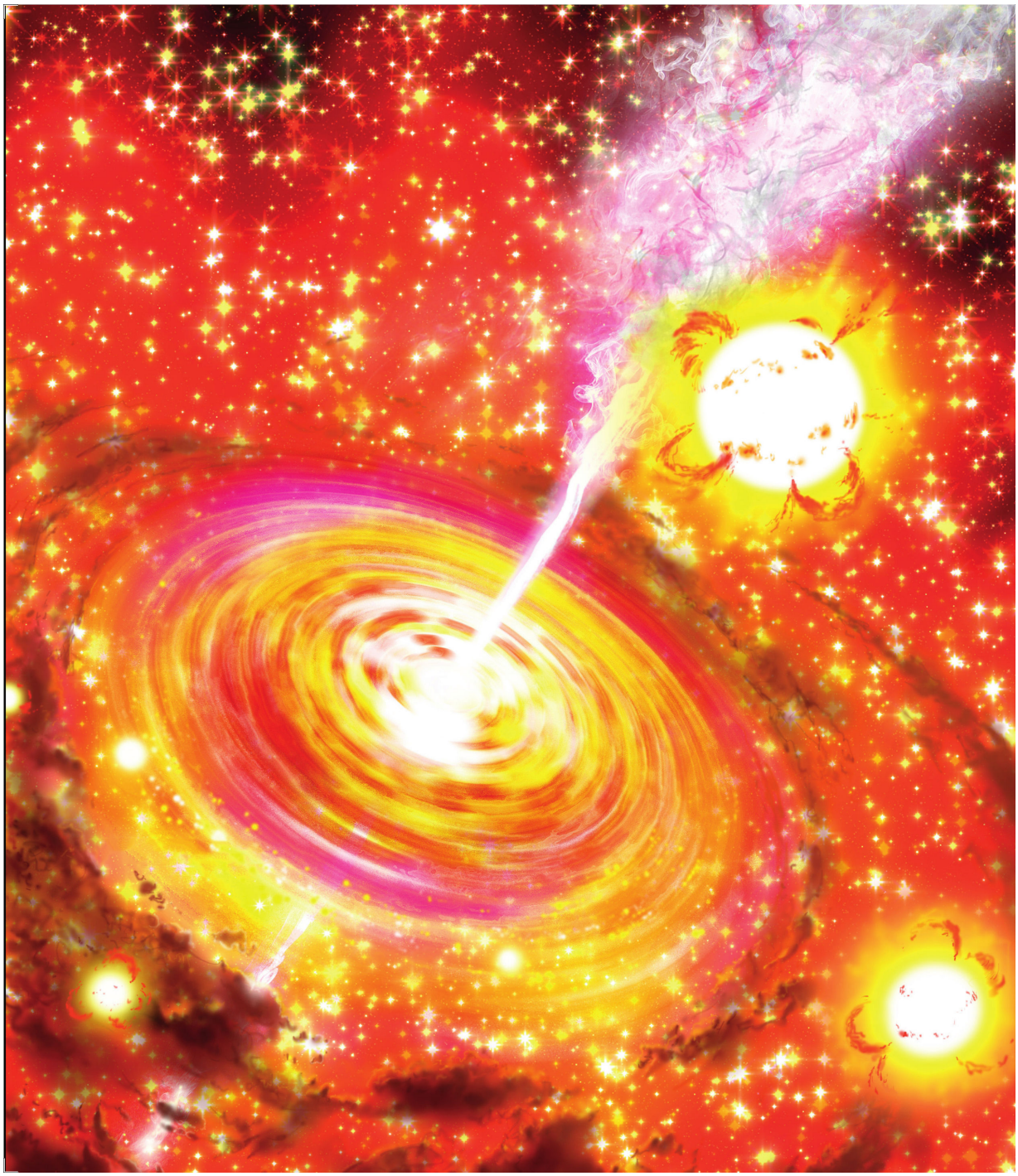


仅仅跨越5个量级，我们就来到了如同硬币一般的本星系群。



我们的本星系群。

10^{23}米



黑洞会撕裂物质，产生光线。

2
看不见的黑暗与空白

10^{22}米，10^{21}米，10^{20}米，10^{19}米，10^{18}米

约106万光年至106光年

从8至10倍银河系直径那么大，到一个巨大的分子云那么大

设想一下，你是一个充满力量的外星生物，能够随意揉捏银河系里的所有恒星，将它们全部挤压到一起。若将这些星体之间的空余部分去除，你便能把这些恒星塞进一个边长80亿千米（大约是地球公转轨道半径的54倍）的立方体中。这个包含了2 000亿颗恒星的立方体刚好能放在太阳系中海王星的轨道直径内。换句话说，星系之中、恒星之间有着大量的剩余空间。

当然，物理法则并不会允许你这么做，至少不会让你万无一失地做成这件事。把这么多大质量物体堆在一起的问题在于，最终你会制造出一个黑洞。为什么？因为所有这些恒星间的引力将无可估量。然而奇怪的是，这样一个包含了2 000亿颗或银河系中更多恒星的黑洞，实际上比我们设想的恒星立方体要大得多，其体积大约是立方体的146倍。

这是因为，如果你将黑洞的最外围视为黑洞大小的测量边界，那么实际上黑洞中很大一部分的密度是相当低的。这一点可能有点儿反常，但是黑洞的大小，也就是事件视界（event horizon，即不归点，黑洞质量集结的一片区域，在这片区域内，任何东西都无法逃脱）与黑洞的质量成正比。换句话说，如果黑洞的质量翻倍，那么事件视界的半径也将翻倍。



黑洞中的致密物质会猛烈地扭曲空间和时间。

这和发生在一般物体上的情况非常不一样。比如说，将两个相同的面团揉在一起，新面团半径并非原始面团的2倍，而只比之前大了26%。为什么呢？因为普通物质形成的球体半径与质量的立方根成正

比，质量增加1倍，半径大小只增加26%。因此，如果我们把黑洞的事件视界看作其物理尺寸的测量范围，那么位于黑洞边界的物质的平均密度就会非常低。一个质量是太阳质量30亿倍的黑洞，其密度可能只与我们呼吸的空气密度一样！但这种说法与我们对宇宙的理解有点出入，之前对这些物体的理解告诉我们，黑洞的全部质量实际上被压缩在一个非常小的、几乎不可见的、围绕中心无限收拢的区域内。

在体积最大的星系的核心处，在那些巨大的奇点存在的地方，情况通常也和我们预期的恰好相反。的确，黑洞是黑的，但是你可能不这么想，因为它们能够产生巨量的光线。气体、尘埃、恒星、行星以及其他某些未知的、能加速的东西，如果离黑洞足够近，就会被撕成碎片，并且被加热。从事件视界之外，直至到达不归点，能量会在这个过程中向外逃逸。如果有足量的向内掉落的物质，那么一个旋转着的黑洞便能将质量转化成能量，其效率甚至比核聚变还要高。在整个宇宙中，散发出最明亮的光的黑洞，释放出的能量是太阳能量的百万亿倍。

物质在密度被压缩到极致的情况下（比如黑洞这类情况），会让我们当中最严谨的人都大吃一惊。而在另一极端，类似银河系这样的星系中的空荡区域同样让人吃惊。

必要的空白

大部分人总会在生命中的某些时刻感受到孤独：在不熟悉的地方迷路时，独自一人在家时，或者被遗留在黑暗、恐怖的森林深处时。但是星系际空间（intergalactic space）和星际空间（interstellar space，也就是星系之间或者星系某些部分的恒星之间）确实是你所能遇到的最孤独的两个地方了。在这些“跨区域”环境中，安全区的跨度非常非常长，其间几乎没有任何东西。

如果你是一个倒霉的宇宙搭便车旅行者，正站在银河系的恒星之间，你的身体就会呈现出一种物质集中的状态，密度大概会是围绕在你身边的星际空间密度的1亿兆倍。换句话说，看看你的小手指头：这么点儿地方就包含10^{23}个原子。而这一数字，正好是1亿立方千米的星际空白中的原子总数。

最终，作为一个被滞留在原地的旅行者，你稍稍有点释怀了，毕竟在宇宙中，你也算挺特别的了。如果你随机地把一个图钉钉在可观测宇宙地图上，它只有极小的可能性会被钉在一个像你的身体或是任何行星、恒星那样富含物质的地方。

星系中的奇怪空白引发了一些其他的有趣特质。假设两个星系发生了碰撞（大概在40亿年内，银河系和其临近星系仙女座就会发生碰撞），在一个如此大型的事故中，恒星本身会撞到一起去吗？不，并不会。与它们之间的广阔空间相比，恒星实在是太小了，根本不可能撞击在一起，即使它们巨大的母星系正在缓慢地穿过彼此。

在星系与星系接近时，物质的引力作用会扭曲和破坏星系的形状及星辰的运行轨道，但另一方面，就像是两群虫子或者鸟迎头相遇一般，这些小星星会直接从彼此之间的空隙处溜过去。

星系际空间的物质稀疏度甚至比星际空间的更加极端。若是被困在星系际空间（比如从银河系到邻近的仙女座星系的旅途中），你需要压缩的体积至少是星际空间的100万倍，才能使其中的物质和你身体内的物质数量达到同一级别。

最坏的情况下，你正好位于星系际“空白”处，那么这时需要压缩的体积可达星际空间的1 000万倍以上。在星系之间、物质呈网状分布的一些地带，几乎没有可发光的物体存在。泡沫一般的宇宙空白跨度能超过3 000万光年（约3×10^{23}米）。在这些区域，物质的密度甚至小于宇宙平均密度的1/10，这使得这些地方极度压抑，除非你享受这样的空无一物。

但这并不意味着这些空白是毫无用处的，事实远非如此。在这些地方，空间的扩张实际上会更快一点，因为这里没有那么多物质产生的引力。因此，宇宙空白能够“自我清洁”，将物质堆放在它们的边界处，也就是推到周围密集的星际空间里。这样的话，它们就能直接将物质聚集起来，送到明亮的星系和恒星网里了。



视野中的我们的星系。

10^{22}米



本星系群内部。

我们的（略微有点功能失调的）星系家族

明亮的星团和星系组群中的个体并非孑然一身，它们彼此之间的距离只有大约300万光年，或者3×10^{22}米。举个例子，从银河系的中心到下一个最近的大型星系——仙女座（也称梅西耶31或M31）的中心，距离相对没那么远，这一“鸿沟”约有250万光年，或者2.5×10^{22}米。

也有证据表明，仙女座周边有一片稀薄的等离子云（由正离子和电子组成的气体），这片等离子云向外延伸的距离约有100万光年（10^{22}米）。这是一种非常轻薄的物质，凭借人类的感知是无法将其与真空区分开来的。但在这一气体混合物中，某些组成部分的温度约为100万摄氏度，包含碳和硅，以及氢和氦。我们目前还不知道银河系是否有类似的光环。



银河系（远远的左侧）与同一比例下的仙女座。

我们已经发现，银河系引领着一大群更小的卫星星系。其中拥有最多恒星的是我们熟悉的大、小麦哲伦云，它们是一对不规则矮星系，分别包含约300亿颗和30亿颗恒星。但在150万光年的距离之内，至少还有30个矮星系存在，大部分都位于围绕银河系的轨道上。

我们也发现这并不是一个完全幸福的家庭。这些矮星系的轨道会导致它们自己的恒星被引力拉走，从而被剥离出去，进入围绕银河系的巨大“潮汐流”（tidal streams）中。这些恒星残骸区是了解星系成长的线索。一个大的星系有时会用几十亿年的时间来蚕食自己的小伙伴，从而增加自身重量。

这些围绕着银河系的潮汐流极其黯淡，因为它们仅表现为分散在星系空间鸿沟中的一小部分恒星。然而，灵敏的望远镜所获得的数据能够揭露它们的存在。一个绝佳的例子就是人马座星流，这是一个宽阔而混乱的恒星环，环绕着银河系，不停歇地游走。

这种星流也能够揭露银河系引力场的基本形状。从这个角度来说，恒星的轨迹便是天然的引力探测器，其测量点位散落在几万、几十万光年的范围内。

这些测量也是一种强有力的提醒，点明了作为宇宙核心谜题的一个事实：在一个类似银河系的结构中，可见的、明亮的、由正常物质

组成的恒星、气体和尘埃只不过是一小部分组成物罢了。在我们的星系中，暗物质的数量大约是正常物质数量的10～30倍。

什么是暗物质？研究单个星系的运行是解决这一难题的好方法。目前最受推崇的答案就是，暗物质是一种亚原子粒子，仅通过引力和弱力相互作用，而且这种物质并不会反射或吸收电磁辐射。

显然，与其他亚原子粒子相比，暗物质粒子数量极多。暗物质的特性可总结为一个首字母缩略词：“WIMPs”，即弱相互作用大质量粒子（Weakly Interacting Massive Particles）。“弱相互作用大质量粒子真实存在”这一理念符合很多宇宙测量结果，包括已推断出的星系和星系团的引力场、引力透镜的观测，以及宇宙微波背景辐射模型。问题在于从未有过任何弱相互作用大质量粒子被直接检测到，有很多仅针对地球的实验仍在积极地寻找它们。或许并不存在什么暗物质，不过是我们对引力本身的性质理解得不够完整罢了。

古老的银河系

不管是否有弱相互作用大质量粒子，我们的银河系都是个了不起的典范，它展示了宇宙是如何收集物质的。银河系横跨100 000光年（约10^{21}米）的距离，包含总质量相当于太阳质量1万亿倍的可见物质和暗物质，可谓是一头猛兽。

这个扁平的、飞碟状的星系是时间的产物，而这段时间是一个引力下降、能量散逸、角动量守恒的过程。



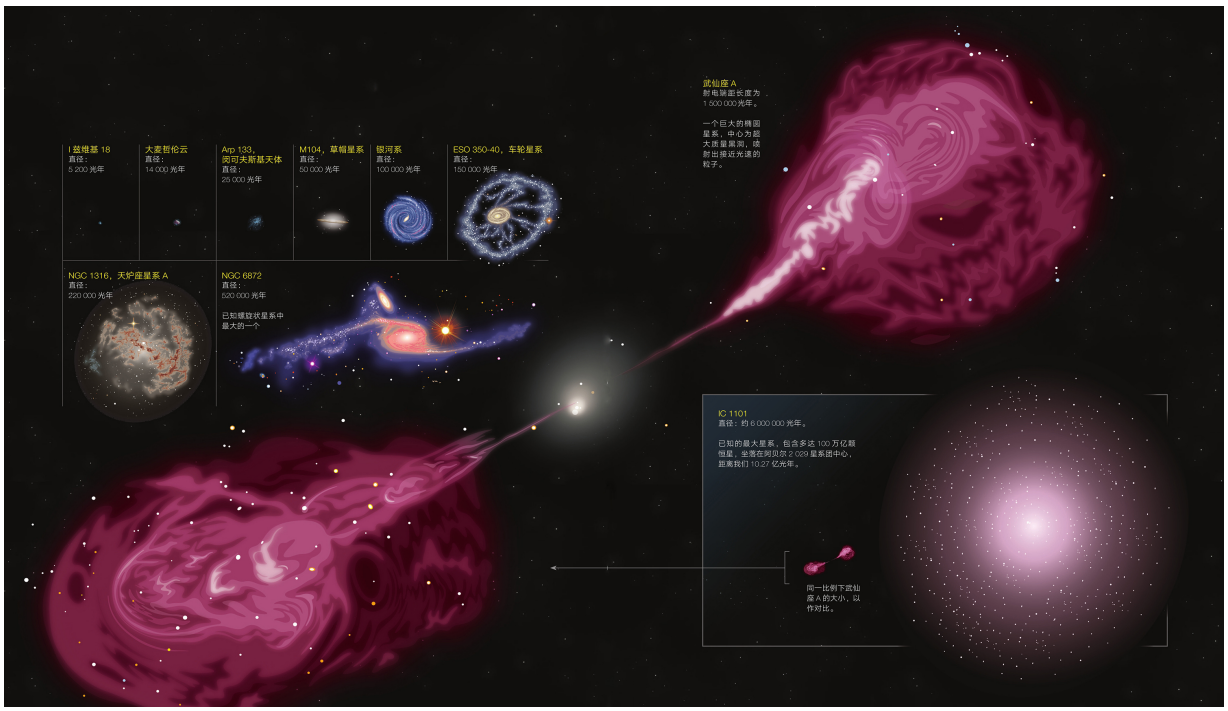
从宇宙中一颗流浪行星的地平线上升起的银河系。

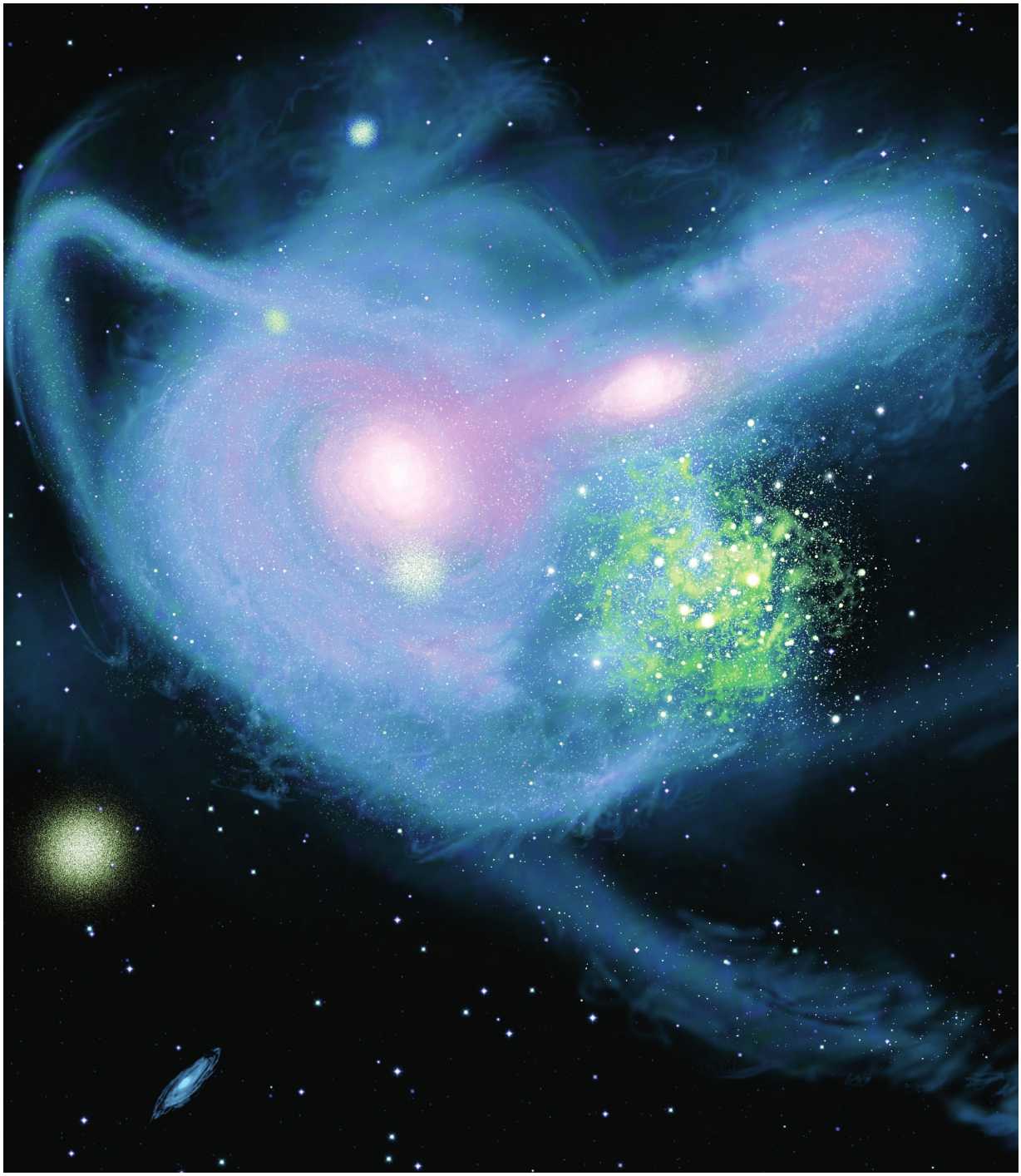
10^{21}米

星系动物园

星系可以如动物物种一样分门别类（根据不同的历史以及不同的恒星、气体、星际尘埃混合的情况予以分类）。

这些“物种”也在大小和恒星数量上跨越了好几个数量级。





星系与恒星潮汐流的冲撞。

还有其他一些明显的线索可以追溯银河系的过去，比如更古老恒星的中央核球（central bulge）。这些古老恒星之间的距离比银河系中太阳周围恒星的间距更近。在这接近银河系几何中心的地方，恒星

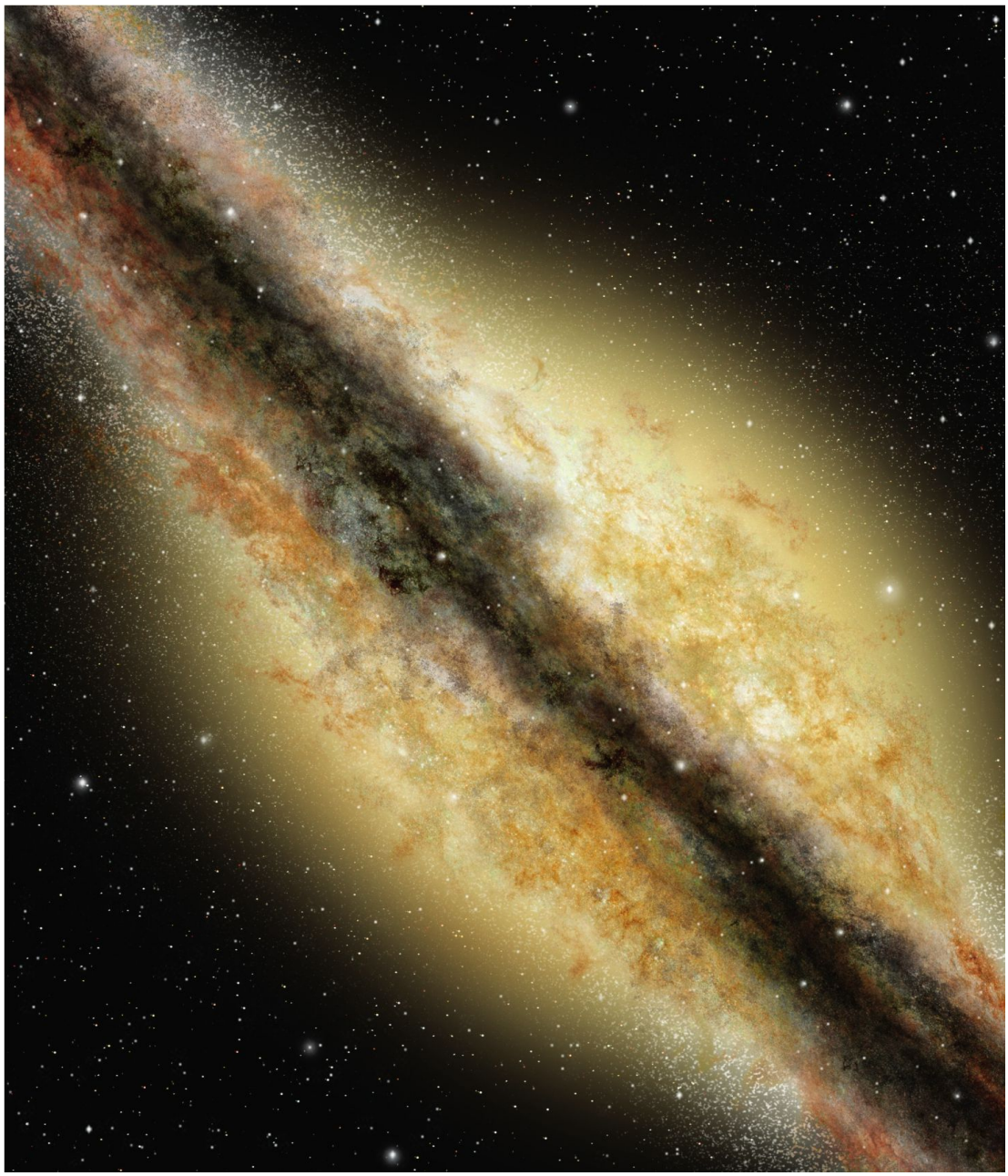
的空间密度大幅上升。在距离中心300光年的范围内，恒星的数量比太阳附近任何指定空间区域的恒星数量的100倍还要多。如果再向内前进一点，恒星密度会继续上升，甚至达到一个难以想象的峰值：恒星密度会比我们惯常认为的高100万倍。

这意味着恒星间的距离是用光周（light-weeks，约10^{14}米）而不是光年来计算的。在这种环境下，任何行星的天空都会充满明亮的光点。如果我们住在星系核心深处，夜晚的天空将会布满100万颗如天狼星般明亮的恒星，这些恒星用比我们熟悉的满月时的亮度还要亮200倍的星光照亮了整个世界。

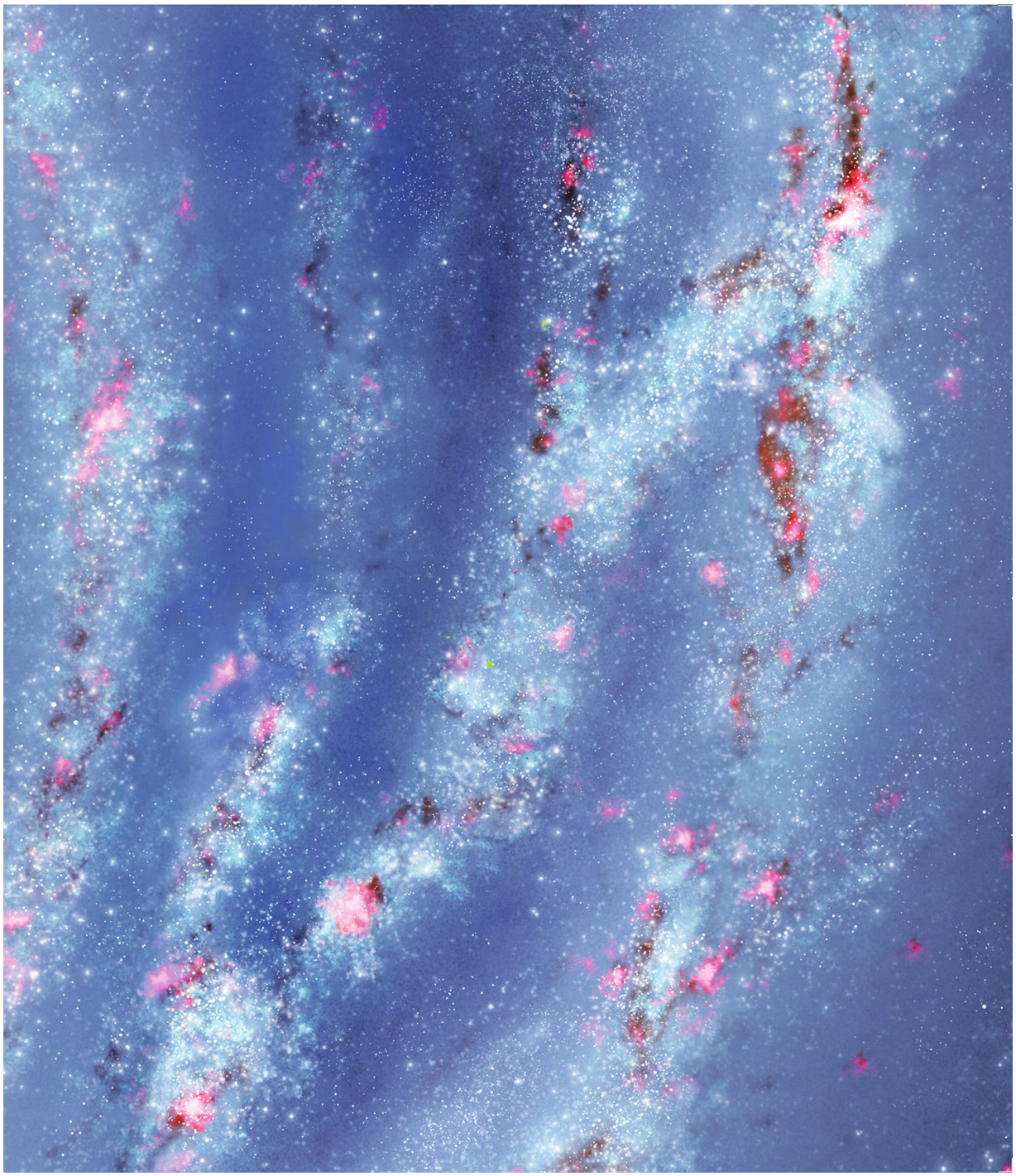
在这个明亮的核心深处，坐落着一个神秘的区域。这里有一个由气体、尘埃和恒星组成的圆环状结构，围绕在范围仅有几光年的星系中心周围。这个圆环结构笼罩着一个黑洞，也就是所谓的人马座A。这可是一头怪兽，质量大约是太阳质量的400万倍，它将自身紧紧地包裹住，形成了一个不断聚集物质的旋转圆盘。

但这只不过是银河系的一个特殊部分。古老的银河系是一个无序而又复杂的地方，在这里，超过2 000亿颗恒星用它们的方式环绕或者穿越可怕的引力井和星际垃圾。银河系最具标志性的特点就是其明亮的旋臂。这些旋臂是不断移动的区域，是炙热而明亮的新恒星形成的地方。与这些旋臂相关的是围绕在星际圆盘周边的恒星及气体密度缓慢发生的改变，像是涟漪一般。从这方面来说，银河系和其他类似星系的宏大结构，多多少少带有些虚幻的色彩，这是广阔而相对温和的物质波造成的结果。

在我们的附近，也就是距离银河系中心26 000光年（2.5×10^{20}米）的地方，恒星沿轨道运行，需要2 300万年才能绕行银河一圈。我们认为太阳目前正处于绕行银河第20周的旅途中，或者说是第20个“银河年”（galactic year）。但我们邻近的恒星并不完全与这一运动同步，恒星更像是稍微有些混乱的鸟群。

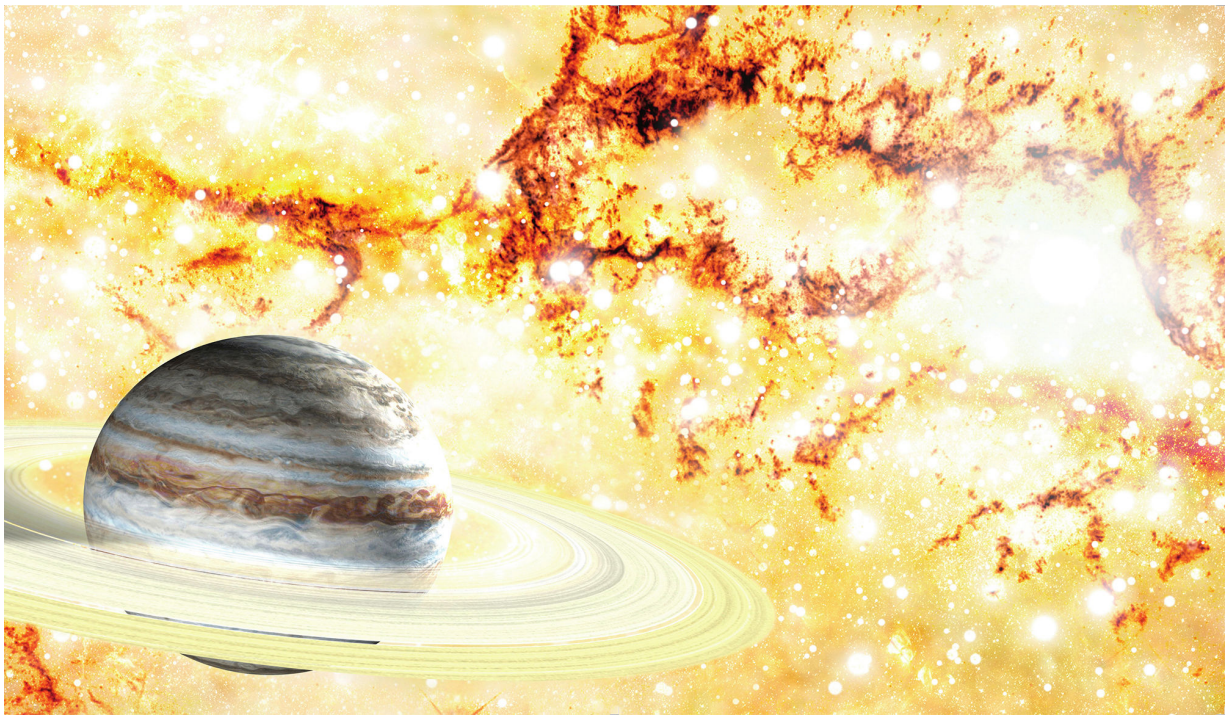


接近银河系中心。

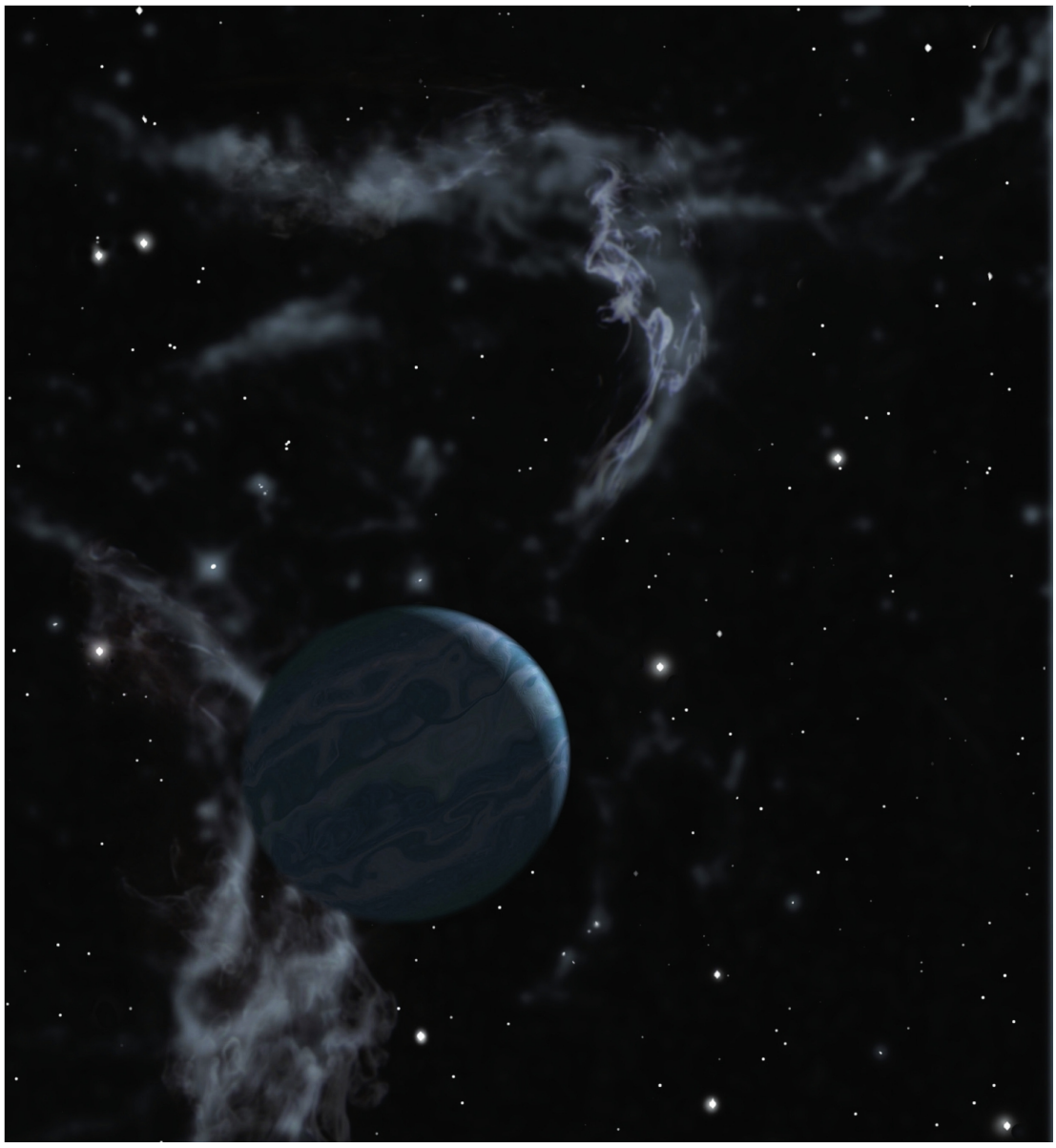


银河系猎户座旋臂上方。

10^{20}米

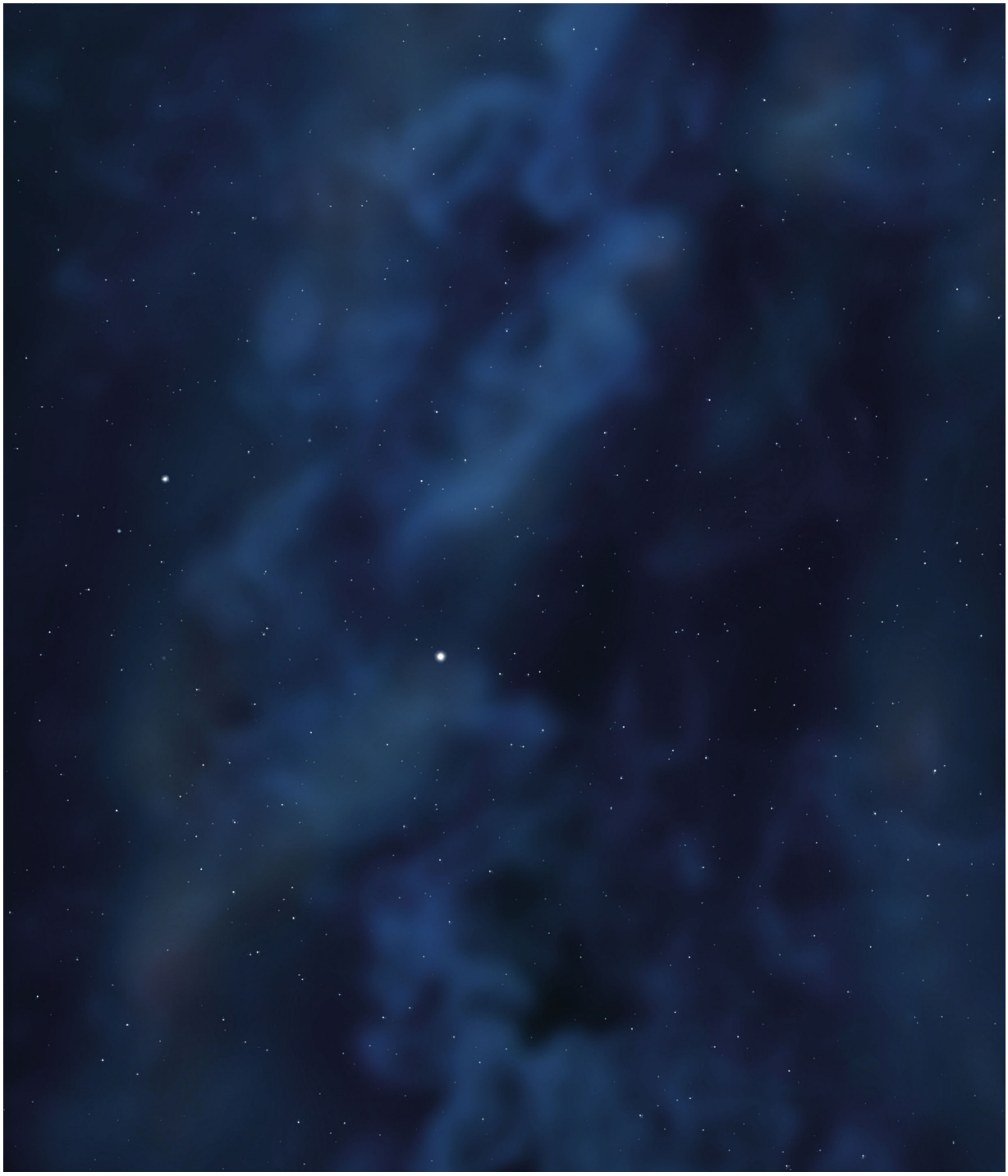


靠近银河系中心的一颗行星。



银河系外稀疏的恒星、星云及流浪行星。

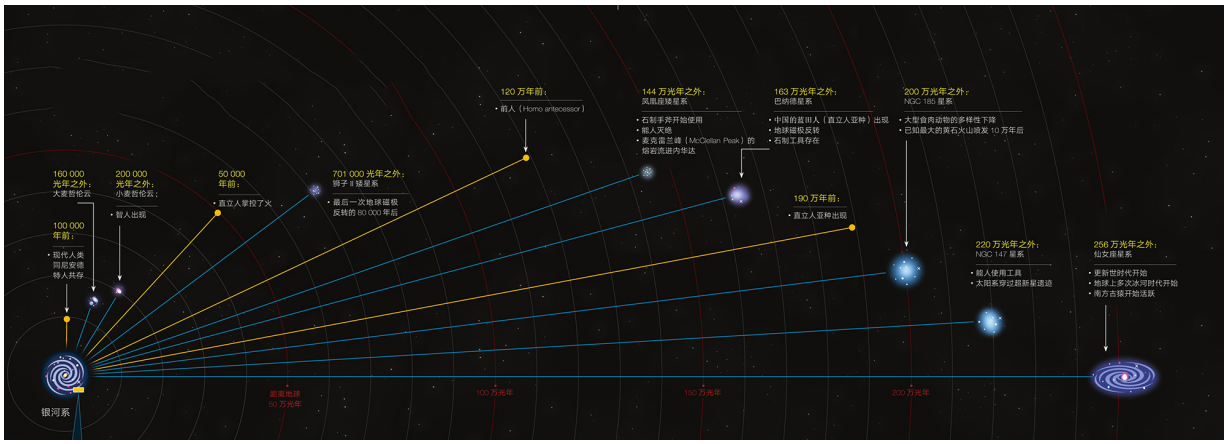
围绕在我们身边的恒星以几十千米每秒的速度在不同的方向上飘移着。随着时间的流逝，这种运动会产生一些混乱，所以今日离我们很近的东西可能在百万年前并非如此。事实上，我们并不知道在45亿年前，恒星群中与我们的太阳一同诞生的其他那些“太阳”现如今在哪儿。可能它们仍在某地组团，也可能彼此相距甚远。



10^{19}米

我们邻居的时间机器

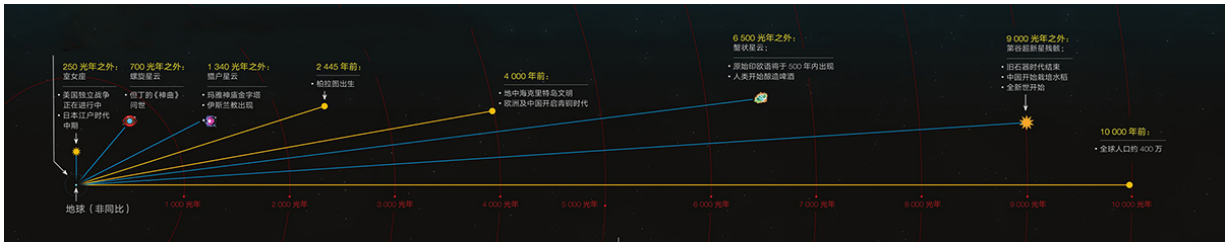
人类历史被地球发出的光裹挟着，快速进入了宇宙。从附近的恒星到仙女座，我们的星系邻居随着地球之光的行进路线，目睹了我们故事的每一个阶段。



更近的视角

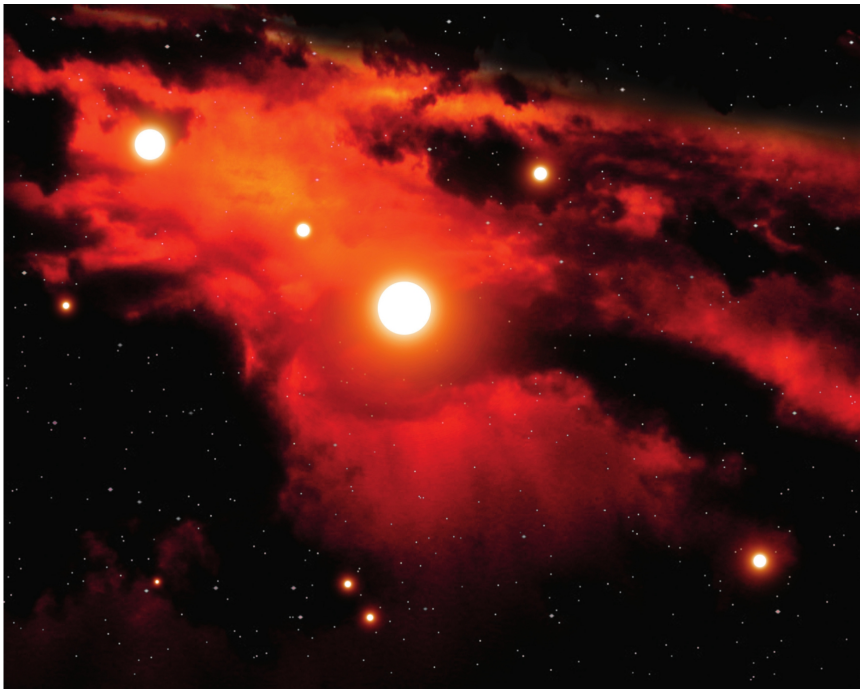
在我们周围100光年以内有约10 000颗恒星。

过去100年内发生的所有事（世界大战，物理学、生物学、基因学上的突破，太空探索，各种发现，社会变迁，艺术和音乐）可能都被几千个与太阳类似的恒星上的生命——目睹着。

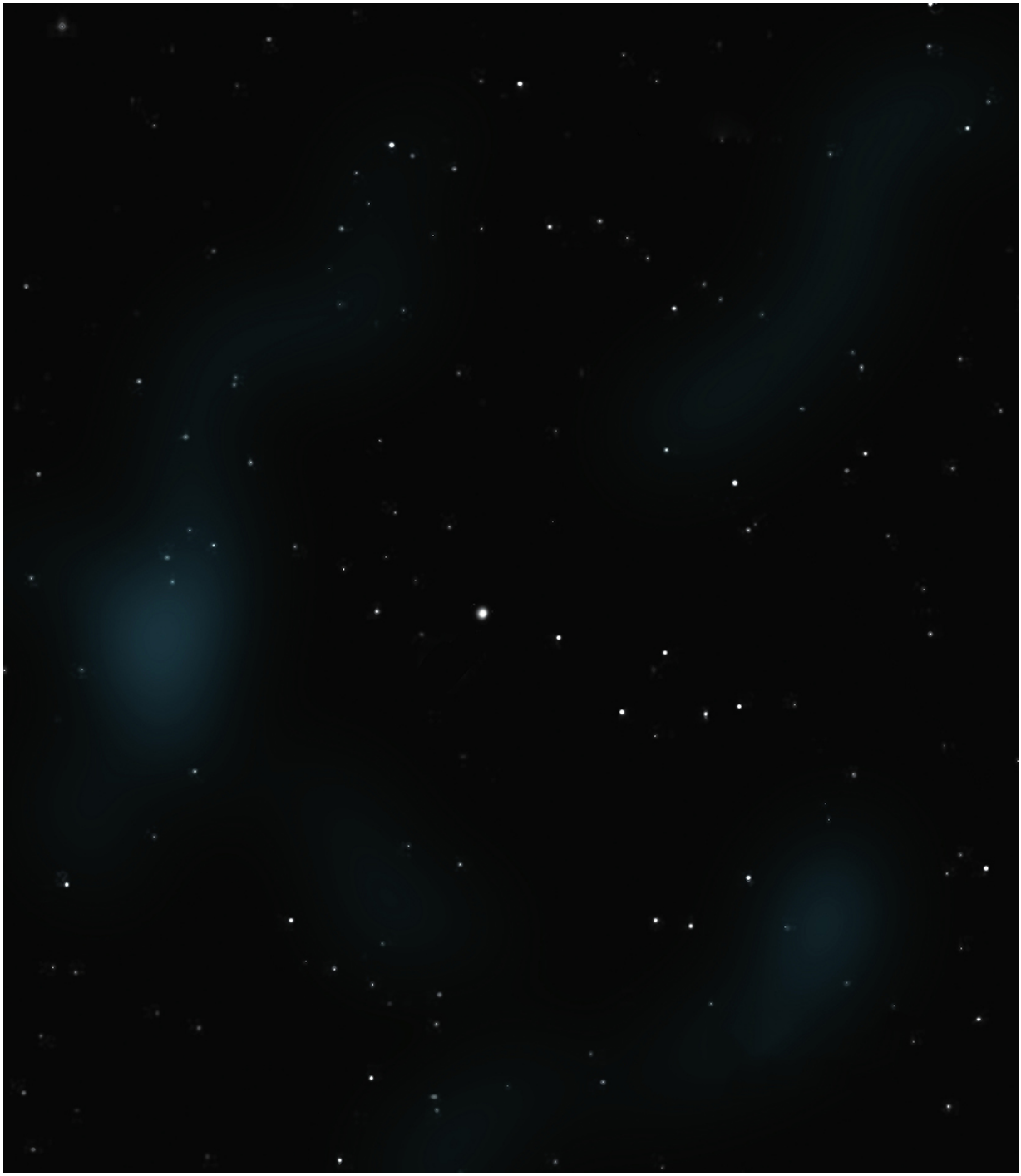


今天，我们住在银河系里一个相对不那么显眼的地方。在距离我们50光年的范围内，有约130颗在夜晚裸眼可见的恒星，以及至少1300颗比较黯淡却能被望远镜检测到的恒星。这并不是很多，甚至听起来易于掌控，范围也相当有限。然而我们人类这样的物种在过去的4万年里还不能到达离我们最近的相邻恒星。这样说来，我们就是星际荒原上的一座孤岛。

随着旅程的继续推进，我们会探讨这个孤岛是否值得一游。



姊妹恒星，45亿年前。



在中心处，那很难注意到的，就是我们的太阳。

10^{18}米



3
万物，过去和现在

10^{17}米，10^{16}米，10^{15}米，10^{14}米

从大约10光年到92光时，或者668天文单位（astronomical units）

从星云的大小到奥尔特云的内缘大小

组成你的原子在50亿年前广泛分布于宇宙之中，其分布范围大约是现在的1 000万倍。对于组成你周围每个人和每件事物的原子来说都是如此，从你手中的这本书，到你冰箱里还没吃的芝士，以及邻街吵闹的邻居；组成太阳系中每一颗流星、卫星和行星的原子也是如此，甚至太阳这个热核球体本身的构成粒子也是这样。

我们所有人都曾经在漫无边际的星际空间中飘荡。在你体内任何一个细胞里的1.8米长的DNA链中筑巢扎根的这些特定原子，很有可能在宇宙的历史中第一次聚集得如此紧密。

这是怎么形成的呢？

简单来说，我们都是经过压缩的。宇宙的基本物理性质就是促成一系列原子和分子聚集在一起，而这些原子和分子曾经占据着比如今大1亿兆倍的空间。

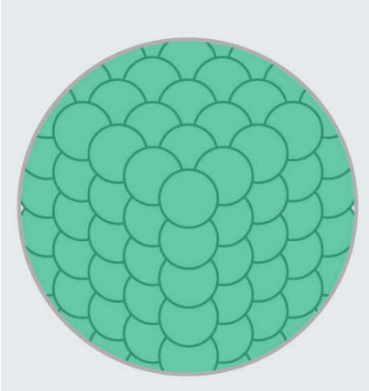
由于粒子间复杂的相互作用（由引力、电磁力、量子物理及亚原子物理导致），所有这些微小的成分各自找到了凝聚在一起的方法，形成了恒星、行星、卫星、小流星、吵闹的邻居、冰箱里的芝士以及你和这本书。

这种物质的聚集形成了人类这一物种所代表的量级，也形成了地球和太阳那一量级，这在当今的宇宙中多少有些特殊。正是在这一物理范围中，一系列连贯而又相当复杂的结构得以形成。也是在这一范围中，宇宙内物质的4种基本状态（固体、液体、气体和等离子体）可以共存。此外，若不是形成了小小的人类，我们所处的这方微小的宇宙天地绝不可能创造出，或者说再现某些物质状态，例如粒子对撞机中的夸克－胶子等离子体这样的超高能态，或者像实验室里的玻色－爱因斯坦凝聚体这样的超低能态，以及低温超流体和超导体等，不一而足。

物质的状态

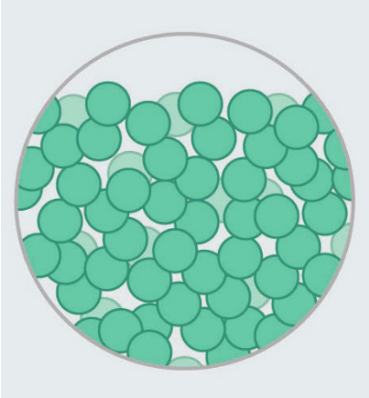
物质的组成物（离子、原子、分子）能够以不同的方式组织起来或表现出来，我们将其称为物质的“状态”（或阶段）。物质在微观层级上发生的事经常会导致更大层级上的天壤之别：从固态的冰或铁，到奔流的河水，再到行为古怪的中子星。

常规状态



固体

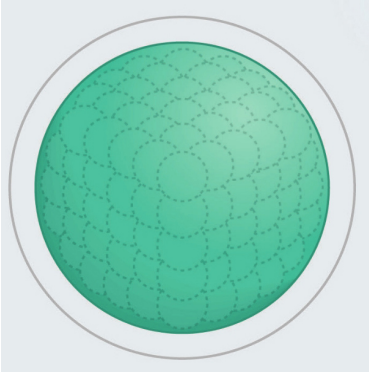
组成单元紧紧地聚合在一起，并与另外的组成单元形成固定的空间关系（暂且不考虑这些单元所进行的小小的热振动）。固体的例子包括有序结晶固体，比如金属、钻石和冰；非典型固体包括非晶态固体，比如某些聚合物、塑料、煤和玻璃。



液体

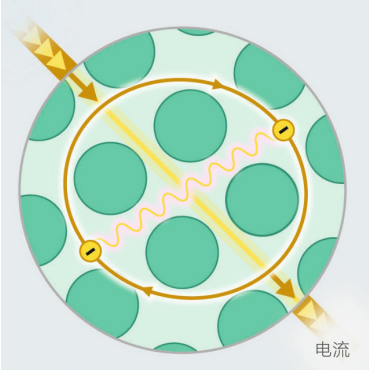
组成单元关联紧密，但没有固定的秩序。液体能够改变外形并且流动。

稀有状态



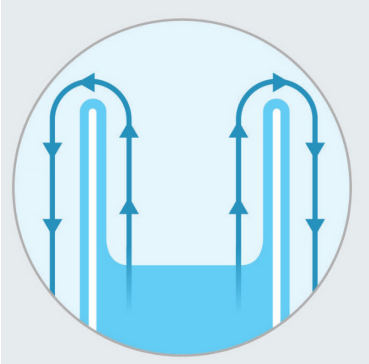
玻色-爱因斯坦凝聚体

将某些物质，如氦原子降温至接近绝对零度，它们便能够聚集成一个单一的量子实体。单个的原子失去自身特征，成为“超级原子”的一部分。只要条件合适，甚至光子也能形成玻色-爱因斯坦凝聚体。



超导体

将某一元素，如铌降温至-264摄氏度，它会变成零电阻超级电导体。在封闭的环内，电子能够永不停歇地循环。人们预测，有些中子星是超导体。

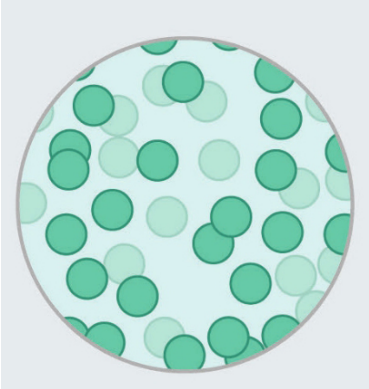


超流体

一种无黏度的液体，能够流过自身。搅动一下超流体，它就会永无止境地流动。超流体液氦还能够爬出容器，从分子大小的孔隙中逃出。和玻色-爱因斯坦凝聚体及超导体一样，超流体能够存在于中子星中。

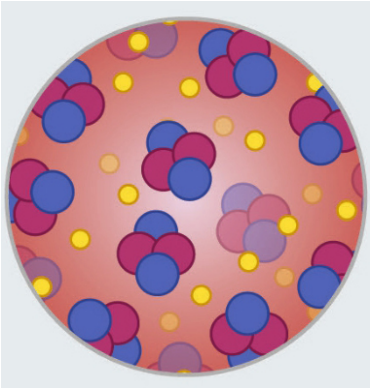
天体物理学的圈子

当我们的太阳系在大约50亿年前开始凝聚时，这样的事并不是第一次发生。138亿年前，宇宙从一个微小、密实、炙热的点开始膨胀。与太阳系的凝聚相似，那似乎是个极为枯燥无味的过程，但并非完全如此。结果，宇宙中少许最不完美的部分开始拉扯自身，让自己脱离宇宙膨胀的基本状态。



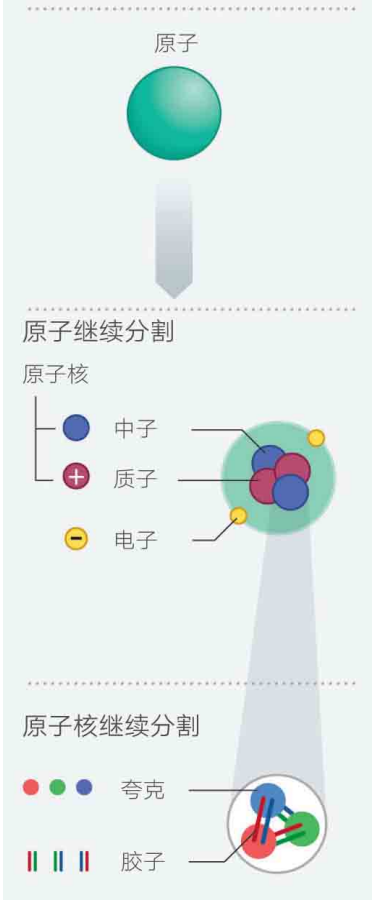
气体

由能够自由移动、没有紧密相关性的单元组成的可压缩流体。气体的黏滞性较低，能够膨胀、填满可用空间。

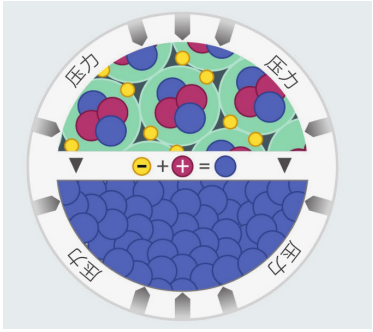


等离子体

与气体有相同的特质，但由于组成部分是被离解电子的海洋包围着的带电离子，因而具有导电性。

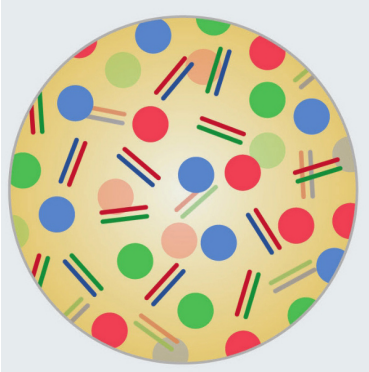


关键：物质的基本组成



简并态物质（Degenerate matter）

在极端高压或低温情况下，物质的组成物（如电子）能够填充所有的可用量子能量级。在这一情况下，一种被称为“简并压”的反压力产生了。简并态能够出现在中子星的中子中，防止它们塌缩成黑洞。



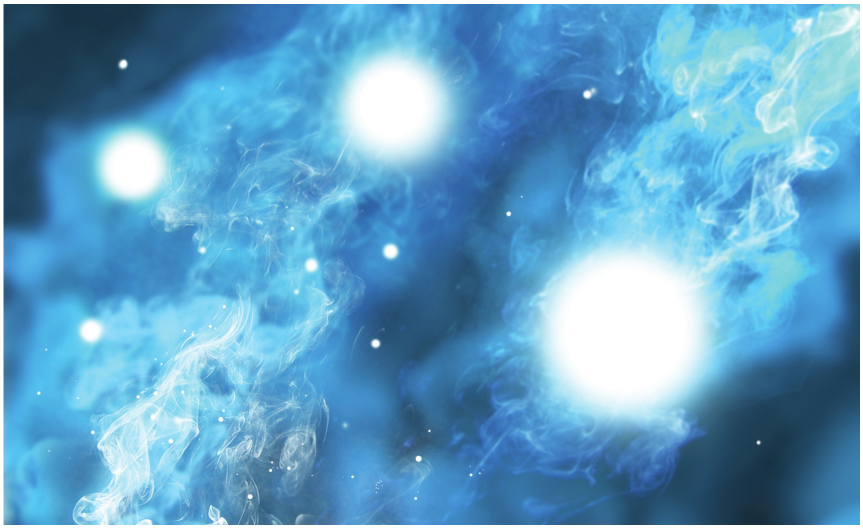
夸克-胶子等离子体

在超过10 000亿开尔文下形成的类似液体的夸克和胶子浆。在宇宙早期及粒子加速器中，质子和中子能够融化，形成这样的液体。夸克-胶子等离子体是一种几乎无摩擦的液体，若温度更高，便可能成为一种气体。

这些不完美的部分是如何脱离宇宙膨胀的呢？通过引力。它们中的一部分，是那些物质密度比周围平均密度稍高一点的地方。给定一个足够高的密度，自引力（一片区域的重量）就能够阻止这一空间的膨胀。这样一种“自拉力”（质量扭曲自身周边时空的现象）足以克服基本的宇宙膨胀趋势，并使得暗物质和正常物质得以聚集。

但是物理总是难以捉摸的。如果气态的正常物质聚拢在一起，或者更准确地说，落在一起，形成的物质会将引力势能转化为热能。换句话说，它变热了。这使得引力聚集物质和热能压力分散物质两种运动间形成了竞争。在适当的环境下，如果物质冷却得足够快，引力就能够将之聚集成高密度的聚合物。

大爆炸后的1亿年内到底发生了什么，至今仍是个谜团，但似乎在这一时期，初代巨型恒星和初始星系结构开始形成。这些早期的恒星对于宇宙第一批重元素的形成来说很关键，并且在恒星随着年龄增长、膨胀及爆炸而被扔至星际空间的过程中发挥了重要作用。



宇宙中的第一批恒星。

就像是幼苗的优质肥料一般，少量的重元素开启了气体冷却的新篇章。这是释放热能的过程，同时也减缓了新的聚集物和结块的形成速度。造成的结果就是，之后的几代恒星在大小上有着很大差异。

某些结局凄惨的恒星，比如超新星，也触发了星际物质的快速崩塌，或者使星际物质在凝聚和分散的边缘摇摆不定。一颗爆炸的恒星会向星际空间持续不断地放射出气体和粒子冲击波，由此释放出的种种不稳定催生了新的聚集物。

这些早期的物质群开创了物质循环的先河，并一直延续至今：星际间的物质聚集到一起，某些物质聚集得足够紧密，从而形成了恒星（以及行星大小的星体）。恒星热核中的核聚变创造了越来越多的重元素，几百万年到几十亿年以后，那些恒星向虚空中放射出混合元素，通常只留下恒星残骸，这些残骸就是白矮星、中子星甚至黑洞。这些密度极高的凝聚体通常意味着终点，在这里，物质将会就此停留。

几十亿年间，几千亿颗恒星经历了许多次这样的循环，使星际空间被这些重元素缓慢地侵占，这种侵占柔和而微妙。即使到了现在，相比宇宙之初就存在的氢和氦那庞大的数量，这些新元素的数量也是

微不足道的。碳、氧、氮、硅这类元素，以及我们周围的其他所有重原子元素，几乎只占据正常物质的1%～2%，而且它们大部分存在于星际空间或星系际空间的稀薄气体中。

宇宙中也存在少许尘埃。这种尘埃是微观的，由硅酸盐或富含碳的化合物组成，直径小于千万分之一米。这些尘埃是超新星爆炸时排出的残余物，由衰老恒星的大气层和星体内部经快速冷却而形成。

在银河系这类星系的轨道旋涡中，由恒星物质构成的最紧实的积聚物可在星云中看到：点缀着星际银盘的分子云。宇宙中有几千处星云区域。一部分体积最大的星云如今正赶在星系物质偏离轨道及其引力拉扯将星云中的污垢一扫而净之前，积极地制造新的恒星。



恒星爆炸。

我们可以重现太阳系的大部分史前历史。这些线索来自对遥远的宇宙，以及毗邻家园的宇宙空间的观察。同时，我们通过窥探宇宙不

平凡的过去所留下的微观残留物，发现了一些极为重要的事实：一些元素和放射性同位素深深嵌入了落在地球上的远古陨石中。

所有这些事物，为我们带来了睡前故事，也为所有这些睡前故事带来了终结。

从过去到现在

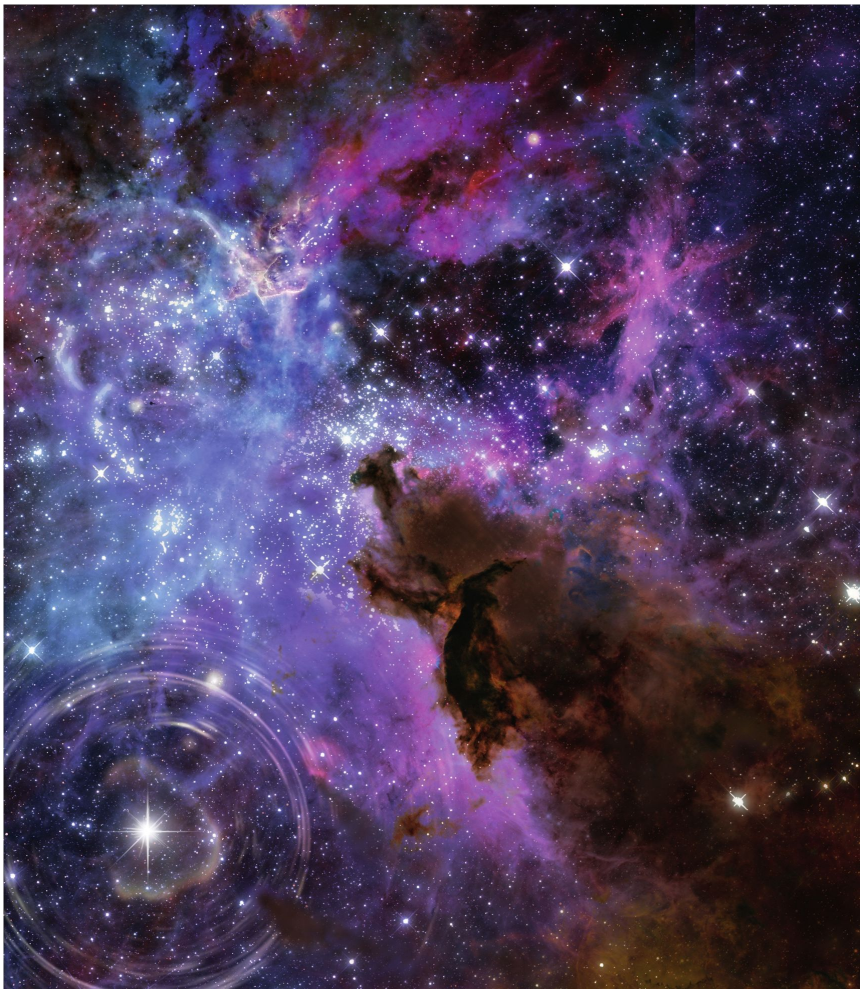
很久以前，在大约45亿年前，银河系中有一片富含物质的星云，其中一块大小和密度正合适的区域开始向内移动并凝聚。正如所有类似的情况那样，一颗临近的恒星爆炸所产生的力，使它跨过了自身的引力边界。在星云的其他部分，恒星的生死循环已持续了很长时间。在周围，有几颗刚形成或即将形成的恒星，还有更大质量的恒星短暂地存活，然后年纪轻轻就已灭亡，在与其核心可能发生的核聚变链进行了一番竞速之后，便作为超新星而爆炸。

不管这一区域中的气体压力造成了多少阻力，也不管星际磁场引起了多少太空压力，引力想方设法获得了胜利，并导致越来越多的星云物质聚集到一起。这种凝聚物的物理特性根植于引力、角动量、热力学这一类规则，但同时也容易产生棘手的、混沌的行为。

物质逐渐聚集到一起后，能够形成怎样的形状和几何结构就是关键了。气体和尘埃的混合物凝聚成一个逐渐增长的、中心为球形的核，同时向外飘溢，形成一个巨大的轨道形圆盘。这个圆盘复杂而动荡，其边沿不断扩大。通过圆盘的气体和尘埃在其内旋转，充斥着其核心。新鲜的星云物质也从一个巨大的双面漏斗的顶端和底端一起进入，充斥着这一圆盘，这个漏斗的两端到圆盘中心的距离比如今地球到太阳的距离还要大几百倍。

内核是一个由温暖气体组成的快速旋转的球。这个内核将会随着自身的增长，旋转得越来越快，直到毁灭。但在很多情况下，在短短

几万年内，旋转涌入的混合物和不断增大的形如恒星的核会放射出炙热的、高速的物质激流，从中心球体新近形成的南、北两极喷射而出。



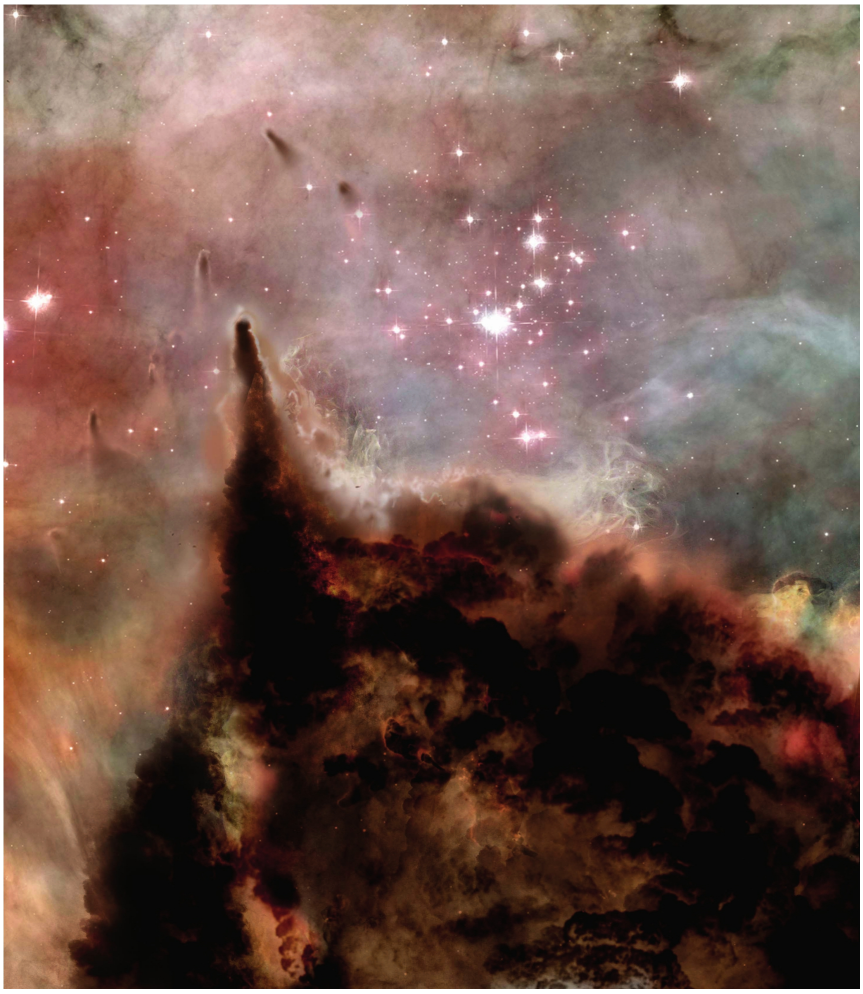
我们的星云温床，在几十亿年前宽约10^{17}米。

天文学家称之为原恒星喷流（proto-stellar jet），这是一束跨度至少可达1光年的粒子激流。这些喷流全力冲入每一片挡在其前进路上的星云，引起冲击波，使热物质的正面发出光芒。这种流出物有助于调整内核，释放出一些角动量，否则原有的角动量会将内核撕碎，并使之收缩得越来越小。



如今的太阳。

10^{17}米



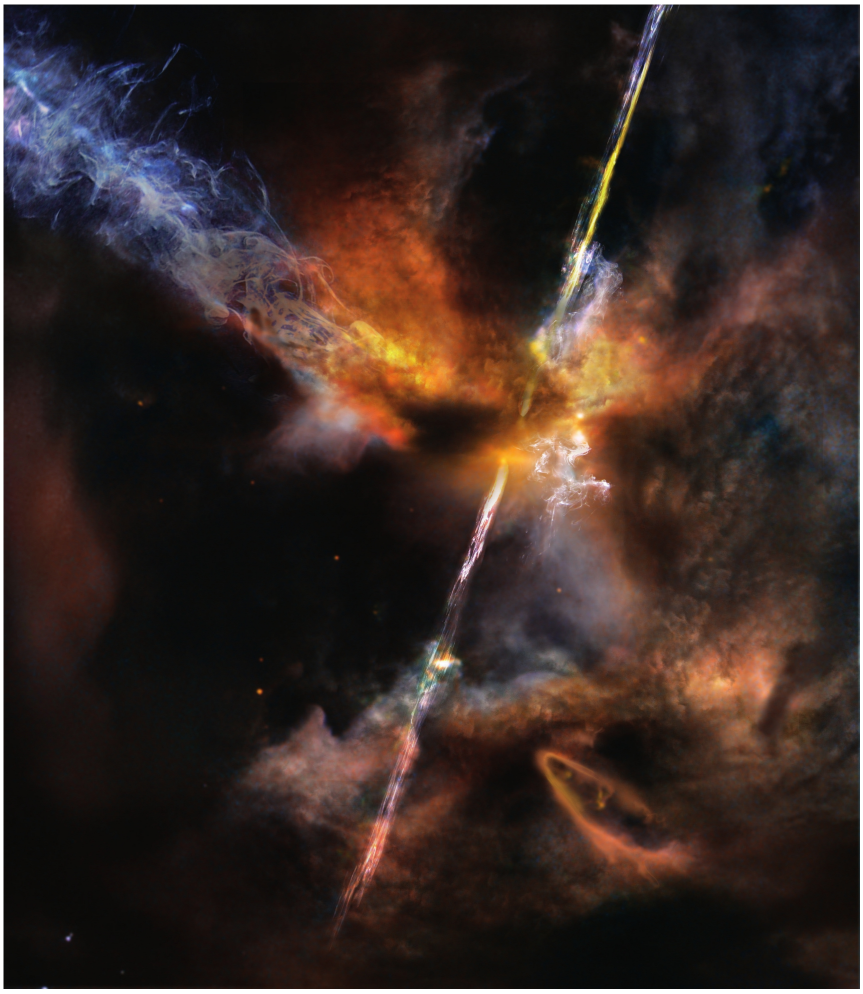
太阳系这颗“蛋”的出身：一团气体与尘埃构成的紧实的结。

一直以来，大圆盘的周身物质自身经历着变化。在圆盘内部深处，在温度各异、化学成分不同的各个分层之下，由尘埃及分子组成的微尘形成了。起初在微观层面，它们被旋转的气体不断冲击着。随着它们一次又一次地扫荡周边环境，原先那些气体的冲击加速了它们的增长。这些不断增长的聚集体，有时就像尘团般，尺寸从几厘米增加到几米，甚至更大，有些就像是沿着山坡直滚而下的雪球。它们变得越大，就能扫荡越多的物质，这一过程能让它们轻易地在几万年的时间内把直径扩大到几百千米。我们将其称为微行星和原行星。



距离今天的太阳更近处的景象。

10^{16}米



一颗原恒星喷射出的气体进入太空，经过长达10^{15}米的距离。

然而随着时间的流转，膨胀的圆盘表面被紫外线摧毁。这些光线来自其他年轻的恒星以及炙热的中心原恒星核。它的作用是使物质衰减消失。



我们视野中的太阳。

10^{15}米



清晰可见的原恒星盘，直径达10^{14}米。

这种物质聚集又丢失的循环行为使得大圆盘从厚厚的、四处扩散的气体与尘埃，变成了松散的固体，并释放出原子和分子。在远离原恒星核心的地方，在那些更寒冷的区域中，有行星雪线（planetary snow line）存在，在这里，水冰（形成巨型物体的重要组成部分）开始形成。我们在此处找到了尚处在襁褓之中的木星、土星、天王星、海王星，以及晚些时候会在别处出现的其他大型行星胚胎。

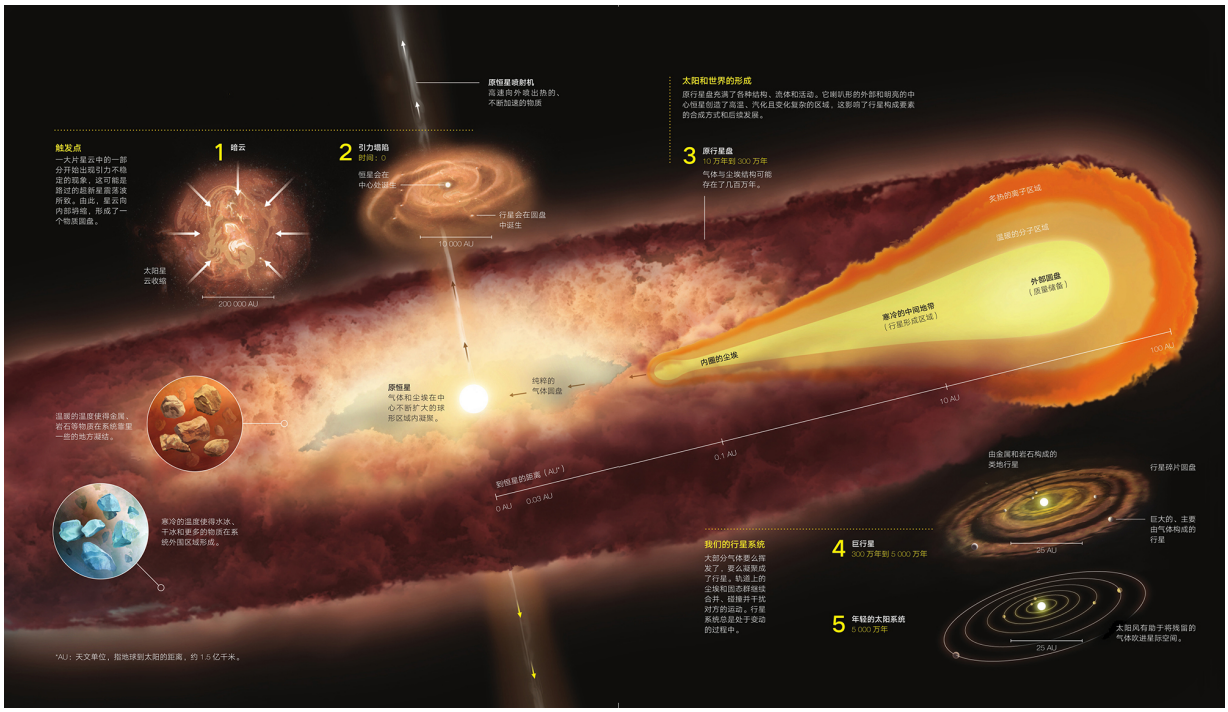


太阳的星际（黄道）尘埃所形成的薄雾，前景是行星形成过程中的小行星残骸。

10^{14}米

太阳系的诞生

当物质自行聚集并进行压缩时，恒星与行星在星际空间中聚合而成了。这并不是一个简单的过程，其中引力对抗着热能和电磁能。没有完全一致的两个系统。



同时，在内核的引力井深处，球形凝结物到达了收缩中的一个关键节点。这个物体的内部温度开始升至100万摄氏度以上。当温度达到1 000万摄氏度时，它就会变成一颗真正的恒星，同时其中心将闪耀出第一次核聚变的光芒。

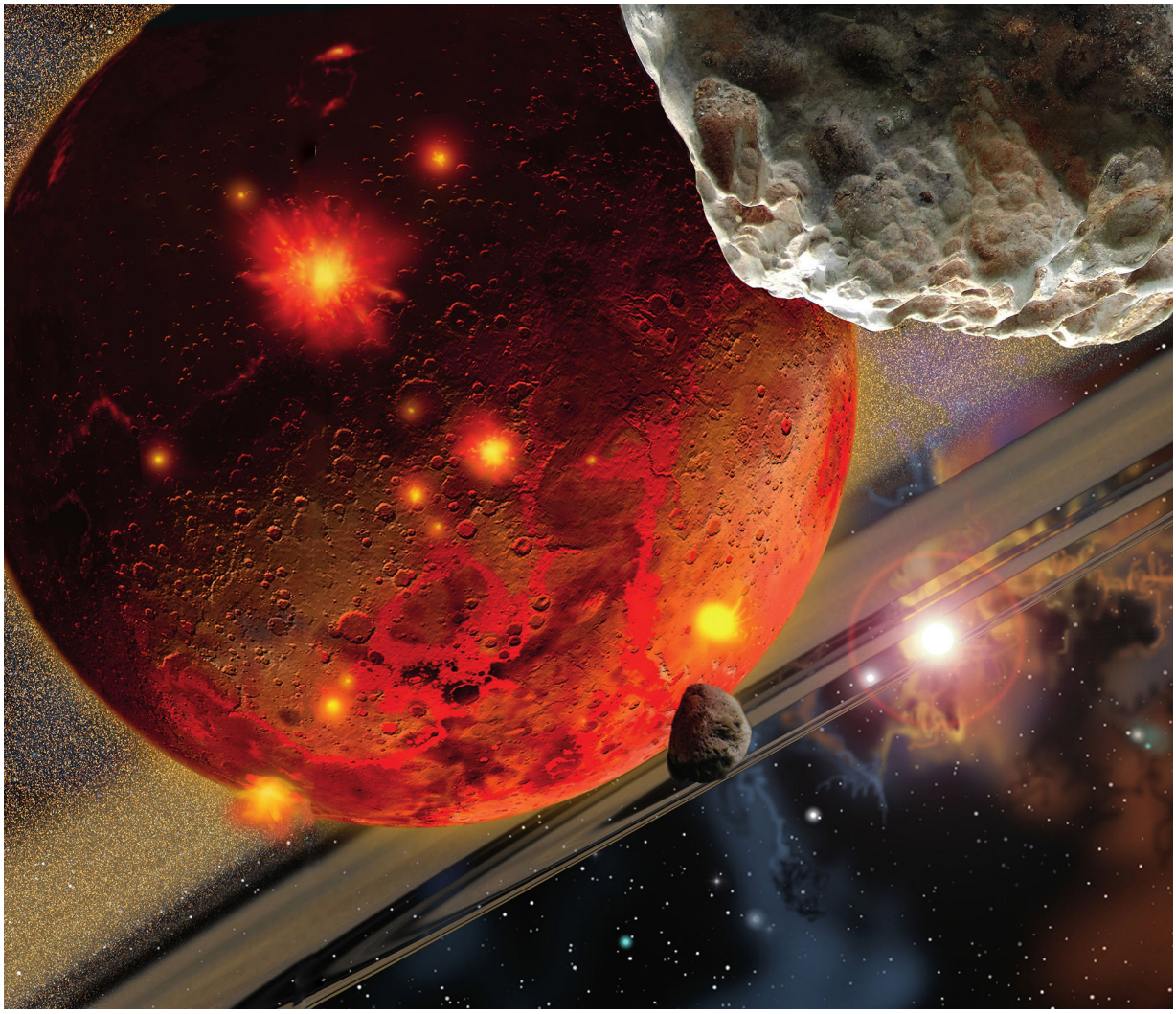
自星云物质的漂流入侵开始，时间已经过去了几亿年。而从原恒星还是一团气体时开始，所用的时间更少，大约过去了几万年。用宇宙的标准来说，恒星与行星的诞生不过是一夜之间的事。

目前还没有一个完整的故事能告诉我们，太阳系中的行星和地球自身是如何形成的。我们的行星和其他以岩石为内部结构的天体是在

太阳系诞生过程的晚期才出现的。这些天体在原行星一次又一次的碰撞中受到了粗鲁的对待。

这是一个粗糙的、随机的过程，抛出了众多至今依然悬而未决的问题：我们的太阳系过去是否有一些行星位于水星轨道以内？地球上的水是从哪儿来的？为什么没有产生更多的水？火星为什么这么小？为什么地球的运行轨道几乎是个圆形？月球真的是因为一次大碰撞而形成的吗？在太阳系的最外缘，到底有着怎样的行星天体？

如果能够解决这些问题，那么人类不仅能更好地理解自己的起源，理解自己如何在宇宙中形成，还能搞清楚类似的故事如何在其他恒星系统中持续上演数亿年。而这就是关键，因为随着旅程的继续，我们马上就要面临一个最大的难题：该如何面对宇宙？



地球吸取原行星的碎片。

PART 2
10^{13}～10^{-1}米的15个宇宙：生命存在的现实世界



4
行星的生存家园

10^{13}米，10^{12}米，10^{11}米，10^{10}米，10^{9}米

从约9.3光时到100万千米

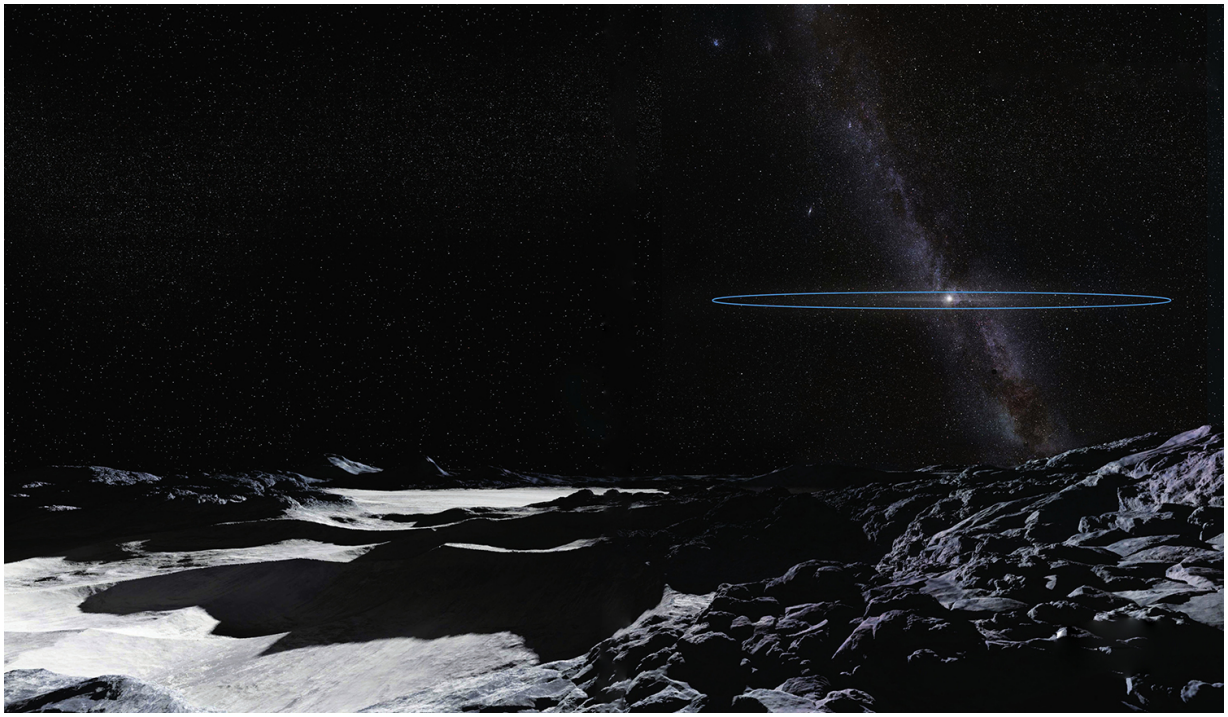
从当前地球——冥王星距离的2倍到地月距离的3倍左右

让我们在晴朗的夜晚走出房门，向着天空挥舞一下手电筒，接着回房间美美地睡上一觉吧。第二天早上，你向宇宙释放的光子已经奔袭了大约100亿千米的距离（10^{13}米）。

只需要一个手电筒，只需要一晚9小时的安然睡眠，你就成了宇宙设计师，送出了光子消息，穿过了海王星的轨道。即使是并不明亮的冥王星，那个遥远的、由冰层与岩石组成的球体，与地球间的距离也比你释放的光束所行经的距离近20亿千米。

在这10^{13}米范围之内，是太阳系中的主要行星所占据的轨道区域，所有这一切，已经被拥有毛茸茸小脑袋的灵长类动物默默关注了几千年。我们并不能用肉眼看到所有行星，因为海王星和天王星超出了人类视力所及范围，但木星、火星、金星和水星对地球上任何视力良好的生物（不论是昆虫还是狒狒）来说都是肉眼可见的。

仅凭太阳系的主要行星沿着一定范围的轨道运行这一事实，并不能推断出其他系统也建立在同样的尺度范围之上。然而纵观银河系，在考察类似的轨道分布时，我们能够找到各种星际同胞：双星、三星系统、四星系统、伴随着白矮星或者黑洞的恒星、多颗中子星相伴的系统，以及其他各种奇异的构成，甚至连宇宙中众奇点之王者——超大质量黑洞的事件视界，也拥有同样的尺度范围。

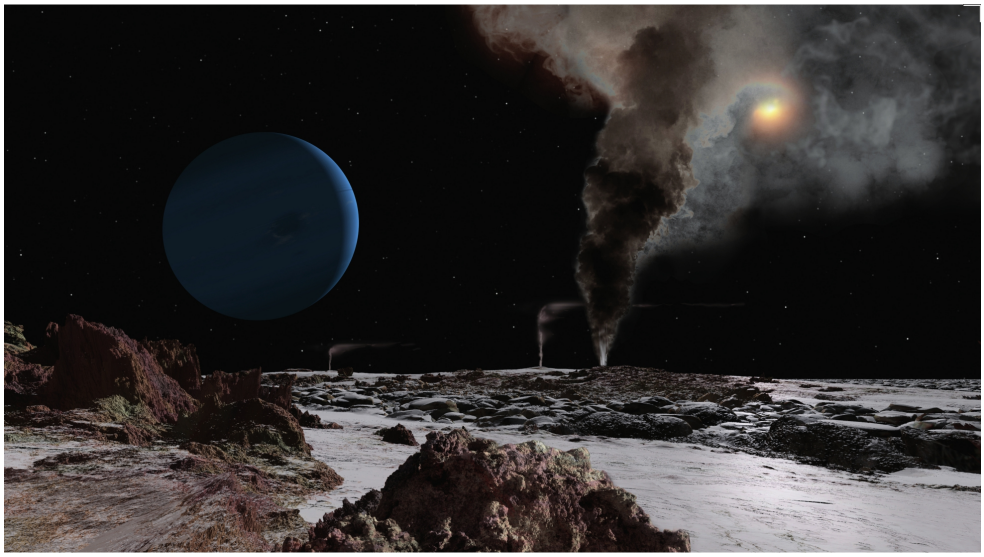


从阋神星（位于海王星之外）上看到的海王星轨道。

10^{13}米



冥王星的天空及其卫星卡戎；太阳远在44亿千米以外，是一颗晦暗的恒星。



从海王星的卫星海卫一上看到的蓝色海王星。液氮间歇泉从低温冷冻的卫星表面喷发出来。

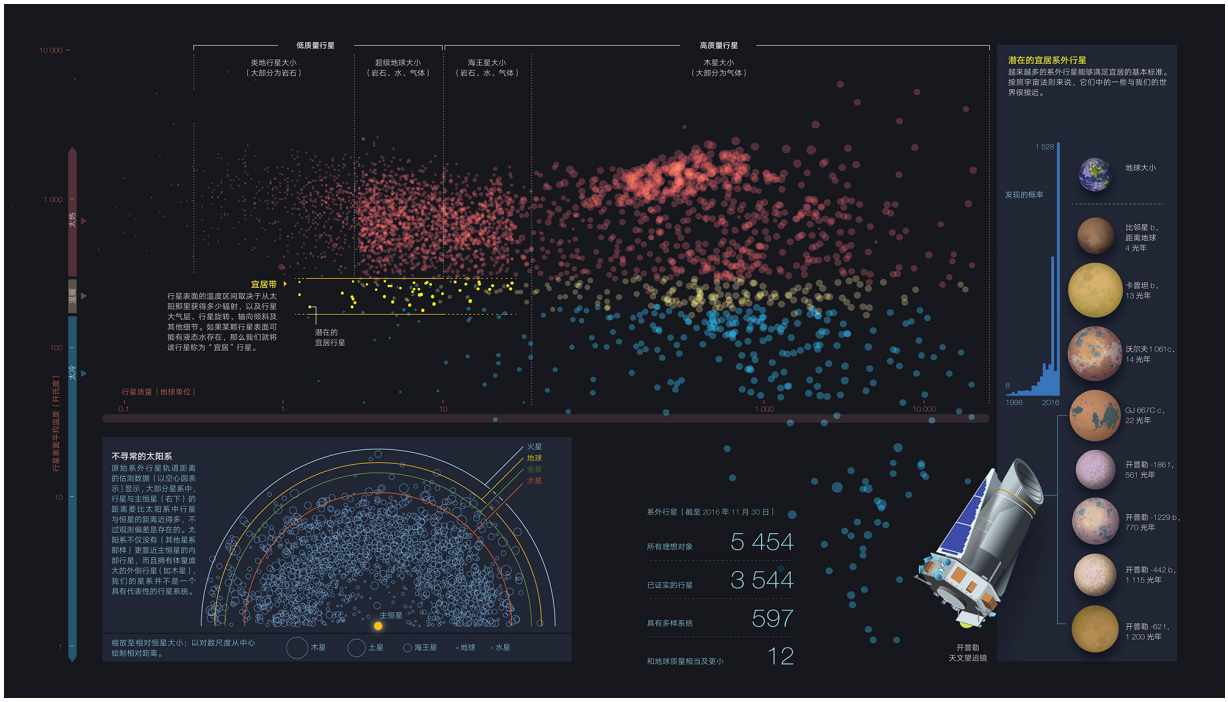
这样的尺度能够让我们深入观察宇宙用正常物质和能量所生产出的密度最高的凝结物。这是个奇怪的现象。我们已经知道，当生成恒星和行星的星际污垢蔓延至10^{13}～10^{14}米远，在这一时期，引力开始将物体聚集在一起，过剩的能量将向外传播，留下的是广阔无边、空荡荡的空间。

然而，填充这些空隙的是行星，是铁元素、岩石、水和气体。接下来，对生物来说，行星可能是宇宙中最多姿多彩、复杂多变的天体了。没有哪两颗行星是完全相同的：穿越太空的轨道不同，旋转方式和方向不同，大气、云层、雾气、地层、海洋或大陆、糊状熔融的内核也各有差异。所有这些特质始终是不一样的。

而现在，得益于20世纪晚期出现的一系列卓越技术和天文学进展，我们了解到，在太阳系甚至整个宇宙中，行星的数量至少与恒星一样多。事实上，行星数量或许还要多得多——宇宙中充满了系外行星。

系外行星

银河系中大部分恒星都被行星围绕。此处用图表描绘这些天体，便于我们将太阳系纳入宇宙环境中。





这是距离我们最近的系外行星吗？由于比邻星b的母恒星是一颗红矮星，所以它可能拥有一片布满极光的天空。

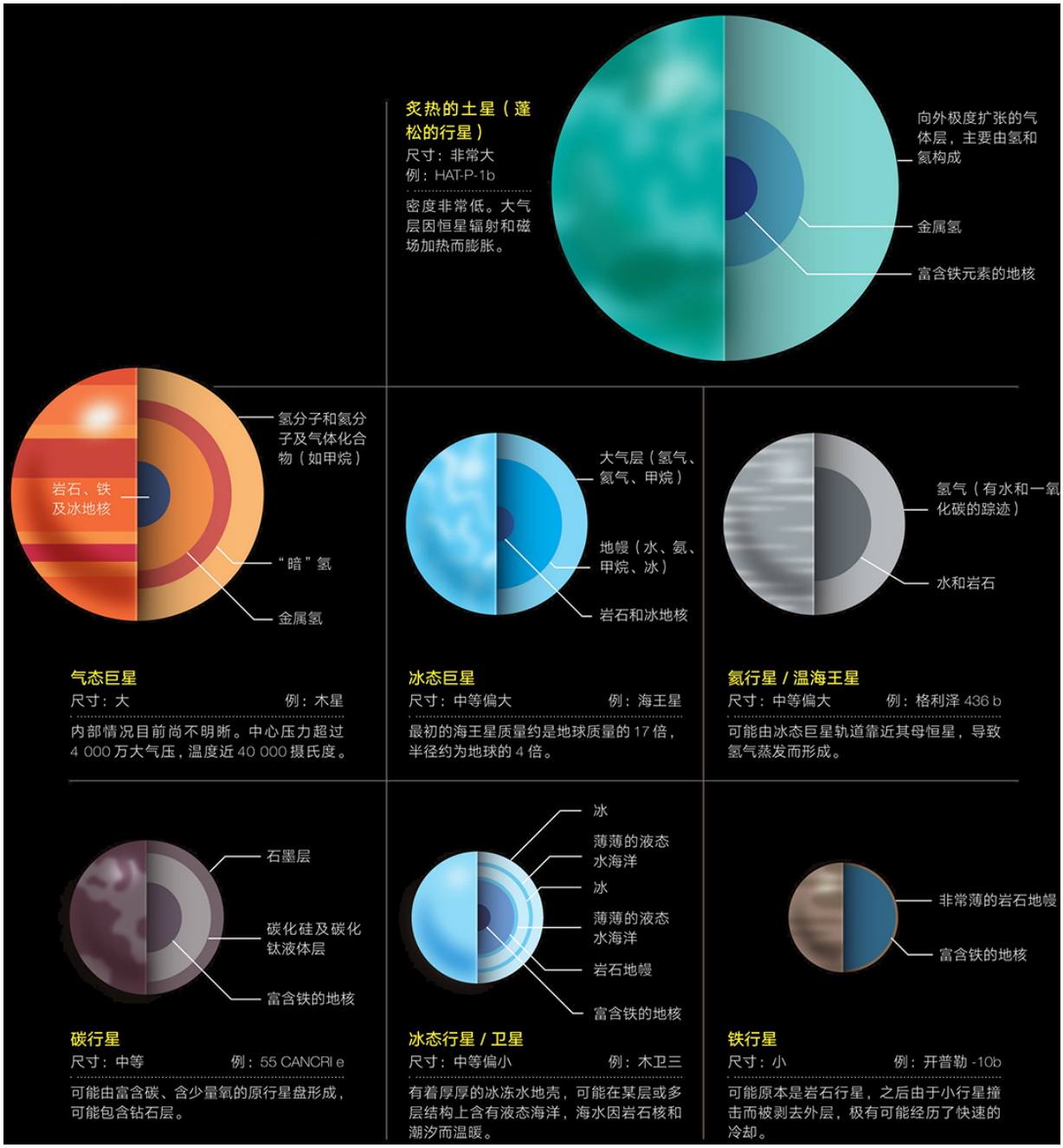
若要寻找与地球大小相似、化学和热学状态或许也颇为相似的地方，那么统计推断告诉我们，太阳系外大约有15%～40%的恒星能够产生这样的世界。这是个令人震惊的预测，它意味着纵观整个可见宇宙，我们轻轻松松就能找到几十亿兆颗利于生命栖息的岩石星球。

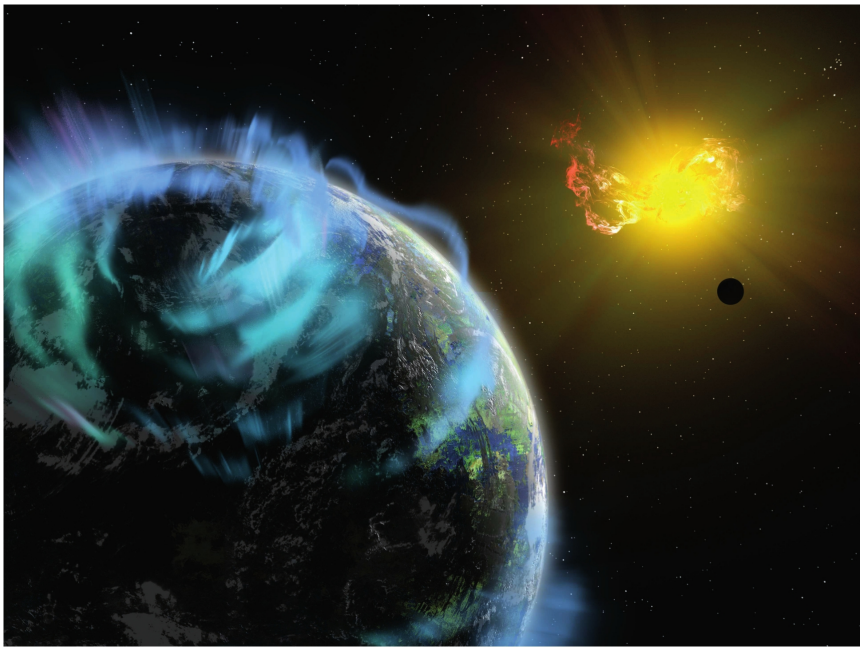
抛开这些种类丰富的星球不说，岩质小行星仅代表着众多可能存在的、彼此迥异的行星形式之一。一些行星体积过大，可被当作恒星；还有一些星球是其他行星的卫星；甚至有部分星球在引力的作用下，从环绕其母恒星的轨道中弹射出去，漫步在冰冷的、死水一般的星际空间中。理论上，这些“荒原狼”式的行星可能保有大量温暖的水。紧紧将水锁在其内部，使之与外界隔绝开来的，是一层厚厚的外冰层和氢气层。在外冰层及氢气层形成后，内部的绿洲将会在接下来的几十亿年内持续存在。

宇宙中有很多气态的巨型星球，其中一些星球在巨大的原始氢元素与氦元素“斗篷”的笼罩下，有着紧实的、由铁与岩石构成的内核。像这样的行星，其轨道距离母恒星几十亿千米，行星外围是寒冷的，内核却相当炙热。它们的内部压力能够使物质的状态与地球脆弱的地表截然不同。正如木星那般，气态巨行星的内部压力是如此之高，导致氢会呈现出金属般的状态。我们只能在实验室里制造出这种物质状态。而在我们的太阳系中，却存在木星这样一颗行星，它还是太阳系行星中质量最大的一颗。

行星分类

行星的构成元素与内部结构是多种多样的。对这些更大的星球而言，引力是造成其内部分离及分层的关键因素，而宇宙环境改变了其外观。从炙热行星到冰冷星球，行星“动物园”里充斥着不同的种类。


炙热的土星（蓬松的行星）
尺寸：非常大
例：HAT-P-1b
密度非常低。大气层因恒星辐射和磁场加热而膨胀。
向外极度扩张的气体层，主要由氢和氦构成
金属氢
富含铁元素的地核
氢分子和氦分子及气体化合物（如甲烷）
岩石、铁及冰地核
“暗”氢
金属氢
气态巨星
尺寸：大
例：木星
内部情况目前尚不明晰。中心压力超过4 000万大气压，温度近40 000摄氏度。
大气层（氢气、氦气、甲烷）
地幔（水、氨、甲烷、冰）
岩石和冰地核
冰态巨星
尺寸：中等偏大
例：海王星
最初的海王星质量约是地球质量的17倍，半径约为地球的4倍。
氢气（有水和一氧化碳的踪迹）
水和岩石
氦行星 / 温海王星
尺寸：中等偏大
例：格利泽 436 b
可能由冰态巨星轨道靠近其母恒星，导致氢气蒸发而形成。
石墨层
碳化硅及碳化钛液体层
富含铁的地核
碳行星
尺寸：中等
例：55 CANCRI e
可能由富含碳、含少量氧的原行星盘形成，可能包含钻石层。
冰
薄薄的液态水海洋
冰
薄薄的液态水海洋
岩石地幔
富含铁的地核
冰态行星 / 卫星
尺寸：中等偏小
例：木卫三
有着厚厚的冰冻水地壳，可能在某层或多层结构上含有液态海洋，海水因岩石核和潮汐而温暖。
非常薄的岩石地幔
富含铁的地核
铁行星
尺寸：小
例：开普勒 -10b
可能原本是岩石行星，之后由于小行星撞击而被剥去外层，极有可能经历了快速的冷却。



一颗类地行星围绕着一颗发光的恒星，其上极光闪耀。

整个星系中，也有一小部分大型行星的轨道离恒星很近，它们的大气趋于白热化，其中包含由钛氧化物或铁构成的云和雨、超音速射流层，有时会导致十分极端的天气出现。这些行星是如何演变成这样的，至今仍是一个谜。有着这种体积的行星，其质量是地球的几百倍，它们显然不可能在此刻（我们发现它们时）的位置上形成。换句话说，在这些行星的幼年时期，由于原行星盘的复杂引力作用，它们改变了所处的位置，经历了大范围的迁移，被迫来到离它们的母恒星更近之处。或者，它们参与了一场行星弹球游戏，在家族中其他行星的引力作用下被驱散到更靠近母恒星的轨道上。

在其他地方，也存在包含钢铁般的冰冻水分层和碳氢化合物混合大气层的冰态巨星。我们预测，某些行星所含的碳或水的总量多得不可思议。还有一些超级地球，其体积比地球大，但比海王星小，它们在太阳系中并没有对应的行星，却出现在其他大部分（约占全部恒星系统60%的比例）恒星系统中。某些超级地球似乎与我们所熟悉的岩石世界大相径庭，比如，包裹在巨大而又温暖的氢气“毯”之下的熔岩行星。

在将这些新发现的系外行星进行分类并探索太阳系的过程中，我们颠覆了之前先入为主地将地球视为“最重要的世界”的看法。任何所见之处，任何所到之地，我们都能看到活动的迹象，看到当地的复杂性。土星的卫星泰坦有着由厚厚的氮气和碳氢化合物构成的大气层。虽然它的表面极冷，平均温度约为－180摄氏度，但仍有季节之分。泰坦星不仅在不同半球有着夏季、冬季之分，还存在大规模的蒸发与冷凝循环。泰坦星上的甲烷湖能被蒸发殆尽，之后化为碳氢化合物之雨落回地面。而遥远的冥王星的寒冷表面有着丰富的地形，如山川、冰川及冰火山。

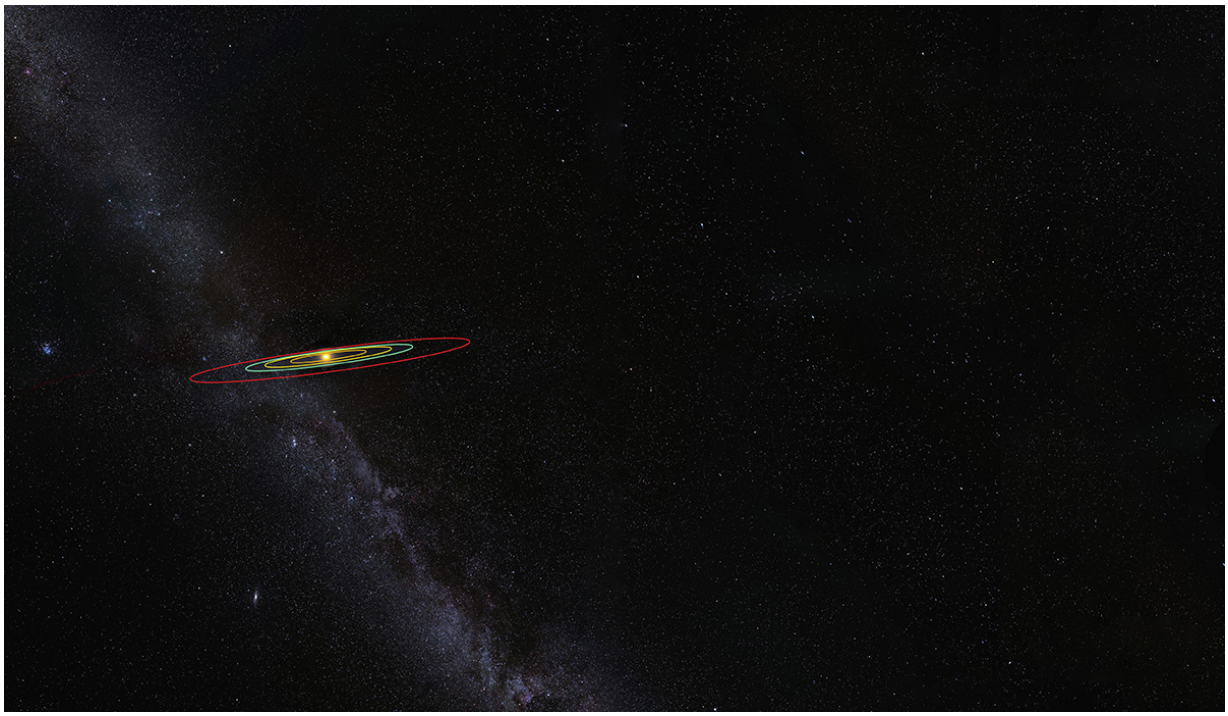
一条即将走完的路

我们研究的大部分行星都在其恒星的引力井之内，沿着爱因斯坦相对论宇宙中的弯曲时空路径运行。对人类这一物种来说，这些行星轨道是宇宙最具标志性的特质之一，然而事实上，它们只是我们想象中的产物。这些轨道不过是些推论和几何幻想，能够帮助我们了解自然的复杂性而已。

运行轨道实际上只是一种估算，是恒星或行星随着时间运动的一般情况。真正的轨道系统有着复杂的引力作用：恒星吸引恒星，行星吸引行星，行星支撑着卫星，卫星互相拉扯。任意一个瞬间，作用在天体上的力都是所有这些力的总和，是许多力作用在一个物体上所产生的综合表现。

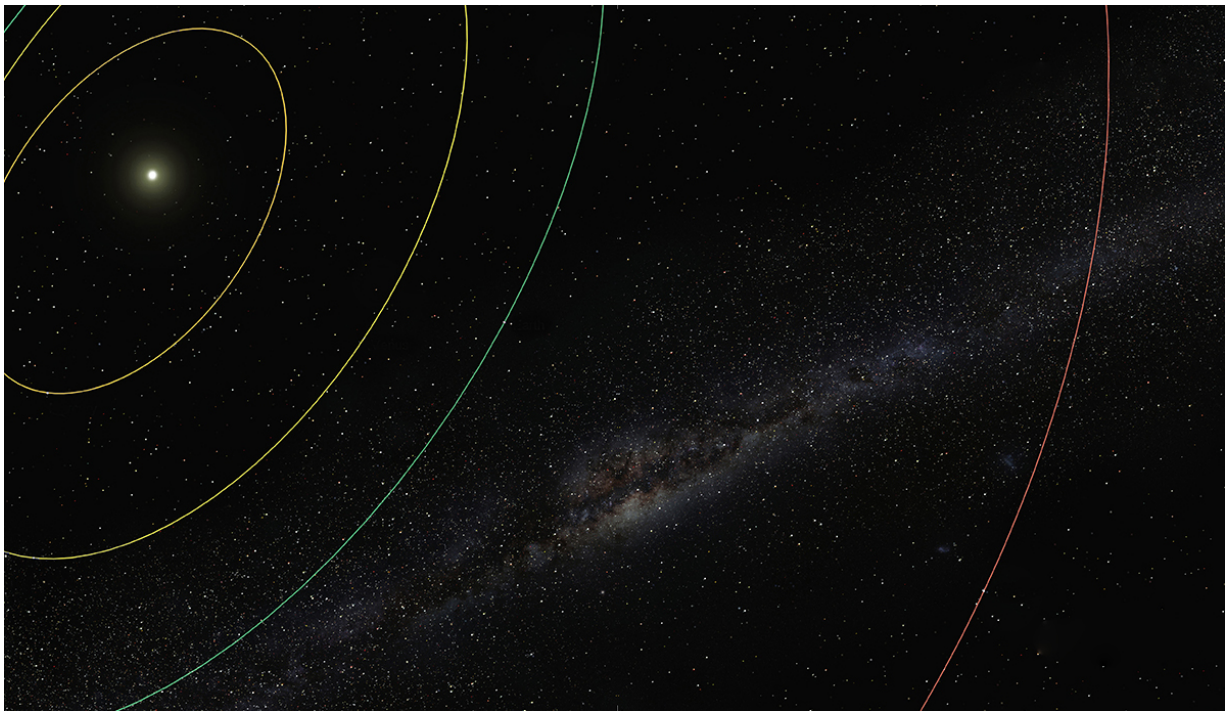
因此，行星系统在本质上是混乱的。经过亿万年的演变，轨道蔓延（orbital creep）出现了，这是一种混沌扩散的现象。从根本上来说，这种蔓延的细节是不可预测的，但我们能够对蔓延的不同时间线做出预测。行星位置或速度的微小变化，即便只是几毫米的变化，都能导致它们几十亿年后的天差地别。甚至爱因斯坦相对论所带来的影响（虽然很难描述典型的行星速度和质量）也在某种程度上决定了我

们对这些宇宙历史的认知，因为这些影响改变了运动世界的运行方式。



太阳系内部的岩石行星轨道，从外向内依次是火星、地球、金星、水星的轨道。

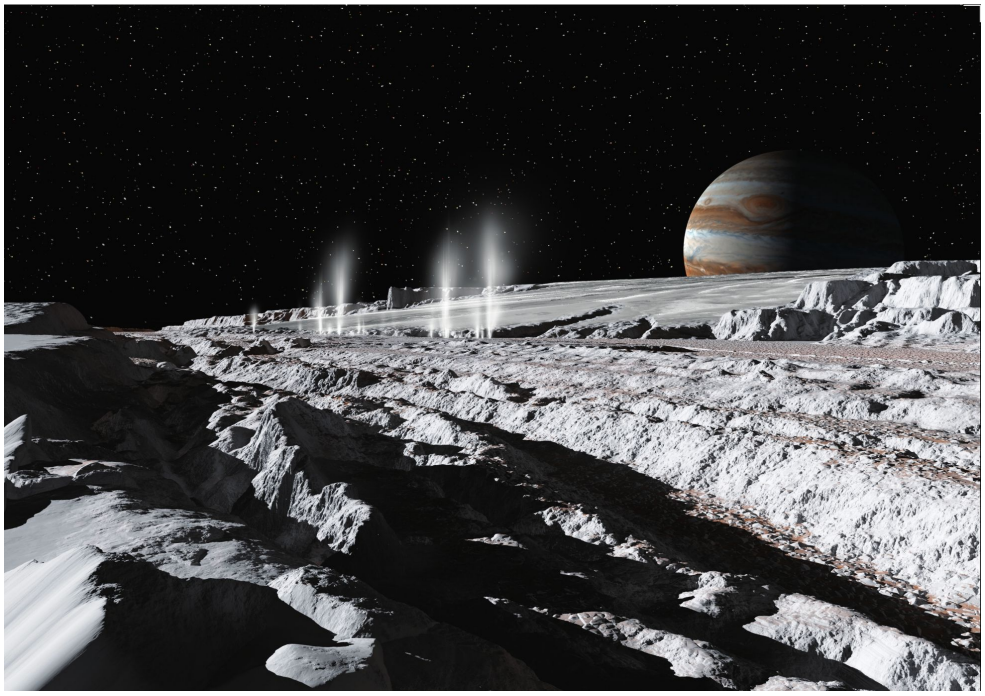
10^{12}米



水星、金星、地球和火星的轨道（从左至右）。

10^{11}米



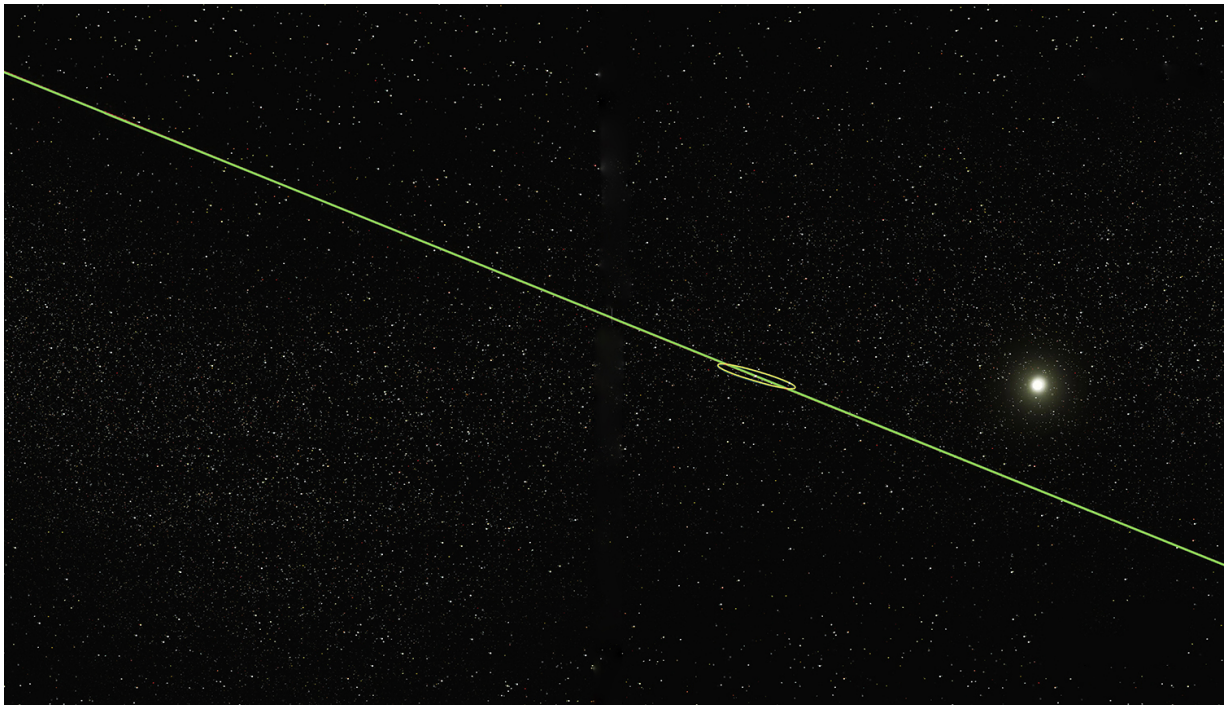


火与冰：木星的卫星木卫一（左页）及木卫二（上图）都经历了引力潮汐。

潮汐力也在行星的故事中扮演了一个重要角色。潮汐力是差动拉力（differential pull），使得同一星体的“近端”和“远端”受力不均，这是引力依赖于距离，也就是平方反比定律（the inverse-square law）所导致的结果。随着时间流逝，潮汐使得椭圆轨道变成了圆形轨道，释放出动能，并将之转化为行星内部的摩擦热能。

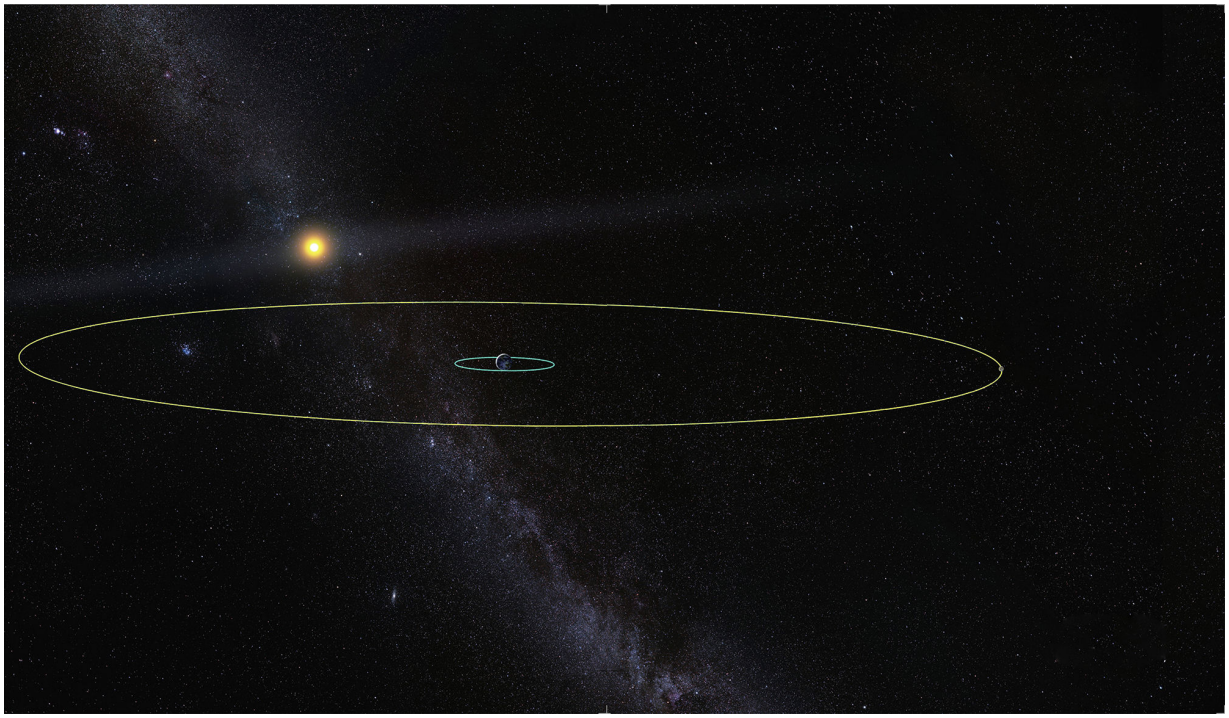
潮汐修饰了太阳系的很多细节。很多卫星进行的同步运动（即自转周期与公转周期一致）就是潮汐的产物。木卫一上的热火山，土卫二、海卫一和古老的冥王星上的冰火山，以及木卫二、木卫三、土卫六和很多天体上可能存在的内部黑色海洋，都是潮汐力作用的结果。

随着旅程的推进，我们来到了月球——这个黑暗的、满是尘埃的灰色星球，同时也是地球的同伴。我们发现它被困在地球身边，并因为潮汐力而形成了现在的结构，但月球轨道仍在不断演化，每年都会远离地球几厘米，而地球也逐渐放缓了自转速度。



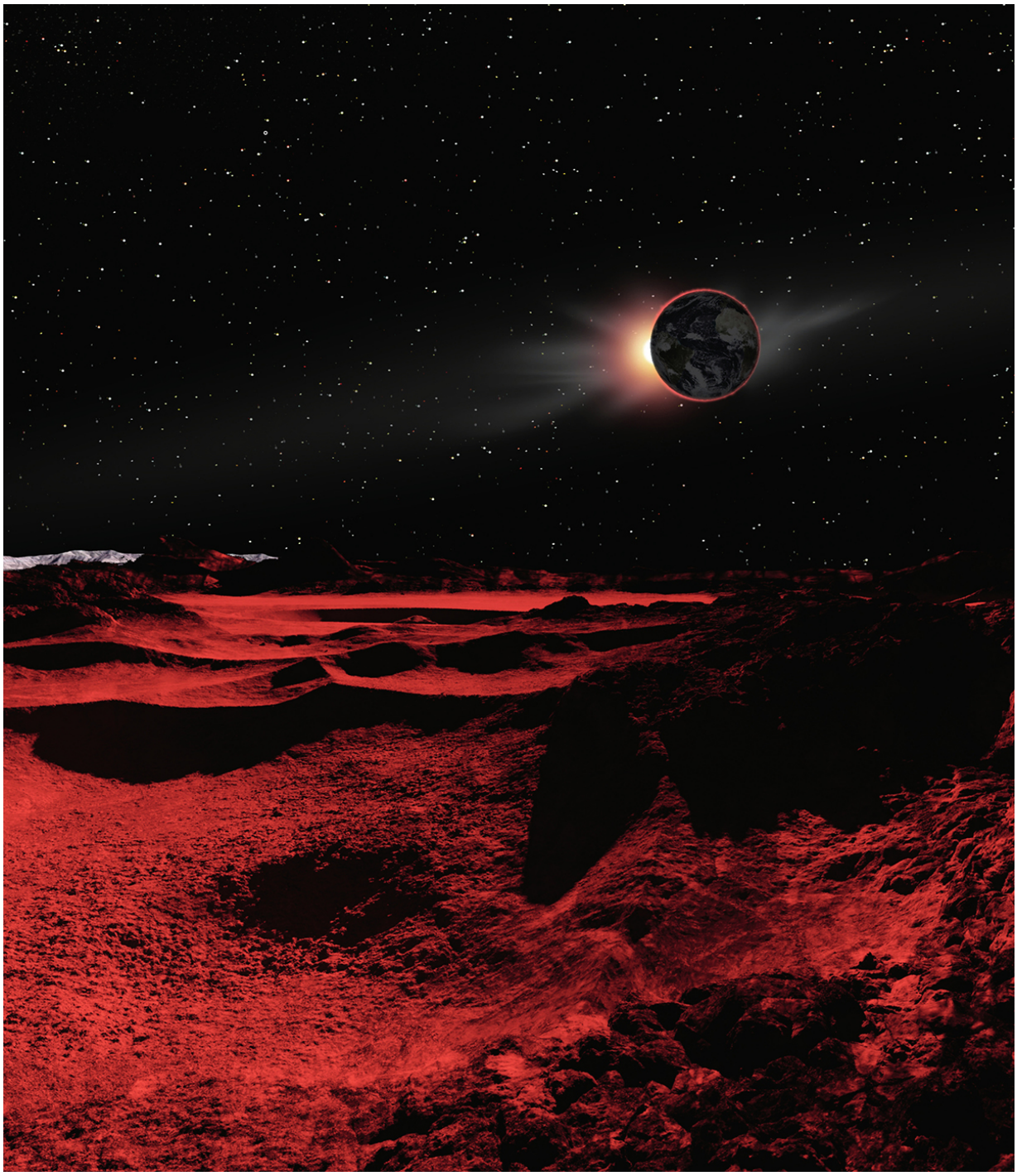
地球轨道和月球轨道。

10^{10}米



让我们纵观一下10^9米这一尺度：月球轨道环绕地球，而离地球更近的是地球同步轨道，例如人造卫星的轨道。

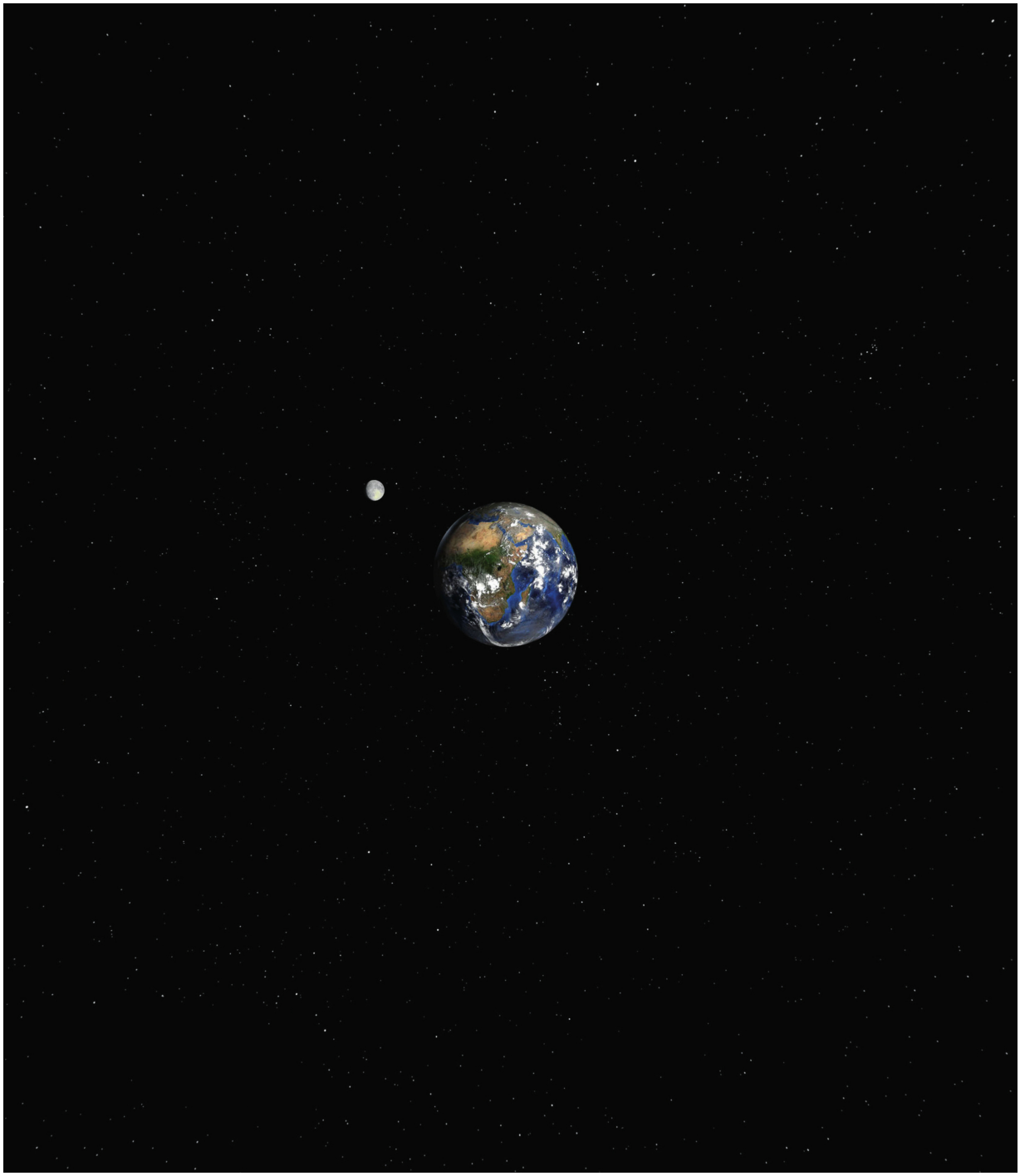
10^9米



月食时从月球上看到的地球。

这些变化能够追溯到很久以前。地球上海洋的潮汐运动，从6.2亿年前就被记录在沿海海滩的砂岩中，该记录显示，那时地球上1天约有22小时。结合对“月球如何形成”所做的最佳猜想（即月球是因早期版本的地球与一颗火星大小的原行星发生了一次大型碰撞而形成的），我们能够猜测，大约45亿年前，那个年轻的地球自转得更快，每天的时间更短。由于地球自转超前于月球公转，所以海洋潮汐形成了，并且规模非常巨大。多少亿年后，这些拍打土堆的水和被侵袭的岩石地幔仍然没能完全消除那种原始动荡系统的强劲势头。

这是件令人开心的事，因为这些潮汐是一些有形的链接，它们存在于我们的日常生活和我们在宇宙中的动态位置之间。正是因为你生活在一颗由这些力所塑造的行星上，所以你能用一个手电筒向宇宙中释放探测信号。地球今天的条件创造了让人类这种有机生物存在的机会，也正是这些条件提供了线索，让我们知道我们是如何到达这里的。



10^8米

5
我们称之为地球的世界

10^8米，10^7米，10^6米，10^5米，10^4米

从10万千米到10千米

从地月距离的26%到海底的夏威夷冒纳凯阿火山的高度

地球是什么？

这个问题的答案取决于你的提问对象是谁。对行星科学家或者地球物理学家来说，地球是这样一个球体：内核是铁，其上覆盖着炙热岩石，表面为薄薄的一层结晶矿物质。对天文学家来说，地球是少量恒星物质的凝聚体，其重元素来自很早以前就已死亡的前代恒星天体。对运算数字的统计学家来说，地球只是可观测宇宙内无数天体中的一个数据点而已。

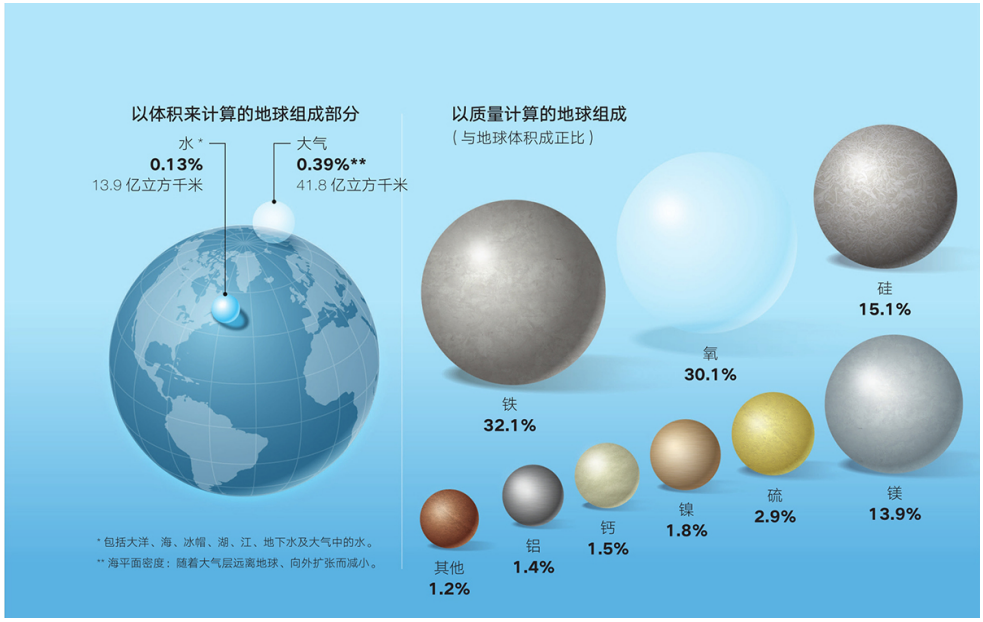
这是一颗环境适中、外露层缓慢演化着的行星。对生物学家来说，地球是个温床，孕育了我们称之为生命的动态现象，而生命几乎代表了存在着的所有动态现象。在过去的漫长岁月里，这个世界的面孔一再改变，地球从可怕的岩浆海洋变成了有陆地的海洋星球，并反复经历从炙热到冰冷之间的所有气候。有时，它蜷曲的表面会产生活着的东西；有时，巨大的灭绝事件消灭了整个有机生物一族，使得地球表面贫瘠到几乎一无所有的程度。

地球既非常古老，又非常年轻。你能拿在手上的地球表面最古老的岩石可以追溯到约35亿年前。在火成岩（如花岗岩）中，你所能找到的密集的小锆石晶体可以追溯到约44亿年前，这着实令人震惊。抛开年龄，地球目前还很活跃：它仍然在制造新的火山岛，地球深处的

动力驱动着强烈的偶极磁场（dipolar magnetic field），表面的生态位仍在进化出新的有机物种。从这些方面来看，没有哪个瞬间能真正代表地球的完整历史或全部未来。地球正是这样一颗星球。

但是对你和我而言，除了这些缤纷多彩的科学观点，最重要的一点在于：地球是我们不可磨灭的一部分。

地球唤醒了丰富的景象、声音、气味和味道：你通过双脚感受到坚硬的大地或者漂在水面的轻柔海浪；你在宁静的清晨雾气中看到太阳从海平面升起的景象；你在夏日暴雨后闻到泥土和植物的芬芳；当夜色逐渐笼罩大地，你看着夜空中亮起的星辰时，心中涌现出激动而震撼的感觉。同时，地球对我们而言，也是一个令人不安的，有时还颇为危险的家园：肆虐的狂风摧残着我们，而暴风雪、台风和大地本身的剧烈晃动会把我们掀翻在地，让人无处可逃。



地球的组成

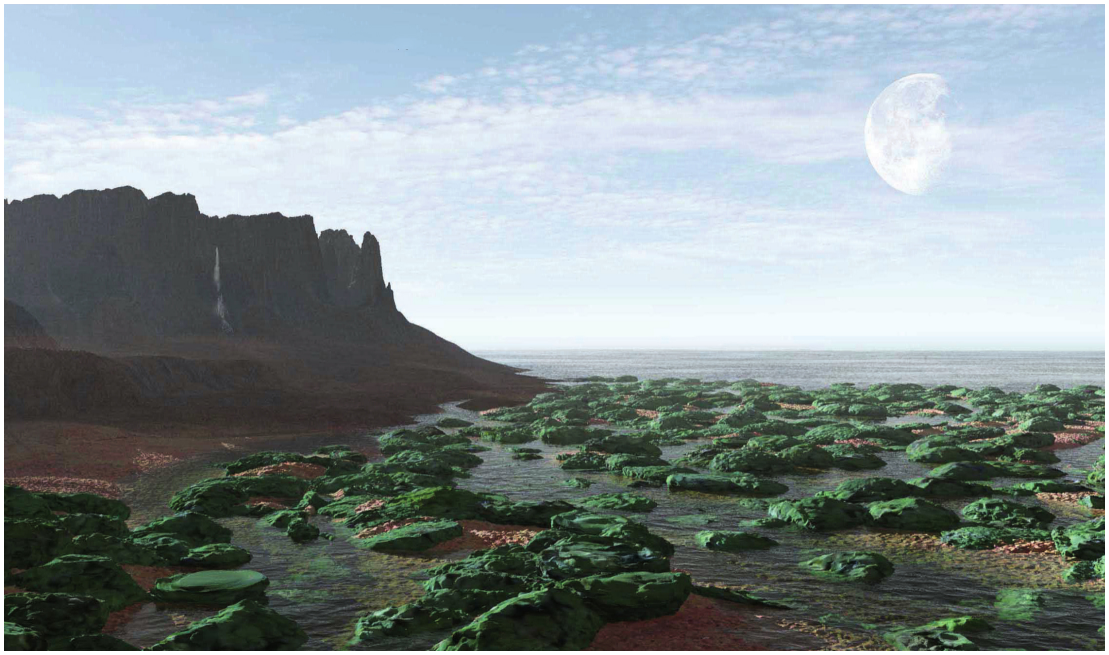


地球历史久远，从冥古宙（46亿年前）一直发展到显生宙（5.41亿年前至今）。

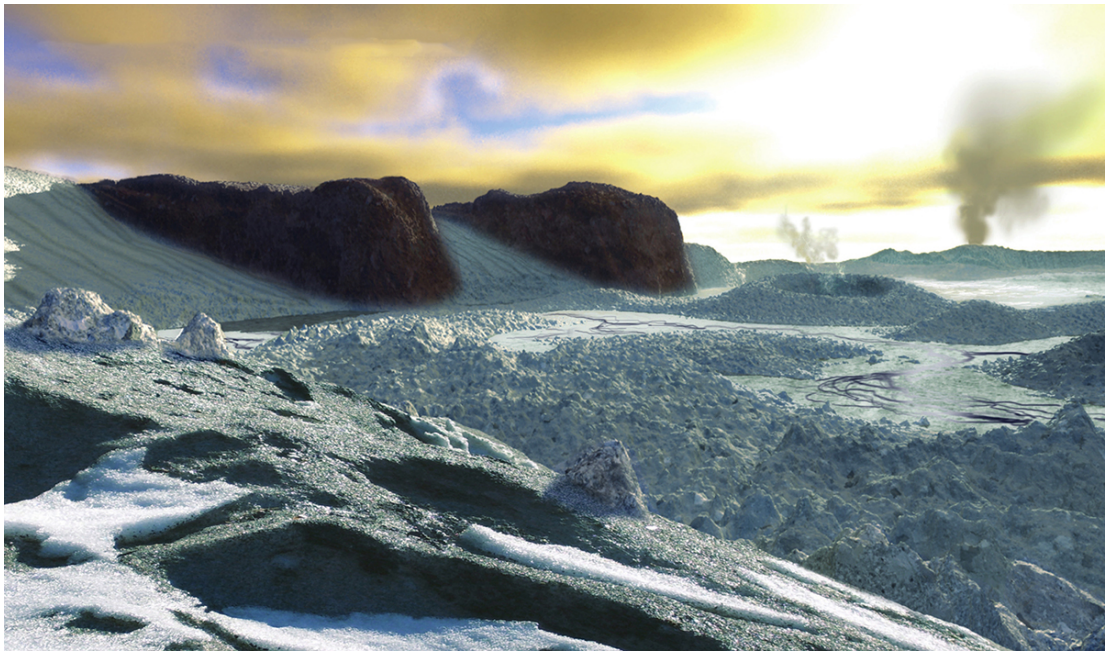
冥古宙，开始于46亿年前。



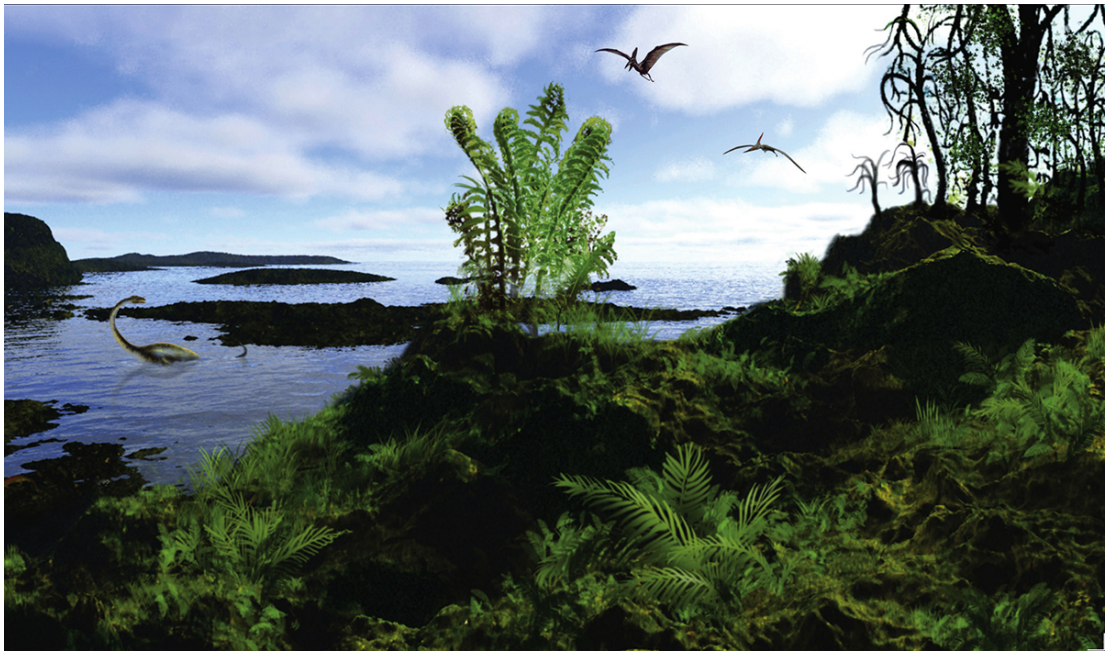
40亿年前：太古宙出现。



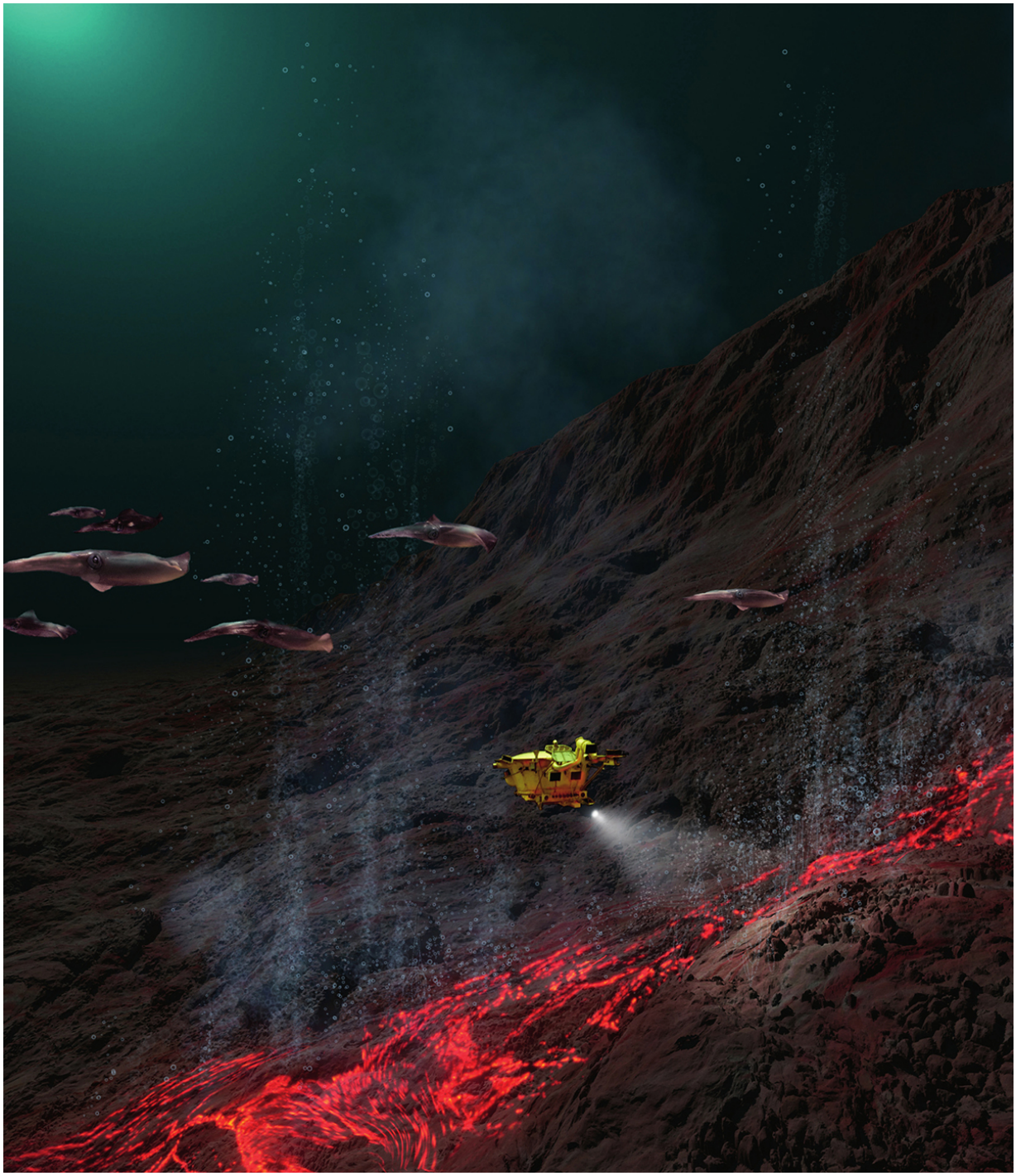
30亿年前：早期微生物生成了叠层石。



约24亿年前：全球冰川事件创造出一个“满是雪球的地球”。



1.5亿年前：恐龙生活在郁郁葱葱的侏罗纪。



对一座火山的洋中脊的探索：这是一座科学界的金矿，能够开采矿产资源，但它也是一个充满诱惑又令人担忧的地方。

我们用双手挖掘这个世界，用工具勘探这个世界。我们雕刻这个世界的物质，让它成为我们需要的形状，或者只是我们想要的形状。

就像所有有生命的物体一样，我们持续不断地将一组化合物转化成另一组，转化成我们呼吸的空气、食用的食物、燃烧的燃料。几十亿岁的基层岩石成了我们的家园、学校或者雕塑的建造原料；自然压缩形成的金属层成了我们的桥梁、汽车、自行车、结婚戒指和电路；精炼的矿石成了核反应堆的燃料；艰难提取出的稀土元素指引着电脑和智能手机中的电子并增强其磁场。

我们变得非常精通这种改造，甚至在为自己谋利方面有点太过精通了。我们改变了地球的平衡，给如今的生物和环境施加了巨大的压力，而它们正是支持人类生存的重要系统。

当然，人类并非第一个把全球环境搞成一团乱的物种。大概在25亿年前，微生物物种开始将它们所产生的废物排泄到大气中去，这种废物便是氧气。这样的“化学污染”标志着星球上的化学、气候状态以及紧随其后的所有生命形式即将发生巨大变化。

那些早期进行光合作用的氧元素制造者在物质上并没有什么选择余地，它们只是简单地将自身进化所产生的代谢工具进行了相应的分配。我们人类则与它们截然不同，而且十分有趣，因为我们清楚地知道我们在做什么，并且通常对所采取行动的结果有一定意识。

以同样的评判标准来看，虽然地球是人类的诞生地及婴儿床，但它同样对我们毫不怜惜。地球为何“刚好适应”人类？并没有什么特别的原因。毕竟，人类来自这颗星球，而非其他地方。无论人类对地球做了什么，对这里的生命做了什么，这颗星球都会走下去，进化也会持续进行，而我们所处的这一时代，最终也会成为未来的沉积岩中薄薄的一层。

这是因为（和任何行星一样）地球是个强有力的热力、化学、放射性机器。许许多多现象被编排进这颗行星的表面和内部，也被编织进了时间。从气候到化石燃料，我们认为理所当然的特性，都是几十

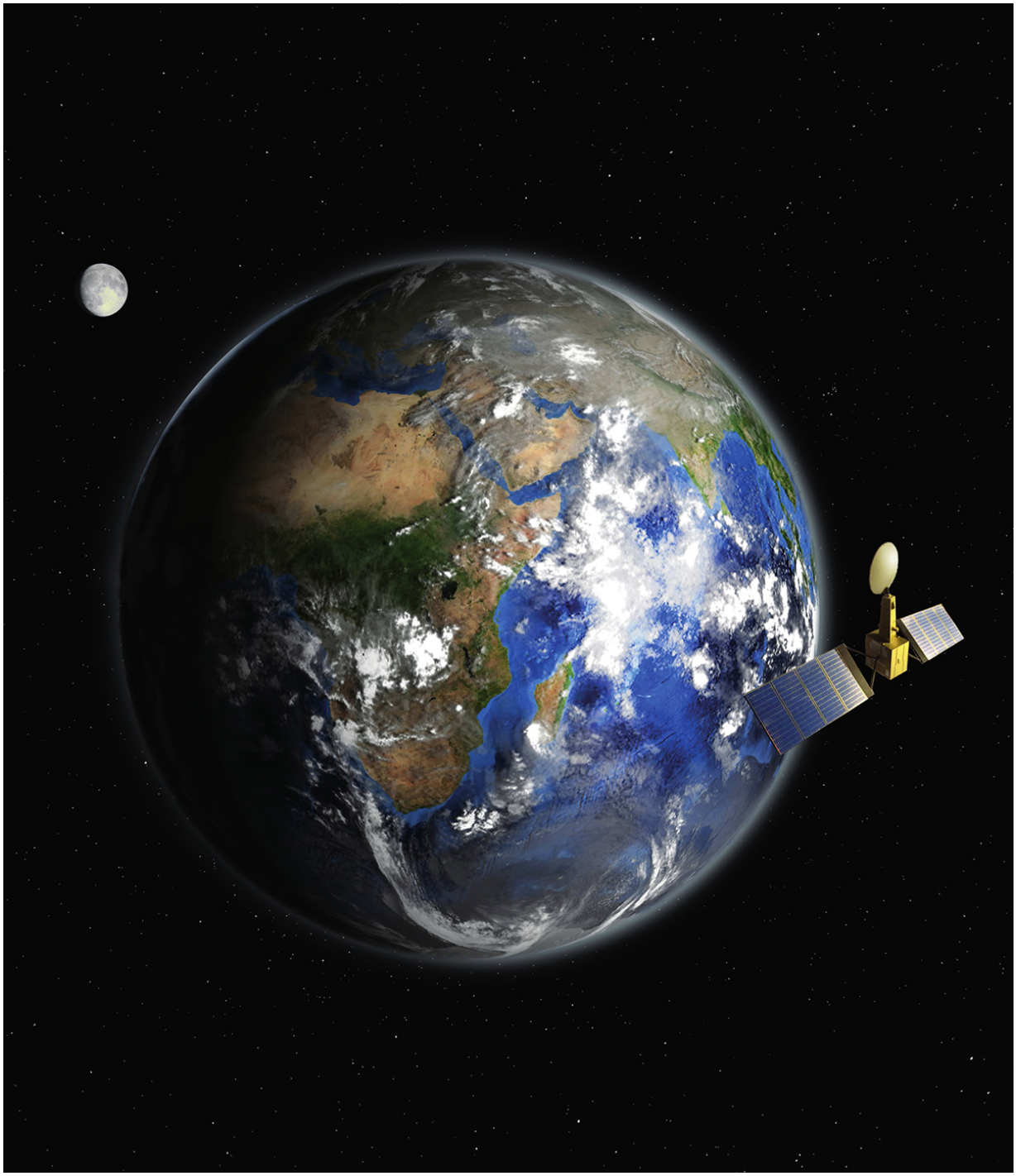
亿年以来的深度循环和偶然事件的结果。事实上，我们在地球上享有的所有事物都是更宏大故事的产物。

吸收、搅拌、辐射

这场宇宙之旅逐渐带我们来到熟悉的领域，行星上环环相扣的过程开始揭露出它们自身的秘密。随着我们逐渐接近42 000千米这一高度，也就是地球上方的同步卫星轨道高度，一个几乎完整的半球体出现在眼前。在这半面，我们能看到岩石行星的某些主要动力，这些力驱动着其表面的热动态和环境状态。

在地球处于白昼的这一边，太阳以每平方米1 300瓦的辐射量照耀在大气层之上。这几乎就是一个电水壶烧水所需的能量，看上去似乎并不多。

若是把地球整个半球的所有太阳辐射全部加起来，就会有总数约174皮瓦（10^{15}瓦）的太阳能照射在大气层上。这当中有高达89皮瓦的能量被地球表面直接吸收，剩下的能量会被地球表面反射，或者被大气吸收，被雨云反射。



10^7米



地球大气的表层接收到了大量的太阳光子。

以人类的标准来看，这一能量的总量令人震惊。当前人类的能量消耗预估量为一年1.6×10^{11}兆瓦时，意味着在一年的8 760小时中，我们使用能量的功率大约是0.018皮瓦。据估测，地球上所有生命（加

上光合作用有机物、植物的水分蒸腾以及生命从化学和地球物理能量中所获取的）消耗能量的速率约为0.1～5皮瓦。换句话说，尽管地球上的生命留下了强有力的足印，但以宇宙尺度为衡量标准，我们几乎没怎么吸收和使用太阳光带来的福泽。

地球的本源热量来自它仍在熔融的内核，相较太阳能而言，这种热量也是最温和的。所有冲刷着地球表面的地热和地球化学能量总计约为0.047皮瓦。

因此，地球绚烂明亮的白昼一侧并不只是一道亮丽的风景线，它意味着地球正持续不断地吸收电磁辐射。地球反射光子，但同时也像一块巨大的光子海绵，否则这些光子将会衍射到宇宙的其余部分。我们的地球可能只是一颗小小的星球，但投下了长长的影子。

然而这些能量去了哪儿？就像任何实物一样，地球的趋势也是不断地丢失多余的能量，这样便能和周围的宇宙达到平衡。不过有个例外：地球表面覆盖的大气和海洋减缓了能量的损失。行星逐渐升温，促使红外光子射入太空，以恢复平衡。但多数能量在逃逸到太空之前会转变为其他形式并经历过渡。这使得大气、海洋及它们的化学成分发生了波动，使这颗星球变成了一个新奇的引擎。

我们能够轻易地观测到这些能量再制造机器的运作。纵观地球，我们能够看到大气的流动，看到大洋横跨几千千米的距离。这颗自转的星球将这些流动的物质拉至自己周围，形成了一层气体、一层液体。但是太阳的能量会对这一切施以大规模的干扰。举个例子，温暖潮湿的气体从赤道等热带地区蒸腾上升，在移动到南边和北边前，上升到10～15千米的高度，最后这些气体在中纬度地区沉降下来，导致了全球范围的南北大气气流循环。极地地区也存在类似的气流，只是机制不同而已。

由于地球自转，赤道地区的空气移动得最快，这些无法和其他地区同步流动的空气会从赤道处被转移走。结果，大气层在这里经历了

柯氏效应，使得空气朝着相对地球表面而言偏东的方向移动。

这样的偏移导致被称为喷射气流（包括亚热带和极地）的高速大气气流在距地表大约10千米处形成，并环绕着地球。如果你曾在北美和欧洲搭乘飞机，你可能体验过喷射气流，它会使你由西向东的旅程加快，使你由东向西的返程因逆风而变慢。

喷射气流同样有助于区分地球的大气，将冷、热空气分隔开来。但是如果高纬度的喷射气流变得微弱或者发生了曲折，冷空气就会降到较低的纬度，并给这块地方的人带来麻烦。

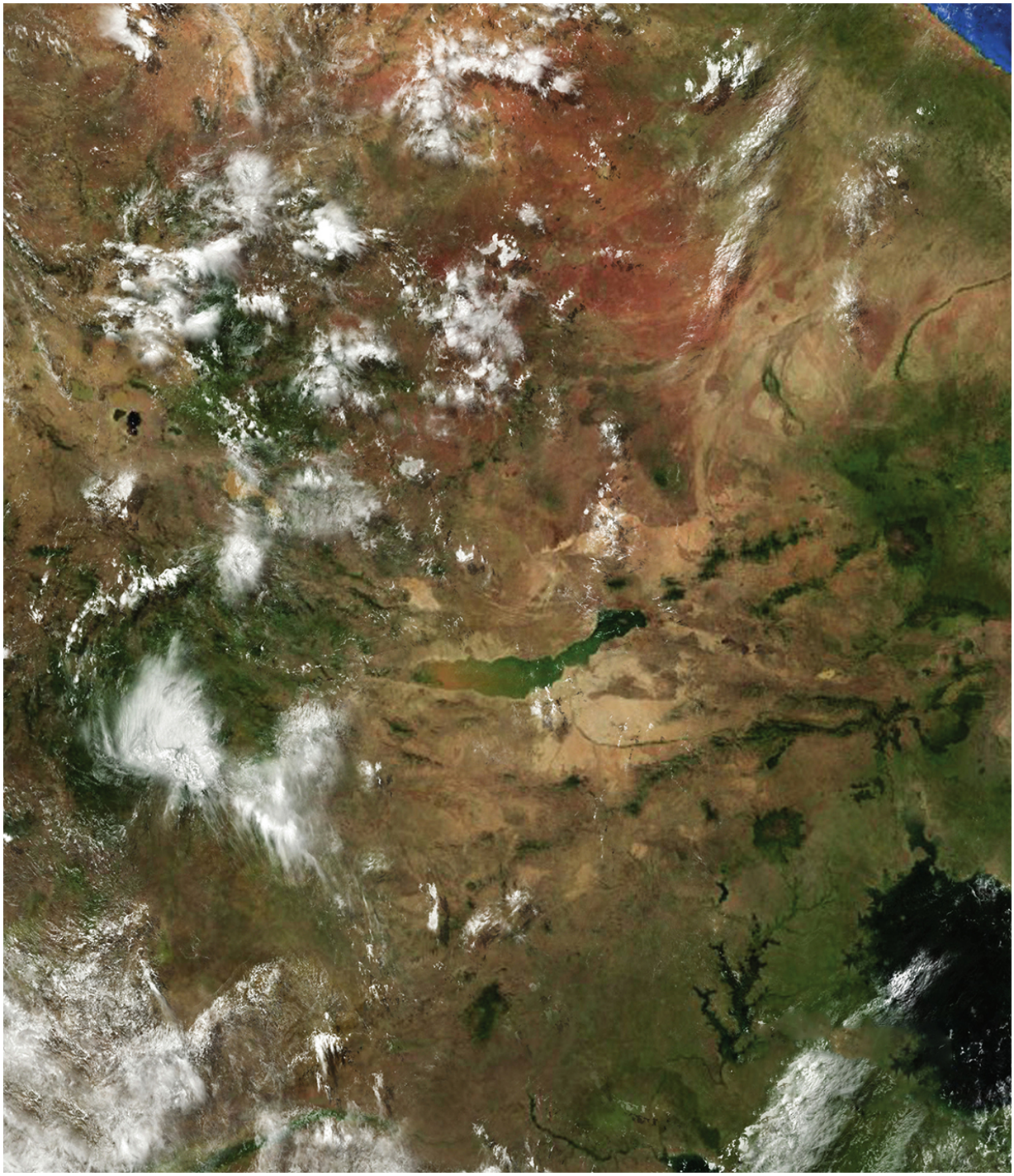
然而，对一个充斥着行星的宇宙来说，地球呈现的不过是这些现象中最温和的情况。太阳系的其他星球中，巨大的气体行星木星每10小时自转一圈，有着多种多样的大气喷射，规模极其巨大，如同环绕木星的巨大彩色条纹。土星看上去平静又典雅，但实际上，在其南、北两端有着大型的极地大气涡旋，而赤道高空风速可达每小时1 800千米。

受太阳操控的地球大气的狂暴行为还孕生了另一个产物：天气。最壮观的天气是在低气压区域产生的，在这里，大量温暖潮湿的空气上升到天空中，形成了热带风暴，或者称飓风、龙卷风或台风。它们呼啸着席卷地球。

这些旋转的野兽让我们得以一窥冲击地球的纯粹力量。水从海洋中蒸发，又在形成飓风的区域重新凝聚，释放出大量的热能。根据估算，一次大型飓风一天之内所包含的能量是地球上所有发电量总和的200倍。

太阳能并不只是简单地使地球变热，或给地球带来麻烦；地球的化学成分也因其发生了变化。在过去45亿年里，来自太阳的紫外光帮助包括水和氧气在内的平流层分子分离，促进了地球大气层蓬勃的光化学反应。太阳光也持续地照射在地球表面的矿物质上，引起了化学

和结构变化。当然，通过对生命的催化过程，尤其是光合作用，太阳能显著影响了化学蚀变（chemical alteration）。某些变化只需简单的一天，比如一簇藻类在浅海环境中的生长；另外一些变化可能会持续几个世纪，比如树根腐烂，或是微生物留下的酸性物质改变了地球表面的岩石和矿物质。

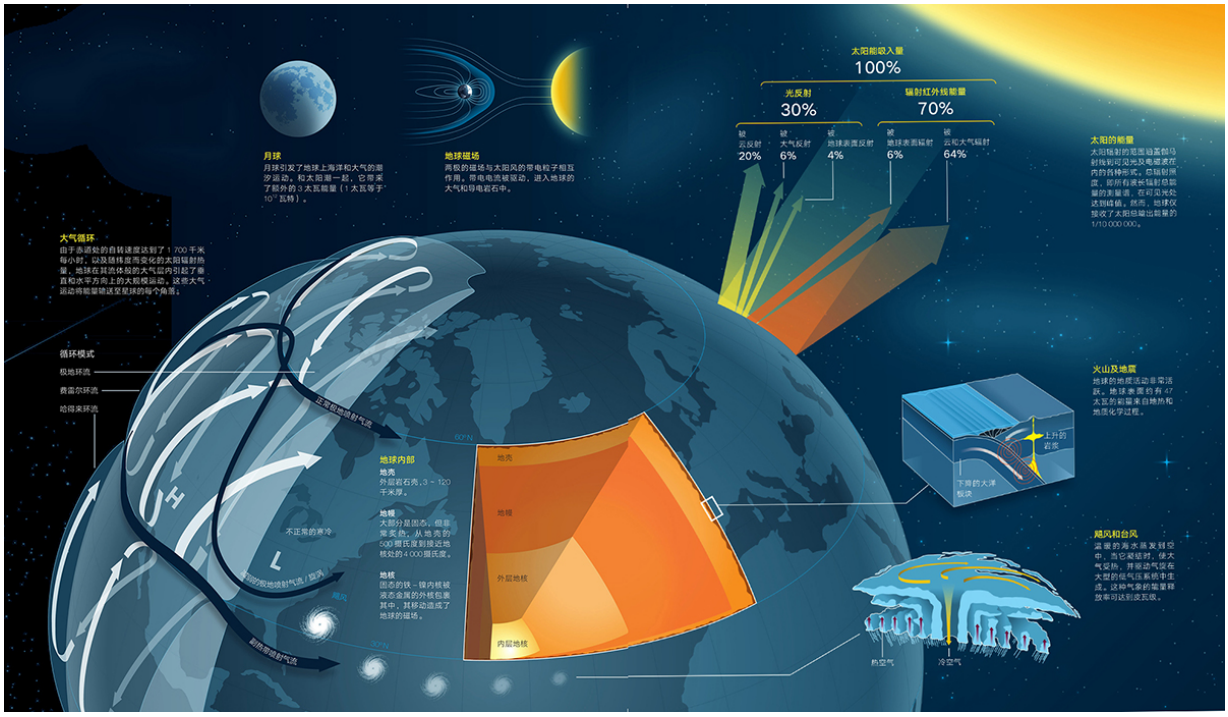


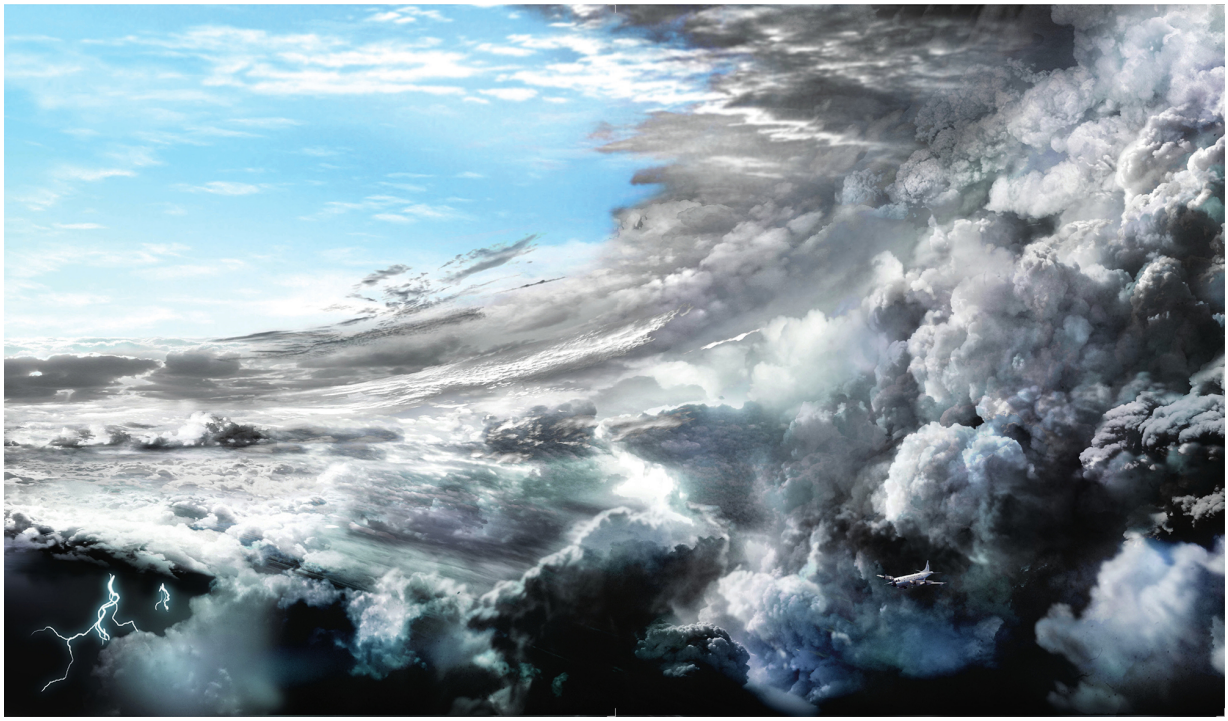
非洲，包括东非大裂谷上方。

10^6米

地球的机制

就像任何天体一样，地球会吸收并散逸能量，以保持其周身的热力学平衡。但能量的流转导致了复杂的、遍及整个行星的现象。





暴风眼之中：气象飞机在飓风眼壁中探险。

朝恒星前进

地面上方万米高空的一片区域，是一个有结构、有活力、受能量驱使的多样世界。这颗行星是人类与宇宙之间最具意义的联系。然而，自现代人类崛起后，我们之中的大部分可能一生都囿于方寸之间，不会远行。这是真的，但也有一些特殊的例外。

自20世纪60年代起，超过530个人类在外太空待过，或者曾进入亚轨道飞行，或者在地球同步轨道上穿梭。我们进行长途穿梭，9次往返于地月之间，其中6次踏上月球。这些经历不但展现了我们的技术力量，也让我们对自身所处的世界有了相当不同的认知，比之前几十亿现代人类所提供的知识都要丰富。

这些幸运的宇航员、太空人以及航天员发现，当他们目睹眼前的一切时，心中满是敬畏。以下是他们心目中的地球：

我认为我们所经历的最激动人心的时刻发生在我们在月球上看到地球升起时……这使我们意识到我们所有人都只存在于一颗小小的星球上。从370 000千米之外看它，它真的就是一颗小小的行星。

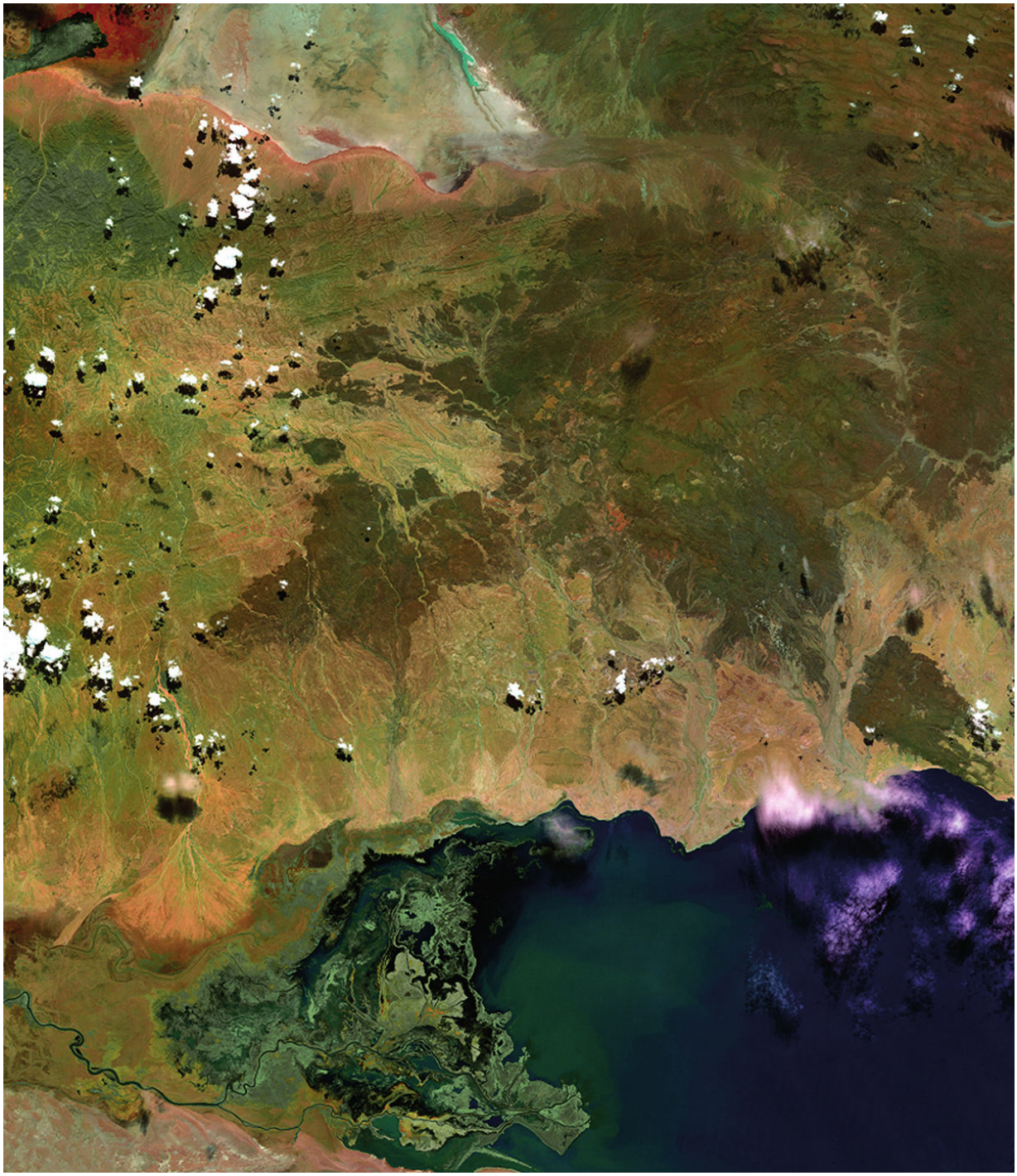
——弗兰克·博尔曼（Frank Borman），《阿波罗8号》，1969年1月10日

地球小小的，透着明亮的蓝光，如此的孤独。这是我们的家园，我们必须像保护神迹一般保卫它。地球绝对是圆的。我发誓我从来没意识到“圆的”这个词的含义，直到我从太空中看到了地球。

——列昂洛夫（Aleksei Leonov）

我的第一眼满是环礁和云朵：明亮的深蓝色海洋全景，间杂绿色、灰色和白色的阴影。靠近窗户的我看到太平洋的运动由于地球的巨大弧度仿若镶上了边框。它有着薄薄的蓝色光晕，除此以外就是黑色太空。我屏住了呼吸，怅然若失。我感到了莫名的失落。这是一场伟大的视觉奇观，然而却寂寞无声。此刻没有大型的音乐剧伴奏；没有奏鸣曲或交响乐来庆祝胜利。我们当中的每一个人都只能谱写自己的音乐篇章。

——查尔斯·沃克（Charles Walker）



地球富于变化的色调：从地球上空看到的图尔卡纳湖，位于肯尼亚和埃塞俄比亚北部。

10^5米

我们对月球已经了解了很多，但我们真正了解的是地球。事实上，月球到地球的距离如此遥远，以至于你竖起你的拇指，便能将地球藏在拇指后面。你曾经知道的一切，你的所爱，你的事业，地球本身的问题……所有一切都在你的拇指之后。我们是多么微不足道，而我们又是多么幸运，能够拥有这具身躯，能够享受此处的生活，享有地球本身如此绚烂的景致。

——吉姆·洛威尔（Jim Lovell），阿波罗8号和13号的宇航员，
在2007年电影《月之阴影》中接受采访。

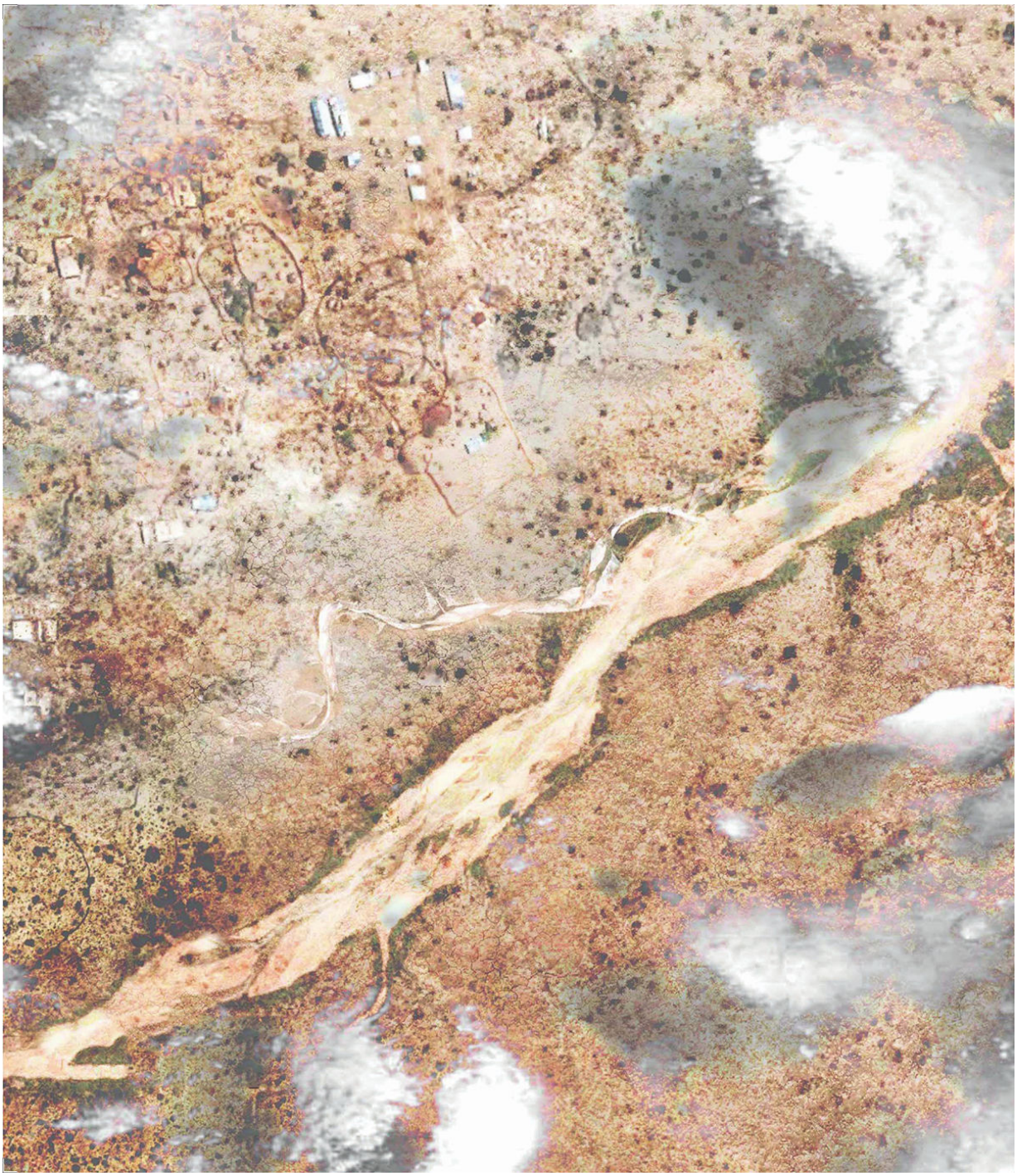
中国有个故事，说有些人被派去伤害一个年轻的姑娘，而看到她的美貌后，这些人变成了她的保护者而非侵扰者。这就是我第一次看到地球时的感受。我情不自禁地想要敬爱她，珍惜她。

——王赣骏（Taylor Wang）



肯尼亚上空：人类存在的第一个小小迹象。

10^4米



随着我们的靠近，复杂生命的讯号开始在地球环境中显现。

10^3米

6
生命的法则，未曾停止的探索

10^3米，10^2米，10米，1米，10^{-1}米

从1千米到10厘米

从一圈短暂散步的距离到近乎你手掌的大小

此前，我们已经从整个星系如同闪闪发光的微粒尘埃时的尺度比例，推进到整个行星不过是几个固化了的矿物这一尺度。现在我们所来到的尺度中，人类就像分散在世界各地的微粒一般。从开始直到这一步，我们大概跨越了24个数量级。

我们花费了一生的时间，从大部分都是水的多细胞微粒中，透过细胞膜去看，去听，去闻，去感受。不知为何，我们总是通过这些感官来构筑意义。人类有一种奇特的属性，被称为意识，人类也有一种奇特的能力，被称为智力。

也许宇宙中的其他复杂生物也是以同样的方式被创建的，只是我们目前还不知道这是不是事实。很可能，我们的生物学并非唯一一种创造生命的方法。我们也不知道人类的智力是否能够体现宇宙中任何地方的智力的运作方式，或者智力究竟代表了什么。它可能只是一种破解迷宫或者打开罐头的能力；它也可能拥有更好的衡量方法，比如推演数学证明的能力，以及推导宇宙性质和起源的能力。

意识让这些难题更加令人迷惑。几千年以来，意识让哲学家、科学家、诗人和艺术家们感到疯狂，他们苦苦摸索意识究竟是什么。很多现代神经科学家可能会说：意识是人类大脑整合信息的方法，是通过感觉来组建一个连续的平滑的世界模型的方法。但这也意味着意识

比大脑其他各个部分的总和还要重要。意识可能是一种崭新的、无法简化的状态，由黏在大脑上的电化学造就。



随着我们的视线逐渐靠近，地球上的各种景观开始遍布复杂生命的痕迹。

总之，人类的情况有点滑稽。我们所处的位置非常不适合了解关于世界之性质的客观真理：我们处在一个奇异的、有自我意识的、有血有肉的微粒之内，而这一“肉身”还在缓慢地穿行于时空之中。然而，正是我们的天性使我们提出了这些棘手的问题。我们很容易找出理由，证明人类需要对自省这一行为本身进行反省。

这一点很让人不悦，就像是试图编写一段能够诠释和调试它自身的计算机代码，或者让一位艺术家画一幅看上去像是在画一幅画的画。对我们穿越存在物的所有物理尺度的旅程而言，这也是一个挑战。我们真正能做的，就是在一颗小小的岩石行星上安家，围绕着可见宇宙中一颗普通的恒星转动，并交叉手指进行祈祷，以此帮助我们弄清楚生命的现象。



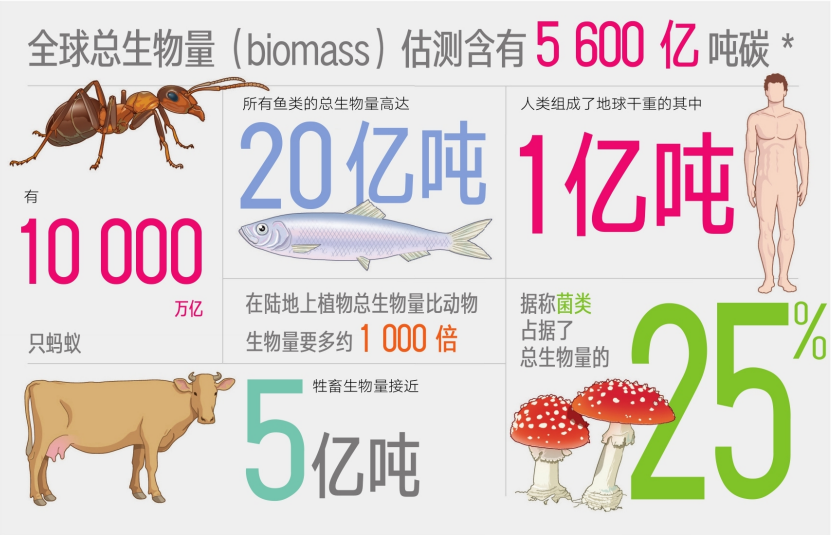
几千万年前，从地球上的一个小水坑向外注视着宇宙的水坑。

更糟糕的是，生命的基本形式充满了欺骗性。几乎没有哪种生命能永远保持它第一次出现在我们眼前时的样子。比如说，章鱼并不仅仅是章鱼，它还与其他的有机物密切相关，并嵌入史诗般的生物进化网中，就连它的身体也是一处景致，在此，亿亿万万的小实体参与了一场“达尔文战役”。

在一个更基础的层面上，我们所知的全部生命似乎都是由无数个微小的、反复变化并不断重组的结构互相作用而产生的新型产物。正如我们所见，这些分子基石是质子、中子、电子和电磁力间的物理作用所引发的直接结果。

如此微小的组成部分简单地遵循着基本的宇宙“规则”，而这一点早已在138亿年前便刻入了宇宙中。如今，这些微小的部分齐心协力，构筑了星系、恒星、行星、大象、人类、鸟、昆虫，以及宇宙中其他不知名物体。

这一切是如何发生的？这个问题正是科学和哲学研究的绝对核心，也是我们从自身利益出发，努力建构一个合理的自然场景的核心。这个问题仍悬而未决。



*不含细菌

地壳上的生命

关于存在物的这些难题，我们通过更好地量化自己在宇宙中的家而取得了一定的进展。这一量化过程开展得相当容易。例如，地球地壳外层的70%被液态水覆盖，这些区域代表着形形色色的生物栖息地。这里充满了大大小小的生命，从微观的单细胞到目前存在于世的最大的多细胞有机生物。

与水生生物完全不同的陆地生物占据着另一组栖息地，它们几乎与海洋处在平行维度上。即使是在同一套基本规则之下，这里的生命仍有机会扮演不同的角色。陆地涵盖了从灌木到沙漠，从巨大的冰川冰帽到热带岛屿，从山川到平原的各种景观。



两种有意识的物种（吉普车中的人类和车外的象群）在互相观察。

10^2米

当人类试图解析自身的起源时，最引人入胜的景点之一坐落在东非大裂谷。这一区域是一道不可思议的地理学鸿沟。在这个地方，地球的地壳板块实际上是撕裂的，使脆弱的矿物带变成了完全不同的铜绿。

在东非，从厄立特里亚到莫桑比克，大裂谷这个长度超过6 000千米的大规模地壳构造系统衍生出了一系列超常的地理特性：比如复式火山（stratovolcanoes），特别是海拔将近5 900米的乞力马扎罗山；山谷两侧到谷底的落差可达600米；大裂谷中有幽深的、海峡似的水体。维多利亚湖是世界上最大的热带湖，有面积将近70 000平方千米的热带淡水，滋润着今日的尼罗河。

在大峡谷内，我们发现了关于人类起源的线索：早期人类物种的化石残骸。这些残骸书写了我们的史前历史，改变了我们对这段历史的认知。

早期人类物种中的一种，被我们称为能人，他们似乎存在于280万年～150万年前。另一种是直立人，第一次出现在约190万年前。其他的原始人类化石也被一一附上了具有辨识度的标签，但事实上，我们尚未完整描绘出百万年前有哪些人种漫步于地球，他们之间又有怎样的联系。我们也并不知道这些人类物种的分布地有多广，但很可能，他们活动的范围只是区域性的，并未延展到整片大陆。

看看是谁在观察

尽管直立原始种占据了漫长的历史，但今天，按现代人类的标准来说，大裂谷仍然有很大一片区域的动植物，它们彼此毫无关联。

比如，在肯尼亚，我们跨越不同自然尺度的旅程来到了某个象群头顶上的一小片的空间。这群大象在观察四周，也在被观察：被金属吉普车里那些紧张不安的人类观察。

再旋转几下长焦镜头，我们就来到了一个厚皮动物个体上。一只啄牛鸟停在大象身上，从大象粗糙的皮肤褶皱中撬啄下一只肥厚的虱子。



10米

如果将其置于一个更宏大的背景中来考察，那么这一幕将是非常耐人寻味的。这是一只大型的哺乳动物，一只重达4～7吨的多细胞生物。它用身体内的子宫孕育后代，而且它的腺体能够在生产过后至少为后代提供5年营养丰富的乳汁。大象的大脑是一个巨大的、拥有3000亿个神经元（比人类神经元数量多3倍）的大型网络。这些生物表现出了复杂的、显然利他的社交行为，几乎可以确定它们是有意识的。它们当然有智慧，即使这种智慧与人类的智慧并不完全一样。

另外，大象那羽毛浓密的共生伙伴则归属于不同的谱系，在3亿年前，它们与哺乳动物有着最后的共同祖先。就像所有的现代鸟一样，啄牛鸟是一种特定的族群“大蜥蜴”，即卵生恐龙的后代。在2.6亿年前到6 500万年前，啄牛鸟的祖先迅猛龙生活在同样的大陆景观中。在那个世界里，恐龙进化出了上肢，或者说至少把握住了进化的核心。



角色互换：曾经，最高级的物种是某些恐龙，而并非哺乳动物。

按照我们的认知标准来看，啄牛鸟显然是有意识且有智力的。很多鸟都表现出了自我意识，具备识数和使用工具的能力，尽管鸟的大脑在物理上比大象或人类的大脑要小得多，只包含1亿个神经元。

在鸟喙上的寄生虱子也有一个甚至能追溯到更久远历史的祖先。它属于无翅昆虫族，至少有4.8亿年的历史，从无脊椎动物进化而来。从这个角度来看，虱子可能是画面中最异形的有机物，不考虑它现在所处的困境的话，它几乎是最成功的有机物。

虱子有没有意识或智力呢？某些昆虫，比如蜜蜂，其行为往往被解读为具有自我认知或智力特征，并且有数量高达百万的神经细胞。

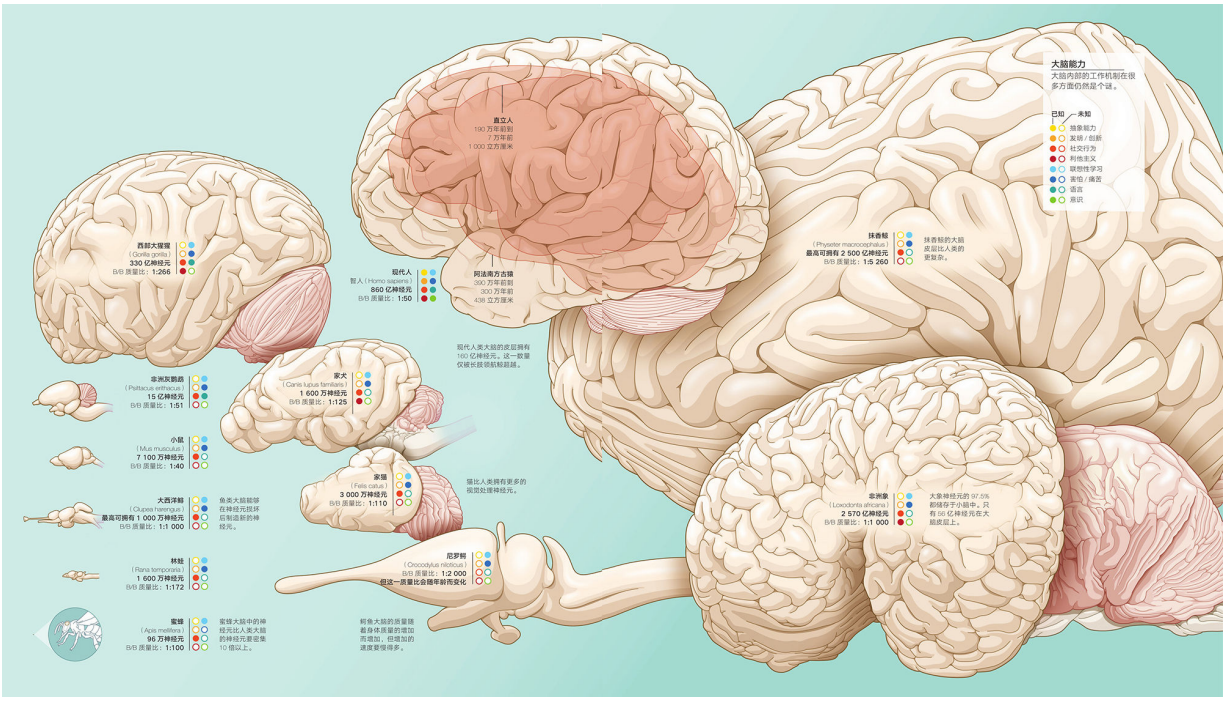
虱子并非蜜蜂，而我们并不知道在它的神经系统中究竟发生了些什么。



10^0米

大脑的世界

大脑由神经元构成。神经元是一种特殊的细胞，由它构成的电敏感网络能够接收、处理和传递电化学信号。大脑是我们已知的最复杂的生物结构。



这简短的生命一瞥（几十亿年来无数拍照机会中的一瞬）包含了另一个重要的故事。

一头哺乳动物款待了一只鸟和一只昆虫。鸟吃掉了寄生虫，帮助了哺乳动物。鸟也喂饱了自己，无意中促成了虱子未来基因的变化，因为这只倒霉虱子的后代将不复存在。如果这只鸟没有落在这头大象上，没有找到这只虱子，一系列发生在未来的复杂事件都会变得不同。在某些未来中，单一事件不会产生什么影响。但在其他时候，原则上，某个单一事件正好充当了改变地球整个进化轨迹的雪球。

历史上像这样陷于混沌的突发事件只是冰山一角。大象不断改变着它们周边较大范围内的环境。它们食用植物，喝水，移动并改变了土壤和岩石。实际上，它们促进了外部熵（宇宙中可量化的无序）的增加。在该环境下的植物和其他生物感到了这些变化所带来的压力。自然选择（适者生存）以及基因漂变（幸者生存）导致了整个时间轴上的生物变化。

啄牛鸟也做着同样的事。它筑巢，排泄废物，和其他鸟类、其他生物竞争。既卑微又强大的虱子，也扮演着自己的角色。上述场景只是虱子社会的一部分，从生态系统整体来看，虱子是细菌和病毒的完美家园。

将大裂谷中这张看似无害的生命快照放大后，我们得以一探是什么造就了真正的行星生物圈。答案便是：相当复杂的、多层的、层次交错的原子、分子、生命、行星、恒星和宇宙热力学。

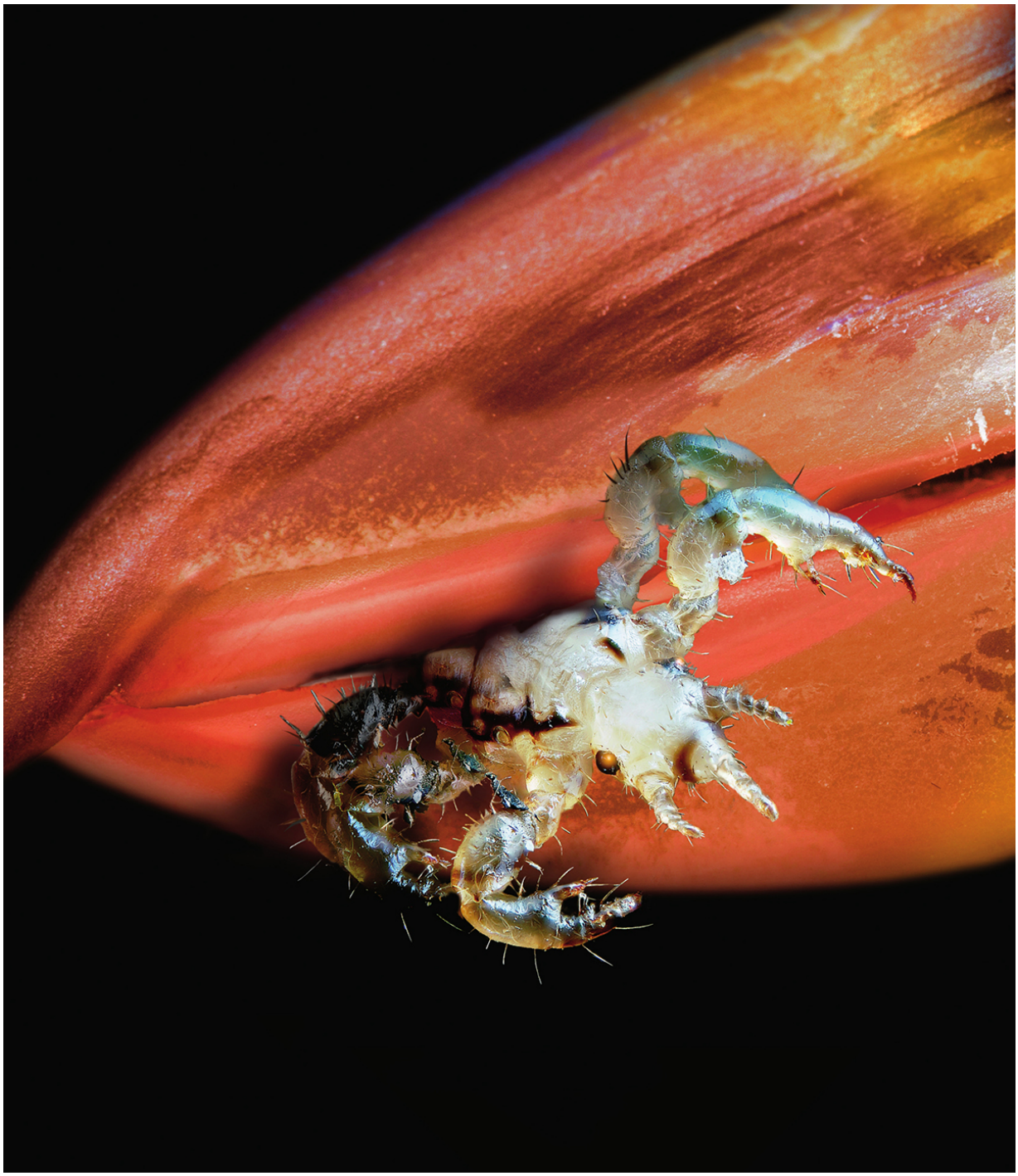
那些我们称之为意识和智力的奇特现象滑进了这个系统的缝隙。我们并不知道复杂生命是否总是需要进化出这些特点，以便更好地生存，或者这些是否只局限于地球上的生命。我们并不知道意识和智力如何精确地在虱子到大象之间以及这之外的尺度上分布，但我们人类的举动能够传播得很远，远到未来，远到太空。智力使我们有能力决定这些举动。真正的问题是，我们应该选择怎样的方式来对待这种能力。



10^{-1}米

PART 3

10^{-2}～10^{-35}米的34个宇宙：万物从有到无的虚空



10^{-2}米

7
消失在宇宙背景中的物质碎片

10^{-2}米，10^{-3}米，10^{-4}米，10^{-5}米

从1厘米到10微米

从人类指尖大小到一小滴水云或一个动物细胞大小

随着我们进一步缩放宇宙的尺度，我们称之为家园的这颗行星逐渐消失在背景中。地球上的所有色彩和戏剧性事件不过是一片比我们现在的新起点大10亿倍的模糊区域。但这个尺度和接下来的几个量级可一点儿都不无聊。在这里，你会遭到缤纷而又奇怪的观念的挑战。其中处在首位的就是我们所谓的复杂性。

复杂性是当前宇宙的中心。我们已经在浏览星系和星云时遭遇了这一概念，但它也充斥于我们的日常生活中。我们的身体结构以及与我们共同生存的多样物种种群都证明了这一点。虽然我们几乎没有注意到，但我们的确栖息于一个拥有复杂生物粒度的世界。

感官的局限性让我们没法完全了解这个世界究竟是什么样的。如果我们在自己面前的适当距离处拿着两个极其微小的物体，那么只有当它们的间距大于一根头发的宽度时，我们的眼睛才能分辨或解析出这对物体。若将这个间距减半，那么即使是人类中视力最好的人也无法区分眼前所见到底是一个物体还是两个物体。

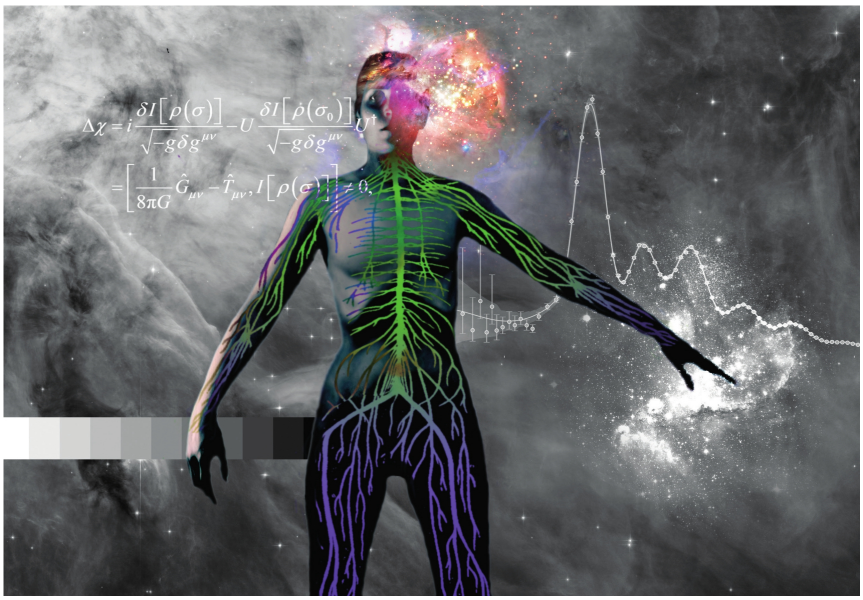
由于这样的限制，我们在过去的几万年里，把大部分时间浪费在了我们无法察觉到的鼻下，指甲之下，血液、唾液和皮肤之内的世界。我们总是把自己的实体，以及其他任何生物都视为紧紧包裹住自

身的整体。任何东西，从大怪兽到小昆虫，似乎都同样坚固，都不可分割。

然而，我们所有人就像宇宙的其他部分一样，是由碎片组成的。我们由原子、分子、分子复合物和细胞组成。而在这些部分之间，可能有着各式各样、不计其数的机械动作和化学反应。

以人类的手为例。你的双手，现在正忙着抓紧这本书，它们处于一种动态拉伸的状态。坚固的骨骼、肌腱、肌肉、神经纤维和皮肤协同行动，它们共同感受着这本书，并同步协调着彼此的活动，这样你才能专注地看着这些字。

许许多多不同颜色、不同肌理、大小各异的手，帮助我们在周围的世界里留下自己的印记。



手和细胞让我们能够与宇宙建立联系。

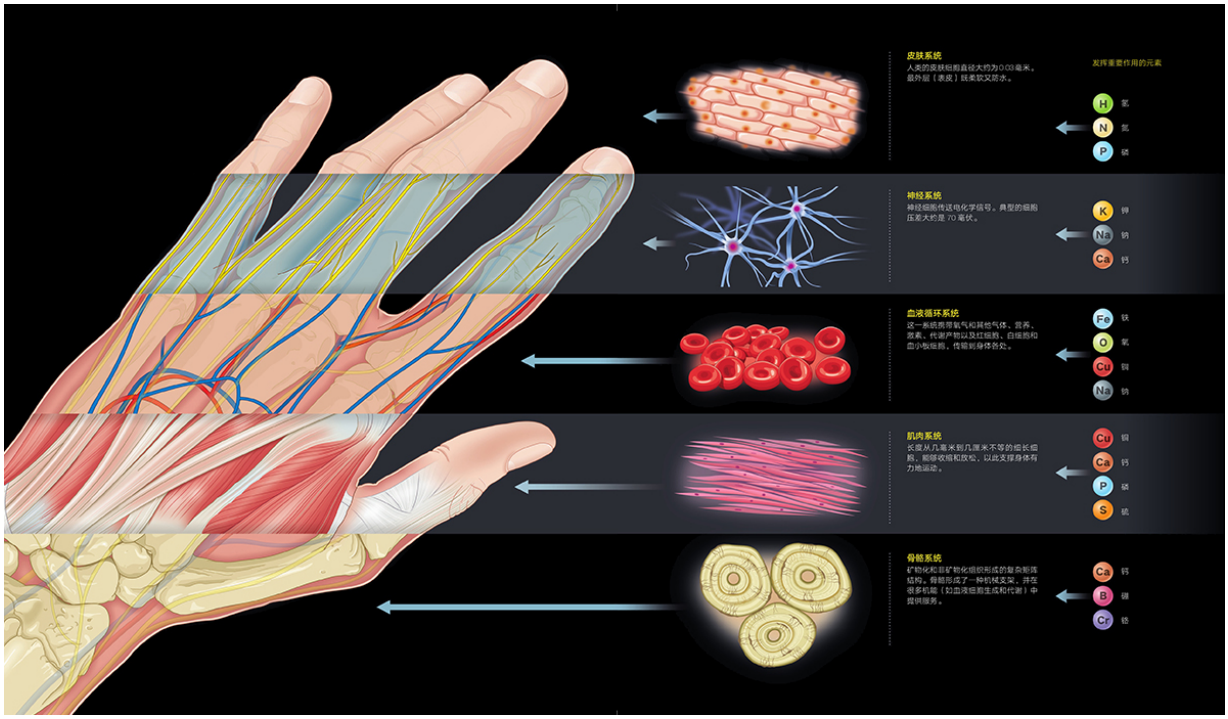


虱子的眼睛。

10^{-3}米

生命的粒度

人类的手是一件精巧、复杂，装配了多种细胞、组织、结构和化学成分的艺术品。这些相互依赖的组成物让人类这一物种能够表达自己，能够将自身刻印在周围的世界中。一只典型的手有29个主要关节、123根韧带、34块肌肉、48处神经和30条动脉。



我们将脑中的概念提炼出来，并用岩石和铁器将它们雕刻成形状和图案，将自己的思想转化成实际的物理的东西，而这些思想反过来启发了我们，让我们的双手创造出新的东西，等等。灵活的手指让人类能够飞向天空，飞向月球，飞驰到太阳系的外层。这些手指制造出能够制造其他机器的机器，从机器人到自动组装计算机；也建造出由精心打磨的镜片和传感器组成的显微镜，以及巨大的电磁粒子加速器，用以在亚原子王国中进行更深的挖掘和探索。

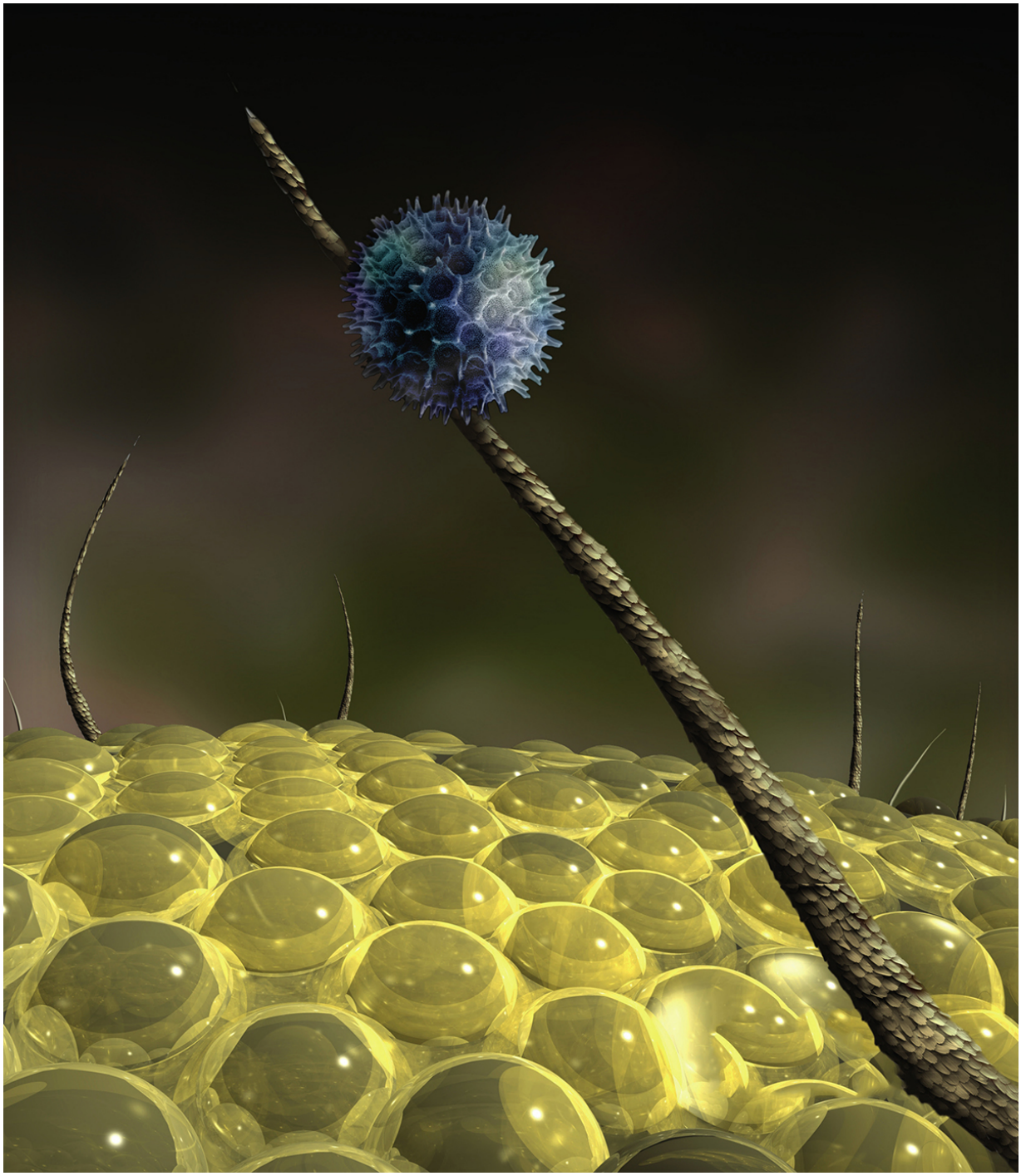
然而你的手并不真的是一个单一的实体。这个部件由大约4 000亿个细胞组成，这些细胞是高度专业化、平均直径约0.03毫米、有膜包裹的囊状物。正是这些微小机器的协同行动让你能够抓住这本书，就像其他微小的机器让我能够敲打出这些文字一样。在更广阔的尺度上，正是这些机器的群体协作帮助人类进化。

对我们身体的其他部分来说，情况也是如此。对地球上的所有大型生命形式来说亦然。当我们将视野缩放到东非大裂谷，缩放到一头大象、一只鸟、一只昆虫，以及这只昆虫的细胞结构上时，我们能够看到生命的粒度。这些细小的部件合在一起所能做的事，实在是令人印象深刻。

复杂性的简单性

不过，这些细胞机器也会有生有死。人类的红细胞能够存活大概4个月；皮肤细胞大概能生存几周；其他的细胞，比如大肠中的那些细胞，只能存活几天。甚至当你离世时，你体内的很多细胞还会继续存活几小时甚至几天。构成多细胞生物的细胞会像对待自己一样对待它们的宿主。

生命间的集群合作已经在地球上存在了很久，可能至少存在了30亿年。如果算上蓝细菌第一次“殖民”的话，作为一种生物策略，多细胞体的变种被“再改变”了很多次。有着不同细胞形式的多细胞有机体，包括植物、动物、真菌，在大约15亿年前出现。在合适的环境条件下，细胞的合作与共生提供了各种进化优势。多细胞体衍生出了如今的生物，后者种类繁多，覆盖范围多达令人震惊的22个数量级（如果把病毒也算作生物的话，将会是27个数量级）。地球上的生命从最小的微生物（10^{-16}千克）层级一直延伸到最大的植物和哺乳动物（10^{6}千克）层级。



虱子的复眼，及其晶须上的一粒花粉。

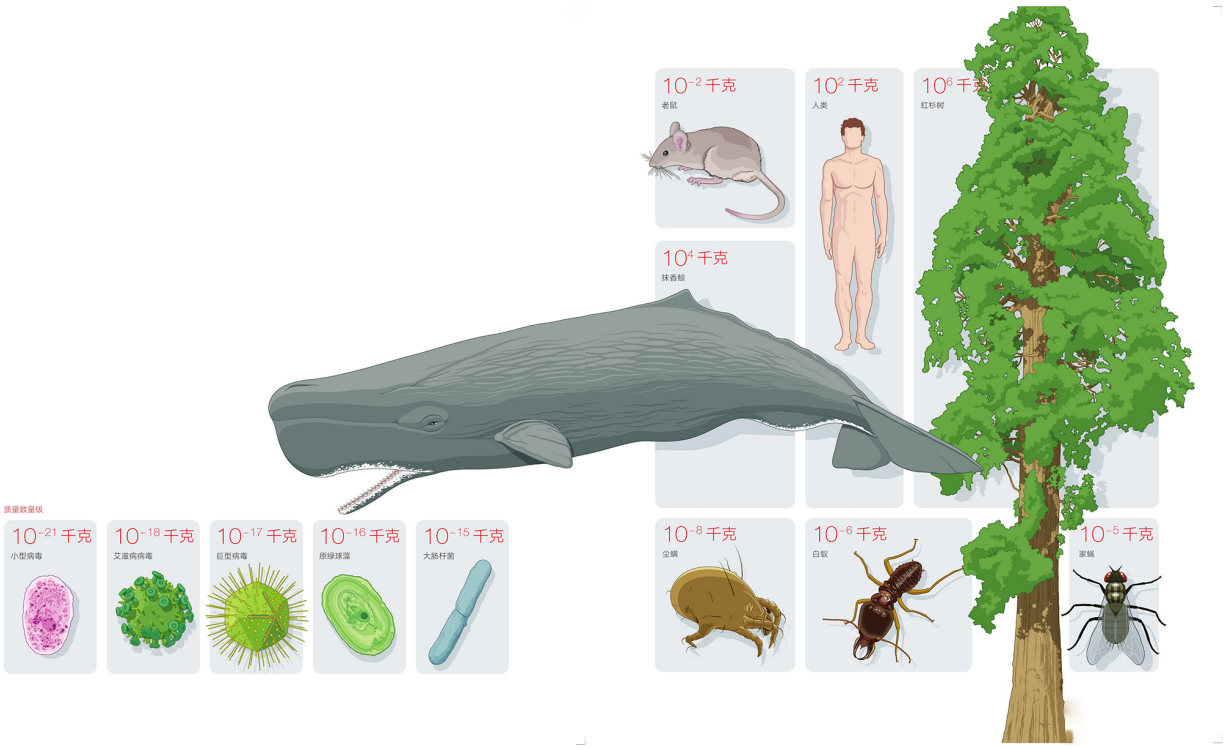
10^{-4}米

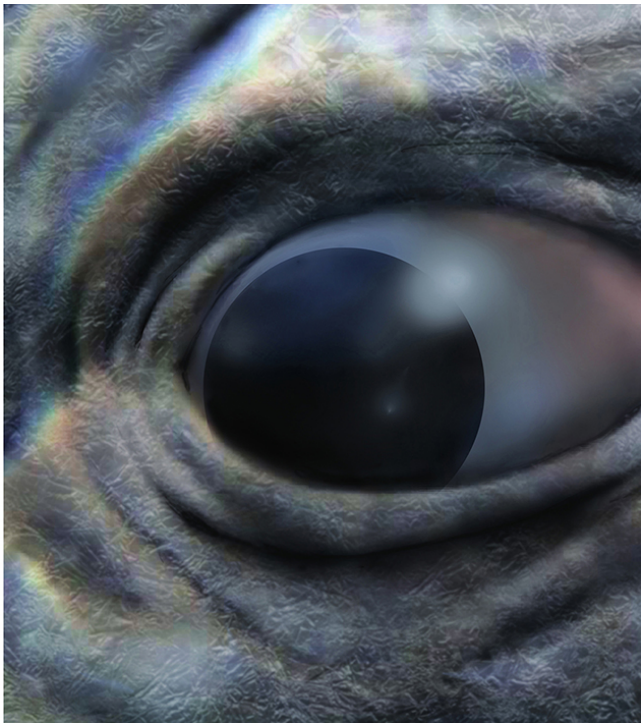
合作的收益远远超过其他生物通过进化所取得的优势。所有细胞单元共同协作，便能够建造比各部分单独建造的总和多得多的东西。几十亿的细胞能够形成真菌、植物、昆虫、鸟和哺乳动物。它们能够形成像爱因斯坦、艾达·洛芙莱斯（Ada Lovelace，第一位计算机程序员，诗人拜伦的女儿）、牛顿、居里夫人这样的人，或者像莫扎特、巴赫、毕加索、雪莱和达·芬奇这样的人。

它们也能从复杂中创造出令人惊讶的简洁。例如，在动物世界，基础代谢率（动物休息时燃烧化学能的速率）和身体质量之间有着一种可观测到的数学关系。实际上，从细菌到小型鼩，再到体型庞大的蓝鲸，这种数学关系一直存在：基础代谢率随体重的三次幂的增加而增加。这条规律存在于全部10^{22}种不同生物体中。

生命的数量级

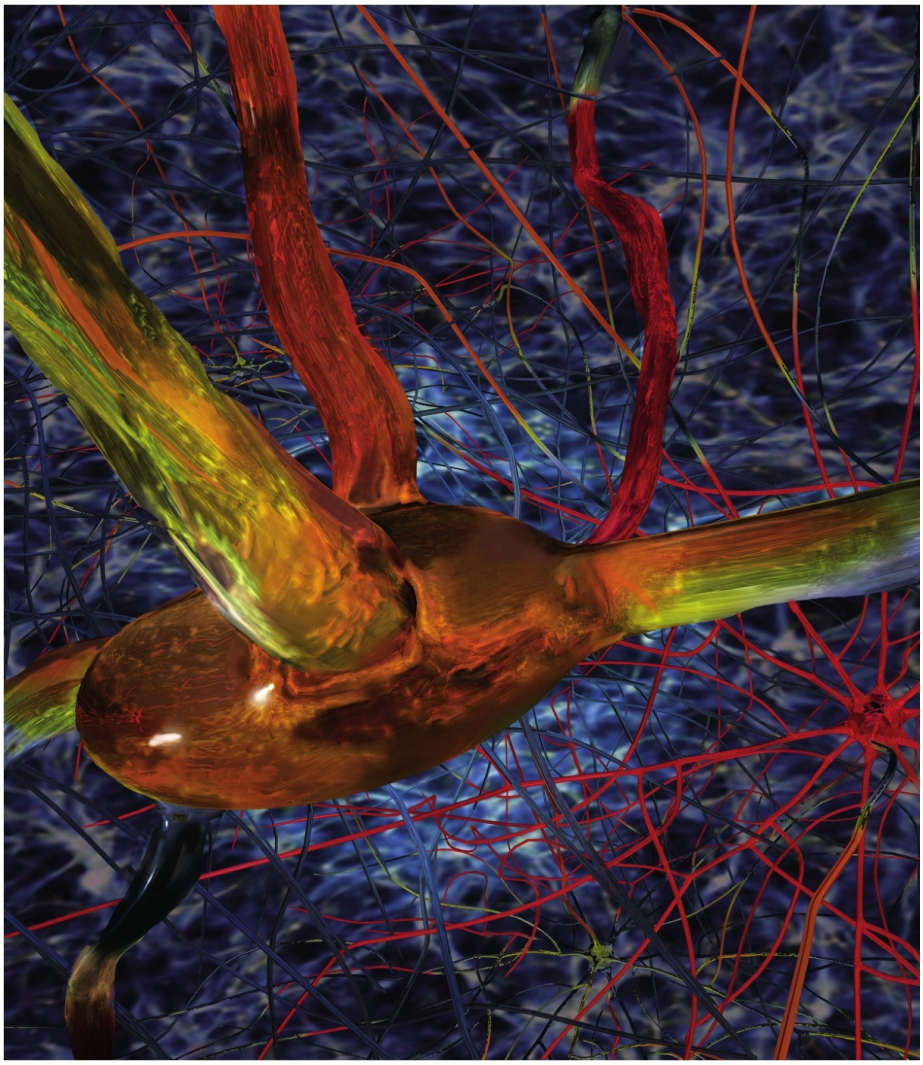
地球生物的大小至少跨越了10个数量级——从单细胞到多细胞大型生物。它们也在质量上占有22个数量级的范围（如果算上病毒，将是27个数量级）。







一只老鼠和一头鲸鱼在两个不同的数量级上打量着对方。

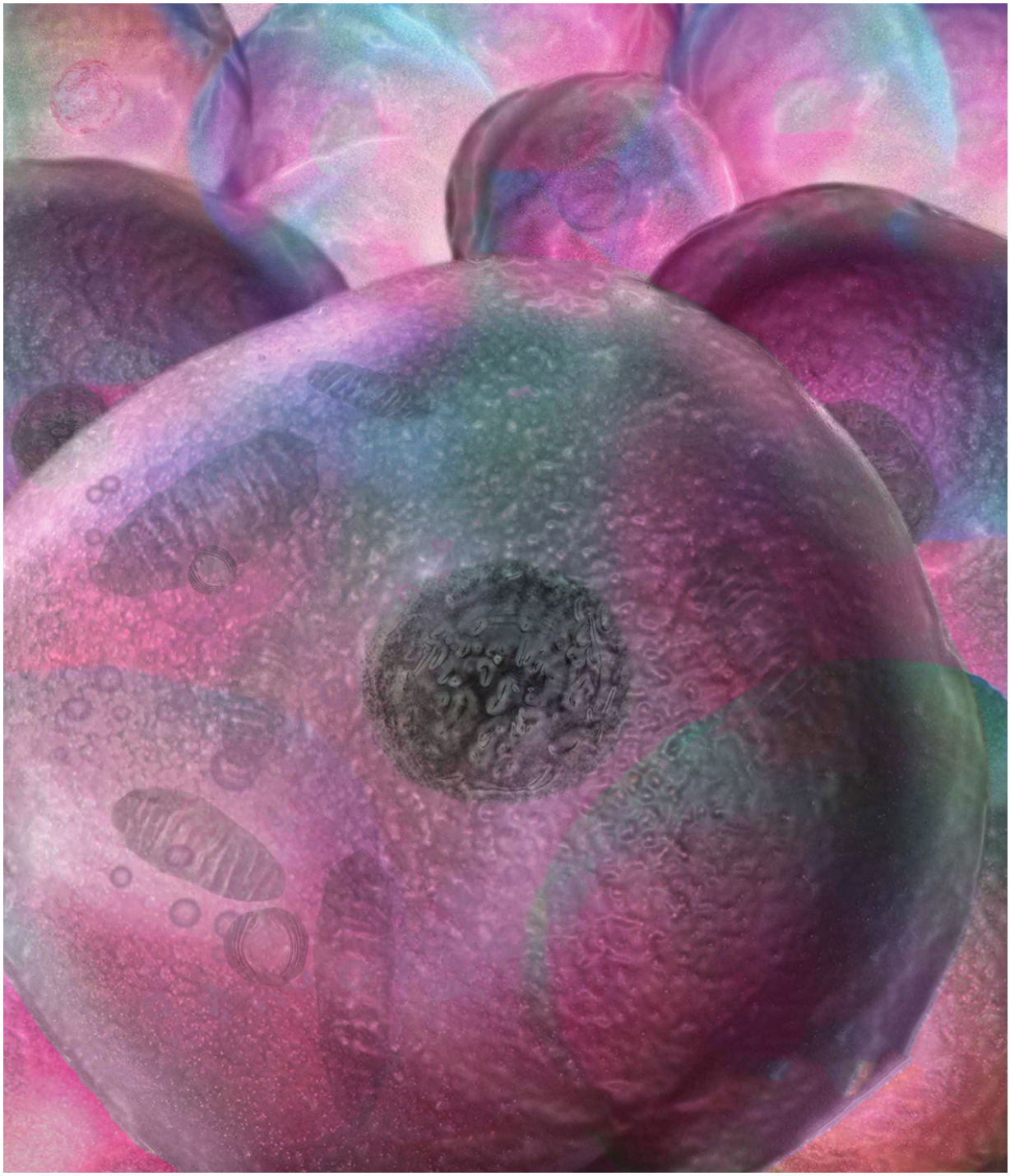


神经元细胞体的代表。

不知为何，一个常规而又简单的法则在这些物种迥异、大小不一的不同组合形成的生物细胞中出现了。生物学中的其他特征也表现出令人惊奇的规律性。比如，生命扩张的方式、增长率，以及不同物种的物理尺寸也存在单纯的数学关系。

这怎么可能呢？我们相信这是一场公平的赌局，所有这些都是最优的表现形式，是由自然选择所青睐的那批生物促成的，严格地说，这正是这些生物尽最大努力所达到的效果。从烦琐中创造简单之所以能够成功，其实取决于一套复杂的系统，系统中的很多部件既能够单独运作，也能够跨越多个尺度互相合作。

对于多细胞生物的群体行为而言，情况也是如此。它们经常形成团体：兽群、鸟群、鱼群、蜂群等。这种集群就像有着自己发展法则的新型实体。其中的每个生物体成员都可能遵循着简单的规则，但作为整体，它们在全世界范围内活动的同时，形成了意想不到的合作模式。



多细胞生物的单个细胞。

10^{-5}米

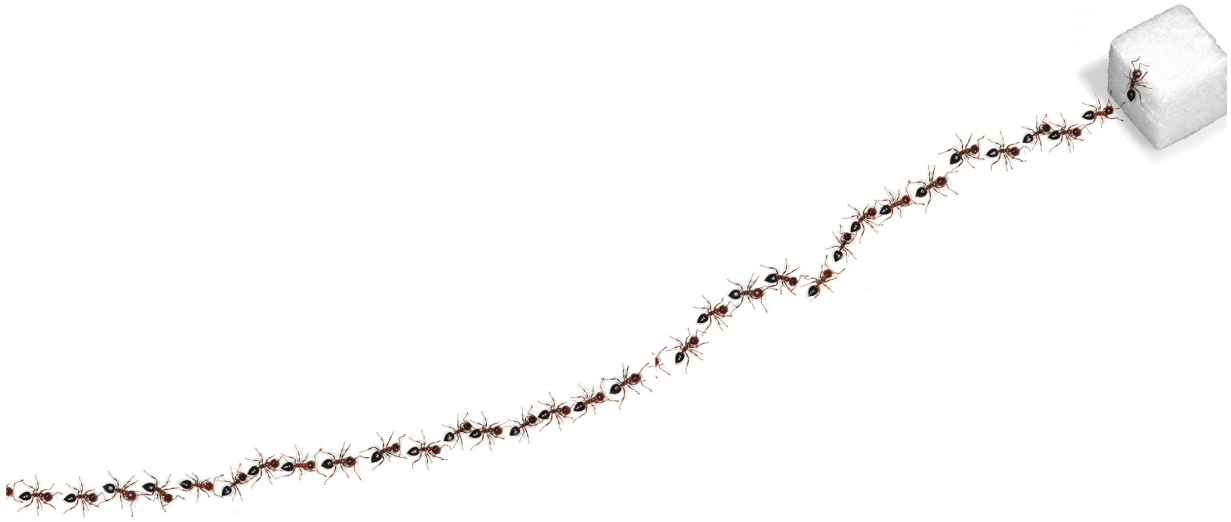
这些合作模式在很多完全不同的物种里都能看到。比如，椋鸟在它们的大型“自然奇观”中俯冲流动，就像海中的一群鲱鱼一般。对这两个物种来说，群体行为的优点在于给潜在的掠食者造成一种数量超载的错觉。但这种行为也会导致危险，比如吸引了掠食者的注意力。

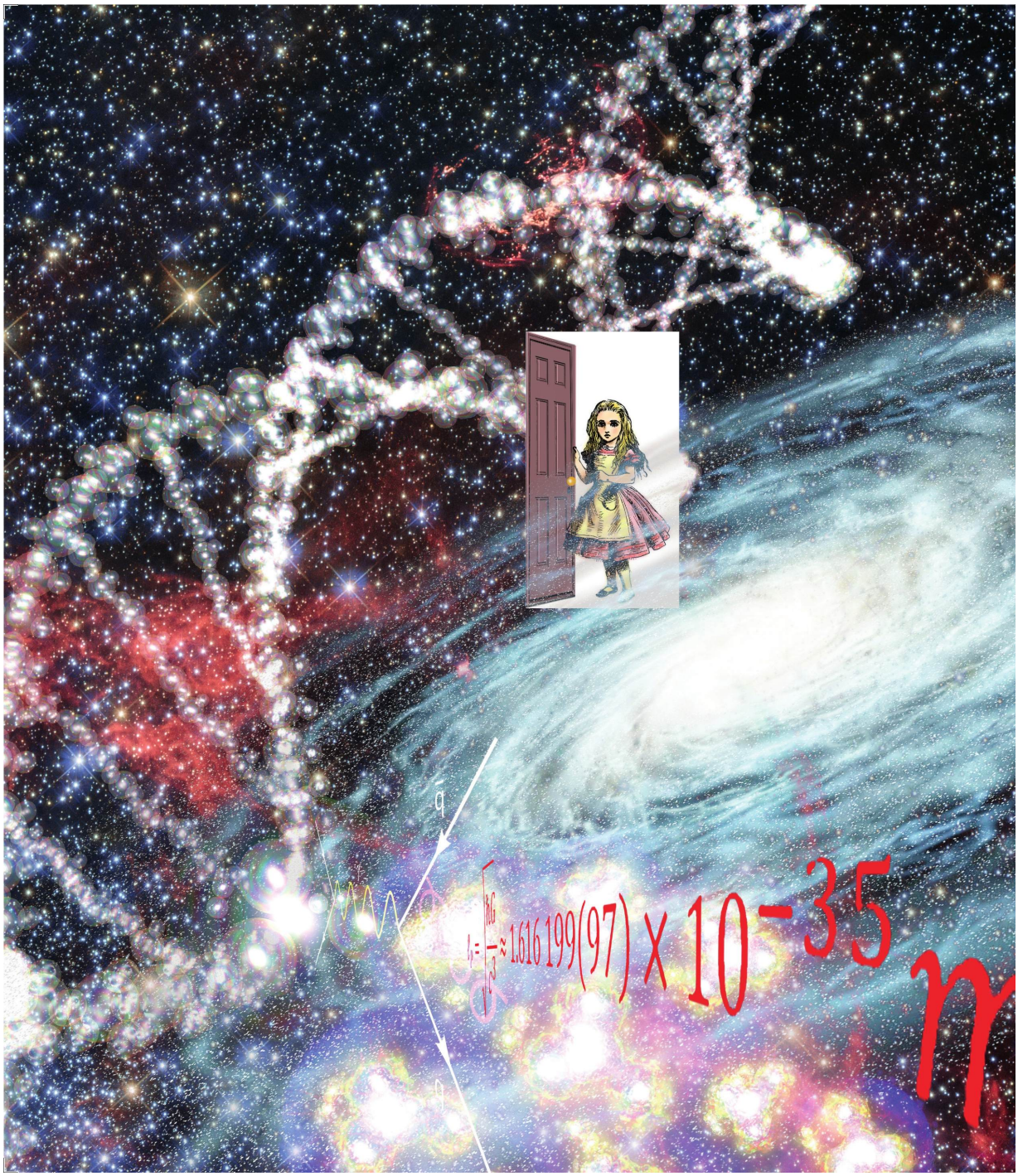
人类不属于这个范畴。我们是社交动物，通过语言，通过几乎不用说话就能一起工作的优势，我们被绑定在了一起。研究表明，我们的城市也遵循着一些相当简单的数学编码。道路的长度、电力线缆以及加油站的数量，与城市的总人口息息相关。工作报酬、暴力犯罪和疾病也与人口有关，不过其背后是另一套数学编码。

自然选择也能用简明的规则解决计算问题。比如，单个蚂蚁用信息素标定巢穴到食物的路径，而当往返路径更短时，信息素更有效。因此，随着时间推移，越来越多的蚂蚁会追寻更短的路径。结果，这个群体“发现”了填饱肚子的最快路线。

对群体行为而言，计算成本与利益是所有生物都会进行的工作。这也是为什么有些生物是独行侠，而有些生物以百万级的数量群居生活。人类的社会、文明、经济体系以及个体行为显然受到这些规则的驱动。

从细胞组合成更大的生物体，到新行为和能力的产生，所有这些特性都根植于复杂性。但复杂性本身根植于一种更基本的宇宙特性，我们称之为熵。熵是对无序的一种测量值。随着我们的旅程延伸至更小的尺度，你会发现熵和不确定性越来越重要。它们是使你、你的手和你的细胞得以存在的要素。




$\bar{q}$
q
$l_P := \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616\,199(97) \times 10^{-35}\,m$

8
亚原子世界，开启尺度颠覆之门

10^{-6}米，10^{-7}米，10^{-8}米，10^{-9}米，10^{-10}米

从1微米到1埃（或者说0.1纳米）

从细菌（原核生物）大小到大约氢原子直径大小

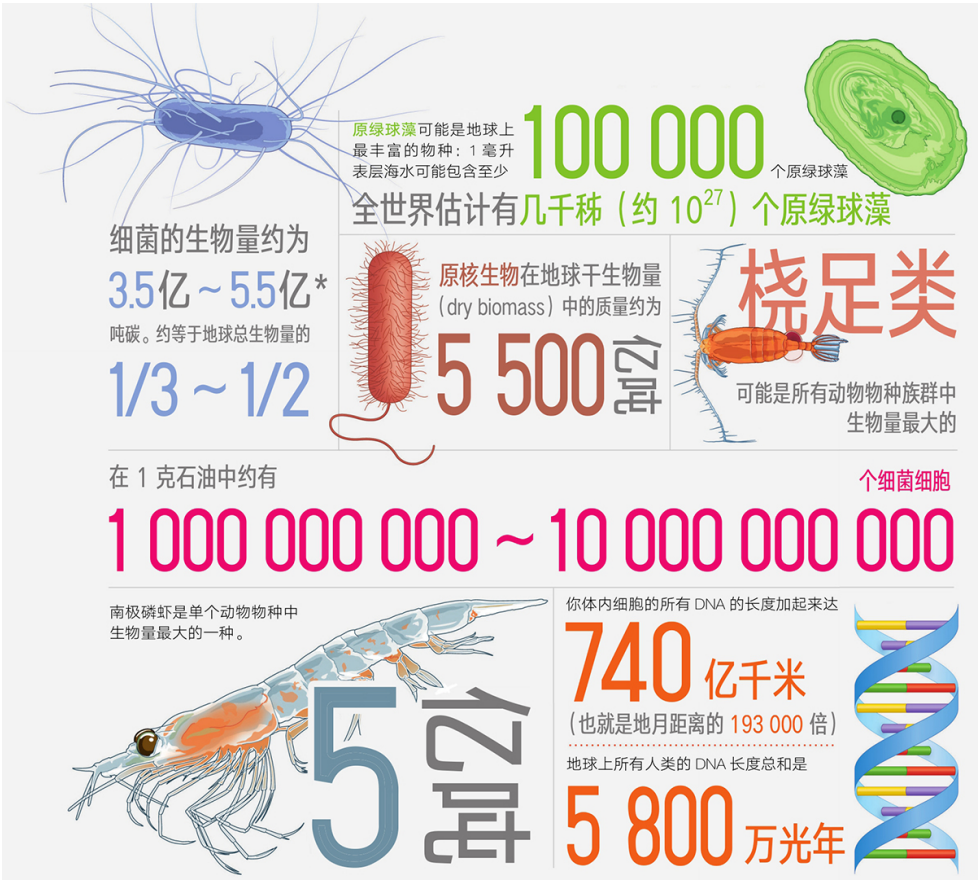
在这段穿越宇宙尺度的伟大旅程早期，我们仅仅跨越了5个数量级，就从可观测宇宙的尺度来到了我们自身所在的银河系尺度。这是一个巨大的转折，从宇宙所在的尺寸（当然了，宇宙是所有我们已知的空间、时间和物理的总和）来到了一些零散星系的领域，而每个星系都有它自己的故事。

做好准备吧，因为接下来，你将踏上一段更魔幻的旅程。在这里，你会再次跨越5个数量级（从1微米到0.1纳米），这是一段让人震惊的简短旅程，我们从可能较为熟悉的现实世界来到了一处非常奇怪的地方，此地存在于离我们并不遥远的日常感知的区间内。

让我们想象一幅画面：你正途经一系列连在一起的房间，如同身处《爱丽丝漫游仙境》所描述的场景之中。每个房间都有一扇窄窄的门，与下一个房间隔离开来，而你需要打开每个门，穿过去。每经过一扇门，当下的世界就会比门后的世界大10倍。

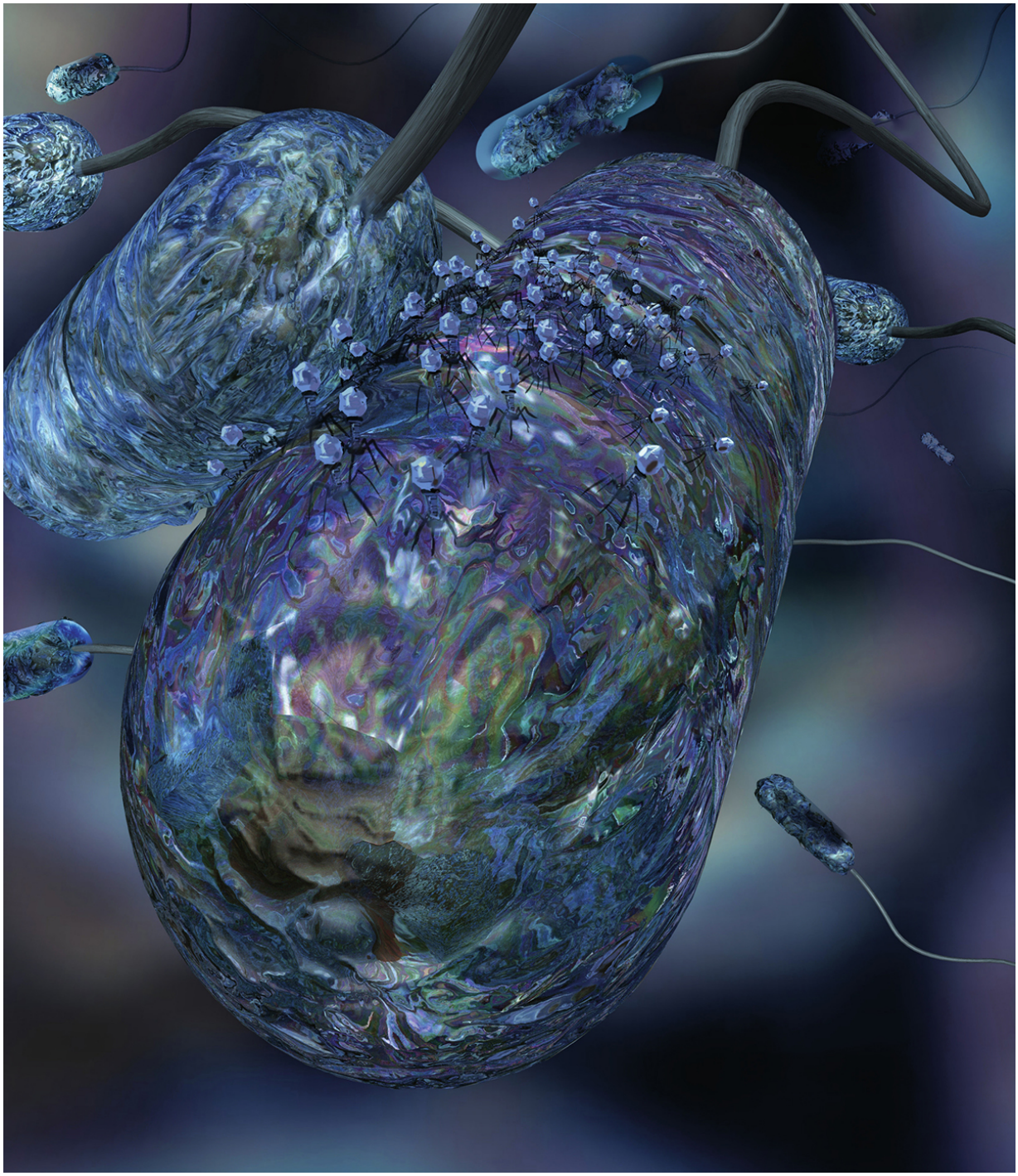
你打开第一扇门。在这里，填满你面前这个房间的，是涂满了一层厚厚黏液的活的细菌。这种单细胞实体是一种活跃的生物与机械的混合体，被包裹在半透明的膜里，形成了一种类似胶囊的结构。在“胶囊”的一端是旋转的、抖动的尾巴，或者说是鞭毛。“胶囊”的表面有无数微小的头发似的延伸物，叫作菌毛。“胶囊”里面是一堆

遗传物质：一条DNA链，小型双链脱氧核糖核酸回路（也就是质粒），以及一堆更小的化合物和分子结构。



*部分研究给出的这一生物量数据偏小，约为0.5亿～2.5亿吨碳。

这种细菌是一种完全成熟的生物实体。它的化学工厂热闹非凡，化合物无止境地在膜上滤进、透出。与细菌这种生物的出现同样奇异的是，它们的行为似乎也充满目的性。细菌通过化学信息和电化学变化感知周边的世界，并对这些情况做出回应。



一个细菌，其上带有鞭毛（尾巴），还附着了病毒入侵者。

10^{-6}米

从这个生物旁挤过，你来到了通往下一间更小量级房间的门前。现在请深呼吸，然后，拉开门吧。一个更加奇特，更加令人不安的形体充斥在这间房里。这是一个单体病毒：分子结构集合在一起，包裹在一个有节的、豆荚般的盒子里。其要点在于紧凑拥挤的蛋白质分子形成了小圈遗传物质，这便是病毒的编码。它是活的吗？它可能不以你熟悉的方式活着，但它显然不是死的：就在你观察它的时候，它钻出了一条自己的路，进入其他无自保能力的细胞的基因结构中。

这间房子内目之所及，有些奇怪的事发生了。我们很难清晰地看到这种病毒。通常你用来感知这个世界的光线并不会以你期待的方式与这种小东西进行交互。事实上，可见光波长的峰值比这些病毒要大。这些波无法以一种连续的方式反射或穿过这个小家伙。这种病毒并不会直接地出现。相反，它只是混淆了光线。当你眯着眼看时，就会看到另一种场景。

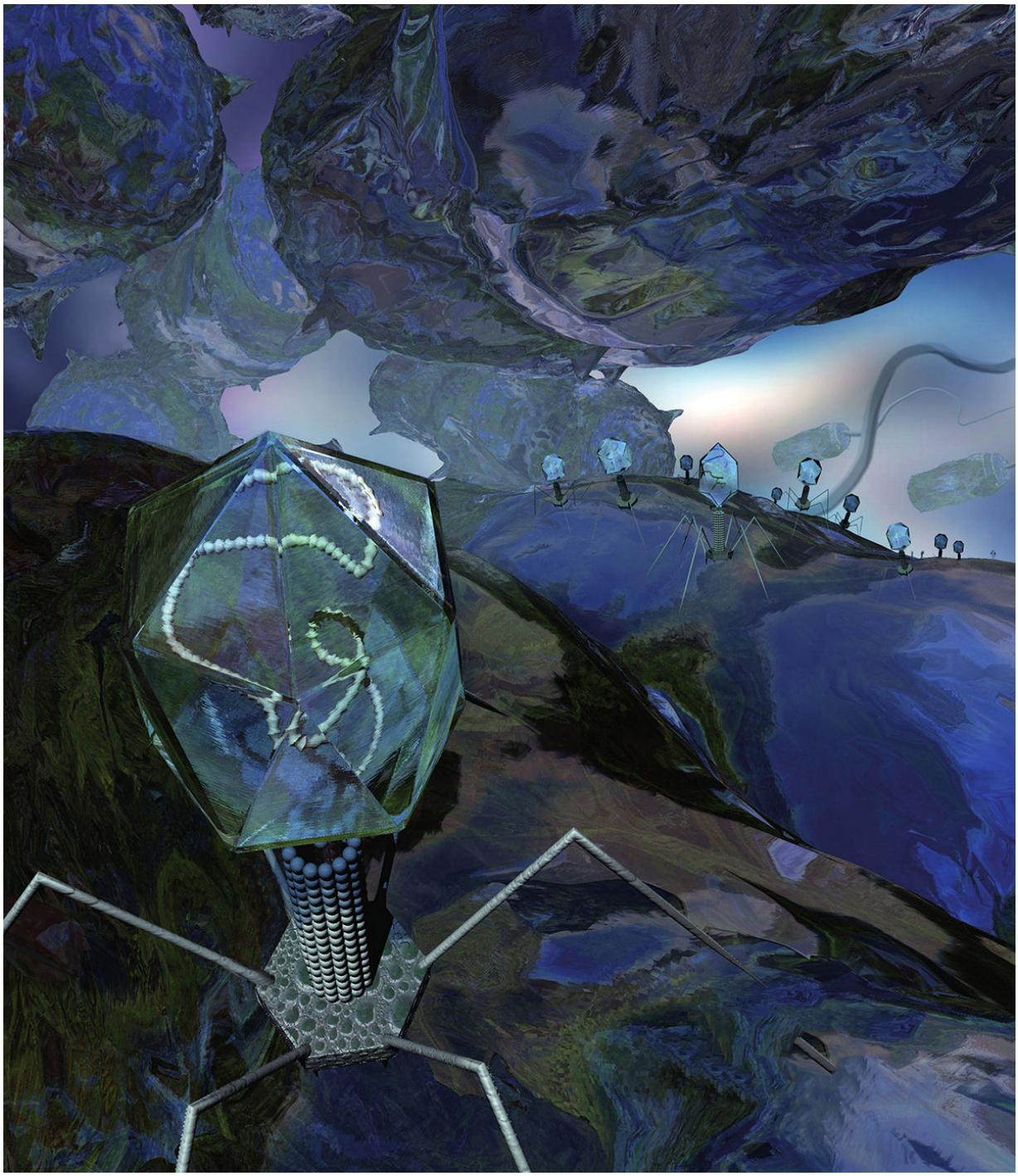
在你向第三扇门前进的路上，你必须摸索并探查前方的路线。可见光在这里会丧失作用。相反，你会感受到在自己那收缩的身体内，静电正与潜藏在下一间房里的生命进行互动。这就像是你戴着眼罩，蹒跚地探索前路，并发现你的手正处于某种波浪般、不平整、黏黏糊糊的东西上。

这就是大型分子的房间。这种骇人的生物是一种核糖体集合，一种对于生命现象非常重要的结构。它是合成蛋白质的重要一环。你伸手去触碰时，这个复杂的形式会移动位置并改变形状。这种核糖体一般附着在其他分子结构中，并通过一系列行动完成自己的工作，仿佛流水线的一部分。分子臂和基准点会收集并操控更简单的分子（比如氨基酸）来形成更大的结构。

这个过程是优雅而精准的，即使过程中充满了激烈的运动和震颤。核糖体需要几分钟的时间来积累和组装细胞生命组成物的重要部

分。你能感觉到崭新的蛋白质链从其母体脱离出来，翻滚着折叠在一起。

趁它工作时，你从中挤过去，躲开它那带电的黏性凸起，并继续来到下一间缩小的房间。通过第四扇门，繁忙的分子似乎被一系列薄薄的、有规律性和对称性的DNA链所代替，这条DNA链扭转着，漂浮在核糖体周边。



肌胃病毒噬菌体准备将它的基因组注入细菌的细胞质中。

10^{-7}米

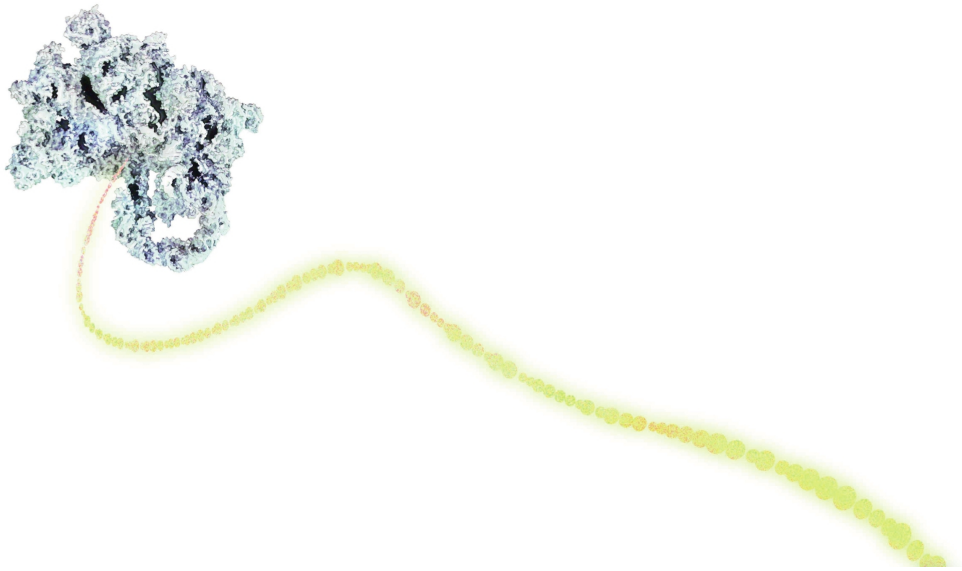
在这个尺度上，你真正感受到的是充斥着可能性的一方空间，是一屋子缥缈的静电推力和拉力。我们所能想到的与这种经历最接近的比拟，就是蒙眼尝试未知的食物和气味。这里有一份感官菜单，上面独特、繁复的感受首尾相连，排成一队。

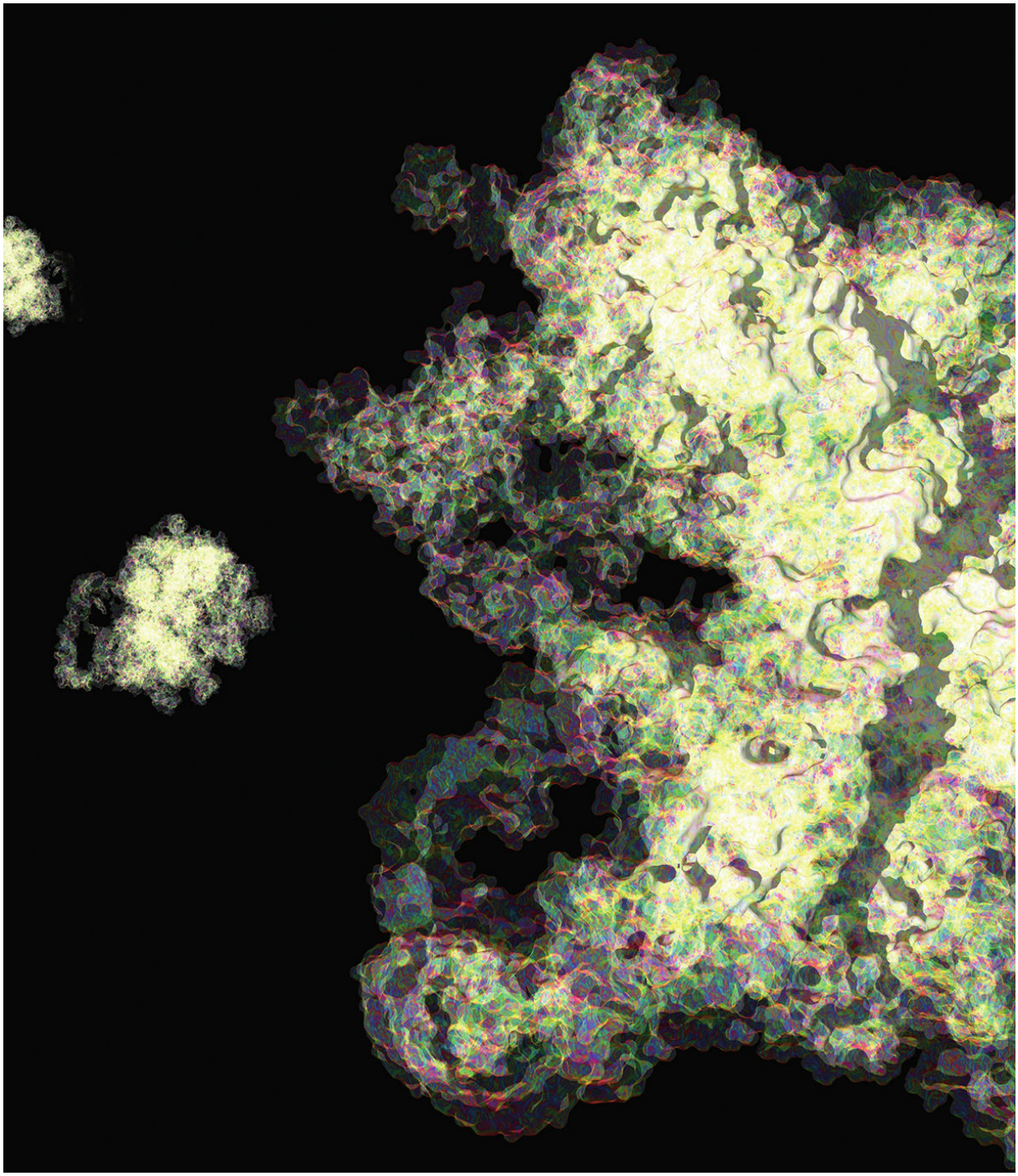
我们将此处的一种实体称为碳原子。还有一些氧、氮、氢原子等，它们簇拥在一起，就像其他可识别的物体一样，形成相对简单的分子，我们称之为核苷酸：腺嘌呤、胸腺嘧啶、鸟嘌呤、胞嘧啶，沿着朝任意方向弯曲的一对糖－磷酸轨道分布。

然而，讨论“这些东西看起来像什么”已经完全没有意义了。有意义的是这些实体的“状态”，它们的电磁能，它们的震动和旋转，它们仍然无形的存在模式。走在它们之中，你会受到众多声音与恳求的冲击，这些冲击以吸引力和排斥力的形式表现出来，然而这种看似无序的杂音，可通过规律和信息被记录下来。

跨越门槛来到奇特世界

现在，你来到第五扇门前，继续向下一级进发。然而这一次，在你跨越这个门槛后，一些极其古怪的事将会发生。你感到你自身发生了变化，这种改变在你意识的外围游走，在最后这扇门前徘徊，而现在，这种变化几乎成了你所感受到的全部。就好像你突然被抬升到极高处，向外呼气并发生了膨胀。





复杂的、运转中的核糖体。

10^{-8}米

你不再是之前那个完整统一的你。你几乎同时在这儿，在那儿，在各个地方向外膨胀。而你面前的这个结构碰巧是个碳原子，它也一样奇怪。你无法以任何明确的方式感受到这颗原子。相反，你与时间和空间融为一体，分享彼此。你多半出现在原子前方，但也存在于原子的两侧。原子会对你的闯入做出反应。它的电磁场是一片充满负电荷的轻快移动着的云，然而这片云有自己的结构，即多少蓄着点电的区域。原子的深处，是一个正电荷，它保有对周身一切的决定性控制。

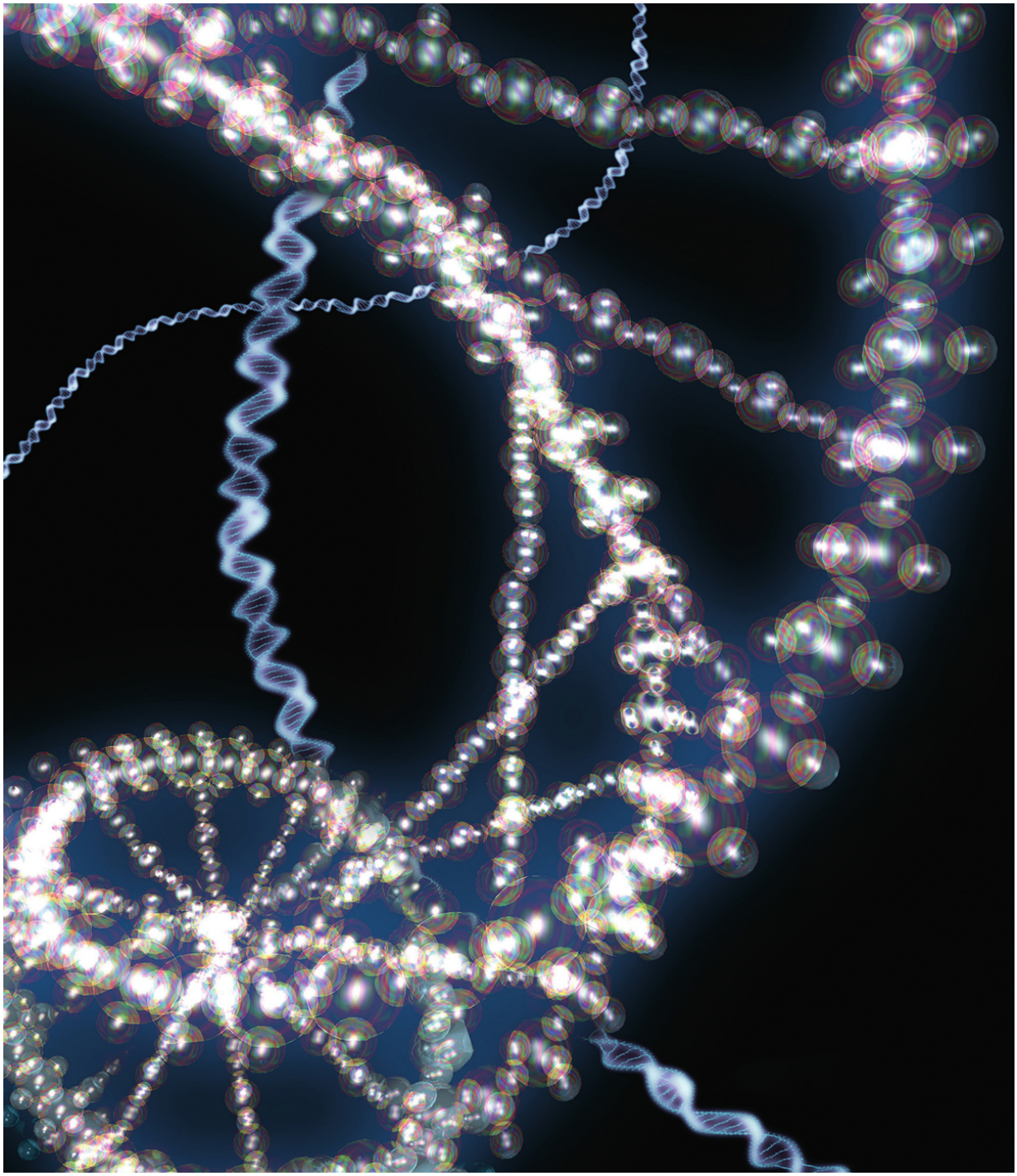
欢迎来到量子世界。事实上，经过这扇门的你并没有被改变，只是接触到了你本质的一个基本方面，而这一面一直存在。准确地说，你只是因为不断缩小的状态而被衍射了。

通常情况下，在你存身的那个量级，身体由无数的原子组成，组建完成后的身体比单个原子要大上几百亿倍。你以每秒几米的速度快速移动，在从一个量级来到下一个缩小10倍的量级时，任何衍射都会超出你的感知，突破目前任何测量设备的探查范围。但现在，在这样一个微小的，只有一亿分之一米的尺度，你无法迈着华尔兹舞步轻松穿过不同量级之间的大门，同时还指望着一切安好。作为现实的更深层本质，物质的波粒二象性充分地发挥了其效力。在这些微小的量级中，宇宙是一种概率，一种统计，一种拥有众多分叉路径和奇特关系的舞蹈。这种奇特性就是世界的核心，是让我们得以存在之物。

碳宇宙

正如我们目前所知的，生命建立在碳元素的基础上。为什么是碳？

碳原子只是恰好擅长构成所有种类的分子。它就像乐高积木中你最爱的那块，总能让你成功地完成最复杂的项目。



一条脱氧核糖核酸（DNA）。

10^{-9}米

碳原子有6个电子。这些电子可以说排列得相当完美，其中4个（被称为价电子，valence electrons）能够轻易地被其他原子的原子核吸引，并与这些原子的电子共享空间。用量子语言来说，这些价电子占据了碳原子周边可能的空位，使得原子之间彼此有了联系，换句话说，形成了化学键。

举个例子，一个碳原子的价电子能够和另一个原子（比如氢原子）的价电子形成一个共价键，这个时候，有两个电子在原子之间高效共享，处于一种被称作“量子叠加”的状态（这是一种量子特异性，随着量级的进一步缩小，我们将越来越频繁地遇到这种现象）。新的碳－氢分子总体上会比之前的两种单独的原子拥有更低的能态。为什么这一点很重要？因为更低的能态提高了化学键形成的可能性。

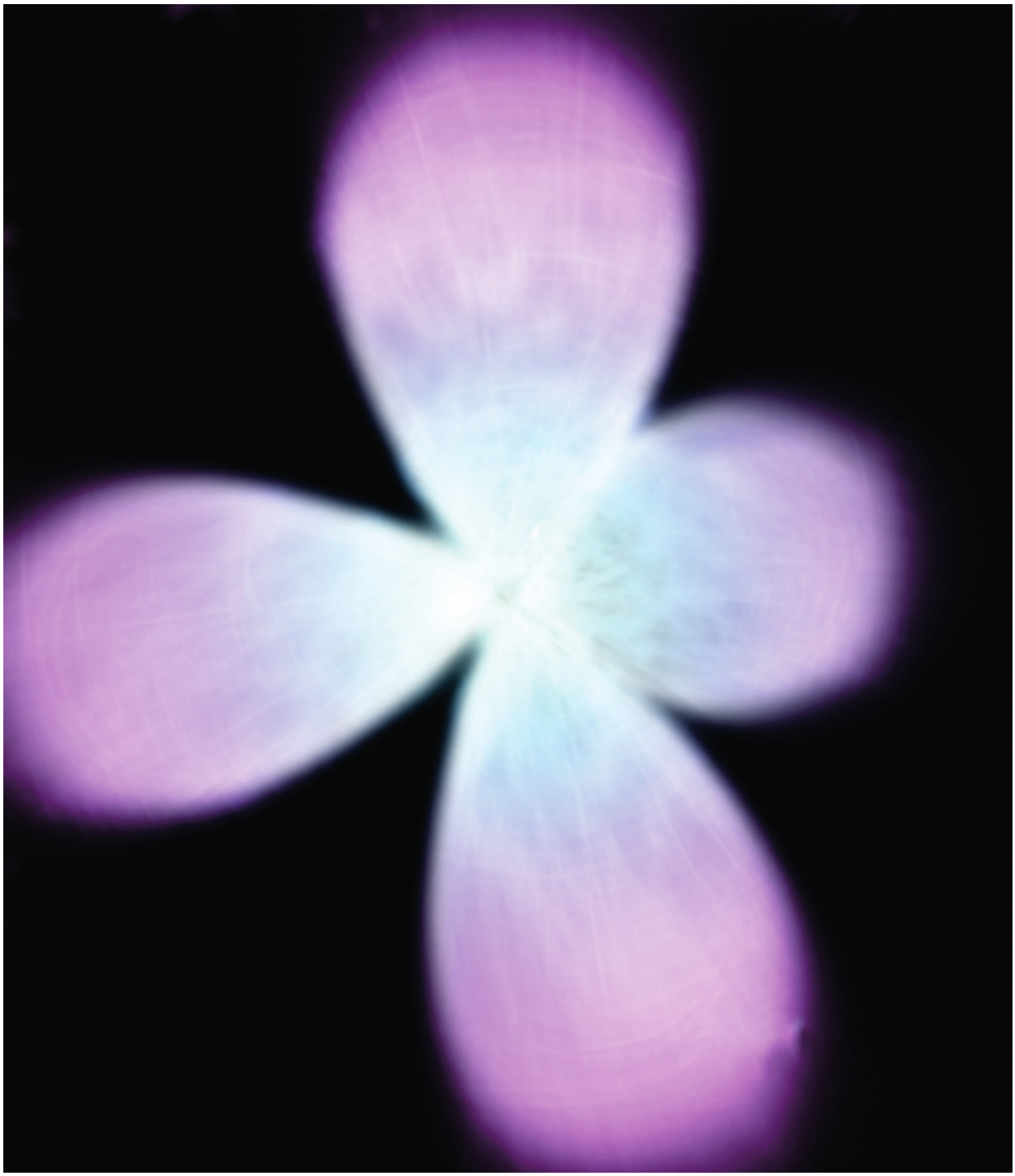
当然，也有很多其他的元素像碳原子这样拥有4个价电子。比如，接下来，作为重元素的硅和锗也拥有这类电子结构。它们与碳原子间的区别在于，碳原子更轻，更小，形成或断开碳链所需的能量变化最少。最终的结局就是碳基分子在动力学上更加灵活，同时能够在无机化学发生反应的温度条件下形成、占有和破坏化学键。这一点在液态水的生成中尤其明显：碳基分子如同不可思议的溶剂一般，成为化学活动性的推动力。最重要的是，碳原子能够轻易地与其他碳原子连接，从而形成长的聚合物，或者链式和分支式结构，以及其他复杂的分子结构。

碳元素在宇宙中的来源也预示着量子物理的一个重要功能。如同其他所有更重的元素，碳元素是由恒星的核聚变（nueosynthesis，该词源于nuclear fusion）产生的。但碳含量之丰富（在当今宇宙中，其原子数量排行第四，位于氢、氦和氧之后）有赖于宇宙的几个关键特性。

大部分碳形态经历了三重α过程：两个氦原子核融合，形成铍－8原子核，接下来铍原子核与另一个氦原子核融合，形成碳。若抛开某

些微妙的巧合不谈，这可能是个非常低效的形成碳的方法。这些巧合极具技巧，或许只有核物理学家才会喜欢，但它们还是值得了解的，因为它们能帮助你抓住基础物理与我们之间的联系。

第一个巧合发生在恒星的内部，铍－8原子核和氦原子核的组合能量刚好能匹配带电的碳－12原子核。这种能量上的“共振”是个关键；它在很大程度上提升了下一步聚变（制造碳－12）的速率。第二个巧合在于，铍－8原子核恰好保持了足够长的稳定状态，因而有机会捕获一个从周边经过的氦原子核。最后一个巧合是，新的碳－12原子核并不擅长迅速融合其他空余氦原子核从而形成更重的氧原子核，所以碳不仅不会被吞食、变成氧，还会一直存在，直到几十亿年后形成你身体里的DNA。



碳原子绑定4颗氢原子的概率密度电子云。

10^{-10}米

碳原子的一生

在我们的生命中，没有其他任何一种元素扮演着如此重要的角色。我们复杂的生物化学完全依赖于碳能够形成强壮而又柔软的分子键的能力。你身体中的10^{26}个碳原子的每一个都经历了一段悠久的，关于机会、偶然和聚合的历史。



审视这种现象的另一条路径就是去探讨，我们的存在以及我们已知的那些生命形式如何深刻地取决于这些深奥的物理学。某些思想家将此视为生命和宇宙学间的深层联系，视为一种“人择理论”认为，正是因为我们在此处观察宇宙，它才“刚好呈现出此般面貌”。对另一些人来说，万物不过是恰好呈现出这种效果，尤其是在考虑到我们

的宇宙只是多重宇宙的其中之一后。对于宇宙是否被迫产生生命，你可能有你自己的想法。不论哪种观点，都是深夜辩论的绝佳话题。

这些关于原子核的故事和谜题，以及我们旅程的这一阶段中不断缩小的房间，都只是接下来的旅程中的调味剂。现在，我们已经一脚迈入量子宇宙的大门了，让我们向着存在的根源继续深入吧。



原子内部。

10^{-11}米

9
难以置信的空洞

10^{-11}米，10^{-12}米，10^{-13}米，10^{-14}米，10^{-15}米

从10皮米到1飞米

从X射线波长到大约一个碳原子核大小

握紧拳头。现在假想一下，你的拳头代表着原子的原子核大小。那么按比例计算，整个原子的半径大约是5千米。原子的99.9999999999999%都是空的（一个典型的原子核，体积只有整个原子的万亿分之一左右，却占据了原子99.9%的质量）。

因此，如果把所有空余的原子空间全部排除在外，你便能够将70多亿人挤压成一块方糖那么大。在地外空间，比如中子星上，引力正在做同样的工作：创造出一个由特殊状态的原子核物质（退化物质）组成的天体，直径只有10～20千米，然而其质量相当于一颗恒星。

这些空旷也意味着你的旅程的下一阶段——从10^{-11}米（10皮米）到10^{-15}米（1飞米）的量级，是一片让人难以置信的空洞。事实上，这比你之前经历的星系际和星际太空之旅要恶劣得多。至少在那里，偶尔还有一个分子或一颗星际尘埃陪着你。而在原子内部，哪怕是遇到一个转瞬即逝的电子都成了一种奢望。虽然电子的物理尺寸不太容易定义（甚至可以说，电子的物理尺寸并没有多大意义），但有些实验表明，电子的大小不及原子的原子核大小的千万分之一。

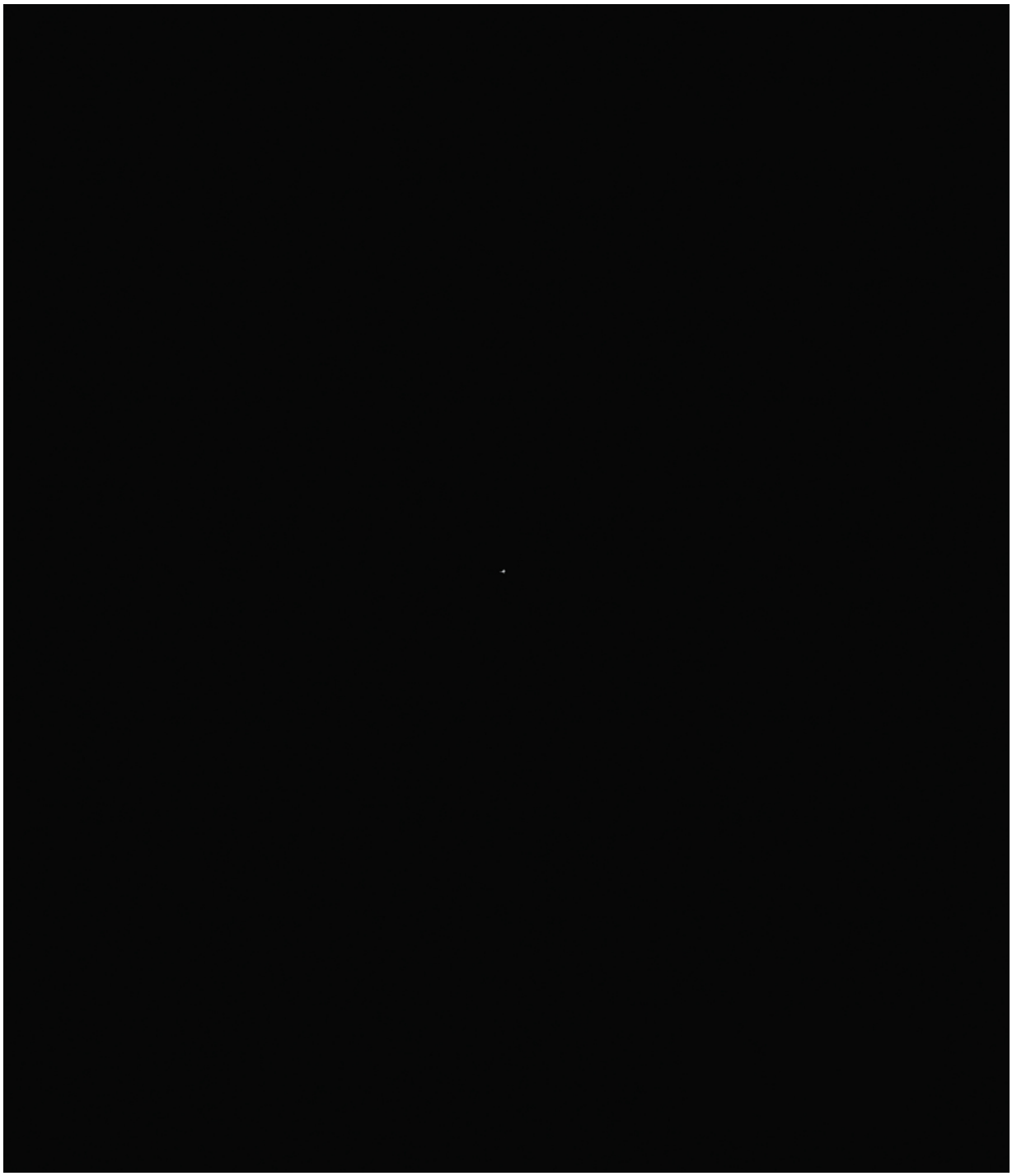
这段穿越空荡原子的旅程确确实实能使你拥有更多的时间，来思考包裹着你的空间的基本性质，以及这种性质是如何与你在上一章中从最细微层面上体验到的奇特现象相关的。



如果你的拳头是一个原子核，那么图中这块区域就是整个原子的大小。

在我们当前对宇宙的探索之旅中，概念上最具挑战性的问题便是基本现实的量子性质。虽然量子物理让人迷惑不已，但这显然就是宇宙运行的方式。

我们成功地将量子物理的数学描述与自然（比如原子物理学）融合起来，从而制造出一些目前人类所知的最精确、预测能力最强的工具。在量子领域，我们也推导出一些关于宇宙基本性质的最精确的实验测量数据。我们测量了一些古怪但又十分重要的对象的数量，例如所谓的电子反常磁矩（anomalous magnetic moment of the electron），其精度达到了惊人的小数点后11位。我们的量子电动力学（QED，包含相对论物理学）曾精确地预测出这一数值，达到了同等级别的精度。



仍然是原子内部；远处出现了一个小亮点。

10^{-12}米

我们对这些微观现象进行的数学物理研究效果极好，应用了功能多样的研究工具，涉及范围从狄拉克矩阵和波函数的构建，到优雅直观地描述粒子相互作用的费曼图。我们也发明出了强大的、高度数字化的设备，它们的名字令人印象深刻，比如“对称环境”“希尔伯特空间”“运算符”，以及“特征值”。

然而，所有这些数学物理研究的核心都是一种让我们备感困惑的反常物理。海森堡不确定性原理告诉我们，物体和系统的特性是不可分割的，两者具有互补性。比如，我们无法同时精确地测量一个粒子的位置和动量：若其中一个数值测量得比较精准，那么另一个就无法确定。这种不确定性并不只是由我们的观测所导致的，它是一种固有的属性。

微小物体呈现出的特性，既可归于离散粒子，又可归于波型实体。而在我们传统的、宏观的世界中，粒子与波这两种特征通常是互不兼容的。

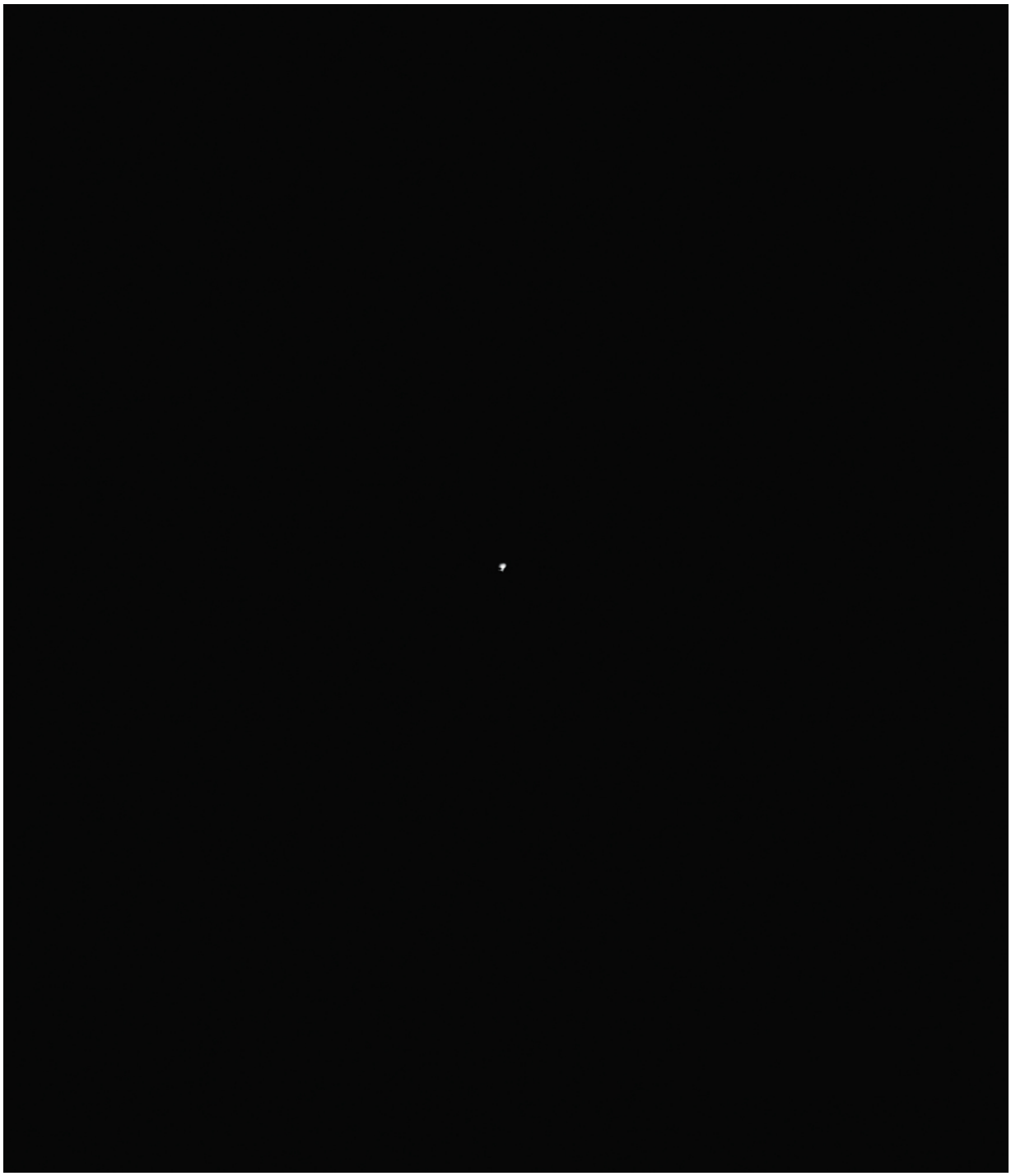
科学家仍在尝试解决所有这些问题，而我们也有一些选择能够帮助我们理解量子世界。

量子物理的三大阐释

举个例子，量子力学中所谓的“哥本哈根解释”表明，唯一的真实只来自概率和统计。这就像是沿路向下滚动的骰子一般。本质上，粒子既不在此处，也不在彼处，直到某物和粒子发生了交互作用后，这些粒子的位置才得以确定。它们的去向由概率云给定，由波函数描述，其精确的行为由一种叫作薛定谔方程的数学装置所获取。一旦对粒子进行观测（影响），波函数就会“坍塌”，并由此确定粒子的位置和性质。

哥本哈根解释认为，在波函数失效之前，根据方程所述，粒子本质上存在于任一位置、所有位置。如果我们不喜欢这一点，那可就不好办了，毕竟大自然才不关心我们是否开心。

虽然哥本哈根解释是关于量子力学基本性质的理论中最受欢迎的观点，但它并非唯一的。另一种观点曾在20世纪早期及中期被提出，该观点认为，粒子确实如离散的“传统”实体一般存在，它们有着明确的位置，但同时与一种叫作“导航波”的物质一起存在。导航波决定了粒子移动的路径及方式，例如，它们会衍射和干涉粒子（另外一种波状性质，我们可在10^{-10}米这一量级中遇到，也就是最后一扇导致你身体衍射的缩放房门）。我们需要两个方程来描述对量子世界的这种解读：一个是波函数，另一个是将粒子行为与波关联起来的方程。

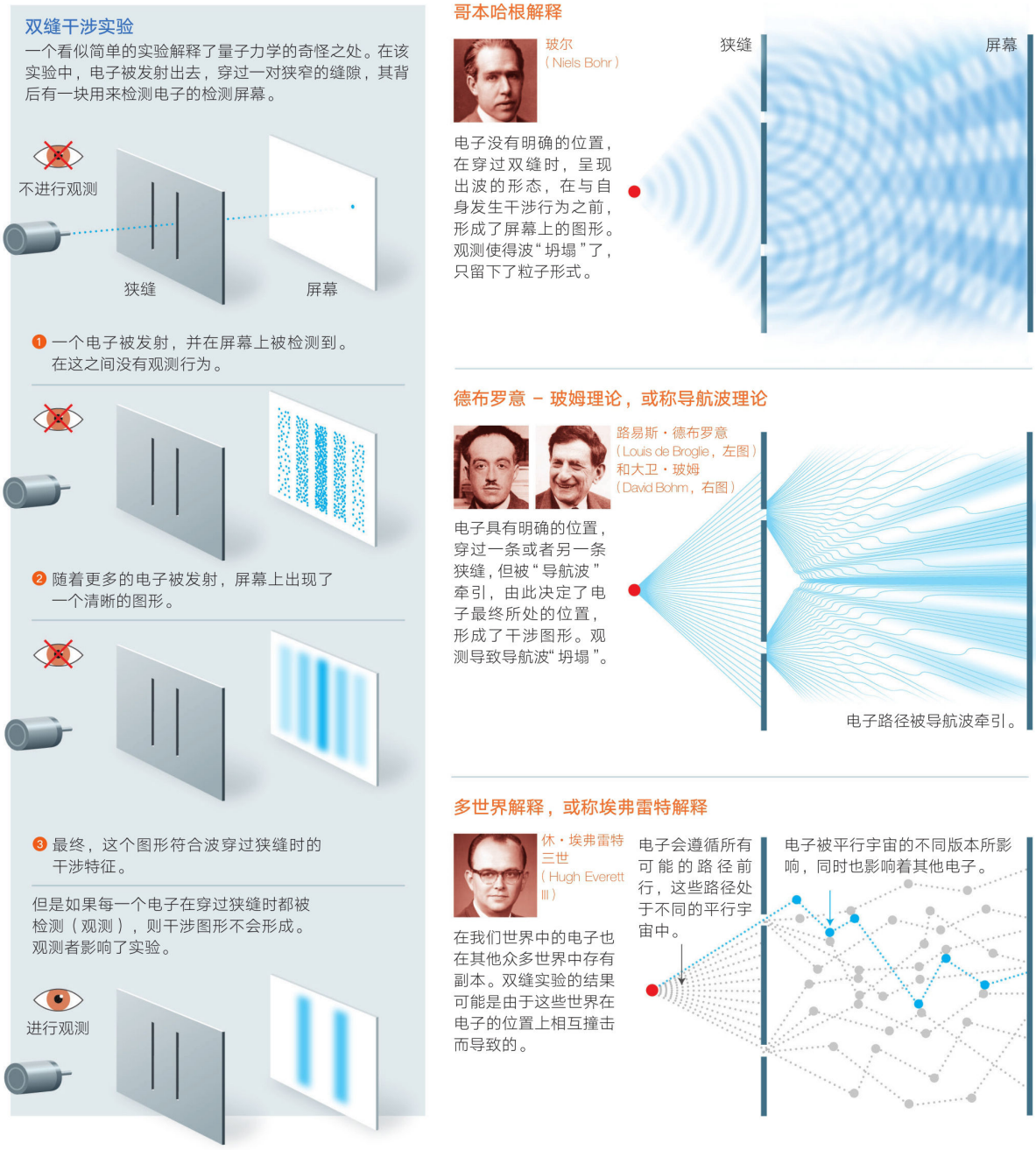


更远处，但仍然在原子内。

10^{-13}米

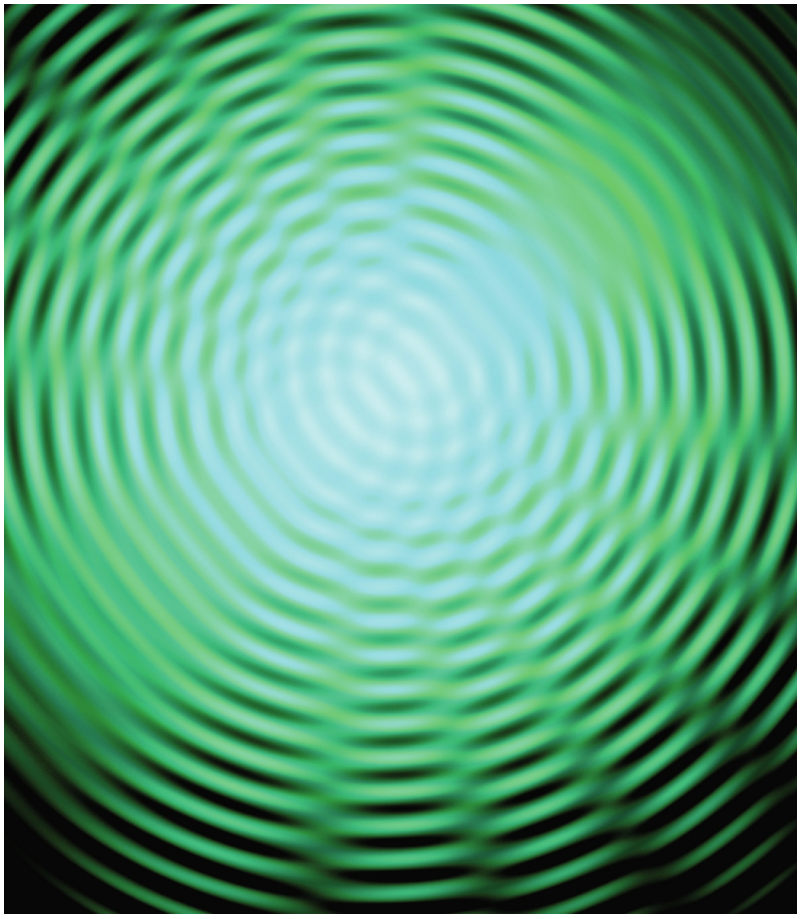
量子力学的三种不同解释

虽然量子力学对于原子、量子及亚原子粒子等系统的描述十分出色，但物理学家仍然在争论，在更深层次上粒子究竟发生了什么。



这种所谓的量子力学德布罗意－玻姆理论（de Broglie－Bohm version）与哥本哈根解释中的许多预测是一致的，但它坚持认为粒子就是粒子，波就是波。这一理论也暗示宇宙是确定不变的。所以如果你知道宇宙中某一瞬间所有物质的性质，你应该（原则上）能够预测出未来会发生什么。

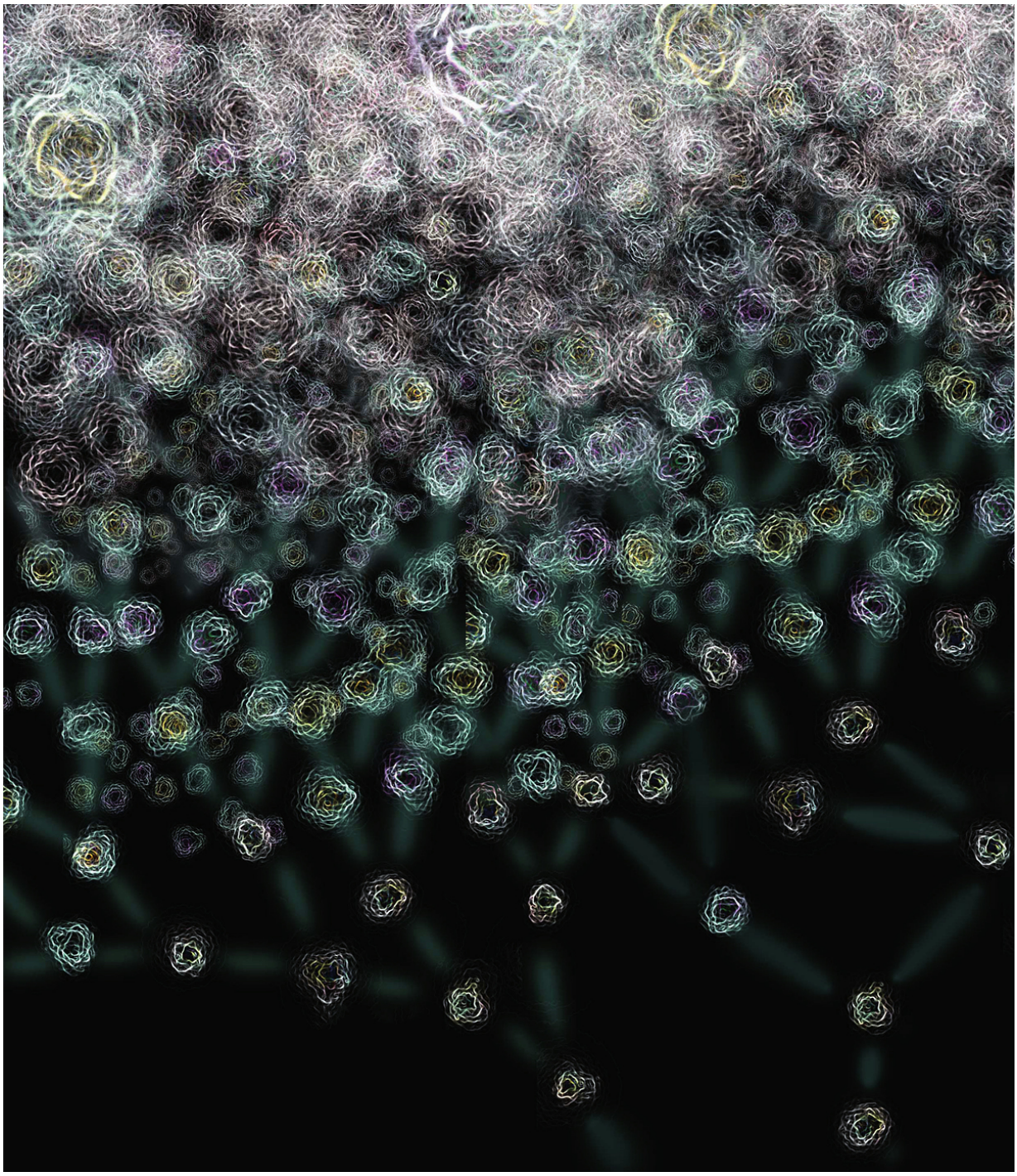
但是一个被称为非局域性（non-locality）的棘手问题出现了。本质上，两个粒子之间一旦互相有了联系（例如，两个粒子是在同一亚原子过程中产生的），那么当它们冲向宇宙时，它们仍会保持联系（纠缠）。一个粒子随后的状态将会影响另一个粒子的状态，即便它们的距离非常遥远。这种性质能够在对光子、原子甚至更微小的固体物质所进行的实验中得到证实。这也是量子领域中最奇特的方面之一。



波的干涉图形。

哥本哈根解释处理了这种“鬼魅般的超距作用”（爱因斯坦的说法，用来描述他对量子物理整体性质的怀疑），不过其处理方式基本相当于耸耸肩说：“事情就是这样的。”德布罗意－玻姆理论试图做出更进一步的处理，它表示一个系统的波函数没有空间限制，它确实

遍及全宇宙。一个粒子的行为总是与其他任何由同一波函数掌控的粒子绑定在一起。



每一件事都会把一个世界拆分成无限多个可能的世界吗？

但是还有另一种理解量子力学的方法：多世界解释，或称埃弗雷特解释。用基本术语来说，多世界理论认为，波函数描述了某物既不“坍塌”也不“引导”粒子的发生概率。相反，所有能够发生的可能事件一定会发生，只不过它们不在同一个世界里发生。

这是一种非常具有挑战性的后设理论：宇宙中的一个电子发生碰撞的每一种可能的结果，每一个光子的折射和衍射，每一种放射衰变，每一个亚原子事件，都衍生出了一个独立的世界，都对应着一种平行的存在，特定世界会产生特定的结果。换句话说，我们所经历的这一瞬间的世界，只不过是这一瞬间所发生的无限可选路径中的一条。

有了类似这样的观点，还有谁能“指责”物理是无聊的呢？

颜色、气味以及复合材料

所有这些对于量子的思考都说能帮助你度过缩小量级时遭遇原子空白的时间。随着我们到达10^{-15}米的量级，我们就可以仔细看看宇宙的一些原始成分了。我们即将近距离接触原子核物理。

在每个原子的中心处，是其原子核。最简单的原子就是一个单独的质子，一个具有正电荷、质量约为电子的1 836倍的粒子。将更多质子放在一起，那么中子的数量自然也会增加。中子，即电中性粒子，它几乎只比质子质量重0.14%。稳定的原子核倾向于有着几乎相同数量的质子和中子。但是总体来说，中子与质子的数量之比，会随着原子核大小的增加而增加。比如，最普遍的稳定元素铁，其原子核拥有30个中子和26个质子。

原子核是个棘手的问题。它们看上去很复杂，质子和中子通过一种原子核力（“强原子力”）“感受”所有其他质子和中子的存在。完整的原子核能够呈现一系列的行为，包括“令人激动的”能态，甚

至那些双中子位于主原子核之外的情况，即晕核（halo nuclei）。过去几年里，物理学家给原子核建立的模型包括将它们描述成液态水滴，或者是有着能量外壳的全量子物体（与原子的电子极为相似）。

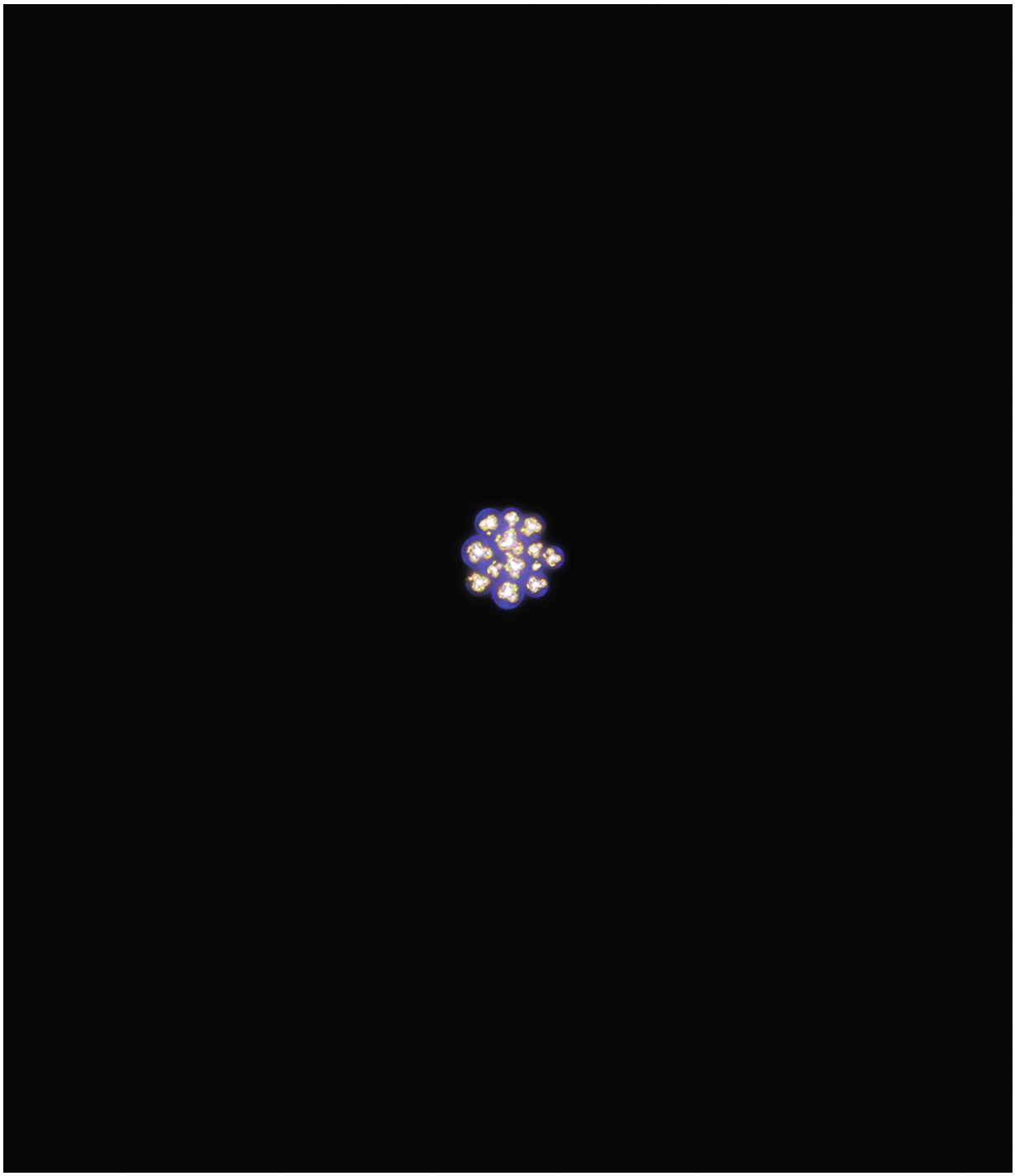
不同数量的中子可以与拥有同样数量质子的原子核绑定，这导致了同一元素中有差别的原子，即同位素，这一系列原子通常是不稳定的（放射性的）。每一种元素都有36种不同的同位素，元素氙和铯的同位素最多：氙有9种稳定的同位素和27种具有放射性的同位素，而铯有1种稳定的同位素和35种不稳定的同位素。

属于同一元素，但作为不同同位素的原子有类似的化学性质，因为它们分享和交换电子的方式大体相同。但是不同同位素的质量和电子能级的微妙变化，确实会导致一系列可检测到的不同行为。比如，生物通常更倾向于由更轻的同位素构成，最简单的原因就是，更轻的原子活动所需的能量更少。在观察某个环境样本中存在什么样的同位素时，这种倾向性能帮助我们检测生命系统的存在并解密其行为。温度也会对不同同位素的化学反应产生不同的影响。这改变了化合物中的同位素比率，留下了能够延续成百上千年，甚至亿万年的独一无二的特征。

之前游览星系区域时，我们便找到了地球的原子核花园之起源。因为我们的太阳系是星际物质浓缩而成的，所以地球上的所有原子核都有着一段长长的历史，深锁在它们10^{-15}米的区域内。在自然界，恒星中的核聚变所生成的重元素中，最重的是铁元素（稳定的铁元素拥有56个质子和中子）。聚变反应吸收热量，意味着它们所释放的能量不再比开启聚变反应所需的能量多。这使得那些暴烈的超新星，或者古老又巨大的恒星能够形成更重的元素。在这种高能态的环境中，多余的中子和质子实际上能够被迫结合在一起，即使该过程吸收能量而非释放能量。这就是钴、镍、铀甚至钚等元素形成的地方。

我们也发明了形成更大、更重的原子核的方式，比自然界能够形成的还要大。超大原子核非常独特：一个相对稳定的有着非常多质子和中子的小岛，与原子核本身内部的倾向性能级相关。目前最大原子核的纪录持有者是oganesson（之前叫作ununoctium，源自拉丁文的“118”），其质子数为118（中子数176），但它只有890毫秒的半衰期。

但是，这些如此丰富的复杂性究竟来自何处？严格来说，质子和中子并非真正的基本粒子。相反，它们也是组合物。一个质子实际上是由3个叫作“夸克”的实体组成的（两个“上夸克”和一个“下夸克”），这3个夸克通过强原子力（或色力）绑定在一起，介于其间的是几乎无质量的“胶子”，它们在很短的距离内进行交换。夸克携带了1/3单元的电荷（一个单元为一个电子所携带电荷），能够经受所有基本的相互作用——引力、电磁力、强相互作用及弱相互作用。一个中子也是由3个夸克所组成的，一个上夸克，两个下夸克。

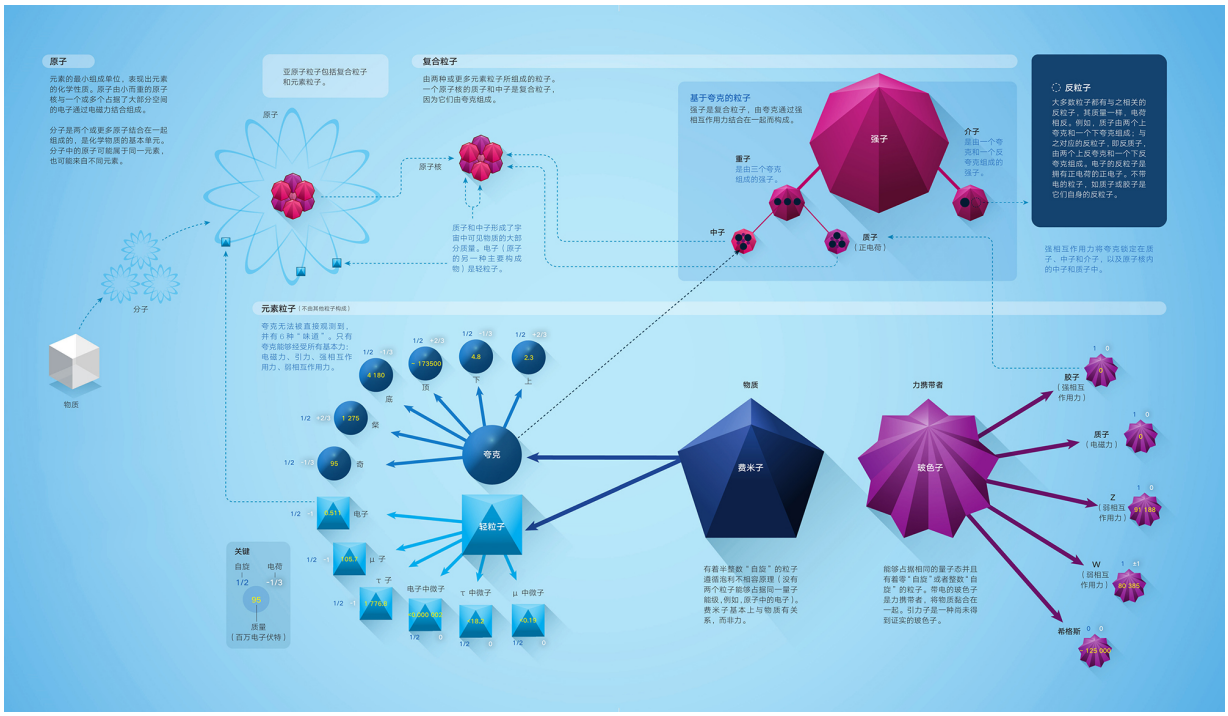


碳原子的原子核。

10^{-14}米

亚原子粒子

遍布宇宙的基本要素，包括光子、希格斯玻色子等。诸如质量、电荷及量子力学“自旋”等的性质刻画出一组不同的族群。亚原子粒子的存在时间是短暂的，它们在不同的条件下被创造和毁灭，其能量和质量可交换。

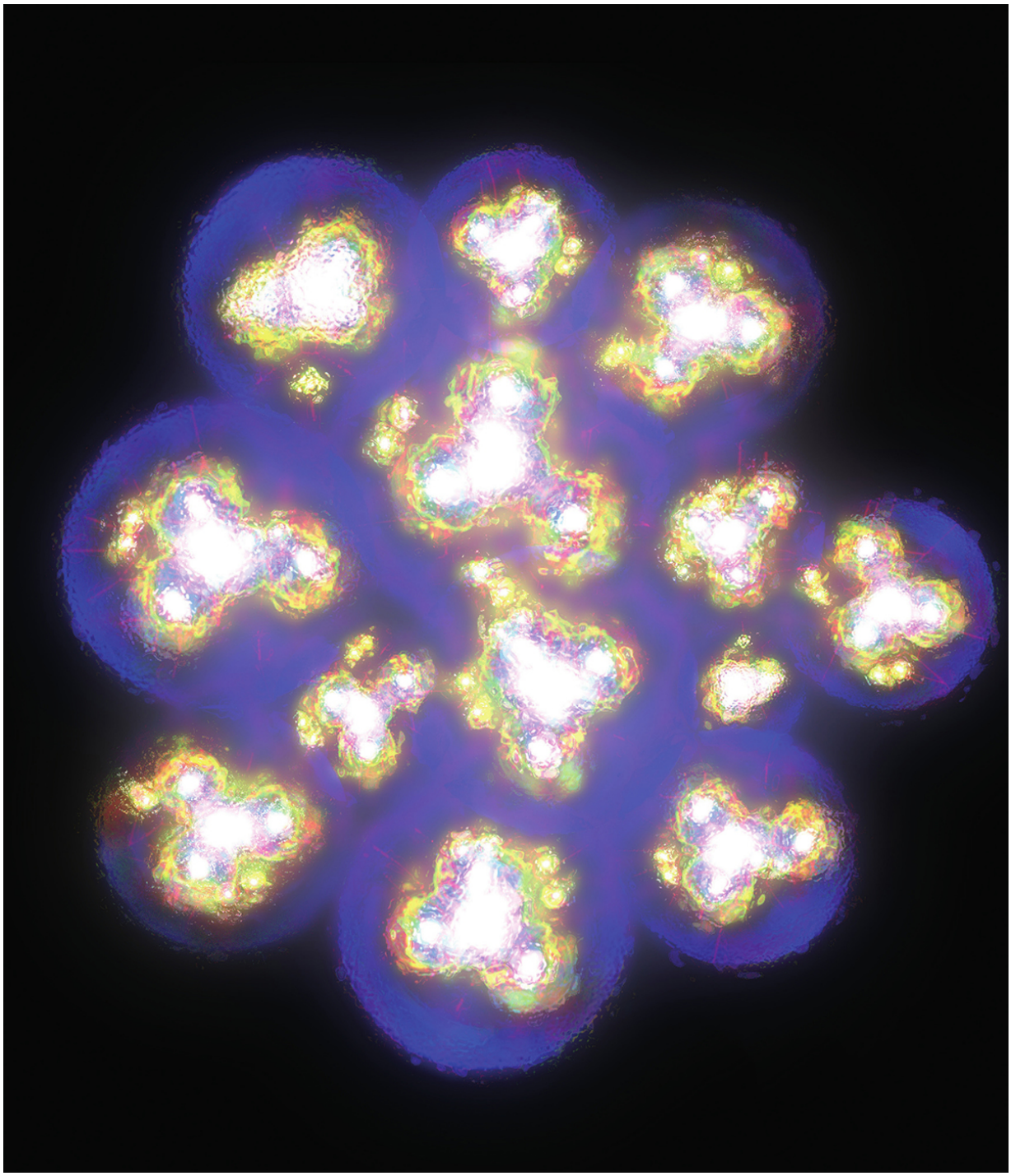


请深吸一口气，接下来还有更多粒子等着我们。刚刚提到的只是质量最小的夸克，还有一些质量稍大的粒子（并未在质子或中子中找到），它们有着不同的“味道”，被叫作“奇夸克”“粲夸克”“顶夸克”以及“底夸克”。另外，质子质量和中子质量的99%都来自夸克的动能（运动的能量）及胶子的能量（感谢爱因斯坦的相对论）。如果能拆分出单个的夸克，则它本身几乎是没有质量的。在质子或中子中，这3个夸克也成了一片虚无的夸克和反夸克云，叫作“海夸克”。

如果以上这些没有给你带来任何安全感，那么欢迎你来到亚原子的奇异世界。在你穿过空荡的原子后，这里是一片崭新的富有活力之地。

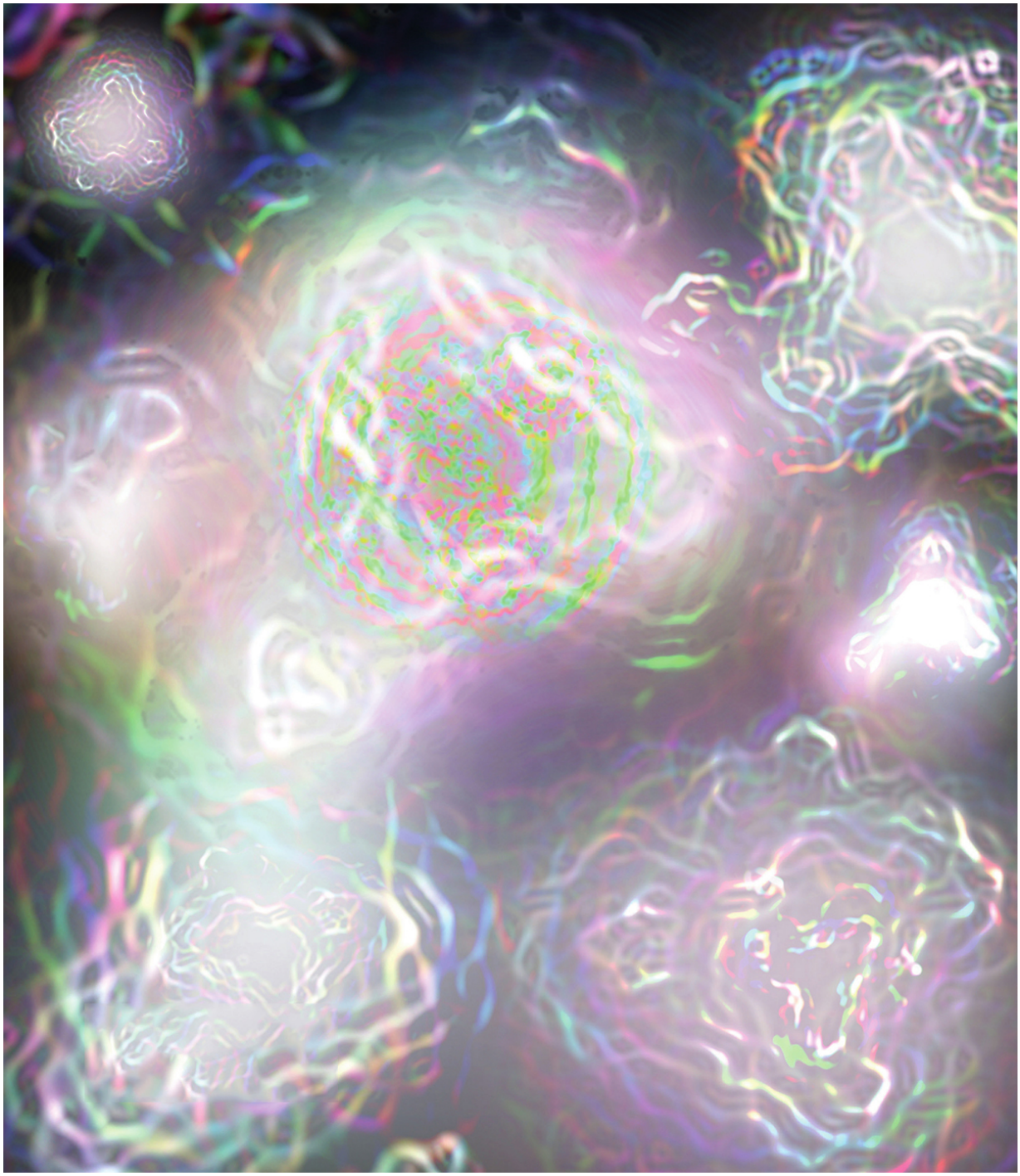
让我们暂停下来，思考一下。50亿年前，我们只是宇宙中零星存在的、污垢般的“元素”，飘浮在太空中，这些元素自行组成了电子、夸克和胶子。现在，我们是能够自我维系的生命形式，已经进化出对自身和周边宇宙的认知。我们的大脑使用着860亿神经元，经历了许多代的更迭，我们发明出了能够揭露本质的数学结构，而它与我们的日常经验基本毫无共通性。

这种情况被享誉世界的爱因斯坦总结出来，他十分震惊地宣布，宇宙中最让人无法理解之事恰恰在于宇宙是可以理解的。换句话说，真正让人无法理解的，就是宇宙能够理解它自己。



质子和中子本身是复合物。

10^{-15}米



10^{-16}米

10
时空深处的旅程终点

10^{-16}米，10^{-17}米，10^{-18}米，以及……10^{-35}米

从1/10飞米到普朗克尺度

从近似质子半径到几乎空无一物

这里将是最后一个量级。从10^{-16}米开始，或者说从质子这一量级开始，我们跳到了一条通向兔子洞底部的路径上。

令人震惊的是，我们的最终目标指向了第19个数量级。这段旅程与前几章中从整个可见宇宙到熟悉的地月系统这一部分类似。但这所有一切都发生在一个质子之内。

质子的内部结构比我们所预想的要复杂和混乱得多。虽然我们已探测出这个复合物只包含2个上夸克和1个下夸克，但是这只是一部分而已。

拉到更近处来观察，我们发现，这个复合粒子的结构包含一堆胶子和成对的夸克与反夸克，后者在不确定性原理的容差范围内出现又消失。能量和时间被借出又被平衡；物质在宇宙记账员生气之前出现又消失。

如果在某一瞬间，你能够挑出所有互为补充的夸克和反夸克，那么质子内部将只剩下2个上夸克和1个下夸克。这3个夸克也就是外界世界能够探测到的东西，它们具有不对称性。



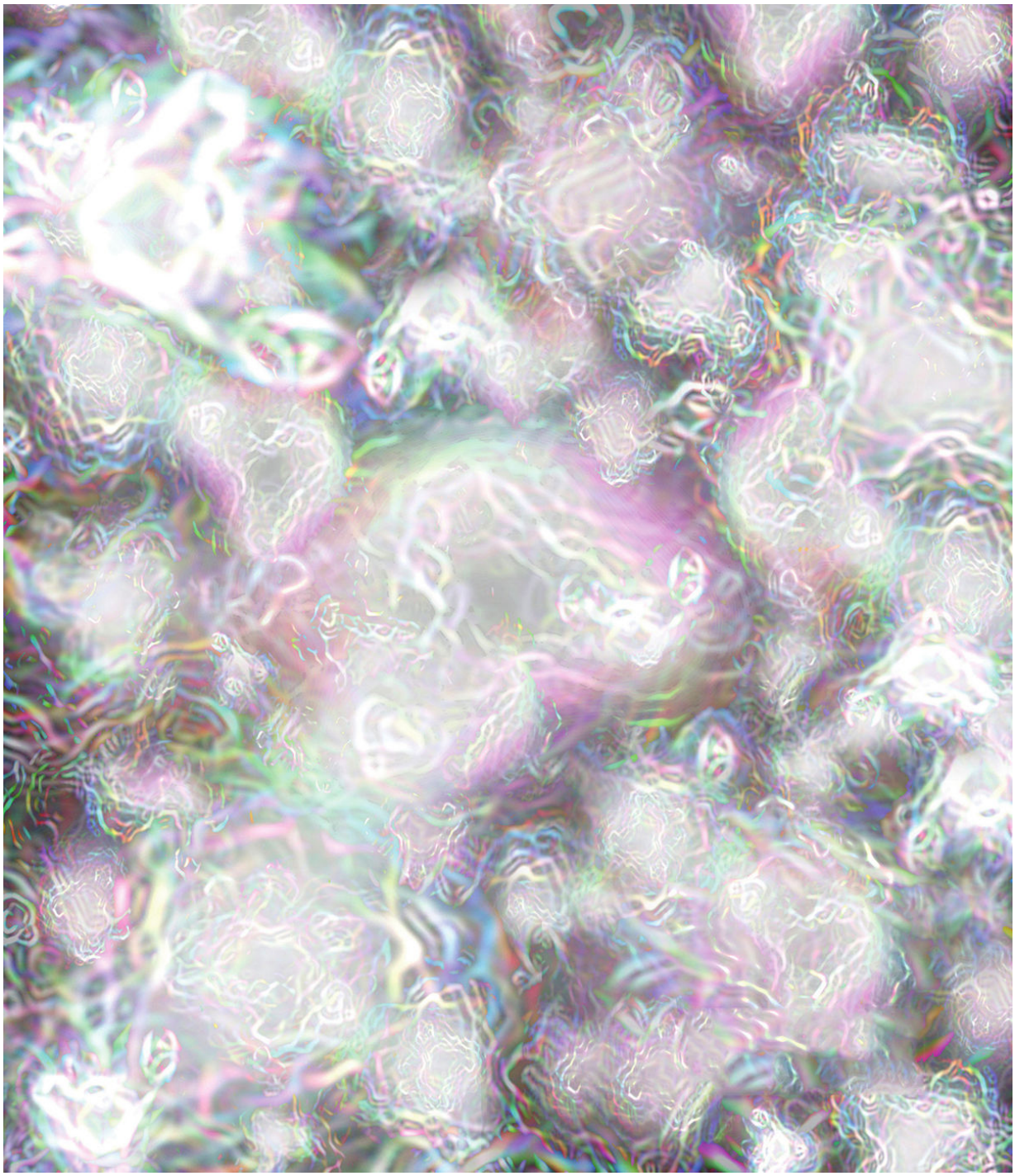
质子的内部是一片虚拟粒子海。

在这些量级以及此般异样的环境中，我们有必要改变早先的一种观点：现实是由“粒子”和“波”组成的（然而波的数学应用在这些量级中仍然是值得一提的重要部分）。相反，经过深思熟虑，我们用“场”和“量”予以替换，这种说法更易理解。

从石质工具到场理论

场是一种数学函数，是一种代数的精巧设计，能够生成一种在某些时刻取决于物理位置（x，y，z）以及时间的结果。这个结果可能是

一条橡皮筋的长度，可能是大气的压力或者在特定地点、特定时间的海平面高度。场的概念十分抽象，所以它可能也适用于所有物理量和各种现象，从深奥的数学族群到政治家的自我认知范围，而不仅仅适用于物质。



虚拟的糊状物。

10^{-17}米

严格地说，你也能创建一个适用于物理中许多基本现象的场。比如，电磁力能够用场的数学来表示。同样，爱因斯坦的广义相对论公式也能用场来解释。事实上，物理中场的一个重要性质就是，它并不需要关注它自身与它所处其中的媒介的关系。

场能够移动，也能被改变，变得有能力携带波。这些波或许只能以特殊状态存在。关于场携带波的行为，如果我们忽略一大堆使之得以实现的数学物理原因，那么简单来说，这一行为使我们来到了“量”这一观念的边界。

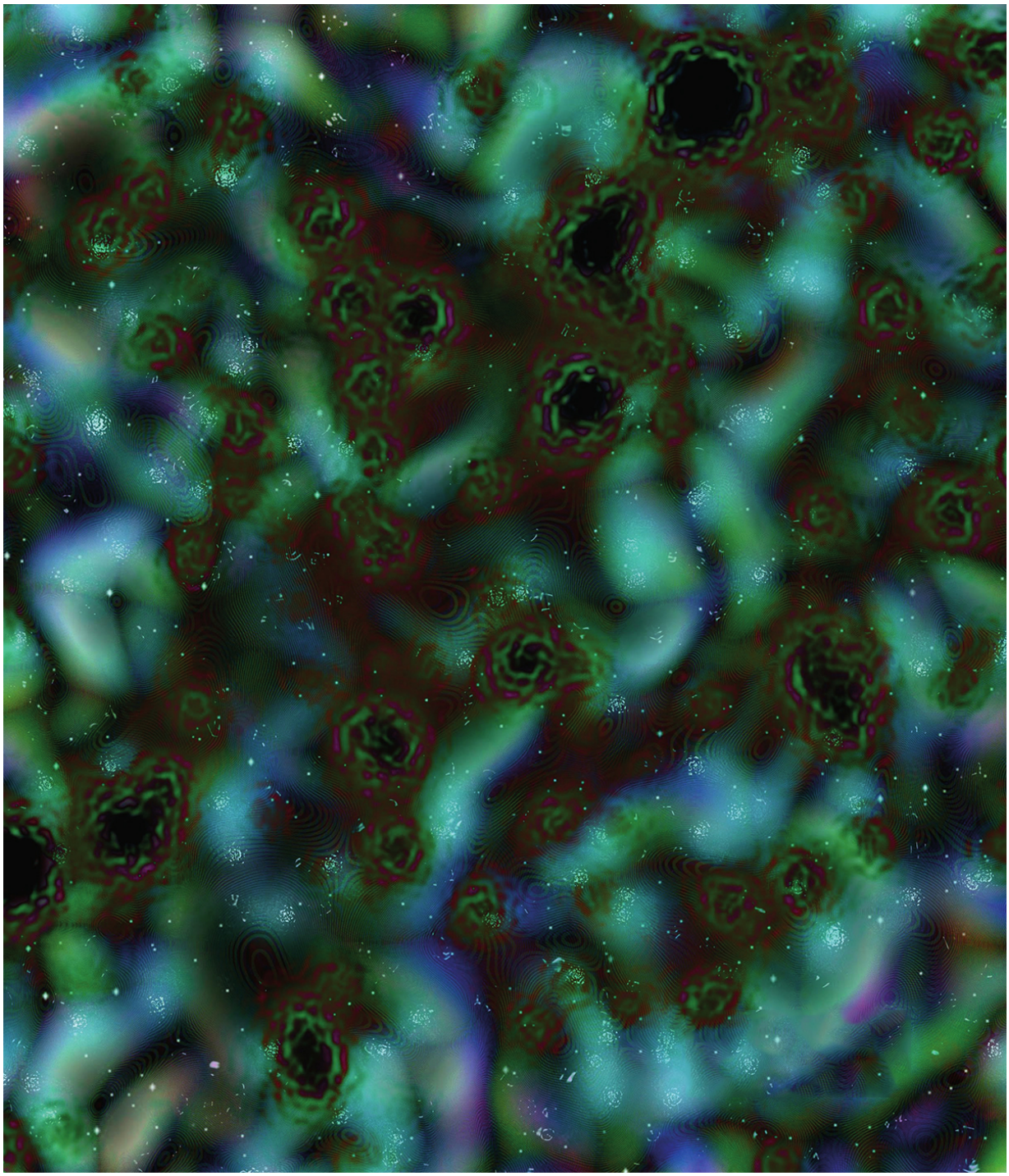
想象一种场，其中的能量能够使波以一定幅度、频率和均势（静息水平）进行传播，就像池塘水面上的涟漪。但碰巧这些波的频率是不连续的。存在一个最小的潜在频率（或者说潜在的最长波长），而且该频率并非为0。这就像是池塘的涟漪绝不会超过某个最大距离。

这些便是相对论量子场的特性。最小的潜在频率实际上与量子场对应。就像池塘中波及范围最远的涟漪般，这种量子具有最小的能量，而能量又与我们之前所说的粒子（感谢爱因斯坦的著名公式：$E=mc^2$）的质量对应。其他形式的场不需要大量的粒子，例如量子色动力学和无质量胶子的场理论。

你可能已经晕头转向了，所以我们便将这里画为底线吧：最好将那些所谓的粒子看作各种相对论量子场的量子，也就是量子场所能形成的最低频的涟漪。无论这些粒子是电子、质子、夸克、胶子，还是从中微子到希格斯玻色子的其他东西，它们都是量子场的激发源。所以，当我们讨论到亚原子物理时，我们实际上讨论的是来自场的回弹。当你听到科学家们因探测到一种希格斯粒子而感到激动时，实际

上，让他们激动的并非那种粒子，而是粒子所揭露的希格斯场的存在。

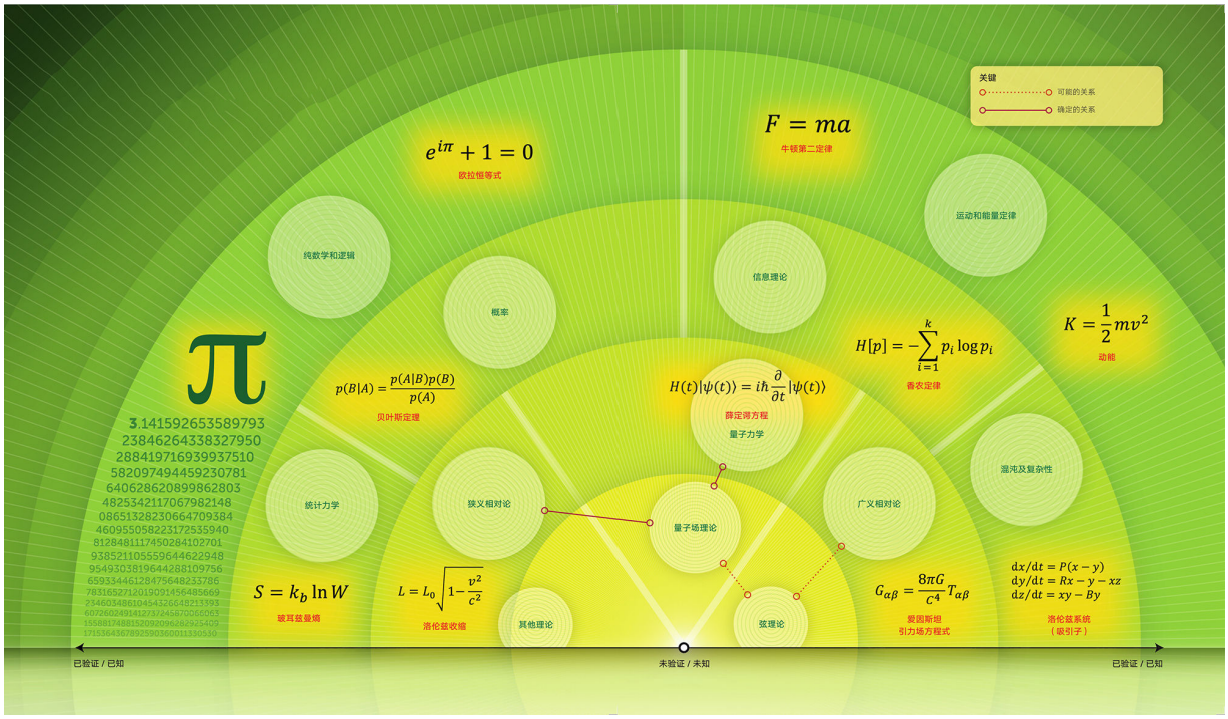
这是一种思考亚原子宇宙的方法。我们正在触及人类知识的真实底线和调查工具的局限性。场、波和量只是我们寻求洞察世界基础的一个方面。它们也恰好给我们提供了一些科学史上对世界特性所做的最为精准的理论预测。



10^{-18}米

物理宇宙说明

数学语言允许我们尽力解决物理现实的性质。但是随着我们理解的不断深入，从结数学和物理基本定律到统计力学及其复杂性，再到相对论、量子力学和其他理论，我们的理解越来越不完整。



自始至终

目前对于不确定性原理的认知告诉我们，在10^{-35}米的量级，宇宙不再表现出任何可接受行为的表象，至少不再体现任何我们所知的规则。

我们知道，光需要5×10^{-44}秒来走过10^{-35}米这一段距离，这两者就是普朗克时间和普朗克尺度（两个基于真空特质的物理常数）。我们在其他性质的常数组合，例如光的速度、引力常数、普朗克常数（与光和物质的量有关）以及π中，追寻着普朗克时间和普朗克长度

的起源。从这个角度来说，初看上去，普朗克单元可能只是有趣的数字游戏。

然而我们怀疑，某些重要的事情在这一量级发生了。

似乎这一尺度没法再进行进一步的真实测量：位置和时间的整体观念因不确定性而崩塌。理论物理指出，在这个级别，时间—空间的结构不再是平滑的。相反，时空可能是“离散的”（discretized），它们能够量化成不可分割的位。在这一量级，我们真的需要量子引力理论来面对现实。然而我们目前还没有形成一套完整的理论。

这个量级也是虚拟黑洞出现并消失的尺度，就好像它们也是场的量子一样。对于人们广泛讨论的弦理论来说，这也是有意义的最小尺度了：大约是形成所有元素粒子（是的，弦、场、量子引力，所有这些混在一起）的震动弦的大小。

关于超小量级的另一种令人感兴趣的说法是，时空本身变成了量子泡沫。如果这种说法正确，那么我们所熟知的简单的空间几何将无法在这样微小的范围中存续。相反，时空会扭曲并震荡，带着不确定性的怒火冒泡、颤涌。这种量子泡沫的想法可以延伸到虚拟粒子（量子）在真空中不断地出现又消失的观念。正是这种真空虚拟“海”，可能与我们在最大量级上看到的推离宇宙的暗能量相关。在量子泡沫的假设中，时空的结构因虚拟的扭曲和反转而扭动。

我们是否有希望证实量子泡沫的存在呢？可能会有那么一天吧。在10^{-19}米这一尺度（很小，但距离10^{-35}米还远着呢），我们能够确认时空仍然是平滑而有规律的。但在尺度之梯的底部到底是什么，现在仍不得而知。

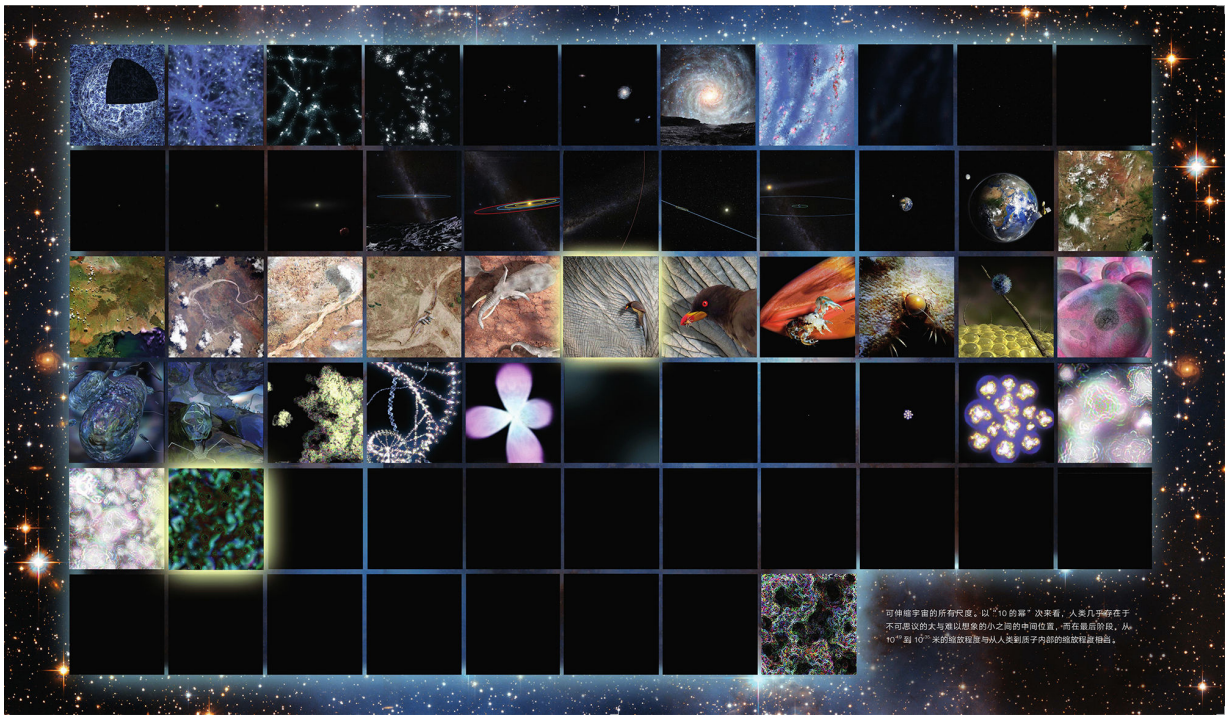
端到端

现在，在穿越了60多个数量级后，我们迎来了我所谓的“现在该结束了”之时。当然了，我们也从这里开始，从普朗克尺度开始，不断提升数量级，直至充满闪闪发光的宇宙尘埃和结构的可观测宇宙。其本身并不像一颗复合粒子，而更像一个散布着能量和活力的地方。

这段旅程将带着我们从一个质子内部，到一个碳原子内部，到一条脱氧核糖核酸内部，再到一个虱子细胞表面的细菌细胞内部；虱子在鸟的鸟喙上，鸟藏身于大象皮层上，大象身处东非大裂谷的一小片灌木丛中，大裂谷坐落于一颗岩石行星的一块浮动地壳的大型大陆一角，这颗岩石行星深藏在一颗恒星的引力井之中，恒星处于孤寂的星际空间，而星际空间内有一片旋转的，由气体、尘埃和暗物质组成的星系，这是一组星系和其他星系超星系团的一部分，分布在一片138亿岁、正在膨胀、大部分空荡荡的时空之中。



我们的宇宙环境影响了我们看待现实的方式。



可伸缩宇宙的所有尺度。以“10的幂”次来看，人类几乎存在于不可思议的大与难以想象的小之间的中间位置，而在最后阶段，从10^{-19}到10^{-35}米的缩放程度与从人类到质子内部的缩放程度相当。

这些方向与焦点的选择很是有趣，因为这必然反映出人类这一物种以及我们自身所处的特定环境中的一些问题。如果这本书在100年或1 000年后写就，会是什么样子？如果这本书由1亿光年之外的外星生物执笔，又会是什么样子？

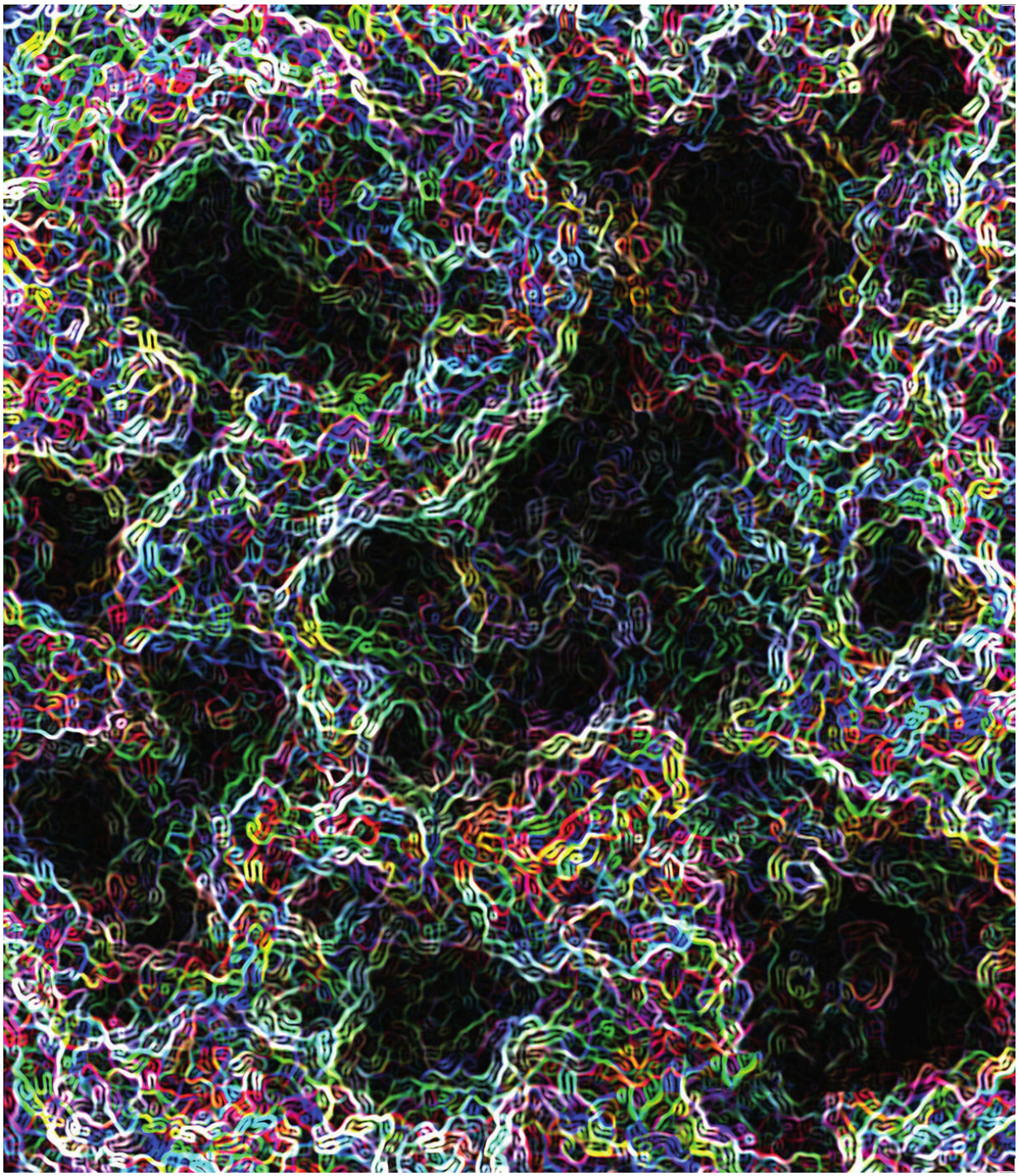
那些假想的作家、艺术家和设计师（或那些外星球上的类似角色）会遵循同样的轨迹，当然在细节上会有所不同。地球上的另一块大陆会被放大，一块不同的岩石、水或生命会被放上舞台。或者，它们笔下有可能会出现一个完全不同类型的星系：一个新的恒星宿主，另一个行星家园。

然而在本书呈现的时空范围内，对人类自身而言，我们所走的这条路径并不陌生。在自然界中，无论是场、量子及宇宙中的各种力，还是复杂因素、新事物和组织的潮涨潮落，一些基本定律总在其中发

挥作用。这些规则形成了一种语言，这种语言如此丰富，足以超越时间或空间的分隔。而我们只需要学习如何翻译它。

这项任务是很有可能完成的，我们将尝试做更多这样的翻译。解剖学表明，现代人类已经存在了约10万年。这只是宇宙年龄的0.0007%。人类只是走过了宇宙漫长历史中的短短一瞬，而我们的科学已经能带领我们跨越60个数量级了。

换句话说，如果将宇宙年龄等同于一个人的一生，那么宇宙只不过花费了5个小时的时间，让我们人类这种生命形式出现，并对宇宙有所理解。



结束点：普朗克尺度，最为和谐的时空结构的深处。

10^{-35}米

我们正在通过计算机和算法，通过我们的医疗优势和不断累积的知识来加速并扩展我们的思维。这些思想是最宝贵的东西；我们需要珍惜这70多亿不同思想。漫步在当今这颗岩石星球的某些地方的人，可能就是能将我们带往下一级别观念的人。这个人可能身处于任何地方，从非洲到亚洲，从大洋洲到欧洲，或者美洲。这个人更有可能就是你。

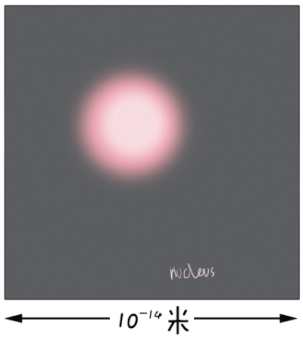
而下一段旅程至少会同这一段一样精彩。



另一个地方，另一个尺度的故事。

知识链接

在任一量级，我们已知的事情有哪些呢？以下是一张非常不完整的清单。

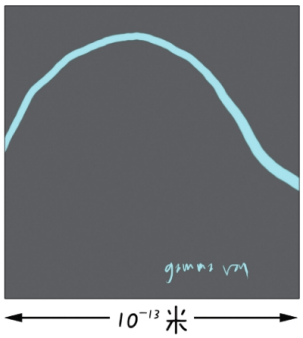


0.001飞米（fm，1飞米是10^{-15}米）或更小：高级LIGO引力波探测器在频率40赫兹时的粗略镜像位移灵敏度

0.84飞米：质子的有效直径

0.1纳米（nm，1纳米是10^{-9}米）：氢原子的有效直径

0.14纳米：碳原子的有效直径



0.8纳米：氨基酸平均大小

2纳米：DNA α 螺旋的直径

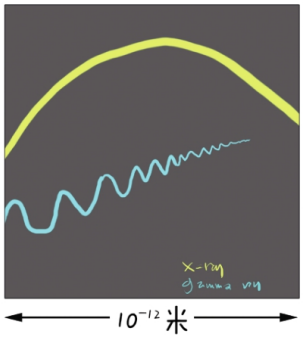
4纳米：球状蛋白的大小

6纳米：肌动蛋白丝的直径——细胞骨架的一部分

7纳米：细胞壁的厚度

20纳米：核糖体的大小

25纳米：微管（细胞的细胞骨架或结构支撑的管状结构形成部分）的外径



30纳米：较小的病毒（如猪圆环病毒，它的基因组为单股环状DNA，由1768个碱基对组成）的直径

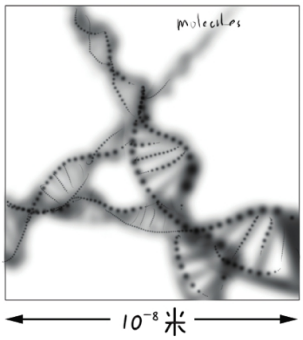
30纳米：鼻病毒（普通感冒病毒）的大小

50纳米：核孔的大小

100纳米：逆转录病毒（如HIV）的大小

120纳米：大型病毒（正粘病毒，包括流感病毒）的大小

150～250纳米：大型病毒（杆状病毒、副流感病毒）的大小

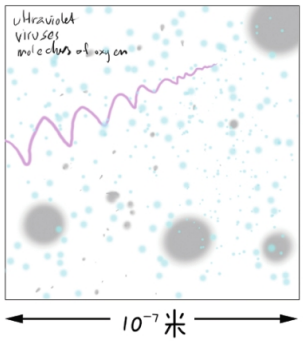


150～250纳米：已知较小的细菌的大小

200纳米：中心体（动物细胞中的圆柱状细胞器）的大小

200纳米（200～500纳米）：溶酶体（真核细胞中的细胞器，帮助分解蛋白质、碳水化合物等）

200纳米（200～500纳米）：过氧化物酶体（真核细胞的细胞器，帮助打断长链脂肪酸）的大小



750纳米：约一个巨型拟菌病毒的大小

110微米（μm，1微米是10^{-6}米）：原核生物（细菌、古细菌等）的普遍大小

1.4微米：丝状埃博拉病毒的最大长度（约80纳米宽）

2微米：大肠杆菌（一种细菌）的大小

3微米：真核细胞内的大型线粒体大小

4微米：小型神经元的大小



5微米：植物细胞内的叶绿体长度

6微米（3～10微米）：细胞核的平均直径

7微米：人类红细胞的直径

9微米：小型阿米巴虫的直径

10微米（10～30微米）：大部分真核动物细胞的直径

10微米（10～100微米）：大部分真核植物细胞的直径

160微米：最大的巨核细胞的直径



200微米：人类卵子直径

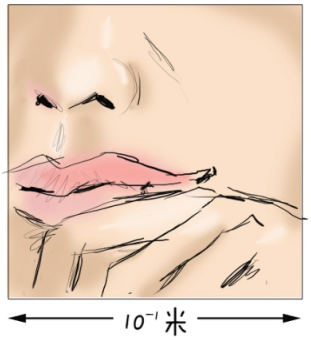
500微米：最大的大型细菌，硫珠菌属的直径

800微米：大型阿米巴虫的直径

1毫米：枪乌贼的巨大神经细胞的直径

40毫米：巨型阿米巴虫Gromia Sphaerica的最大直径

5.8厘米：小臭鼩的大小



12厘米：鸵鸟蛋的直径

1米：刚出生的大象的高度

3米：长颈鹿脖子里最长的神经细胞的长度

13米：巨型（雌性）乌贼的长度

15米：成年座头鲸的长度

32米：成年蓝鲸的长度



39.7米：泰坦巨龙阿根廷龙的估测长度

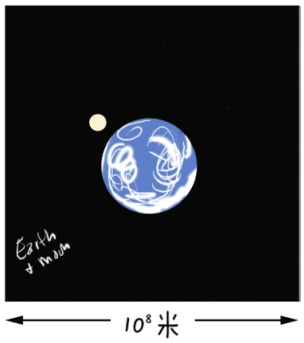
3 000米：已知最大的蜜环菌，即奥氏蜜环菌的占地直径

8 848千米：珠穆朗玛峰的海拔高度

10.994千米：挑战者深渊（北太平洋马里亚纳海沟最深的区域）的深度

21千米：火星上奥林帕斯山的高度，测量基于全球基准

300千米：南非维勒德福特（Vredefort）小行星撞击坑的直径



504千米：土卫二的直径

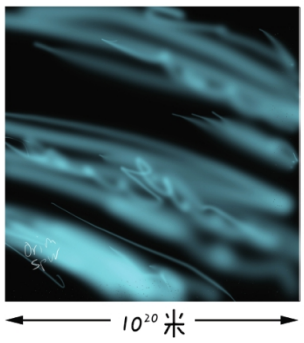
950千米：谷神星（离太阳最近的矮行星）的直径

6 000千米：东非大裂谷的长度

6 000千米：约整个南极洲最长路径的长度

6 794千米：火星直径

92 000～117 580千米：土星B环的内环半径与外环半径



160 000千米：太阳最大的太阳黑子的直径

384 400千米：月球到地球的平均距离

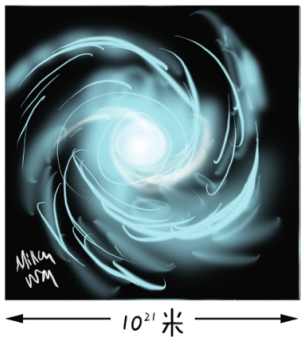
1.496亿千米：地球到太阳的平均距离

16.43亿千米：红超巨星参宿四的直径

42.8亿千米：冥王星到地球最近路径的长度

86亿千米：质量相当于太阳质量的10亿倍的黑洞形成的事件视界的直径

740亿千米（约2.86光天）：一个人体内的所有DNA首尾相连的近似长度

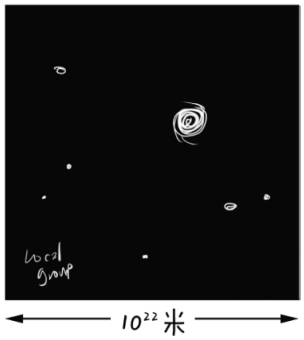


40.14兆千米：地球到比邻星的距离

2.35千兆～2.69千兆千米（约24 100光年）：地球到银河系中心的预估距离

2.1千兆千米（约220 000光年）：仙女座星系（M31）的直径

3.1千兆千米（约326 000光年）：从中央超质量黑洞中喷射出的天鹅座A辐射的总长度



525千兆千米（约5 800万光年）：所有人类（当前活着的74亿人口）的DNA首尾相连的近似长度

13吉兆千米（13.8亿光年）：斯隆长城宇宙结构的长度（大尺度丝状结构），约为可观测宇宙大小的1/60

296吉兆千米（312.17亿光年）：目前检测到的最远的宇宙天体——原星系的同步移动半径距离，距离大爆炸4 000万年

880吉兆千米（930亿光年）：可观测宇宙的直径（同步移动距离）

注释

1．从一颗散发着微光的尘埃到整个星系

第1章既是情景设置、旅程计划，同时也开始努力传达每一件事的重要性。房间里充满尘埃这一场景来自本书较早的一个版本，在这个版本中，我试图给出一个友好的（可能相当知识论的）速成课，该课程有关一些术语的真正意义，如宇宙、存在等。阿曼达·木恩（Amanda Moon）建议我用另一种方式进行表述，在此对其表示感谢。

这些事实和数字的来源十分广泛。其中许多，比如我们星系中的恒星数量或者已存活的人类数量，都是“常识”，科学家们很快就了解到，这是表达“总量估算”的一种方式。例如，对银河系中恒星数量的估算仍饱受争论，人们给出的数量从我所引用的2 000亿，到多达4 000亿。可观测宇宙中星系数量的最新结果比之前所认为的要多10倍，这一下子让恒星数量从2 000亿变成了超过10 000亿。参见：Christopher J. Conselice et al., “The Evolution of Galaxy Number Density at z < 8 and Its Implications,” The Astrophysical Journal 830, no. 2 (2016): 83。

出现差异是因为没人会真的一个个数清楚这些恒星或星系。相反，对于银河系中的恒星，人们是根据我们从银河系中接受了多少光线、银河系的估算质量，以及我们预测每颗恒星贡献了多少质量和光线来推测的。一部分关于银河系质量和含量的有趣资料来自：Jorge Peñarrubia et al., “A Dynamical Model of the Local Cosmic Expansion,” Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 433, no. 3 (2014):2204–2222; and Timothy C. Licquia and Jeffrey A. Newman, “Improved Estimates of the Milky Way’s Stellar Mass and Star Formation Rate from Hierarchical

Bayesian Meta-Analysis," The Astrophysical Journal 806, no. 1 (2015): 96。

有很多关于我们目前对宇宙学之理解的伟大著作。年代久远但仍然经典的作品包括史蒂文·温伯格的短篇《宇宙最初三分钟：关于宇宙起源的现代观点》（Steven Weinberg, The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe, updated version, New York：Basic Books, 1993）；约翰·格里宾的经典著作《大爆炸探秘》（John Gribbin, In Search of the Big Bang: The Life and Death of the Universe, new edition, New York: Penguin, 1998）。更多时下的著作包括劳伦斯·克劳斯笔下有争议却精彩绝伦的《无中生有的宇宙》（Lawrence Krauss, A Universe from Nothing: Why There Is Something Rather Than Nothing, New York: Free Press/Simon and Schuster, 2012）；以及肖恩·卡罗尔的《大图景：论生命的起源、意义和宇宙本身》的相关部分（Sean Carroll, The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself, New York: Dutton, 2016）。

我在书中提到，我们的宇宙可能比目前的宇宙视界要大250倍。这一说法来自：Mihran Vardanyan et al., "Applications of Bayesian Model Averaging to the Curvature and Size of the Universe," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 413, no. 1(2011): L91–L95。至于那些认为"完整的"宇宙要大得多的估算，当然了，世事难料。一开始的宇宙膨胀能够提供给你几乎任何你能接受的大小10倍，10倍又10倍，10倍又10倍，直到10的122次方。这一说法来自：Don N. Page, "Susskind's Challenge to the Hartle-Hawking No-Boundary Proposal and Possible Resolutions," Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 2007, no. 1 (2007): 004。难怪很多物理学家最后从事金融行业。

我发现多重宇宙的观念很迷人，很有逻辑性，但“一定在开玩笑”。从物理学角度来看，你很难否认有很多理论想法都指向多重宇宙这一方向。但是，用老话来说：非凡的观点需要非凡的证据，而现在证据还没有浮出水面。

宇宙的“发泡性”，有时也叫作“宇宙网”，是宇宙值得注意的一个方面。这种规模庞大的组织主要因引力对原始物质分布的拉动及物质原始的速度场而受到影响。关于宇宙物质分布的两个项目是Sloan Digital Sky Survey (www.sdss.org) 及 6dF Galaxy Survey (www.6dfgs.net)。

2．看不见的黑暗与空白

若没有一些极端的思想实验，那么宇宙普遍的空旷（纵观所有尺度）是一件让人难以欣赏的事。为了这里的粗略计算（back-of-the-envelope calculations），我假设所有恒星都有同样的物理大小，当然它们并非如此，大部分恒星直径都小于太阳半径的70%，少量巨型恒星的大小却可达太阳体积的1 000多倍。将太阳的半径作为平均值只是一个简单却可行的粗略估算。我在这里辩证地讨论黑洞，但个人感觉指出物理所允许和不允许的是很重要的。黑洞的物理大小（由事件视界决定）并不与质量成正比，它与“普通”物质并不一样，这一点确实有些反常。

反映星际或星系际空间中物质密度的数据取的是典型的平均值。这当中有很多区别。这些数据来源于一个世纪以来的天文观测。

星系际的真空是物质密度在宇宙超大尺度内初始变化的有趣表现。它们倾向于“自我清洁”，因为低密度宇宙区域（约1 000万到1亿光年范围）有着稍大的宇宙膨胀率。真空中的星系也表现出不同的历史和特性。相关评论参见：P.J.E. Peebles, “The Void

Phenomenon," The Astrophysical Journal 557, no. 2 (2001): 495–504。

我们关于银河、仙女座及所有其他伴星系的观念在过去20年中已经有了巨大的进步。有很多新的、小型星系因为机器和计算的进步而被发现。这可谓是“大数据”的一个优秀案例了。对上亿颗恒星及其颜色的绘制和分析，使得天文学家可以识别那些分布在银河系明亮恒星掩盖之下的黯淡的、弥散的星系——也就是我们需要了解、学习的宇宙的其余部分。其中一份参考资料为：Martin C. Smith et al., “The Assembly of the Milky Way and Its Satellite Galaxies," Research in Astronomy and Astrophysics 12, no. 8 (2012): 1021。

暗物质问题依然存在，尽管我们多次试图解决它。目前为止，在物理圈里有一种观念逐渐崭露头角：要么暗物质的特性比我们所认为的还要诡异得多（由性质更奇特的粒子组成），要么我们在某些事上犯了大错。

银河系的中心区域必然是难以目睹的。与其相比，我们仿佛生活在文明世界外围的阴冷山洞里。当然了，我们并不知道是否有什么东西正在注视着观测它。银河系中心区域的“艺术品”确实置身于一片全然的光亮中，并且这种环境制造了很多乐趣。

描述我们的星系是件非常有趣的事，因为事实上，我们仍然没有明确所有的细节。这多半是因为我们无法轻易看见整个星系；我们身处其中，陷得太深，就像在种子的深处。但我们有希望做得更好。太空考察例如GAIA任务将会彻底改变银河系的现有地图，至少也会改变银河系的一部分。参见：http://sci.esa.int/gaia。

描述星系大小的信息图表让人震惊。在过去几年，关于银河系如何对抗其他星系，有很多讨论，但毫无疑问，银河系之外还是有不少怪物的。参见：Juan M. Uson et al., “Diffuse Light in Dense

Clusters of Galaxies. IR-Band Observations of Abell 2029," The Astrophysical Journal 369(1991): 46–53。

恒星在星系中的位置持续地变动着，我们的恒星也是如此。参见：C. A. Martínez-Barbosa et al., "The Evolution of the Sun's Birth Cluster and the Search for the Solar Siblings with Gaia," Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 457 (2016): 1062–1075。

3．万物，过去和现在

这一段旅程的量级有些难以处理。事实上从10光年到92光时（这里只是粗略跨度）的虚拟旅程，也就是太阳系内的伸缩的尺度对人眼来说似乎并不那么令人激动。我们有些咬牙切齿地想弄清接下来该做些什么。我们本可以让这段旅程依然无聊而又现实，但我们意识到这样做可能会让我们错失过去与现在的深层联系。它并非总是如此无聊！这也是这一章在空间和时间（以及物质状态）上进行同步缩放的原因（从大约50亿年前开始）。

宇宙中的第一批恒星极其重要，但我们对此仍然知之甚少，相关资料参见：Volker Bromm, "The First Stars," Annual Review of Astronomy and Astrophysics 42 (2004): 79–118。

关于恒星如何产生元素并将它们喷射到宇宙中这件事，你可以写上一整本书，而人们已经这么做了。参见：Jacob Berkowitz, The Stardust Revolution: The New Story of Our Origin in the Stars (Amherst, New York: Prometheus Books, 2012)。

关于形成恒星和原恒星盘、原行星盘及行星的天文物理是个热门话题。事实上，这真的是新数据能把我们淹没的另一个前沿科学领域。这一部分的图解（在整本书中我最喜欢的部分之一）反映了这些

新数据。除了哈勃望远镜和其他观测设备，某些最令人激动的图片和观念来自阿卡塔玛大型毫米及次毫米波数组（Atacama Large Millimeter/submillimeter Array，简称ALMA），它位于智利海拔5000米的高原上。你可浏览：www.almaobservatory.org。

太阳系最后诞生的过程中产生的问题（地球的水含量，火星的质量，内圈行星的缺乏）也是现代研究的前沿。这一领域的述评可参见：S. Pfalzner et al., “The Formation of the Solar System,” Physica Scripta 90, no. 6 (2015): 068001。

有时候，天文学家认为我们当今的太阳系像是一个“化石”。这并非是什么不好的说法：最具能量和多样性的活动发生在45亿年前。我们只是生活在诞生期尾声的一段缓慢进化的过程中。参见：John C. B. Papaloizou and Caroline Terquem, “Planet Formation and Migration,”Reports on Progress in Physics 69, no. 1 (2006): 119。

4．行星的生存家园

大揭秘：这才是起草这本书时的第1章。我想要想出一种方式，来连接太阳系的尺度和我们日常生活的尺度。这一点很难。向夜晚的天空挥舞手电，看着一束光线向上攀升而逐渐消逝是我记忆中孩童时期做的事。某些地方那些光子（或者它们当中的一部分）仍然竞相逃往太空。仔细想想，这可是相当了不起的！

系外行星当然算得上是大新闻了。在20世纪90年代中期前，我们并不知道有多少恒星也有行星围绕。现在我们知道了，恒星基本上都是这样。我的书《如果，哥白尼错了》深入讨论了与其他世界有关的科学（Caleb Scharf , The Copernicus Complex, New York: Scientific American/Farrar, Straus and Giroux, 2014）。也有很

多其他的资源。如果你们想密切并私人地关注最新的系外行星原始数据，有两个页面非常有用：http://exoplanet.eu（The Extrasolar Planets Encyclopaedia）和http://exoplanets.org。

已有多名研究员拿出关于地外行星总数的统计推断。部分案例可见：Courtney D. Dressing and David Charbonneau, “The Occurrence of Potentially Habitable Planets Orbiting M Dwarfs Estimated from the Full Kepler Dataset and an Empirical Measurement of the Detection Sensitivity,” The Astrophysical Journal 807, no. 1 (2015): 45, and Daniel Foreman-Mackey et al., “Exoplanet Population Inference and the Abundance of Earth Analogs from Noisy, Incomplete Catalogs,” The Astrophysical Journal 795, no. 1 (2014): 64。

“荒原狼”行星的证据目前仍有争议，并且这一证据来自引力透镜数据。我的猜想是某些研究可能会高估了这一总数，但确实有一些孤独的星球，从它们的诞生系统中被不稳定的轨道弹射出去。

比邻星b的表面图像实际上是大量科学猜想的产物。比邻星b与其明亮的、低质量的（红色色调）的恒星间的亲密度表明，为了维持大气层，行星也需要强烈的磁场。磁场可能会引起大气中的极光，也会与地球物理活动息息相关。因此才有这些不同特征的描述。

正如物理学和地球物理学揭示的很多东西所显示的那样，我们过分简化了行星内部。这不仅是因为我们没有足够的信息来做得更好，也因为我们希望对物理系统的简化能使人更直观地了解它们。如果你好奇地球这样的岩石行星到底有多复杂，可以阅读一下最新的地球物理研究，例如：Kei Hirose et al., “Composition and State of the Core,” Annual Review of Earth and Planetary Sciences 41 (2013): 657–691, and George R. Helffrich and Bernard J. Wood, “The Earth’s Mantle,” Nature 412 (2001): 501–507。

在我开始写这本书的大纲时，NASA的新视野计划在早先几个月迈出了历史性的一步：它飞越了冥王星。虽然没人知道我们能期盼些什么，但我不认为人们只想预测冥王星有多有趣或多复杂。这颗冰冷的星球将会改变我们的心态：一开始就被困在恒星系统的寒冷末端并不会让行星变得迟钝或无聊。参见http://pluto.jhuapl.edu。

我发现潮汐十分迷人，因此我把它们也放进了书里。行星潮汐导致能量的消散，包括行星或卫星（甚至太阳！）的自转能量以及公转能量。这些缓慢的力量消散切实地改变了星球的形状以及穿越宇宙的轨道。关于“系外卫星”含义的技术研究这块，我再次厚颜地推荐自己的一篇论文：“The Potential for Tidally Heated Icy and Temperate Moons around Exoplanets”，*The Astrophysical Journal* 648, no. 2 (2006): 1196–1205。

5．我们称之为地球的世界

在这一章的开始，我想强调几个特别的想法，包括我们认为地球真的恰好在此刻就是适合我们的星球这一事实。纵观其45亿年历史，地球很少以现在这般形态示人。而这样的趋势将一直持续到未来。我也想强调某些我们认为理所当然的行星特性。举个例子，地球表面的水含量图形，相当令人惊讶。我们可能是一个海洋星球，但所有的海洋加起来总量实际上并不多。美国地质调查局网站是更多有趣信息的藏宝箱：https://www.usgs.gov及http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html。

对于地球上最古老的岩石究竟是什么这一问题，仍然有一些争论。但锆石十分具有说服力。关于锆石的有趣研究之一，是锆石内部含有钻石这一发现。该发现提供了40亿年前地球地壳构造形成过程的线索。相关资料参见：Martina Menneken et al., “Hadean

Diamonds in Zircon from Jack Hills, Western Australia," Nature 448 (2007), 917–920。

对于有机物用氧改变了地球的大气这件事，还存有相当大的争议，而这样的改变究竟发生在何时仍不得而知。参见：Donald E. Canfield et al., "Oxygen Dynamics in the Aftermath of the Great Oxidation of Earth's Atmosphere," Proceedings of the National Academy of Sciences 110, no. 42 (2013):16736–41。目前的标准说法是：蓝藻细菌是主要的制氧源头。也许它们是，也许它们不是。

地球从太阳那接收到的能量总数是十分巨大的。希望它们能被传导到这里。人类能量消耗的数量估算真的只是估算而已。例如，国际能源署（International Energy Agency，简称IEA）提供了一些数据与计算，参见：https://www.iea.org。

气候与天气是非常复杂的现象（严格来说，气候只是天气的统计数据，是将时间均化后，特定性质可能性的平均值，例如表面温度或冰盖）。我在这里给出了一个相当简化的概述。考虑到由于人类活动导致的气候变化的紧张态势紧急性（这正在发生，这只是物理学，争议免谈），你可能希望能够随时更新信息。可参见：www.noaa.gov/climate，http://climate.nasa.gov，及www.metoffice.gov.uk/climate-guide。

强有力的台风（印度洋或西太平洋）或飓风（东北太平洋或北大西洋）统一被称为热带气旋，它们实在是令人震惊。你会发现科学家们为了转化其中所含的力量，用了各种方法：这样的风暴一天之内的能量就等于几百颗核弹，或者整个人类文明运转几年所需的能量。

太阳光改变了化学这一点可是个大事。光化学不仅对地球很重要，也是整个太阳系及系外会发生的事。有一篇专业性很强，但易于理解的文章：Renyu Hu et al., "Photochemistry in Terrestrial

Exoplanet Atmospheres I: Photochemistry Model and Benchmark Cases," The Astrophysical Journal 761, no. 2 (2012): 166。

我试图找到一种方法，用非常人性化的术语来表达对地球的愿景。于是，“有人类曾从太空看到过我们的世界”的想法一下子击中了我。我知道有很多人写过他们的体验，但我却没有意识到有这么多的回忆和如此的豪言壮语。这些语录公开记录在这里，还有很多很多并未收录在此。我希望这些资料能稍稍丰富一下我们的国家和文化。参见：www.spacequo tations.com/earth.html。

6．生命的法则，未曾停止的探索

你可能会对我在这章谈到意识感到十分诧异。我也没想到。但是我要开始思考我们世界的哪一方面在其量级上最让人震惊。关于生物，例如人类、大象、鸟等，有哪些以前没怎么讨论过的东西能拿出来说说呢？我认为认知、自我认知、科学以及我们称之为意识的东西这些难题是最难以回答的问题。

另一大难题包括地球上所有生命系统是如何互相关联的，不只是现在，还包括过去。这有一点刻板，但如果你从未读过查尔斯·达尔文、阿尔弗雷德·拉塞尔·华莱士（Alfred Russel Wallace）、亚历山大·冯·洪堡（Alexander von Humboldt）和其他作家所写的让我们对进化有所了解的那些作品的话，那么你值得一探究竟。达尔文在线资源非常不错：http://darwin-online.org.uk。你能从在线资源中找到华莱士关于自然选择的很多资源（他甚至考虑过宇宙生物学）。此外，迈克尔·舍默写过一本经典的传记：Michael Shermer, In Darwin's Shadow: The Life and Science of Alfred Russel Wallace: A Biographical Study on the Psychology of History (Oxford, UK, and New York: Oxford University Press, 2002)。要了解洪堡，可参考这本精彩的著作：Andrea Wulf, The Invention of

Nature: Alexander von Humboldt's New World (New York: Knopf, 2015)。

生物量的估测十分复杂。你没法在地球表层的每立方米里进行抽样然后数一下有多少生物；你不得不根据某些局部数字、食物和垃圾的通量数据等来进行一些推论。关于森林总生物量的估算，可参考一篇评论文章：Yude Pan et al., "The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests," Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 44 (2013), 593–622。另有一篇论文认为微生物的总生物量数值有大幅下降，从而对估测值进行了修改，该论文为：Jens Kallmeyer et al., "Global Distribution of Microbial Abundance and Biomass in Subseafloor Sediment," Proceedings of the National Academy of Sciences 109, no. 40 (2012): 16213–16。

在这本书中我需要做的最大决定，可能就是随着我们的旅程来到了地球，我究竟应该从哪开始缩放尺度。避免过去已经提及的那些事似乎十分重要（老生常谈肯定很无聊），此外还要避免有太多来自西方或北半球的偏见。现代人类全都源自非洲，这也是一块有着明显地理和生物多样性的大陆。而非洲大峡谷是如此壮观，在这里，地球的地壳达到了最薄，提醒着我们即使身处于一大群生物之中，我们也仍有危急的时刻。我也喜欢大象。它们特殊又迷人，别样又美丽，需要我们的欣赏与保护。

关于能人与直立人的信息有很多，但有部精彩的论著提出了该领域的最新观点，这就是：Yuval Noah Harari's Sapiens, A Brief History of Humankind (New York: HarperCollins, 2015)。

"生命之树"是现下流行的一种生命分支进化概念模型，这一点可以追溯到达尔文。完全基于化石记录和分类的树版本有其局限性，更现代的系统发育树会更有说服力。两者都会帮助我们得到一幅某物

与某物相关的总体图。参见以下在线资源：www.tolweb.org，www.wellcometreeoflife.org/interactive，及tree.opentreeoflife.org。

昆虫的智力与认知是个极其有趣的话题，因为我们与它们如此不同。部分近代研究表明（在我印象中，非常有说服力），黄蜂不仅能够通过“创新”来解决物理问题，而且那些掌握了这一技能的黄蜂还能“教会”其他黄蜂（或至少能够从它们成功的亲属黄蜂那迅速学会）。一旦教会，黄蜂便能够将之作为模板传递给下一代。相当奇特吧！参见：Sylvain Alem et al.,“Associative Mechanisms Allow for Social Learning and Cultural Transmission of String Pulling in an Insect,” PLOS Biology 14, no. 10 (2016): e1002564。

究竟不同物种的大脑能够做些什么？这是个非常难以回答的问题。这一章的图里存有很多不确定性。没关系，这就是科学。

我提到了“偶然性”这一术语。这在进化生物学中有着重要的内涵，尤其是在斯蒂芬·杰·古尔德（Stephen Jay Gould）的著作中。他所有的书都非常有趣且极具吸引力，即使你并不同意他的观点中的某些细节，其中一部著作仍应成为你的必读书目，那就是：Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History (New York: W. W. Norton, 1989)。

7. 消失在宇宙背景中的物质碎片

“复杂性”和“复杂系统”已经变成了现代科学术语的重要部分，这当然是有原因的：宇宙充满了复杂性。但复杂性挑战了还原论的倾向，也是我们有待解决的问题。关于这方面有很多著作，某些很流行，某些技术性很强。参见经典著作：James Gleick, Chaos:

Making a New Science (New York: Viking Penguin, 1987); Stuart Kauffman, At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity (Oxford, UK, and New York: Oxford University Press, 1995)。这项工作的大多成果的研究机构也值得一看，如新墨西哥的圣塔菲研究所（Santa Fe Institute）：www.santafe.edu。

关于微观世界，列文虎克（Antonie van Leeuwenhoek）的作品值得一读，他先驱性地开创了显微术，而且可能是第一批真正看到细菌的人之一，时间大概在15世纪和16世纪早期。

我选择用人类的手来体现生命的粒度，因为它是我们如此亲密的附属物，它的外形对我们而言是如此熟悉。它使得我们能够掌管世界。数学家及知识分子雅可布·布洛诺夫斯基（Jacob Bronowski）曾经说过："手是思想的利剑。"

人们认为，地球上最早的多细胞生命证据藏匿于距今21亿年前的加蓬化石之内。参见：Abderrazak El Albani et al., "The 2.1 Ga Old Francevillian Biota: Biogenicity, Taphonomy and Biodiversity," PLOS One 9, no. 6 (2014): e99438。当然了，这只是目前所发现的年代最早的生命。据称多细胞在地球上被"发明"（通过自然选择和环境压力）出来了多达45次。

基础代谢率和生物质量的数学关系令人印象深刻。参见：Geoffrey B. West et al., "A General Model for the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology," Science 276 (1997): 122–126。

比例法则和人类城市也令人惊奇。参见论文：Geoffrey West, "Scaling: The Surprising Mathematics of Life and Civilization."

虫群和鸟群是迷人的，有些学者通过研究这些，试图了解复杂现象如何从简单规则中产生，了解生命如何学习并适应环境。这种研究领域通常被称之为“群体行为”或“群体动力学”。它通过软件模拟和机器学来进行自检。

蚂蚁群的“最短路径”优化引起了一部分研究，并促使人们以计算或代数方法来解决一些可用图表展现的棘手问题：最短路径就是其解。这真的全都是从研究蚂蚁开始的。参见：J.L. Deneubourg et al., “Probabilistic Behaviour in Ants: A Strategy of Errors?” Journal of Theoretical Biology 105 (1983): 259–271。

在这一章的最后，我提到了“熵”。熵本身就可以自成一书。这一概念与现代物理的核心密切相关，很难掌握，并且仍未被人们完全理解。

8．亚原子世界，开启尺度颠覆之门

关于如何书写这一章，我有好几个选择。一个是向前猛冲，忽略我们在物理上无法像观测更大尺度的东西那样“观测”这些尺度。相反，我选择了另一个方向：直面这些尺度的怪异性，并试图展现向原子过渡的历程。接下来的几章也是如此。

DNA长度的数据可能是这一章最令人震惊的东西了（好吧，几乎和揭露量子世界一样让人震惊）。这个数字十分确定：如果你能够将一条人类的DNA链（超过30亿个核苷酸）以不扭曲、伸直的状态展开，它将会是一条1.8米长的隐形线。所有其他的数字都来自这里，一旦你认可人类身体中约有40万亿细胞的估算（更新、更严谨的估算结果是，该数字超过100万亿，这一数字也经常被引用）。人类DNA的总长度数据令人疯狂，我知道，但这确实如此。

并非所有的细菌都长得一样。我们选择了一种有尾巴、药片形状的细菌，因为这样可能更具视觉冲击力。事实上单细胞组织千奇百怪。

微生物是我们行星的真正掌控者。它们也是我们的真正掌控者。如果你想自寻烦恼（以一种比较好的方式），可以读一读这本著作：Ed Yong, I Contain Multitudes: The Microbes Within Us and a Grander View of Life (New York: HarperCollins, 2016)。

等一下，如果微生物是真正的掌控者，那么病毒是什么？有可能病毒“掌控”在它们之上的微生物，正如微生物掌控我们一样；我们只是很难将病毒定义为“活着”。另一本颇受欢迎的著作是：Carl Zimmer, A Planet of Viruses (Chicago: University of Chicago Press, 2011)。

应该有人写写一位读者关心的核糖体（可能已经有了吧），但我没有遇到过什么好的作品。细胞中的核糖体比RNA加上50个蛋白质还多。这可真是奇特。几年前，佐治亚理工学院的尼克·胡德（Nick Hud）曾在亚特兰大的一个闷热的日子里给我上了一堂速成课，其中有一些好的参考文献，包括他的研究小组的成果：Anton S. Petrov et al., “History of the Ribosome and the Origin of Translation,” Proceedings of the National Academy of Sciences 112, no. 50 (2015): 15396–401。

我提到了物体在微小尺度上的带电的黏性。这提醒了我们，化学全是关于电磁学的。虽然电磁学事实上是由质子交换引发的，但这并不是你在人类尺度所能“看到”的那些质子。

穿过一扇门时你被衍射，是一个古老的物理比喻。我曾在学术界听到一个如何利用这一点虎口脱险的笑话：跳进一个小木屋，站在老虎的衍射图形达到最小的地方。这类故事可以追溯到物理学家乔治·伽莫夫（George Gamow）笔下有趣的教育故事：Mr. Tompkins in

Wonderland, published in 1940; a modern collection is Mr. Tompkins in Paperback (Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1993, 2012)。汤普金斯（Tompkins）的旅程包括进入原子内部。

为了明确当你以人类的正常大小穿过一扇正常大小的门时，你究竟会被衍射多少，你必须先解决你的德布罗意波长并利用德布罗意等式，你能通过这些来计算你需要怎样的速度才能达到一个明显的衍射量。结果显示，你必须得非常非常慢，速度不超过10^{-34}米每秒。如此一来，你将会花费比宇宙年龄还要长上几万亿倍的时间来通过那扇门。

我经常被问及自然是否能使用其他元素而非碳元素来制造生命。这是有可能的，但是碳元素确实直击要害，我在文中给出了原因。它形成的化合物，反应性和稳定性都相当特殊。

想象一颗碳原子的一生是个很有趣的话题，但也很有挑战性，因为你身体内的任何单个碳原子都有相当多的路径可以选择。在最后，我决定让我们摄取粘在马铃薯上的碳形成的“有机物”。否则，它不得不在形成一颗植物之前经历大气中的另一次循环。

了解恒星制造碳的过程是20世纪天体物理学和核物理学的重要胜利之一。但这也引起了一些关于宇宙“细微调整”的讨论。最近有一篇相当有趣但又很有技术含量的论文，对此做了更进一步的探讨：Fred C. Adams and Evan Grohs, “Stellar Helium Burning in Other Universes: A Solution to the Triple Alpha Fine-Tuning Problem。”

人本原理确实值得讨论。你能找到很多研究这一话题的资源（包括我早先的一本书）。近来的一本是：Martin Rees, Just Six Numbers: The Deep Forces That Shape the Universe (New York: Basic Books, 2000)。

9. 难以置信的空洞

在这一章我再次抱怨了宇宙之空，正如第2章一样。物质的原子所占据的空间如此之小，令人震惊。不过当然了，电子占据了原子里的所有空间，但它们只是以概率的方式来占据空间的。

量子力学的本质，及其关于原子和亚原子世界的描述是非常难以传达的。这里我决定尽量诚恳。量子力学可以说是相当成功的架构，然而在根本性质的最佳模型这一部分，它也不是非常明确。我们想用薛定谔的猫的实验来阐述不同的理论解释，但是最终发现理论间的差异不够清晰。两缝，或者说双缝实验却正中目标。

德布罗意－玻姆理论在今日似乎得到了更多关注。这部分是因为某些引人注目的实验性工作。参见：Dylan H. Mahler et al., “Experimental Nonlocal and Surreal Bohmian Trajectories,” Science Advances 2, no. 2 (2016): e1501466。

在多世界解释中，经过双缝实验的电子会被那些平行世界的电子所“冲击”，这一想法来自最近的一些论文。这里的平行世界在某种程度来说是“传统的”，量子效应单纯由于其他世界的相互作用而得以表现，如果你去掉其他世界，就会留下一个非量子的传统世界（这想必也意味着我们玩完了）。参见：Michael J. W. Hall et al., “Quantum Phenomena Modeled by Interactions Between Many Classical Worlds,” Physical Review X 4, no. 4 (2014): 041013。

纠缠和非局域性是个能把你搅得晕头转向的怪物。在此我推荐一部优秀作品：George Musser, Spooky Action at a Distance: The Phenomenon That Reimagines Space and Time—and What It Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything

(New York: Scientific American /Farrar, Straus and Giroux, 2016)。

我提到了同位素，因为它让我好奇对我们而言，这样一个性质仍然成谜的基本层级（原子核）究竟是什么。这些原子核一点都不优雅。与此同时，同位素对于我们挖掘宇宙的运作过程十分有用。我会毫不犹豫地引证以下论文：L. G. Santesteban et al., “Application of the Measurement of the Natural Abundance of Stable Isotopes in Viticulture: A Review,” Australian Journal of Grape and Wine Research 21, no. 2 (2015): 157–167。我敢打赌这是这篇文献第一次在书中被这样引用。

你怎样制造超重原子核，比如oganesson,第118号元素？你可以猛击其他重核，期望某些新东西由此产生。方法大抵如此。随着重元素经历了辐射衰减（通常非常迅速），你能找到衰减产物并发现形成了什么东西。

我决定在这一章不要太深入粒子物理，只介绍了夸克、胶子并绘制了粒子族谱。这方面的科学提供了很多好东西，可以追溯到几十年前。我希望保持这样的沉浸感。一路走过这一量级中的丰富多彩的结构，我们能够抓住其中的瞬息流光，但我们必须跳出来。

爱因斯坦的确发表过关于不可理解性（incomprehensibility）的观点，但他的原话并非如此。原始资料中的措辞不太一样（“一说为‘世界的终极谜题即其可理解性’”），参见爱因斯坦的文章：Albert Einstein, “Physics and Reality,” 1936, reprinted in Einstein, Ideas and Opinions (New York: Crown, 1954, 1982)。

10．时空深处的旅程终点

我们面临着两个选择：描述19个量级的未知结构，探讨虚拟粒子，就像在所有量级上所做的事一样；或者跳过其中大部分。我想我们做了正确的决定。但不能掉以轻心。我们只是假设跨越这些微小的尺度有点无聊，但我们并不知道是否如此。

将重点从“粒子和波”转移到“场和量子”，我认为非常重要。由此我们引入了现代物理所使用的数学机制，但它同样（我希望）有助于给我们一种感觉，一种我们正在迈进终极的、最为基本的宇宙的感觉。

一篇优秀的经典读物是理查德• P.费曼的《QED：光和物质的奇异性》：Richard P. Feynman, QED: The Strange Theory of Light and Matter (Princeton: Princeton University Press,1986)。他的其他著作与演讲笔记也同样经典。

描述最后的尺度（普朗克10^{-35}米）是个大挑战。老实说，在这里我们可以做几乎任何事，并且行之有效。最终，我对我们的视角所具有的质感及深度非常满意：有节制却又让你的眼睛有一点刺痛。

“量子泡沫”的想法显然来自物理学家约翰•惠勒（John Wheeler）与他同事查理•米斯纳（Charle Misner）在20世纪50年代中期进行的讨论，参见其论著：John Archibald Wheeler with Kenneth Ford, Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics (New York: W. W. Norton,1998)。尝试测试量子泡沫的特征所带来的成果包括费米实验室的μ介子g-2实验。关于弦理论和其他神秘的超物理学，可读的资源包括：Brian Greene, The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory (New York: W. W. Norton, 1999, 2003)。

这里提供的最后一张信息图是一种描述方法，描述的对象是我们在理解周围的宇宙时用到的“翻译”层，这个“翻译”层由纯数学开始，并逐渐向物理转移。这张图里的方程只是我所选择的最有趣的一

部分工具。从这个角度来说，它们反映出了这本书的整体思路：这是一个大大的宇宙，有很多有趣的旅程，而我们只是选择了其中一段而已。

在文章的最后我再次提到了电脑，其实是在暗指人工智能。最新的深度学习系统（有10层“隐藏的”神经网络软件层）正在完成一些我们之前在计算方面从未见过的事。这听上去有点可怕，却又让人心潮澎湃。我们可能正处于思想延伸到生物界限之外的转折点。等待着我们的，将会是一个多么精彩的未来！

致谢

这本书的最初想法来自早先与马兰穆文学社的黛尔德利·马兰（Deirdre Mullane），以及法勒、施特劳斯与吉鲁出版社（Farrar, Straus and Giroux）的阿曼达·木恩的对话。没有他们的热忱与耐心，这本书可能连最初1厘米的尺度都写不下去。

经过最初几轮思考，我们将重点放在了自然世界与其本身的关系上（在尺度、时间和能量等方面）。在结合了复杂性理论、涌现理论和混沌理论的基础上，这本书的视野得以升华。“从几乎所有事到几乎空无一物”成了一段有趣的旅程。能够与罗恩·米勒共事，让我感到十分荣幸，他有着极其高超的插图绘制技巧与想象力，来自5W Infographics公司的塞缪尔·韦拉斯科（Samuel Velasco）与胡安·韦拉斯科（Juan Velasco）也一样有着高超的图表能力。你们所有人一遍又一遍地向我展示了与真正专业的人士一起工作是什么样的感觉。与此同时，我想要感谢FSG小组的所有成员，尤其是乔纳森·利平科特（Jonathan Lippincott）和斯科特·博彻特（Scott Borchert）。另外还要特别感谢安妮·戈特利布（Annie Gottlieb），他用自己的编辑技巧为本书做了无数的改进。

本书的部分章节是我在纽约至东京的长途航班上，以及在日本禅修的许多时刻构思成型的。我要向东京工业大学地球生命科学研究所的所有科学家和工作人员表达敬意，他们为本书的许多部分添砖加瓦。我尤其感谢皮特·胡特（Piet Hut），正因他播下种子，才有了此后发生的所有事，才有了我所期待的在未来结出的果实。

至于其他朋友与同事，包括玛丽·沃伊泰克（Mary Voytek）、弗里茨·佩雷尔斯（Frits Paerels）、戴维·赫尔方（David Helfand）、安博·米勒（Amber Miller）、米歇尔·韦（Michael Way）、纳尔逊·里韦拉（Nelson Rivera）、丹尼尔·萨文（Daniel

Savin）、阿林·科罗茨（Arlin Crotts）、福井绫子（Ayako Fukui）、温德尔·威廉斯（Windell Williams）、阿比盖尔·温德尔（Abigail Wendell）、刘易斯·温德尔（Lewis Wendell）、埃里克·戈特黑尔夫（Eric Gotthelf）和费尔南多·卡米洛（Fernando Camilo），感谢你们的支持与鼓励。

最后，一如既往，我要感谢我的家庭成员：邦尼（Bonnie）、莱拉（Laila）、阿梅莉娅（Amelia）和玛丽娜（Marina），感谢你们为我付出的一切。

——凯莱布·沙夫
纽约，2016年

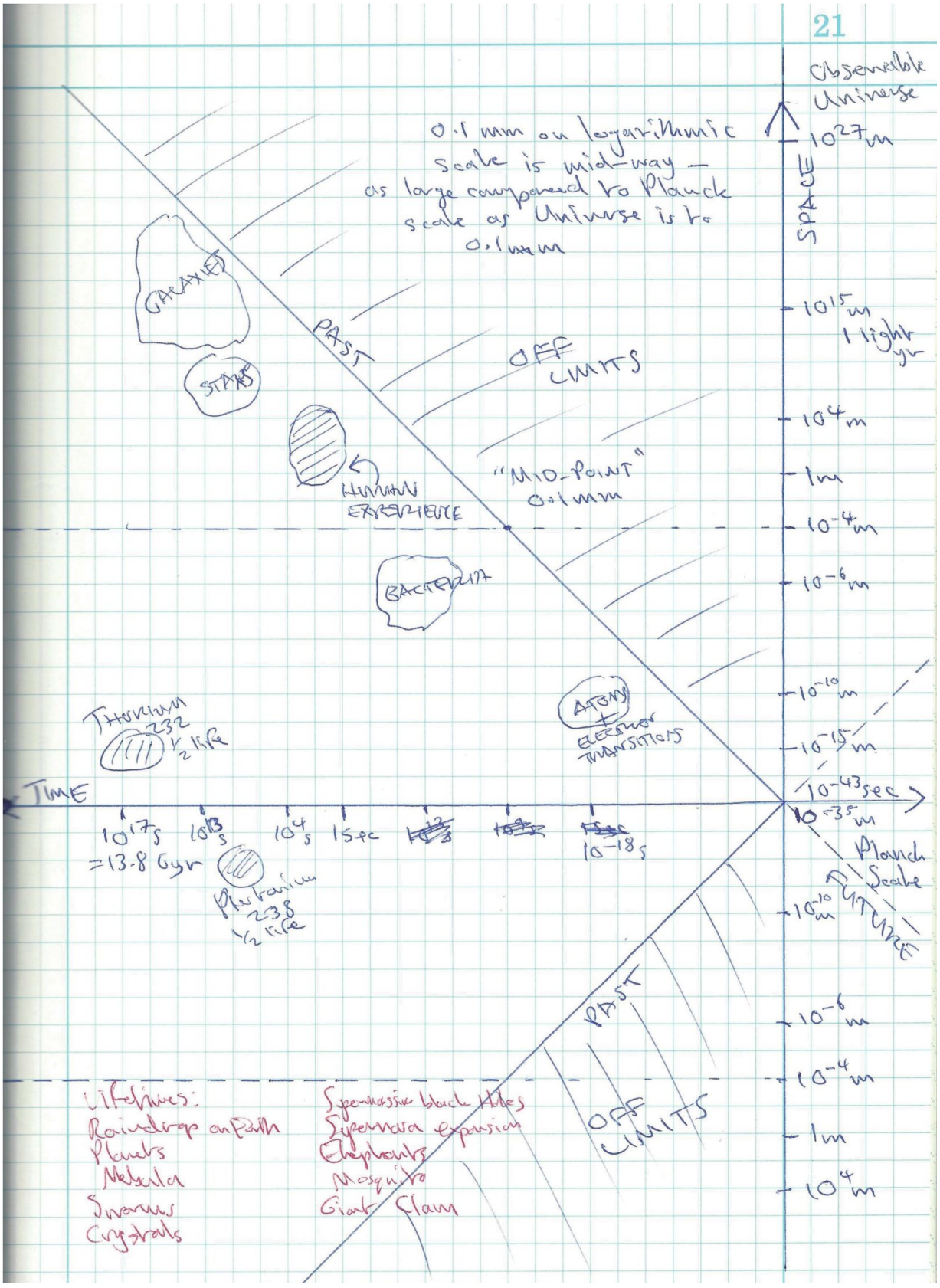
我总是对非常非常大的事物和非常非常小的事物感兴趣：前者可能源于我对天文和太空旅行的兴趣，这种兴趣贯穿了我的一生。后者可能来自刚上映我就看了的电影《奇怪的收缩人》（*The Incredible Shrinking Man*），但我可能是因为读过一篇亨利·哈赛（Henry Hasse）的短篇小说《他缩小了》而想要去看这部电影，这篇小说颠覆了整个宏观–微观宇宙。我也记得我在小学时废寝忘食地看完的一本书，叫作《通往原子的13步》（*The Thirteen Steps to the Atom*），这本书通过图片让我从我熟悉的世界一步步进入几乎无限小的世界。同一时期，我发现了经典的《宇宙观》（*Cosmic View*）一书，我到现在还保留着其最初版本。我记得当查尔斯·埃姆斯和蕾·伊姆斯的《十的次方》在1977年上映时，我看了无数次，甚至根本不清楚到底看了多少回。所以当我有机会给这样一本书配插图时，我立马抓住了这个机会，如果说还有别的理由，那便是因为它提出了一个巨大的挑战。之前我从来没有参与过这样的事。从宇宙边缘缩小到地球，这没问题，毕竟这还是我熟悉的领域。但随着这本书不断深入到极其渺小的量级，我开始探索新的主题、想法和技术。有一个特殊的

挑战在于，需要画出那些实际上看不到甚至无法测量的东西。就此而言，这些东西在很多情况下压根儿就没有实体。

这本书也给了我与阿曼达·木恩再次合作的机会，以及第一次与凯莱布·沙夫合作的机会，他的著作让我相当钦佩。更不用说与这本书的优秀团队的其他成员乔纳森·利平科特和斯科特·博彻特的愉快合作了。最后，一如既往地，我要向曾是病人的朱迪斯·米勒脱帽致敬。

——罗恩·米勒

南波士顿，弗吉尼亚，2016年


Observable Universe
10^{27} m
SPACE
10^{15} m
1 light yr
10^{4} m
1 m
10^{-4} m
10^{-6} m
10^{-10} m
10^{-15} m
10^{-35} m
Planck Scale
10^{-10} m
10^{-6} m
10^{-4} m
1 m
10^{4} m
0.1 mm on logarithmic scale is mid-way — as large compared to Planck scale as Universe is to 0.1 mm
GALAXIES
STARS
HUMAN EXPERIENCE
BACTERIA
"MID-POINT" 0.1 mm
PAST
OFF LIMITS
THORIUM 232 1/2 life
ATOMS + ELECTRON TRANSITIONS
TIME
10^{17} s
10^{8} s
10^{4} s
1 sec
10^{-18} s
10^{-43} sec
=13.8 Gyr
Plutonium 238 1/2 life
PAST
OFF LIMITS
Lifetimes:
Raindrop on Path
Planets
Meteors
Snowmen
Crystals
Supermassive black holes
Supernova explosion
Elephants
Mosquito
Giant Clam

关于作者

凯莱布·沙夫是《如果，哥白尼错了》与《重力引擎》的作者，以及哥伦比亚天体生物学中心主任。他曾为《纽约客》《纽约时报》《科学美国人》《鹦鹉螺》《自然》等媒体及其他出版社写过文章。现居于纽约。

关于插图

罗恩·米勒是本书的插画作者，其作品曾刊登于《国家地理》《科学美国人》，还有销量最高的手机应用“系外行星之旅”（Journey to Exoplanets），他还为《海底两万里》《地心游记》以及其他多部作品配图。他目前是美国国家航空航天博物馆爱因斯坦天文馆的主任，现居于弗吉尼亚。

关于整体设计

5W Infographics公司承担了本书设计，该公司重点关注信息图、数据可视化及信息驱动视觉项目。该公司于2001年由塞缪尔·韦拉斯科与胡安·韦拉斯科创建。胡安于2008年至2014年担任《国家地理》的艺术总监，之前是《纽约时报》的图表艺术指导。塞缪尔是《财富》的前艺术指导，也是本书的插图作者。

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读App：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当作阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的“湛庐阅读”App。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，与你共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读App玩转指南

湛庐阅读App结构图：



三步玩转湛庐阅读App：



App获取方式：
安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往App Store
直接下载“湛庐阅读”App，与最聪明的人共同进化！

湛庐CHEERS

使用App扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界!



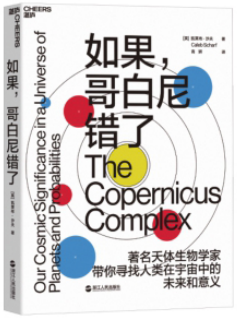
延伸阅读

《如果，哥白尼错了》

◎ 你是否具有哥白尼情结？怎样理解生命的诞生、存在和意义？地球与人类是独一无二的吗？

◎ 如果，哥白尼错了呢？如果人类并不是宇宙中唯一的生命，我们又该何去何从？

◎ 从微小的微生物到远离地球的系外行星，顶级天体生物学家凯莱布·沙夫将带领我们进行一场科学探险，为寻找人类在宇宙中的未来和意义提供一种新的可能。



使用"湛庐阅读"App，
"扫一扫"获取本书更多精彩内容。
ISBN 978-7-213-09390-6

《星际穿越》

◎ 天体物理学巨擘基普·索恩写给所有人的天文学通识读本，媲美霍金《时间简史》的又一里程碑式著作！

◎ 好莱坞顶级导演克里斯托弗·诺兰、欧阳自远等3大院士、李淼、魏坤琳（Dr.魏）等5大顶尖科学家、《三体》作者刘慈欣联袂推荐！



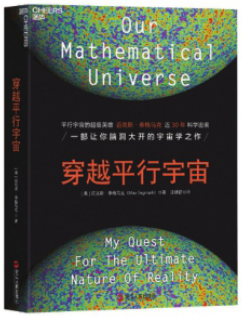
使用"湛庐阅读"App，
"扫一扫"获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-06685-6

《穿越平行宇宙》

◎ 平行宇宙理论世界级研究权威迈克斯·泰格马克重磅新作，带你踏上探索宇宙终极本质的神秘旅程！

◎ 《彗星来的那一夜》《蝴蝶效应》《银河系漫游指南》《奇异博士》等众多烧脑科幻大片争相借鉴的主题——平行宇宙！



使用"湛庐阅读"App，
"扫一扫"获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-07980-1

《人类为什么要探索太空》

◎ 英国著名天文学家、世界级太空旅行专家克里斯·英庇颠覆式新作天文爱好者的不二之选！

◎ 本书讲述了人类从走出非洲到飞出地球的史诗般历程，揭示了冒险基因如何驱动人类的进化，以及人类将来如何在地球之外的浩瀚宇宙中繁衍生息。



使用"湛庐阅读"App，
"扫一扫"获取本书更多精彩内容。

ISBN 978-7-213-09462-0



amplitude business 与思想有关

FUTURE TREK

对话最伟大的头脑
大思考系列

The Universe

Leading Scientists Explore the Origin, Mysteries, and Future of the Cosmos

宇宙
从起源到未来

[美]约翰·布罗克曼
（John Brockman）◎编著
高爽◎译



浙江人民出版社
ZHEJIANG PEOPLE'S PUBLISHING HOUSE

版权信息

本书纸版由浙江人民出版社于2017年9月出版

Edge Foundation, Inc.授权湛庐文化（Cheers Publishing）作中国大陆（地区）电子版发行（限简体中文）

版权所有·侵权必究

书名：宇宙

作者：【美】约翰·布罗克曼（John Brockman）

译者：高爽

字数：324千字

电子书定价：71.99元

THE UNIVERSE. Copyright©2014 by Edge Foundation, Inc.All rights

reserved.

目　录

版权信息
各方赞誉
总序
前言
01 宇宙学的黄金时代
02 循环宇宙
03 暴胀宇宙
04 一个会产生出泡泡的泡泡正在产生新泡泡
05 弯曲的旅行
06 时间之前
07 宇宙为何是今日之貌？
08 我们是被模拟出来的吗？
09 从思考本质着手
10 我们的宇宙只是宇宙景观的一个角落
11 人择原理
12 科学与确定性无关
13 空非空
14 我的爱因斯坦
15 爱因斯坦与庞加莱
16 在更大的尺度上思考宇宙
17 量子猴子
18 获得诺贝尔奖之后
19 谁会关心萤火虫？
20 构造者理论
21 粗糙度无处不在

译者后记

The Universe

Leading Scientists Explore the Origin,Mysteries,and Future of the Cosmos

各方赞誉

伟大头脑的伟大之处，绝不在于他们拥有“金手指”，可以指点未来；而在于他们时时将思想的触角延伸到意识的深海。他们发问，不停地发问，在众声喧哗间点亮“大问题”和“大思考”的火炬。

段永朝

财讯传媒集团首席战略官

建筑学家威廉·J.米切尔曾有一个比喻：人不过是猿猴的1.0版。现在，经由各种比特的武装，人类终于将自己升级到猿猴2.0版。他们将如何处理自己的原子之身呢？这是今日顶尖思想者不得不回答的“大问题”。

胡泳

博士，北京大学新闻与传播学院教授

“对话最伟大的头脑”这套书中，每一本都是一个思想的热核反应堆，在它们建构的浩瀚星空中，百位大师或近或远、如同星宿般璀璨。每一位读者都将拥有属于自己的星际穿越，你会发现思考机器的100种未来定数，而奇点理论不过是星空中小小的一颗。

吴甘沙

驭势科技（北京）有限公司联合创始人兼CEO

一个人的格局和视野取决于他思考什么样的问题，而他未来的思考，在很大程度上取决于他现在的阅读。这套书会让你相信，在生活的苟且之外，的确有一群伟大的头脑在充满诗意的远方运转。

周涛

电子科技大学教授、互联网科学中心主任

作为美国著名的文化推动者和出版人，约翰·布罗克曼邀请了世界上各个领域的科学精英和思想家，通过在线沙龙的方式展开圆桌讨论。“对话最伟大的头脑”这套书就是活动参与者的观点呈现，让我们有机会一窥“最强大脑”的独特视角，从而得到思想上的启迪。

苟利军

中国科学院国家天文台研究员，中国科学院大学教授
“第十一届文津奖”获奖图书《星际穿越》译者

未来并非如我所愿一片光明，看看大师们有什么深刻的思考和破解之道，也许会让我们活得更放松一些。

李天天

丁香园创始人

与最伟大的头脑对话，虽然不一定让你自己也伟大起来，但一定是让人摆脱平庸的最好方式之一。

刘兵

清华大学社会科学学院教授

以科学精神为内核，无尽跨界，Edge就是这样一个精英网络沙龙。每年，Edge会提出一个年度问题，沙龙成员依次作答，最终集结出版。不要指望在这套书里读到“ABC”，也不要指望获得完整的阐释。数百位一流精英在这里直接回答“大问题”，论证很少，锐度却很高，带来碰撞和启发。剩下的，靠你自己。

王烁

财新传媒主编，BetterRead公号创始人

术业有专攻，是指用以谋生的职业，越专业越好，因为竞争激烈，不专业没有优势。但很多人误以为理解世界和社会，也是越专业越好，这就错了。世界虽只有一个，但认识世界的角度多多益善。学科的边界都是人造的藩篱，能了解各行业精英的视角，从多个角度玩味这个世界，综合各种信息来做决策，这不显然比死守一个角度更有益也更有趣吗？

兰小欢

复旦大学经济学助理教授

如果每位大思想家都是一道珍馐，那么这套书毫无疑问就是至尊佛跳墙了。很多名字都是让我敬仰的当代思想大师，物理学家丽莎·兰道尔、心理学家史蒂芬·平克、哲学家丹尼尔·丹尼特，他们都曾给我无数智慧的启发。

如果你不只对琐碎的生活有兴趣，还曾有那么一个瞬间，思考过全人类的问题，思考过有关世界未来的命运，那么这套书无疑是最好的礼物。一篇文章就是一片视野，让你站到群山之巅。

郝景芳

2016年雨果奖获得者

布罗克曼是我们这个时代的“智慧催化剂”。

斯图尔特·布兰德

《全球概览》创始人

布罗克曼是个英雄，他使科学免于干涩无趣，使人文学科免于陈腐衰败。

杰伦·拉尼尔

虚拟现实之父

1981年，我成立了一个名为“现实俱乐部”（Reality Club）的组织，试图把那些探讨后工业时代话题的人们聚集在一起。1997年，“现实俱乐部”上线，更名为Edge。

在Edge中呈现出来的观点都是经过推敲的，它们代表着诸多领域的前沿，比如进化生物学、遗传学、计算机科学、神经学、心理学、宇宙学和物理学等。从这些参与者的观点中，涌现出一种新的自然哲学：一系列理解物理系统的新方法，以及质疑我们很多基本假设的新思维。

对每一本年度合集，我和Edge的忠实拥趸，包括斯图尔特·布兰德（Stewart Brand）、凯文·凯利（Kevin Kelly）和乔治·戴森（George Dyson），都会聚在一起策划“Edge年度问题”，而且常常是在午夜。

提出一个问题并不容易。正像我的朋友，也是我曾经的合作者，已故的艺术家和哲学家詹姆斯·李·拜尔斯（James Lee Byars）曾经说的那样：“我能回答一个问题，但我能足够聪明地提出这个问题

吗？”所以，我们要去寻找那些可以启发不可预知答案的问题，那些激发人们去思考意想不到之事的问题。

现实俱乐部

1981—1996年，现实俱乐部是一些知识分子间的非正式聚会，通常在中国餐馆、艺术家阁楼、投资银行、舞厅、博物馆、客厅，或在其他什么地方举办。俱乐部座右铭的灵感就源于拜尔斯，他曾经说过：“要抵达世界知识的边界，就要寻找最复杂、最聪明的头脑，把他们关在同一个房间里，让他们互相讨论各自不解的问题。”

1969年，我刚出版了第一本书，拜尔斯就找到了我。我们俩同在艺术领域，一起分享有关语言、词汇、智慧以及“斯坦们”（爱因斯坦、格特鲁德·斯坦因、维特根斯坦和弗兰肯斯坦）的乐趣。1971年，我们的对话录《吉米与约翰尼》*（Jimmie and Johnny）*由拜尔斯创办的“世界问题中心”（The World Question Center）发表。

1997年，拜尔斯去世后，关于他的世界问题中心，我写了下面的文字：

> 詹姆斯·李·拜尔斯启发了我成立现实俱乐部以及Edge的想法。他认为，如果你想获得社会知识的核心价值，去哈佛大学的怀德纳图书馆里读上600万本书，是十分愚蠢的做法。在他极为简约的房间里，他通常只在一个盒子中放4本书，读过后再换一批。于是，他创办了世界问题中心。在这里，他计划邀请100位最聪明的人相聚一室，让他们互相讨论各自不解的问题。
>
> 理论上讲，一个预期的结果是他们将获得所有思想的总和。但是，在设想与执行之间总有许多陷阱。拜尔斯确定了他的100位最聪明的人，依次给他们打电话，并询问有什么问题是他们自问不解的。结果，其中70个人挂了他的电话。

那还是发生在1971年的事。事实上，新技术就等于新观念，在当下，电子邮件、互联网、移动设备和社交网络真正实现了拜尔斯的宏大设计。虽然地点变成了线上，但这些驱动热门观点的反复争论，却让现实俱乐部的精神得到了延续。

正如拜尔斯所说：“要做成非凡的事情，你必须找到非凡的人物。”每一个Edge年度问题的中心都是卓越的人物和伟大的头脑，其中包括科学家、艺术家、哲学家、技术专家和企业家，他们都是当今各自领域的执牛耳者。我在1991年发表的《第三种文化的兴起》*（The Emerging Third Culture）*一文和1995年出版的《第三种文化：洞察世界的新途径》*（The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution）*一书中，都写到了“第三种文化”，而上述那些人，他们正是第三种文化的代表。

第三种文化

经验世界中的那些科学家和思想家，通过他们的工作和著作构筑起了第三种文化。在渲染我们生活的更深层意义以及重新定义“我们是谁、我们是什么”等方面，他们正在取代传统的知识分子。

第三种文化是一把巨大的“伞”，它可以把计算机专家、行动者、思想家和作家都聚于伞下。在围绕互联网和网络兴起的传播革命中，他们产生了巨大的影响。

Edge是网络中一个动态的文本，它展示着行动中的第三种文化，以这种方式连接了一大群人。Edge是一场对话。

第三种文化就像是一套新的隐喻，描述着我们自己、我们的心灵、整个宇宙以及我们知道的所有事物。这些拥有新观念的知识分子、科学家，还有那些著书立说的人，正是他们推动了我们的时代。

这些年来，Edge已经形成了一个选择合作者的简单标准。我们寻找的是这样一些人：他们能用自己的创造性工作，来扩展关于“我们是谁、我们是什么”的看法。其中，一些人是畅销书作家，或在大众文化方面名满天下，而大多数人不是。我们鼓励探索文化前沿，鼓励研究那些还没有被普遍揭示的真理。我们对“聪明地思考”颇有兴趣，但对标准化“智慧”意兴阑珊。在传播理论中，信息并非被定义为“数据”或“输入”，信息是“产生差异的差异”（a difference that makes a difference）。这才是我们期望合作者要达到的水平。

Edge鼓励那些能够在艺术、文学和科学中撷取文化素材，并以各自独有的方式将这些素材融于一体的人。我们处在一个大规模生产的文化环境当中，很多人都把自己束缚在二手的观念、思想与意见之中，甚至一些公认的文化权威也是如此。Edge由一些与众不同的人组成，他们会创造属于自己的真实，不接受虚假的或盗用的真实。Edge的社区由实干家而不是那些谈论和分析实干家的人组成。

Edge与17世纪早期的无形学院（Invisible College）十分相似。无形学院是英国皇家学会的前身，其成员包括物理学家罗伯特·玻意耳（Robert Boyle）、数学家约翰·沃利斯（John Wallis）、博物学家罗伯特·胡克（Robert Hooke）等。这个学会的主旨就是通过实验调查获得知识。另一个灵感来自伯明翰月光社（The Lunar Society of Birmingham），一个新工业时代文化领袖的非正式俱乐部，詹姆斯·瓦特（James Watt）和本杰明·富兰克林（Benjamin Franklin）都是其成员。总之，Edge提供的是一次智识上的探险。

用小说家伊恩·麦克尤恩（Ian McEwan）的话来说：“Edge心态开放、自由散漫，并且博识有趣。它是一份好奇之中不加修饰的乐趣，是这个或生动或单调的世界的集体表达，它是一场持续的、令人兴奋的讨论。”

约翰·布罗克曼

这本书作为Edge系列之一，会着重关注宇宙的问题。在官网Edge.org上，有本书21篇文章的节选，其中也包括采访、演讲文字、特邀文章等，而且很多内容都有相应的视频。

Edge囊括了很多科学家、艺术家、哲学家、技术大师和企业家，这些人都是现代社会知识、技术和科学等领域的重要人物。通过授课、研讨会、晚宴等形式，这些学者正在重新书写我们这个世界的文化体系。Edge将其汇集而成了第三种文化。

在Edge.org网站上，有访谈对话，有文化沙龙，数百万字的文档鲜活地呈现了智者、大家们过去18年来的对话。这些内容向公众完全免费公开。

以科学精神为依托，Edge发起的思想者之间的非正式对话，以第三种文化的精神进行非技术性的、没有复杂公式的、口语化的对话。我将其描述为：“在经验世界中的科学家和思想者，他们的工作和精彩的文章正在取代我们生活中的传统智慧，正在重新定义我们是谁、我们是什么。”

《宇宙》这本书问世的同时，位于南极的BICEP2射电望远镜发现了引力波，确认了宇宙暴胀理论预言的原初引力波的存在。[1]以此为契机，我们汇集了Edge网站上最优秀的思想者，他们大多是工作在科学前沿的理论物理学家和宇宙学家。他们提供了一幅基于过去30年发展的宇宙学图景。用代表人物阿兰·古斯（Alan Guth）的话来说，那是一个“黄金时代”。

宇宙学的黄金时代已经走到了它的顶峰，不只是因为南极BICEP2的发现，还包括2012年位于欧洲核子研究中心（CERN）的大型强子对撞机（LHC）对希格斯玻色子的发现。这一发现让宇宙的基本组成粒子有了可以理解的质量。

这本书以阿兰·古斯在2001年发表的演讲开始，他是暴胀理论之父，这样的安排显然恰到好处。一年后，在Edge举行的一次聚会上，古斯与保罗·斯坦哈特（Paul Steinhardt）碰了面。斯坦哈特提出了与古斯的暴胀理论相竞争的循环宇宙理论。而关于引力波的新数据可能已经排除掉了这一理论。可想而知，两人思想的碰撞一定非常值得读者期待。

安德烈·林德（Andrei Linde）被誉为永恒混沌暴胀理论之父。他强调了多重宇宙的概念和人择原理。“宇宙的诸多部分可能彼此差异巨大，而我们只不过生活在自己熟悉的宇宙环境中。”

丽莎·兰道尔（Lisa Randall）和尼尔·图罗克（Neil Turok）详细地阐述了膜理论，这一理论是弦理论的二维结构。膜理论是循环宇宙理论的核心概念。

肖恩·卡罗尔（Sean Carroll）仔细考虑了“可观测宇宙为何以如此纯朴的规则和秩序展开”这一神秘问题。

英国皇家天文学家马丁·里斯（Martin Rees）则推测了我们是否有可能只是超级智能计算机制造出来的模拟生命。

李·斯莫林（Lee Smolin）讨论了时间的本质。之后，他又和弦理论之父伦纳德·萨斯坎德（Leonard Susskind），就斯莫林的宇宙自然选择理论和人择原理的功效进行了绅士般的论战。

布赖恩·格林（Brian Greene）、保罗·斯坦哈特和《爱因斯坦传》的作者沃尔特·艾萨克森（Walter Isaacson），讨论了爱因斯坦可能会如何看待21世纪的理论物理学。斯坦哈特和格林针对弦理论进行了讨论。

地中海大学的理论物理学教授卡洛·罗韦利（Carlo Rovelli）建议回归基础；亚利桑那州立大学的宇宙学家劳伦斯·克劳斯（Lawrence Krauss）放弃了对暗能量的痴迷；科学史学家彼得·伽里森（Peter Galison）提出了20世纪早期两位现代大师之间的分歧，即爱因斯坦和庞加莱；而诺贝尔物理学奖得主弗兰克·维尔切克（Frank Wilczek）则享受这样的未来：“我们将在过去已经取得丰硕成果的物理学中，继续前行。”

加州大学伯克利分校的理论物理学教授拉斐尔·布索（Raphael Bousso）是乐观主义者。他说：“我认为我们已经准备好上《奥普拉脱口秀》了……我们将从中得到一些更深刻问题的答案，即关于宇宙大尺度结构是怎样的、量子引力是如何作用于宇宙学的。”

量子力学工程师赛斯·劳埃德（Seth Lloyd）解释了宇宙如何感知自身；史蒂芬·斯托加茨（Steven Strogatz）从大群萤火虫的同步闪光中看到了宇宙的暗示；牛津大学物理学家戴维·多伊奇（David Deutsch）预言，他的构造者理论最终将“提供一个描述物理学系统和

物理学定律的新模型。它还会有自己的新原理，比现有的最深刻的理论，如量子理论和相对论，都更加直指本质”。

最后，数学大师贝努瓦·曼德尔布罗特（Benoit Mandelbrot）在他80岁高龄时，回顾了分形几何学的漫长职业生涯。他发现：“我的生活最近发生了一次重要转折，我意识到，我长时间以来在脚注里写的东西应该得到重视……我非常长寿，直到今天也还在不停地学习。在众多考虑之下，我认为我的工作由一个单一的总目标所引导：找到一个对粗糙度的严格谨慎的分析方法。终于，这个主题给我的生活带来了强有力的凝聚作用。”

宇宙学可能经历了它的黄金时代，但是你会发现，仍然存在大量模糊不清的状况，人们对其有怀疑也有意见不一。本书收录的21篇文章有着十足的超验精神，并且并不是为了下什么定论。在几个月（甚至几年）之前，大型强子对撞机得出了更多关于微观世界的数据，强大的高科技望远镜和卫星在继续探索着宏观世界。请保持怀疑之心！我们对宏观世界理论的讨论，还在继续。

愿这场讨论继续繁荣！

约翰·布罗克曼



想观看肖恩·卡罗尔、李·斯莫林等作者的

演讲视频吗？

扫码下载“湛庐阅读”APP，

“扫一扫”本书封底条形码，

彩蛋、书单、更多惊喜等着您！



INFLATION PROVIDES A POSSIBLE ANSWER TO THE QUESTION OF WHAT MADE THE UNIVERSE BANG.

暴胀提供了回答宇宙大爆炸结果的可能答案。

——《宇宙学的黄金时代》

01

A Golden Age of Cosmology

宇宙学的黄金时代

Alan Guth
阿兰·古斯
宇宙暴胀理论之父；MIT 维克多·魏斯科普夫（Victor F. Weisskopf）物理学教授；米尔纳基础物理学奖（Milner Foundation Fundamental Physics Prize）得主；著有《暴胀宇宙》

戴维·施拉姆（David Schramm）认为，我们所处的今天，是宇宙学的黄金时代。这话说得千真万确！当下的宇宙学研究正在从一系列不靠谱的推测，转变为真正的硬科学分支，它的各种理论可以得到精确观测的检验和发展。宇宙学最有意思的领域之一，是对宇宙背景辐射的不均匀性起伏的预测，这正是我一直以来深度参与的领域。我们认为，宇宙背景辐射是宇宙大爆炸之后的热量余晖。这种辐射最显著的特征之一，是它在所有方向上均匀统一，在忽略了背景辐射中地球相对运动的影响之后，辐射的均匀性达到了十万分之一的精度。

我深度研究的理论称为宇宙暴胀理论，这一理论似乎是对宇宙均匀性的最佳解释。均匀性并不容易理解。你也许会认为，取出烤箱的比萨从热变凉的过程所体现出的物理学基本原理，就能解释宇宙的均

匀性——事物倾向于达到统一的温度。实际上，通过宇宙学方程算出宇宙在任意给定的时间里膨胀得有多快，物理学家就可以计算出达到均匀性所需要的时间。

物理学家发现，为了实现整个宇宙背景辐射的均匀性，宇宙需要足够快地冷却，信息必须以100倍光速的速度传播。但是，根据现有的所有物理学理论，任何事物的运动速度都不会超越光速，因此宇宙均匀性的现象就无法得到解释了。大爆炸理论的经典版本不得不简单粗暴地假设，宇宙从一开始就是各向同性的，即完完全全的均匀。

宇宙暴胀理论是标准大爆炸理论的扩展，它进一步描述了最初驱动宇宙膨胀的原因。在大爆炸理论的经典版本中，膨胀是初始假设，也就是不需要任何解释。经典大爆炸理论算不上一个完整的大爆炸理论，它只能算是描述大爆炸结果的理论。暴胀提供了回答宇宙大爆炸结果的可能答案，目前这个回答看起来几乎是确定的正确答案。

宇宙暴胀理论利用了现代粒子物理学的结果。粒子物理学预测，高能状态存在特殊类型的物质，这些物质会导致引力转向，产生排斥力。暴胀理论认为，早期宇宙包含至少一定量的这种特殊物质。其结果是，你只需要很少一点的这种物质，就可以使排斥力剧烈增大，达到足以覆盖整个可观测宇宙的范围。

由于在暴胀模型中宇宙可以从极端微小的状态开始演化，所以宇宙暴胀理论对可观测宇宙的均匀性作出了简单、有效的解释。在早期宇宙微小的范围内，宇宙有充足的时间实现温度和密度的均匀性，这与房间中的空气会充满整个空间从而实现密度均匀的机制相同。并且，如果你将房间孤立起来，足够长的时间之后，温度也会达到一致。对于微小的早期宇宙，在暴胀模型的开始之初，宇宙的历史有足够的时间让这些机制发挥作用，最终促成宇宙达到几乎完美的均匀状

态。暴胀接管和放大了这些微小区域，将其变得足够大，直到充满整个宇宙，将其均匀性与宇宙膨胀开始时保持一致。

当这一理论最初得到进一步发展时，人们开始担心我们把宇宙设想得过于均匀。宇宙最令人惊叹的特征之一就是其均匀性，但并不意味着绝对均匀。我们有星系和恒星，有星系团和各种复杂的结构，这些都需要我们对其进行进一步解释。如果宇宙开始于彻底的均匀性，它将一直保持这样的均匀，也就不会使物质聚集或是产生特殊的结构。

我相信史蒂芬·霍金是第一个回答了这个问题的人。他指出，量子效应可以拯救我们，虽然他早期的计算不够精确。真实世界不是被经典物理学描述的，尽管它很厉害，也可以给我们提供完全描述事物的决定性方程。但是真实世界，根据我们对物理学的理解，需要量子力学进行描述。这意味着，一切都是概率问题。

我们感知的“经典”世界中，每个物体都有确定的位置和运动轨迹，它们其实只是量子理论预言的不同状态的平均值而已。如果我们在这里采用这种观念，至少走对了大方向。这意味着，我们在经典方程中预言的均匀密度仅仅是量子力学密度的平均值，真实值在一个范围内波动，只是位置有所不同。量子力学的不确定性使早期宇宙的密度可以在某些地方更高一点，而在另一些地方略低一点。

这样，在暴胀结束时，我们期待，在物质几乎均匀的密度上能泛起轻微的涟漪，而且是可以实际计算的涟漪。坦白地说，我们对粒子物理学的了解还不够，还不能精确预测这些涟漪的尺度。但我们可以计算的是，这些起伏的强度依赖涟漪的波长。也就是说，所有尺度的涟漪都存在，你可以计算不同尺度的涟漪具有怎样不同的强度。你还可以讨论我们称为“频谱”（spectrum）的东西，我们利用这个词精确地描述声波。当谈论声波的频谱时，我们讨论的是不同波长的声音

具有怎样不同的强度。同样的分析也适用于早期宇宙，早期宇宙不同涟漪的不同波长有着各自的强弱程度。今天我们可以在宇宙背景辐射中看到这些涟漪。

我们能看见它们，绝对算得上是现代科技的奇妙贡献。1982年当我们第一次预言这种起伏的时候，天文学家还无法注意到地球在背景辐射中运动的效应，这种效应大约占到千分之一的数量级。而我们讨论的密度起伏的涟漪，只有十万分之一的强度。也就是说，宇宙密度起伏的迹象，仅仅是我们当时能勉强观测到的强度的1%。

我一直不相信我们能真正看到这些涟漪。这要比当前的观测水平强100倍，这对天文学家来说太难以实现了。但是惊喜和光明在1992年到来了。具有7度角分辨率（angular resolution）的COBE卫星（Cosmic Background Explore，宇宙背景探测器）首次探测到了这些涟漪，当然仅仅是最长波长的涟漪，不过我们现在已经有了更好的观测。现在的角分辨率已经远远小于1度，可以非常精确地测量不同波长的涟漪强度。这可是非凡的成就！

大约一年半以前，BOOMERANG和MAXIMA实验发布了一系列独特的声明。两个探空气球实验给出了宇宙在几何上具有平坦性的强烈证据，这正是暴胀理论所预言的。在这里，平坦不是指二维平面，三维空间也可以平坦。根据广义相对论，平坦的宇宙三维空间意味着不存在曲率。利用宇宙演化所引起的涟漪，你实际上可以看到空间的曲率。不过，一年半之前也出现了困扰人们的重大分歧，没有人知道该如何处理这个问题。他们测量到的频谱图像有几个峰值。这些峰值是早期宇宙密度波的震荡，这种现象被称为共振（resonance），共振使某些特定波长的震动强度增加。测量证明了第一个峰值，恰恰就是我们期待中的位置和形状。但我们没找到第二个峰值。

为了用理论拟合数据，人们不得不假设宇宙中存在比过去认为的多了大约10倍的光子，因为额外的光子可以产生某种阻尼效果，以使第二个峰值消失。当然，所有的实验都有误差。如果实验多次重现，结果不会每次都精确一致。因此我们可以想象，第二个峰值只是因为运气不好而恰好没有被观测到。尽管如此，如果宇宙包含了其他观测已经得出的光子密度，峰值不可见的概率将下降为1%。因此预测和理论之间的分歧依然存在。

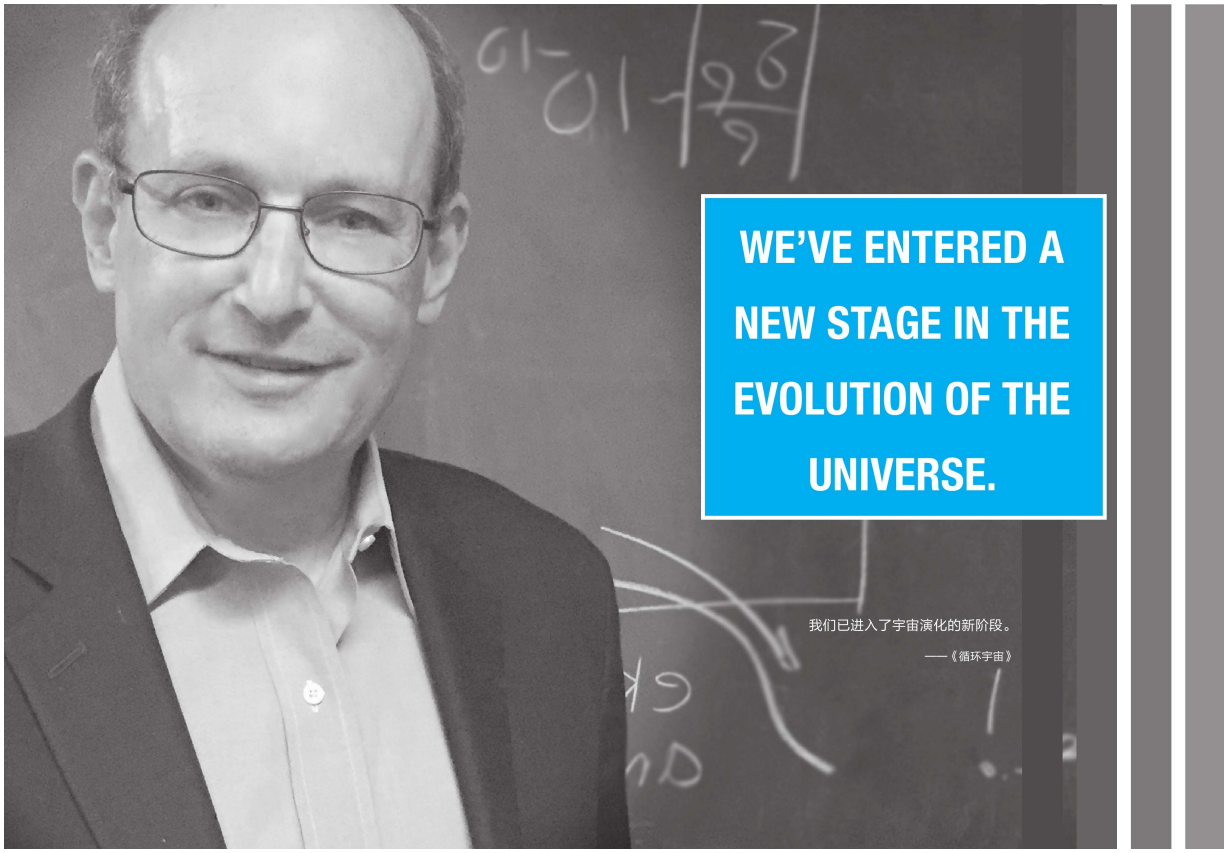
所有戏剧性的改变都发生在三四个月之前。现在第二个峰值不仅能看得见，而且高度与理论预期精确一致，一切观测现在都可以完美地被理论预测。这真是太好了！虽然我知道在这条道路上我们一定还会遇到很多困难，但我们有了一幅漂亮的图景，目前来看，它确认了早期的宇宙暴胀理论。

我们当前关于宇宙的图景面临着一些新困境，这些问题都是两三年前出现的。为了拟合数据，匹配观测，我们必须假设宇宙中存在我们过去不知道的新能量。这种新成分通常被称为暗能量。就像它的名字所暗示的那样，我们依然对它的细节所知甚少。它就像是我们之前谈论过的排斥力，是早期宇宙中驱动暴胀的元素。事实上，我们今天的宇宙依然充满了类似的物质。虽然反引力效果比早期宇宙存在过的效果微弱多了，但我们非常确定的是，今天的宇宙正在加速膨胀，这正是暗能量作用的结果。

虽然我试图对我们已经理解和掌握的知识进行宣传，但这其中仍然存在很多不确定性。比如，我们依然不清楚宇宙组分中最充足的物质的性质。暗能量占宇宙总质量（能量）的60%，我们却不了解它到底是什么。它可能是真空能本身，但我们并不知道更多细节。另外，被我们称为暗物质的部分占宇宙总质量的30%甚至40%，我们同样不了解它。暗能量产生排斥力并且平滑分布，暗物质像普通物质那样受到引

力作用，它彼此吸引并且成团，但我们不知道它的构成。而我们已经认识的质子、中子、普通物质的原子和分子，只占宇宙总质量的5%。

在宇宙学领域，我们已经取得了巨大进展。但同时，我们目前掌握的理论还远远没发展到说明一切的程度。



我们已进入了宇宙演化的新阶段。

——《循环宇宙》

02

The Cyclic Universe

循环宇宙

Paul Steinhardt
保罗·斯坦哈特
理论物理学家；普林斯顿大学阿尔伯特·爱因斯坦科学教授；合著有《无尽的宇宙》

若你向大多数宇宙学家问及我们这一领域目前所在何处，他们会告诉你，我们身处人类历史中一段非常特殊的时期。得益于科学技术的众多进步，我们能够以前所未有的方式观察到非常遥远又非常早期的宇宙。比如，我们可以获得宇宙幼年时期的浮光掠影，那时第一批原子正在形成。我们还可以获得宇宙青春期的剪影，那时第一批恒星和行星正在孕育中。现在我们更是能够获取宇宙完整、详细的三维图像。综合上述这些在人类历史上首次获得的各种信息，你可以得到一系列关于任何宇宙演化模型的严格限制。

回顾20世纪90年代早期关于宇宙演化的各种理论，我们近10年获得的数据已将它们一一排除，只剩下一种被视为共识的模型。这一模型结合了20世纪20年代至40年代发展起来的大爆炸模型、20世纪80年

代由阿兰·古斯提出的暴胀理论，以及我将简要讨论的最近一项修正。这一共识理论与我们现在对宇宙的观测结果高度一致。因此，许多宇宙学家认为，我们终于确定了宇宙的基本历史。

但我有一种颇为不同的观点，这一观点受到了两件事的启发。第一件事就是我前面提到的最近一项修正。我必须说明的是，这项修正不仅仅是一项修正，更是对我们关于时间和宇宙历史相关概念的一次颠覆。第二件事是，近年来我从事的一项将宇宙历史搞得七零八落的替代理论的研究：所有创造了宇宙重要特征的事件以不同的顺序、不同的物理学机制，在不同的时间，以不同的时间尺度发生。并且到目前为止，这一模型似乎还能高度再现共识图景的所有成功预言。

这一图景与共识图景的关键区别可以归结到时间的本质上。标准模型，或者说共识模型，假定时间有起点，也就是我们常说的大爆炸。根据此模型，由于某些我们不甚明了的原因，宇宙突然从无到有，充满物质与能量，并在过去的150亿年持续膨胀和冷却。在替代模型中，宇宙是无限的。时间是无限的，过去无始，未来无终。事实上，贯穿宇宙演化的进程，三维空间始终无限。

更具体些，这一模型提出了一个以循环形式演化的宇宙。也就是说，宇宙经历了从热到冷，从致密到稀疏，从热辐射到我们今日所见的结构，并最终成空无的演化时期。接着，一系列事件发生，循环再次开始：空无宇宙再次被注入能量，形成了一个膨胀与冷却的新时期。这一过程永恒周期性地重复。我们现在所见证的仅仅是最近的一次循环。

循环宇宙的概念并不新颖。在有记录的历史中，人们早已思考过这个想法。例如，古印度有一套详尽的基于循环宇宙概念的宇宙学。他们预言，一次循环会持续86.4亿年，这是一个具有三位有效数字精

度的预言。这令人印象极为深刻，尤其是他们当时可没有量子力学，也没有弦理论！与之不同，我认为应该是数万亿年而不是数十亿年。

在西方思想中，“循环”的概念也是反复出现的主题。例如，埃德加·爱伦·坡（Edgar Allan Poe）和尼采都有各自的循环宇宙模型。在相对论宇宙学的早期，爱因斯坦、亚历山大·弗里德曼（Alexander Friedmann）、乔治·勒梅特（Georges Lemaître）和理查德·托尔曼（Richard Tolman）也曾对循环的想法抱有兴趣。循环的概念吸引了如此多人的原因显而易见：如果宇宙有起点，你就不得不解释它为什么会开始、在什么条件下开始。如果你的宇宙是循环的、永恒的，那就不必解释起始问题了。

在将循环概念带入现代宇宙学的尝试中，若干技术难题被发现于20世纪20年代和30年代。那时的想法是，三维宇宙在时间轮回中的经历始于大爆炸的膨胀时期，又反转到终结于大挤压（Big Crunch）的压缩时期。宇宙反弹，膨胀再次开始。难题之一是，每次当宇宙挤压到极限，它的密度和温度就会提升到一个无限大的值，通常的物理学定律是否适用也难以明了。

其次，每一次膨胀挤压循环都会通过自然热动力学过程创造熵，并添加到更早循环的熵。所以，每次循环开始时的熵密度都会比前一次更高。事实证明，一次循环的持续时间与熵密度息息相关。如果熵增加，持续时间也会相应增加。因此，随着时间流逝，每次循环的持续时间都会比上一次长。但问题是，反推时间，每次循环的时间会变得越来越短，直到经过一个有限的时间，持续时间缩减到零。这样，起始难题还是没能避免，只是推迟了有限的循环次数。如果我们想要再次引入循环宇宙的概念，就必须解决这两大难题。为此，我即将描述的循环宇宙模型便应用了一些新想法。

为了理解寻找替代模型的重要意义，我们要先深入了解下共识模型。不可否认的是，共识模型的某些方面非常吸引人，然而我要强调的是，共识模型还是不够简单明了。尤其是最近的观测发现迫使我们去修正它，使其变得更加复杂。因此，我先从共识模型的综述开始说起。

共识理论以大爆炸为起点：宇宙有初始。过去50年内，人们将此作为一项标准假设。但我们现在还不能用任何物理学定律来证明这一点。此外，它不得不假设宇宙的初始能量密度低于临界值。否则，宇宙将会在进入下一个演化阶段（暴胀期）前停止膨胀并再次坍缩。还有，要进入暴胀阶段，还必须存在某种能量来驱动暴胀。一般而言，这种能量被假定为暴胀场。该理论还不得不假定，在起始值低于临界密度的宇宙各部分中，以暴胀能量的形式储存着一股不可忽视的能量。这股能量最终充满宇宙并开启加速膨胀期。上述假设都可以说是合理的，但假设也仅仅是假设。将这些假设考虑在内，我们才能更好地比较共识模型与它的挑战者。

假设这些条件全部满足，暴胀能量在瞬间超越质量和辐射。暴胀期开始，宇宙急剧加速。许多奇迹似的事情因暴胀完成：宇宙变得均匀和平坦，又留下了那么一些不均匀，进而成为星系的种子。而后宇宙又在合适的条件下准备进入下一个演化阶段。根据暴胀模型，暴胀能量衰退成物质与辐射组成的高温气体。过了差不多一秒钟，第一批轻原子核由此产生。又是数万年过去，缓慢移动的物质主宰了宇宙。就在这些阶段中，第一批原子诞生，宇宙变得透明，宇宙的结构——第一批恒星、星系形成了。目前为止，一切还相对简单。

最近的发现告诉我们，我们已进入了宇宙演化的新阶段。恒星和星系形成后，奇怪的事情发生了，这些事情导致宇宙的膨胀开始再次加速。在宇宙由质量和辐射主宰，并逐渐形成结构的过去150亿年中，

由于物质和辐射的自引力吸引效应与对宇宙膨胀的对抗效果，宇宙的膨胀是在减速的。直到不久前，物质和辐射还依然被认为是宇宙的主导能量形式，而减速也将永久地持续下去。

然而，最近的观测结果却并非如此：宇宙膨胀正在加速。这意味着，宇宙中的大部分能量既非物质也非辐射，而是一种超越了物质和辐射的能量。因为缺少相应的术语，我们称之为暗能量。与我们熟悉的物质与辐射不同，暗能量具备自引力排斥效应。这就是导致宇宙加速膨胀而非减速的原因。在牛顿的引力理论中，所有质量都是引力吸引的，但爱因斯坦的理论则允许引力排斥的能量存在。

我认为，无论是物理学家、宇宙学家，还是大众，都没有真正理解这一发现的意义。从整个历史的角度来看，这是一场“哥白尼”式的革命。“革命”一词可以说源自哥白尼，他改变了人类关于空间、关于人类在宇宙中位置的认知，这是哥白尼的重要贡献。通过证明地球绕太阳旋转，哥白尼引发了一连串的思考，让人们明白人类所处的地球在宇宙中并无特殊之处。而现在，关于时间的本质，我们发现了一件很奇怪的事，即我们所处的位置并无特殊，但我们所处的时间却非同寻常。在这一时间中，宇宙膨胀由减速转为加速；曾主宰宇宙的物质和辐射迅速变得无关紧要；宇宙结构由向更大尺寸形成转变为停止形成。我们刚好处在两大演化阶段转化过程之间。正如哥白尼的地球不是宇宙中心的假设引发了一连串思想“地震”，最终改变了我们关于太阳系乃至整个宇宙的概观理解一样。毫无意外，宇宙加速膨胀的发现也许会完全改变我们对于宇宙历史的看法。这正是我们考虑替代模型的一大动因。

了解了共识模型之后，让我们再将目光投向循环宇宙假设。由于它是循环式的，所以我可以从我任意选取的点开始讨论。为了更具有对比性，我将从类似“大爆炸”的点开始说起，我称其为“爆炸”。

在这一点上，宇宙在一次循环中便达到了温度和密度的最高值。与大爆炸模型不同的是，在这一情境下，温度和密度并不是发散的，而是有一个有限大的极值。尽管这一温度极高，可以达到约10^{20}开尔文，足以将原子和原子核蒸发成它们的基本组分，但还未高至无穷。不仅如此，它事实上也远低于量子引力效应占据主导地位的普朗克能标（Planck energy scale）。爆炸之后，宇宙直接进入了一个由辐射主导的阶段。由于此图景下没有标准模型所具备的暴胀理论，我们仍需解释宇宙为何是平坦而均匀的，仍需解释导致了星系形成的涨落又来自何方。与早期暴胀解释不同，在这里我将用循环宇宙中另一不同阶段来回答这些问题。

在循环宇宙模型中，宇宙直接进入辐射主导阶段并如常形成核丰度，然后直接进入物质主导阶段，原子、星系和大尺度星系皆诞生于此，紧接着的则是一个由暗物质主导的阶段。暗物质在标准模型中“入侵”，为使理论和观测相符，我们不得不把它加进来。而在循环宇宙模型中，暗物质则是将要或者说正在驱动着宇宙以循环形式演化的核心要素。暗能量主导宇宙后做的第一件事就是我们现如今看到的：加速宇宙膨胀。为什么这一点至关重要？因为尽管这种加速比暴胀导致的加速慢了100个量级，但只要时间充足，最终仍能获得与暴胀相同的结果。随着时间流逝，这种膨胀使物质和辐射变得日益稀薄，令宇宙渐趋均匀和各向同性，并最终进入真空态。

赛斯·劳埃德曾说，我们的视界内有10^{80}～10^{90}个比特，但如果纵观万亿年宇宙，你会发现，平均起来你的视界内没有或者不到一个比特。事实上，当计数比特时，我们应意识到宇宙在加速膨胀，计算机实际上在失去我们视界内的比特。这就是我们观测到的东西。

宇宙在变得均匀且各向同性的同时，它也在变得平坦。可以想象，如果宇宙存在任何弯曲，即使这个过程很慢，膨胀也终究会将其

扯平。如果一直这样下去，就没什么好说的了。但在这一情景下，暗能量仅存在于一个有限的时期引发了一系列事件。这些事件最终导致引力能转化为新的能量和辐射，使得宇宙开始了新一轮的膨胀。从局部观察者的视角看，这正像是宇宙经历了一次循环；也就是说，看上去像是宇宙每轮清空，然后新的物质和辐射产生并引发新一轮膨胀。在此意义上，这就是一个循环宇宙。如果从能看见整个宇宙的全局观察者的角度看，就会发现，在这个理论中，我们的三维空间是永恒且无限大的。物质在各个阶段被创造后会变稀薄，不管我们看不看得到。从局部看，宇宙像是在循环；而从整体看，宇宙是在稳定地演化，熵在这种演化的时间和空间中随着循环不断增多。

我们可以用很多种方式描述这个过程。我的选择是一种由超弦理论给出的非常漂亮的集合图景。我们只会使用非常基础的超弦理论，这样除了一些我多次提到的奇怪事情之外，你不需要了解超弦理论，也能理解我将要说的话。它们就在那儿，只等着我们去加以运用了。

超弦理论的理念之一是，其他额外维度，是使其自身在数学上连贯一致的必要基础。尤其是在其中一种构想中，宇宙共有11个维度，其中6种卷曲成微乎其微的小球，小到为了讲述我的理论，我可以假装它们并不存在。我要考虑的是三维空间、一维时间，以及一维额外维度。在这一图景中，我们熟悉并穿梭其中的三维空间，沿着一层超曲面或者说一层薄膜存在。这层薄膜是额外维度的边界。在另一边，则还有一层薄膜边界。额外维度就存在于这边界之间的特定区间内。这就好像我们处在一个夹着空间总体积（bulk volume of space）的三明治的一端。三明治的表面则被称为轨形（orbifolds）或膜（branes）。这些膜是具备物理性质的。它们有能量和动量，当被激活时会产生夸克和电子之类的东西。我们就是在这些膜之上，由夸克和电子组成的。由于夸克和轻子只能沿着这些膜运动，所以我们被限制在只能

看到和移动于膜上的三维空间内。我们无法直接观察到整体或者其他膜上的任何物质。

在循环宇宙中，每过数万亿年，两层膜就会碰撞在一起。相应创造了各种产物——粒子和辐射。碰撞同时加热了膜，因此它们又再次分开。这些膜之间受到一种如同弹簧力一样的吸引，导致它们每过一定的时间就会相撞。更完整地说就是，宇宙经历两种运动阶段。当有物质和辐射存于宇宙之中，或者膜相距足够远时，主要的运动是膜的拉伸，也就等价于三维空间的膨胀。其间，膜或多或少地保持着一个固定的距离。这正是过去150亿年间所发生的事情。在这一时期，我们的三维空间会以正常速度膨胀。在一段微小距离之外，另一层膜存在并膨胀着。但我们却不能穿过主体直接接触、觉察或看到它的存在。如果那里有物质聚集在一起，我们能感受到相应的引力作用，却不能看到它所发出的光或任何其他东西。因为它所发出的任何东西都会沿着那个膜运动，而我们只能看到沿着我们的膜运动的东西。

另一个阶段，与膜间作用力相关的能量将宇宙占据。从我们的膜的视角来看，这正像是我们现今观测到的暗能量。它令膜加速拉伸直到上一次碰撞中产生的物质和辐射全部散开，膜变成基本光滑、平坦又空无的表面。你可以将它们想象成充满物质并褶皱着的曲面在接下来的数万亿年里逐渐拉伸。这种拉伸导致膜上的物质和能量逐渐变得稀薄，而膜本身也变得光滑。数万亿年后，这些膜变得绝对光滑、平坦、平行和空无。

然后，膜之间的力使得它们缓慢接近。在接近的过程中，力逐渐增强，膜因而加速接近。它们碰撞时发生的撞击非常剧烈，以致创造出极高温（但非无限高）的物质和辐射。两层膜则飞速分开，差不多回到它们原来的位置，并在物质和辐射的引力作用下，开始新一阶段的拉伸。

在这一图景中，很显然，宇宙经历了膨胀时期和一段有趣的收缩时期。两层膜聚到一起时，收缩的不是我们的维度，而是额外维度。在收缩之前，物质和辐射处于散开的状态，但与20世纪二三十年代的旧循环宇宙模型不同，由于我们的三维空间，也就是膜，保持着伸展的状态，它们并不会在收缩中聚回到一起。收缩的只是额外维度。这一过程在一次又一次的循环中不断重复。

如果将循环宇宙模型与共识图景相比较，你就会发现，暴胀使宇宙变得平坦和均匀的两大功能，都可以由现在才刚开始的加速膨胀来完成。当然，我说的实际上是在最近一次爆炸之前的上一个循环相对应的膨胀。暴胀的第三个功能——产生密度涨落，则在两层膜聚到一起时发生。当它们接近时，量子涨落导致膜开始褶皱。由于这种褶皱，它们碰撞时并不是所有位置都同时碰撞，而是有些区域要比其他区域早一些。这意味着，部分区域更早地被加热到一个有限的温度，然后开始冷却。当膜再次分开，宇宙的温度并非绝对均匀，还存在着量子褶皱留下的空间变化。

值得一提的是，尽管物理过程完全不同，时间尺度也达数十亿年而非10^{30}秒，最终得到的能量与温度分布涨落频谱却与暴胀理论的结果基本一致。因此，循环宇宙模型也能与现在所有的温度和宇宙质量分布测量结果高度一致。

鉴于这两种模型的物理学机制颇为不同，若这两者之一是正确的，那么我们应该会有显著不同的观测结果，尽管目前还未探测到。暴胀创造的涨落不仅仅是能量和温度的涨落，也在时空本身形成了涨落，这就是所谓的引力波。大家期待在未来的几十年内能观测到引力波来证实共识宇宙模型[2]。在循环宇宙模型中则不会产生引力波。这一根本不同是因为产生暴胀式涨落的过程，是一种极快的剧烈过程，足够强大到产生引力波；而循环式涨落则产生于一种极慢的温和过

程，其强度并不足以产生引力波。这就是两种模型给出的全然不同的观测预言的例子，只是现在还很难被观测到。

有趣的是，现在我们有两种可能的图景。一方面，它们对于时间本质、宇宙历史、事件发生顺序和时间尺度的解释截然不同；另一方面，它们对现今宇宙的预言又极为相似。最终在这两者中选择哪一种，将会结合观测（比如引力波）与理论来决定。因为这一图景的核心理念在于膜互相碰撞时发生了什么，这将在超弦理论中得到验证或证伪。与此同时，在接下来的若干年中，我们可以乐呵呵地推测这些理论的启示，以及如何将它们区分开。

EVERYTHING THERE JUST GETS WASHED AWAY BY THE ENORMOUS EXPANSION.

所有东西都将被巨大的膨胀洗刷掉。

——《暴胀宇宙》



03

The Inflationary Universe

暴胀宇宙

Alan Guth
阿兰 · 古斯
宇宙暴胀理论之父，MIT 维克多 · 魏斯科普夫物理学教授；米尔纳基础物理学奖得主；著有《暴胀宇宙》

保罗 • 斯坦哈特对循环宇宙的概念进行了很好的介绍，而我则要介绍一下他所说的作为循环宇宙模型改进基础的传统共识模型。我同意斯坦哈特在其文章结尾处对两种模型进行的比较，到底哪种模型正确还需要时间及实际观测的验证。但这种比较要建立在两大前提之下。一个前提是，这两种理论模型都还需要进一步发展。对循环宇宙理论来说尤其如此，它还无法解答关于膜碰撞时发生了什么的问题。这个问题最终得到解决时，可能也就是这个理论终结之时。第二个前提是，两种理论模型有可观测的引力波预言对比。

膜是“薄膜”一词的简称，这一术语来自弦理论。弦理论最初仅是单纯关于弦的理论，但当人们对其动力学原理进行更细致的研究时发现，为了一致性，只研究弦是不可能的。由于弦是一维的，为了使

其一致，不得不引入多维膜的可能性，进而产生了一般意义上的膜的概念。斯坦哈特特别提到的弦理论中包含了一个四维空间外加一维时间，他称之为“主体”（the bulk）。这一四维空间被两层膜夹在中间。

这些不是我在本文中要谈的，我要谈的是传统暴胀图景，特别是这一图景在过去几年中震撼性地揭示了，宇宙中存在着某种新型能量的巨大进展。由于没有更好的名字，这种能量一般被称作暗能量。

让我们把时间再往前推一些。暴胀理论本身是传统大爆炸理论的一个变体。暴胀理论试图完善的不足之处是，尽管大爆炸理论叫作“大爆炸”，但它实际上从不是关于一次爆炸的理论。没有暴胀的传统大爆炸理论实际只是关于爆炸之后的理论。它从宇宙中的物质已经各就各位、经历过快速膨胀并已经处于难以想象的高温状态时开始讲起，却没有解释它是如何达到这种状态的。暴胀理论则试图回答这个问题，说明是什么“爆炸”了，又是什么驱使着宇宙进入大规模膨胀阶段。事实证明，暴胀理论的解答非常理想。它不仅解释了宇宙膨胀的原因，同时还基本上解释了宇宙全部物质的起源。我用“基本上”一词，是因为典型的暴胀理论仍需要大概一克的物质来启动。所以，与其说暴胀理论是一个关于宇宙终极起源的理论，不如说它是一个解释如何从几乎虚无发展到我们所见所闻的一切的宇宙演化理论。

暴胀背后的基本理念是，一种排斥性引力导致了宇宙膨胀。广义相对论在最初就预言了排斥性引力存在的可能性，这需要一种负压物质来创造排斥性引力。根据广义相对论，创造引力场的不仅仅是物质密度或能量密度，还有压强。正压强创造我们习惯的吸引性引力，而负压强则创造排斥性引力。同时，根据现代粒子学理论，很容易由这些理论中存在的场来构造出负压强。粒子理论给出了负压强的存在，

而广义相对论则告诉我们负压强会导致引力排斥。综合考虑上述两种理论，我们就得到了暴胀理论的缘由。

解开宇宙膨胀驱动力问题的同时，一些本来神秘的问题也经由暴胀理论得到了回答。我们观测到的宇宙有两大重要属性一直未从大爆炸理论中得到真正的解释，它们只是关于初始条件的假设。其一是宇宙的均匀性，也就是不管怎么看，只要范围足够大，宇宙的各个位置看上去并无不同。它是均匀且各向同性的，从不同方向、不同位置观察到的结果都相同。传统大爆炸理论从未能真正解释这一点，只能假设最初就是这样的。问题是，尽管我们知道只要给出足够的时间，任何物体的集合都将达到一个均匀的温度，但早期宇宙的演化是如此之快，根本就没有足够的时间来发生这个过程。具体来说，要解释宇宙如何拉伸自己来达到我们今天在宇宙背景辐射中发现的均匀温度，根据标准大爆炸理论，能量和信息需要以100倍于光速的速度在宇宙中传播。

在暴胀理论中，这一问题彻底不复存在。因为相比于传统理论，暴胀理论假设了一个由排斥性引力主导的加速膨胀时期。这意味着，如果我们用暴胀理论回溯宇宙到起点，就会发现它的起始物质非常之小，无暴胀的传统宇宙学难以想象这一点。鉴于将要演化成我们宇宙的区域不可思议的微小，它有足够的时间来达到均匀温度，就好像桌子上的一杯咖啡逐渐冷却到室温一样。这一区域大约是原子的十亿分之一还要小，一旦这一区域经由普通的热力学平衡进程达到均匀，暴胀就开始发挥作用，导致这一微小区域快速膨胀到足以包含整个可见宇宙。暴胀理论不仅告诉我们宇宙可以是均匀的，还告诉了我们为什么它是均匀的。这是因为它来自具有充足时间以变得均匀的物质，并被暴胀过程所拉伸。

我们的宇宙中，第二个由暴胀给出完善解释的古怪特点是其平坦性，在这一点上尚无出其右者。我们的宇宙是如此接近欧几里得式几何。在相对论中，欧几里得集合并不正常，相反，它十分古怪。在广义相对论看来，弯曲的空间才是普遍的。将宇宙作为一个整体来看，一旦我们假设宇宙是均匀和各向同性的，平坦性问题就直指质量密度与宇宙膨胀率的关系。巨大质量密度将导致空间弯曲成球形的封闭式宇宙。如果质量密度占据主导，宇宙将会是有限体积、无边界的封闭空间。航行于其中的宇宙飞船沿着理想中的直线行驶很长一段距离后，将会回到它的出发点。另一方面，如果膨胀主导，宇宙将会是几何开放的。几何开放式空间与封闭式空间有着截然相反的几何属性。空间是无限的。在封闭空间中，两条平行线会开始汇聚；开放空间中，则会发散。无论哪一种，我们的所见都会与欧氏空间截然不同。然而，如果质量密度恰好处于这两种情况的中间，就是我们在高中学过的欧氏几何的情况。

从宇宙演化的角度看，今日宇宙基本平坦的事实要求宇宙在其早期极度平坦。宇宙在演化中是趋向于不平坦的，那么根据我们在10年或20年前就已经了解，且现在了解得更清楚的事实，即宇宙是极度接近平坦的。从这一点来推测，我们发现，在大爆炸发生一秒钟后，宇宙的质量密度一定恰好等于可以抵消宇宙膨胀率来产生一个平坦宇宙的临界密度，其精度可达到小数点后15位。

传统大爆炸理论没有对导致如此结果的机制给出任何解释，但它必须如此，这才能解释我们今天所看到的宇宙为什么是这个样子。没有暴胀的传统大爆炸理论必须配上高度精细化调整过的初始条件，才能行得通。暴胀理论避开了平坦性问题，因为暴胀改变了宇宙几何随时间演化的方式。尽管在宇宙历史的全部其他时期内，宇宙向着远离平坦的方向演化，在暴胀期内，宇宙以难以置信的速度趋于平坦。暴

胀仅仅需要大约10^{-34}秒就可以将宇宙变得足够平坦，并解释我们今天所看到的一切。

暴胀模型有两大主要预言，在如今看来是可以检验的。它们分别与宇宙的质量密度和密度不均匀性有关。我打算分别讨论它们，首先，从平坦性问题说起。

暴胀提供的宇宙平坦性驱动机制，不管怎么看，都有些过火。它给出的今日宇宙的样子不是“差不多”平坦，而是“恰好”平坦。这是可以避免的，人们为此尝试设计了许多版本的暴胀模型，然而这些版本看起来都不怎么可信。必须要让暴胀恰好停在令宇宙平坦但又没那么平坦的地方。这需要大量非常精细的调整才能做到，过去曾有人设计过这种模型，那时宇宙看起来还是开放的。但这些模型总是看起来很不自然，从未真正得到人们的接受。

一般意义上的暴胀模型驱使宇宙变得完全平坦，因此它的预言之一就是，今天的宇宙质量密度应该处于一个临界值，使得宇宙是几何平坦的。直到三四年前，还没有天文学家相信这一点。他们会说，要使宇宙平坦，如果只关注可见物质，只能得到所需质量的1%。他们还可以提供更多，因为还有暗物质。暗物质是因其对可见物质的引力效应而被推断存在的一种物质。它是在星系的旋转曲线中被发现的。天文学家第一次测量星系旋转速度时，他们发现星系旋转的速度是如此之快，以至于如果只有观察到的那些物质，星系便会土崩瓦解。

为了理解星系如何达到稳定，必须假设有大量暗物质存在于星系中。这些暗物质的质量必须是可见物质的大概5～10倍，才能将星系维系在一起。星系在星系团中的运动也出现了这一问题。尽管星系在星系团中的运动比旋涡星系要随机、混乱得多，但同样的问题依然存在。要维系星系团的存在，所需的质量远比假设在星系内存在的更多。把上述这些质量都加起来，天文学家依然只得到临界密度的1/3。

他们很确定这就是能探测到的全部物质了。这对暴胀模型很不利，但许多人依然相信暴胀是正确的，天文学家早晚还会有新发现。

事实也确实如此，尽管天文学家们的新发现与我们之前讨论的质量大相径庭。从1998年开始，他们就在收集现今宇宙正在加速而不是减速膨胀的证据。正如我在开始时说的，这是得到了广义相对论支持的。我们需要一种具有负压强的材料。我们现在确信，宇宙一定被某种具有负压强的物质所浸透，它是我们观察到的加速膨胀的原因。我们不知道这种物质是什么，但可以称其为暗能量。即使不知道它是什么，我们仍能利用广义相对论来计算有多少这种物质造成了我们看到的加速。结果发现，几乎正好等于2/3的临界密度。这正是早先计算所缺少的！所以，假设暗能量是真实的，那天文学家得到的临界密度就与暴胀的预言相一致了。

暴胀的另一项预言甚至比平坦性问题更具说服性，即密度扰动（density perturbations）问题。暴胀有一个非常棒的特性：通过将所有事物拉伸，任何在膨胀前存在的不均匀都会被抹平。斯坦哈特的模型也利用了这一效应。暴胀不太关心暴胀前有什么存在，所有东西都将被巨大的膨胀洗刷掉。曾几何时，在发展暴胀模型的早期，我们都非常担心这将导致一个绝对完全平坦的宇宙。

不久之后，若干物理学家提出，量子涨落能解决这一难题。宇宙基本上是一个量子力学系统，所以量子理论不只在研究原子时有用，在研究星系时也少不了。量子理论这种基础物理学理论可以有如此广泛的领域发挥作用，实在是了不起。具体来说是，根据经典暴胀理论，在暴胀结束时，质量密度会达到完全均匀。而根据量子力学，一切事物都是随机的。量子涨落无处不在，一些地方的质量密度比平均值稍高或稍低。这恰好是解释宇宙结构所需要的。你还可以再进一步计算这些不均匀性的频谱。我和斯坦哈特之前都进行过相关工作，可

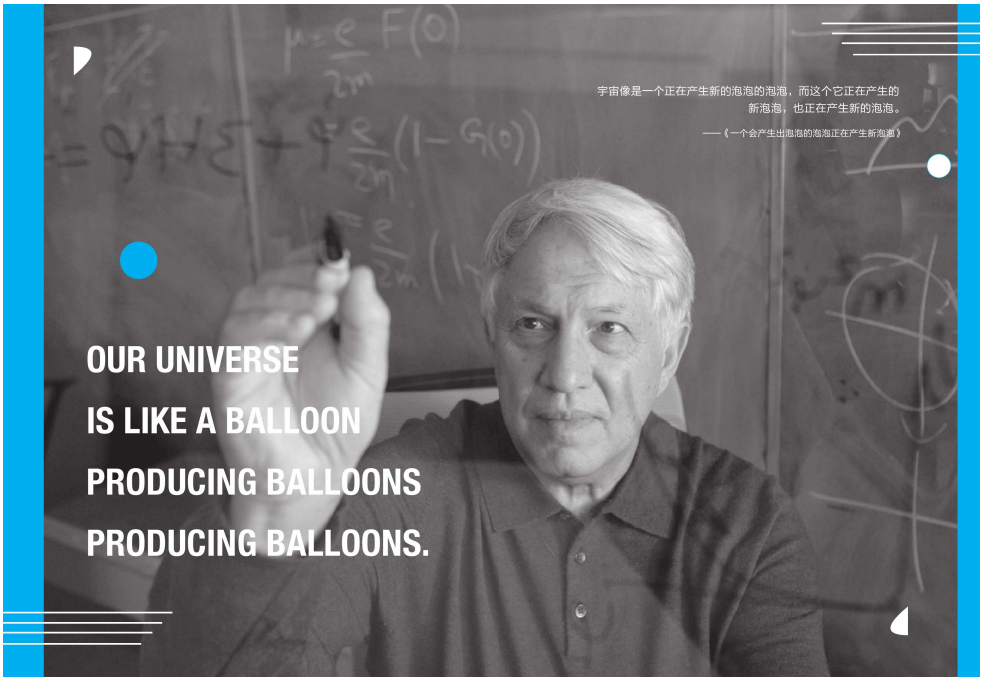
谓趣味无穷。我们的结论是相同的，量子力学恰好能产生正确的不均匀性频谱。

在对基础理论了解更多之前，我们确实不能完全预言这些波动的振幅或者说强度。现在，我们不得不采用从观测中预测出的这些波动强度乘上一个因子的方法。但我们可以预测频谱。想象一个许多不同波长的波动彼此叠加在一起的复杂图像，我们可以计算这些波动的强度如何随着其波长变化。早在1982年我就知道如何去做，但在最近，天文学家可以直接看到烙印在宇宙背景辐射上的不均匀性。COBE卫星于1992年就观测到了这一现象，但由于这颗卫星当时的角分辨率只有大约7度，所以只能看到非常粗略的特征。现在的角分辨率已经提高到0.1度。这些宇宙背景辐射的观测可以用来提供越来越精细的不均匀性频谱图。

最近的数据是由一项叫作宇宙背景成像器（Cosmic Background Imager）的实验发布的。它在5月公布了一组惊人的新数据。这一频谱图像颇为复杂，因为波动虽是在暴胀时期产生的，但之后就随着早期宇宙演化而震荡。因此，你所看到的图像包括了最初的频谱加上所有与宇宙各种属性相关的震动。值得一提的是，这些曲线显示出5个分离开的峰值，这5个峰值体现了理论与观测的良好一致性。你可以看到峰值们的位置、高度都刚刚好，一点不差。最主要的峰值也被很好地画了出来。天文学家的实测结果与基于10^{-35}秒量子涨落的粗略理论的结果拟合得很好，这非常了不起。这些数据到目前为止都与理论匹配得非常好。

现如今，在若干年前与观测严重冲突的暴胀理论，与我们对质量密度和波动的测量结果完美匹配。强有力的证据表明，正确的理论要么就是我这个，要么也会非常接近。

最后我想说，我其实不应该一直用“这个理论”来称呼暴胀理论。实际上，暴胀理论是一大类理论的集合。如果暴胀理论是正确的，并不意味着我们对宇宙起源研究的终结，但也十分接近了宇宙的初始状态。暴胀理论有许多不同版本，事实上，斯坦哈特的循环宇宙模型也可以被认为是其版本之一。循环宇宙理论很新颖，因为它将暴胀放在了宇宙历史中一个完全不同的时期。但暴胀理论仍然在发挥着同样的作用。现在有许多版本的暴胀理论，它们更接近于我们在20世纪八九十年代发展起来的样子。所以即使暴胀理论是正确的，也并不意味着工作的完结，还有许多细节需要完善，还有很多新的东西需要学习，这其中包括宇宙学以及必不可少的粒子物理学。


宇宙像是一个正在产生新的泡泡的泡泡，而这个它正在产生的
新泡泡，也正在产生新的泡泡。
——《一个会产生出泡泡的泡泡正在产生新泡泡》
OUR UNIVERSE
IS LIKE A BALLOON
PRODUCING BALLOONS
PRODUCING BALLOONS.

04

A Balloon Producing Balloons Producing Balloons

一个会产生出泡泡的泡泡正在产生新泡泡

Andrei Linde
安德烈·林德
斯坦福大学理论物理学家；永恒混沌暴胀理论之父；米尔纳基础物理学奖获得者

一切要从过去30年间宇宙学领域发生了什么说起：暴胀理论的诞生；这一理论在近些年的发展，即暴胀成为暴胀多重宇宙理论和弦理论的一部分；接着则是对未来的期望。

在大约一个世纪之前，爱因斯坦提出了一个叫作宇宙学原理的理论，声称宇宙是各向同性的。此后许多年，人们普遍使用了这一原理。事实上，这一原理很早之前就被牛顿论证过。在今天的天体物理学书籍中，仍以各种不同版本的宇宙学原理呈现着宇宙的样子。

曾几何时，这是可以回答宇宙各处为何都相同的唯一答案。但这个问题实际上是在问，为什么是这个宇宙？所以大家都不去考虑多重宇宙的可能，只是想解释我们身处的宇宙为什么这么均匀、为什么这

么大、为什么平行线不会相交。这实际上都是同一个问题的一部分：如果宇宙像小球般大小，如果画几条垂直于小球赤道的线，它们应该在北极点和南极点相交。为何从未有人见过两条平行线相交？

问这类问题可能看上去有些傻。比如，可能有人会对宇宙出现前发生了什么感到好奇。我们当年学的广义相对论告诉我们，问这个问题是没有意义的，因为爱因斯坦方程的解在奇点无法继续，所以何必烦心呢？不过到目前为止，始终有人为此烦心。他们在努力尝试回答这些问题。但对大多数人来说，这种问题是形而上学的，不值得认真对待。

直到暴胀理论被提出，人们才开始认真考虑这些问题。阿兰·古斯思考了这些问题并提出了宇宙暴胀理论。在这一框架下，这些问题可以得到一致的解答。问题是，古斯很快就意识到，仅仅只有他自己的答案还不够完整。之后，经过一年多的研究，我提出了一个新版本的暴胀理论，它对找到这些问题的答案很有助益。最开始，这个理论听上去像是科幻小说，但在我们发现能通过它找到这些问题可能的答案之后，它就始终徘徊在我们的脑海之中。这就是我们相信宇宙暴胀理论的第一个原因。下面我将进行具体解释。

标准大爆炸理论认为，宇宙万物都是从一次巨大的爆炸开始的。“恐怖分子”开启了宇宙。如果你想计算一下这场爆炸需要多少高科技爆炸物时，结果将是10^{80}吨之多！不只如此，这些炸药还要被压缩成一个直径还不足1厘米的小球那么大。同时，“恐怖分子”们还需要恰好同时引爆它的各个部分，误差不能超过万分之一秒。

另一个问题是，根据标准大爆炸理论，宇宙膨胀只会随着时间变得越来越慢。但宇宙为什么开始膨胀？谁给它的初始推力？这事看上去简直不可思议，像奇迹一般。不过有时人们觉得越神奇越好：显

然，上帝可以从无到有搞到10^{80}吨炸药，点燃它，让它变大，反正我们怎么方便怎么来。我们还有其他解释吗？

根据暴胀理论，如果宇宙开始于几乎真空的特殊状态，将会省去许多大麻烦。最简单版本是标量场（scalar field）。还记得电场和磁场吗？标量场更简单：它没有方向。如果它是均匀且不随时间变化的，那它就像真空一样不可见，但却拥有很多能量。当宇宙膨胀时，标量场几乎保持不变，而且它的能量密度也是如此。

这可是关键问题。想象宇宙是一个装有许多原子的大盒子。当宇宙膨胀两倍时，它的体积增大8倍，此时原子的密度则变为原来的1/8。然而，当宇宙中充满不变的标量场时，它的能量密度则不随宇宙的膨胀而发生改变。因此当宇宙增大两倍时，其中质能总量增加8倍。如果宇宙继续膨胀，其中的总能量、总质量会迅速变得无比巨大。因此，无中生有地拥有10^{80}吨爆炸物也就轻而易举了。

这就是暴胀的基本概念。乍一看，似乎是彻头彻尾的错误，因为它违反了能量守恒定律。能量不可能无中生有，自始至终总量不变。我曾经被邀请在瑞典的一次诺贝尔奖座谈会上就能量的概念进行一次公开演讲。我当时一头雾水，他们为什么邀请我？我要跟这些研究太阳能、风能、石油的人说些什么呢？最终我告诉他们：“如果你想要大量能量，你可以白手起家，然后你将得到宇宙中所有的能量。”

并不是每个人都能弄懂这一点，当宇宙膨胀时，质能总量确实会变化。总能量再加上引力能才是不变的，并且它们的总和正好为零。所以宇宙的能量守恒定律始终得到了满足，只是有些古怪：零等于零。质能总量可以任意大，以满足我们的需要。这是暴胀理论的其中一个主要观点。

只要在一个区域存在一种不稳定性，使得初始零质量分裂成一部分巨大的正质能和一部分巨大的负引力能，其能量总和仍然为零。但质能总量就可以要多少有多少。这正是暴胀理论的主要观点之一。

我们不仅已经明白如何开启这种不稳定，还知道如何将它终止。因为如果不停下来，任其进行，那样的宇宙就不是我们能生存于其中的了。阿兰·古斯的观点讨论的是如何开始暴胀，但他并不知道怎样让它妥善地停下来。我的观点则讲述了暴胀怎样开始、怎样继续，以及最终怎样以不对宇宙造成破坏的方式停下来。当明白这一切后，我们就可以无中生有，就如同宇宙学家亚历克斯·维连金（Alex Vilenkin）所说的那样，确确实实是从空无一物中诞生了我们现在所见的一切。那时，这是一项颇具革命性的进步：我们终于能理解我们宇宙的属性了。我们不再需要假定宇宙学原理来解释均匀性问题，我们掌握了真正的物理学原因。

但在提出新版本的暴胀理论后不久，我又意识到了新问题。如果宇宙起始时非常非常小但又含有众多不同属性的部分，然后宇宙的某一部分发生指数级的爆炸，那么我们将再也无法看到宇宙的其他部分，因为不同部分之间的距离在暴胀期间发生了指数级的增加。其他部分的宇宙也因为这遥远的距离再也无法看到我们。举目四望，我们再不能看到具有不同属性的宇宙其他部分，所以我们会认为：“我们的宇宙就是如此，各处都相同，不存在其他部分。”而存在于宇宙其他部分的人可能也这么想：“所有的宇宙就是我们看到的这个样子。”

比如，我开始于宇宙的红色部分，而你开始于宇宙的蓝色部分，暴胀之后，我们放眼四方，说道，“这就是整个宇宙，它就是单一颜色的”，就如同爱因斯坦和牛顿所做的那样。然后我们中的一些人就要努力解释为什么宇宙一定是红色的，而另一部分人则要解释整个宇

宙为什么一定是蓝色的。但现在根据暴胀理论，宇宙被分成具有不同属性的众多部分是颇有可能的。宇宙学原理认为，整个宇宙各处都相同，我们全都生活在有着相似属性的宇宙中。与之不同，我们的看法更具“全球化”：我们生活在一个巨大的暴胀多重宇宙中。有些人生活在红色部分，有些人生活在蓝色部分，只要各部分都在随着暴胀而变得无比巨大，一切就会相安无事。

暴胀理论就这样解释了为什么我们这部分宇宙是如此均匀：我们周边的一切都由宇宙的一小部分通过指数级膨胀而形成的。但我们无法观察到比光速乘以宇宙年龄更远的地方发生了什么。暴胀理论告诉我们，我们所见的这部分宇宙比整个宇宙要小得多。其他部分的暴胀可能产生许多具有完全不同性质的区域。这正是通向暴胀多重宇宙之路上的第一条认识。第二条认识是，即使宇宙在开始时各处都是相同的（比如都是红色），暴胀期间的量子涨落仍可以将宇宙变得多姿多彩。

我在这说的不同颜色只是为了帮助我们理解暴胀期间和暴胀之后发生了什么。我来解释一下我真正要说的。想想水，它可以是液态水，也可以是固态的或者气态的，液态、固态、气态都是水的不同相态，而它们的化学分子式都是一样的：H_2 O。但鱼只能在液态水中生存。对宇宙中物理学定律的理解也是如此。为了简便，我们通常假设宇宙各部分会遵循同样的基本物理学定律。然而，宇宙的不同部分可能是截然不同的，如同冰山与它周围的水不同那般。水的不同相态可能遵循着同样的物理学定律，与之不同，宇宙的不同部分可能处于不同的真空态，在这些真空态中，同样的基本物理学定律可能会有不同的表现。比如，在某部分宇宙中，可能存在弱、强和电磁相互作用，而在其他部分里，这些相互作用可能并无不同。

如果我们始于宇宙的红色部分，它也并不会永远是红色的。暴胀可以产生并放大量子涨落，而这些量子涨落让我们从一种真空态跳到另一种上。宇宙也因此变得多姿多彩。暴胀理论一经提出，这种基础机制就已明了。但它最有意思的结果是在弦理论中表露出来的。

许久之前，弦理论学家就意识到，这一理论适用于多种不同的真空态。如果我们研究的是一个给定版本的弦理论，就无法预言我们世界的属性，而这要取决于对真空态的选取。很多人认为这种可能结果的多样性是弦理论的一大弊端。但在暴胀多重宇宙理论中，这不再是一个问题。在我1986年写成的一篇文章中，我称其为弦理论的一大成就。拥有不同低能物理学定律的多种类型的宇宙，在其之下得以存在。

这简化了我们宇宙中的物理学定律为何与我们存在的必需条件如此相配的问题。我们找到了人择原理的证明，以之取代了宇宙学原理认为宇宙各部分都一样的说法。宇宙中巨大的不同部分彼此之间可能差异极大，而我们只能生活在适合我们生存的部分。30年前，这种类型的观点还极不流行，但20年后，当我们对弦理论真空的属性有更多了解后，局面发生了戏剧性的变化。上面概述的图景成了伦纳德·萨斯坎德所称的弦理论景观（string-theory landscape）的一部分。

从暴胀理论的提出到弦理论景观经历了很长一段路。尤其是刚开始时，这个方向的工作格外困难，因为没有人感兴趣。没有人相信，为了解释宇宙中观测到的均匀性而创造出的暴胀理论，有朝一日会在更大尺度上预测宇宙是完全不均匀的。这有些过头了。即使是暴胀理论的最简单版本，也似乎有些太过革命性，它让从空无中创造一切成为可能。这看起来好像科幻小说，太激进、太异乎寻常。

例如，在1981年建立的新暴胀理论的第一个模型中，我发现宇宙在暴胀时期会膨胀10^{800}倍。这太离奇了，我们从未在物理中见过这样的数

量级。我是在列别捷夫物理研究所（Lebedev Physical Institute）提出新暴胀理论的，当我在那里做关于它的第一次报告时，我不得不一直道歉，因为10^{800}这个数字实在太夸张了。“也许以后，”我说，“我们能得出更现实的结果，这数字会小一些的，全都会小一些的。”但等我研究出更好的暴胀理论，也就是混沌暴胀理论后，这个数字变成了$10^{10000000000000}$。然后我又发现，这一理论中的暴胀将会永远持续下去。

暴胀理论解释了很多没有它我们就无法理解的事情，还预言了一些已经得到实验认证的事情。比如，首先，如果这个理论是正确的，那么暴胀期间产生的量子涨落就解释了与银河系相同类型的星系的形成原因。

其次，还有从太空四处发往地球的宇宙微波背景辐射（CMB）。它的性质很有意思。它在50多年前被发现，当时的温度测量结果是2.7开尔文，这是一个非常非常低的温度。它以均匀的方式从宇宙的四面八方而来。之后更细致的研究发现，它的温度很奇怪，在人的右半边是$2.7+10^{-3}$开尔文，在左半边则是$2.7-10^{-3}$开尔文。不久后就有了解释。我们相对于宇宙在运动，因此有红移的存在。正由于红移的存在，在我们运动方向上大的那部分天空，似乎比另一部分更暖和一些。

接着人们以大约10^{-5}开尔文的精度再次测量了宇宙微波背景辐射的温度。这一工作是由COBE卫星完成的，而WMAP（威尔金森微波各向异性探测器）卫星以及其他许多实验也在做着相同的工作。结果发现，天空中有许多小点点，有些热点儿，有些冷点儿。研究人员将这些小点进行分类并研究了其分布，结果发现，它们的分布规律与最简版暴胀理论的预言完全吻合。这是一项意料之外的验证。从理论上来说，我们知道应该是这样的；但难以置信的是，研究人员们竟能够得到如此令人震惊的精确结果。简直不可思议！

诺贝尔奖只颁发给确定无疑的事实发现。虽然研究人员在宇宙微波背景辐射中发现了涨落，但对涨落是否可能由其他机制引起尚存疑虑。目前为止，在我看来，还没有其他完善的理论能解释这些观测结果。谁说得准呢？也许10年后，就会有人提出像暴胀理论一样优秀的理论。然而，在过去的30年里，已经有不少人投身于此，依然没有提出任何能与暴胀理论相媲美的观点。

现在我将从自己的角度讲一下暴胀理论的提出过程。从俄罗斯（苏联）的角度和美国的角度看这些事，差别会很大。因为在暴胀理论提出时，苏联与美国关系可不算密切，一封信从苏联到美国要大概一个半月到两个月的时间。虽然20世纪30年代就有从苏联到美国的飞行记录了，且只用了一天时间，而50年后，一封信从苏联到美国却需要40～60天。瞧，我们就是这样进步的！

我曾在莫斯科州立大学学习，毕业后，在列别捷夫物理研究学所做博士后。在那里我与博学多才的大卫·柯赞尼斯（David Kirzhnits）共事。他在凝聚态物理、天体物理学、量子场论、非局部理论以及其他各种领域，都有所建树。他实在是一个了不起的人。我发展了他建立的宇宙相变理论（cosmological phase transitions）。也因为此，众多暴胀模型有了一个基本共识，那就是，在宇宙早期，物理学定律可能是完全不同的，也许弱、强、电磁相互作用之间并无不同之处。

曾几何时，我们还以为这可能是个离奇的想法。我们知道它是正确的，只是我们担心无法验证这一点，就好像柏拉图式的观点一样永远得不到什么结果。其实是我们过于悲观了。我们的研究结果之一是，在早期宇宙中会产生叫作原生磁单极子（primordial monopoles）的奇怪事物。我们预言，如果我们的理论是正确的，20世纪70年代公认的弱、强、电磁相互作用的统一理论也是正确的，那么在整个世

界都从初始高温状态冷却下来的宇宙极早期，宇宙相变过程中就会创生出一些像分立的南北磁极那样奇怪的东西。

如果你把一块磁铁切成两半，每一半都会有一个南极、一个北极，你是无法将南北极分开的。但根据统一理论，宇宙中还会有叫作磁单极子的东西，它们要么是南极、要么是北极，而且每个磁单极子都会比质子重1000万亿倍。经过计算，现在的磁单极子数量应该大约与质子相同，这也会使得宇宙比现在重1000万亿倍。这样的宇宙将会是封闭的，而且早已在它演化开始的第一秒就坍缩了。既然我们还在这，那就说明这一理论有些地方错了。这就是原生磁单极子难题。这是我们研究宇宙相变理论的一大困难。

许多人在努力解决这个问题，然而还没有人成功。不知为何，大家就是无法得出一个一致的解。在这些研究进行的同时，我们听说阿列克谢·斯塔罗宾斯基（Alexei Starobinsky）在1979年和1980年提出了一种新的宇宙学理论。这种理论更加离奇，它声称宇宙呈指数级膨胀是由量子引力中的量子修正（quantum corrections）效应引起的。这种情形很有趣，非常像暴胀理论。但没有人管它叫暴胀理论，因为它是在阿兰·古斯提出他的旧暴胀理论之前一年出现的。它被称为“斯塔罗宾斯基模型”，这一模型曾是俄罗斯所有宇宙学相关会议和辩论中的首要主题。但这一理论并没有传到美国，原因之一是斯塔罗宾斯基提出这个模型是为了解决奇点问题。未能成功后，他没有尝试用它来解决那些后来由暴胀理论解决了的其他问题。实际上，斯塔罗宾斯基假设宇宙从开始就是均匀的，并没有尝试解释它为什么是均匀的。然而，当我们回顾暴胀模型的历史，就会发现，除了暴胀的开始阶段，这一模型具备了暴胀模型的所有特性。尽管斯塔罗宾斯基模型的提出动机模糊不清，但它确实能用，或者说差一点点就能用了。

在那之后，阿兰·古斯论证了他的暴胀模型。但我并不知情。在20世纪80年代的某一年，我参加了一次研讨会。那次是在莫斯科核研究所举办的，苏联著名科学家瓦莱里·鲁巴科夫（Valery Rubakov）现在依然在那里生活和工作。在那次会议上，鲁巴科夫讨论了用所谓的科尔曼-温伯格模型（Coleman-Weinberg model）中因宇宙相变引起的宇宙呈指数级膨胀，来解决平坦性和均匀性问题的可能性。他们在对古斯的论文毫不知情的情况下，讨论了这些问题。然后他们提交了论文打算发表，然而却未被接受，因为在那时古斯的论文已经发表了。

我因此学到了如何解决假真空中指数级膨胀期间各种不同的宇宙学问题，但却不是从古斯的论文中学到的。这件事其实比古斯的论文发表时间要早不少，只是因为邮寄导致了延迟。不仅如此，早在1978年，我就在与根纳季·切别斯夫（Gennady Chibisov）的合作中明白了假真空中指数级膨胀的可能性，只是我们发现那个模型并不成功，就没有继续研究；直到鲁巴科夫和他的合作者指出这一点，我们才意识到它可能有助于解决许多宇宙学难题。

当古斯的预印本传到苏联，苏联著名科学家列夫·奥肯（Lev Okun）打电话给我说：“我听说了阿兰·古斯的论文，他尝试用宇宙的指数级膨胀来解决平坦性问题。你听说过吗？”我告诉他：“没有，我从来没听说过，但我可以告诉你它的原理和不足。”之后的半个小时，我向他解释了古斯的理论，并向他说明了为什么古斯的理论行不通。不久之后，我收到了古斯的论文。我们在这之前就有与古斯相一致的结果，我们讨论了宇宙相变、宇宙的膨胀、气泡，就是没讨论用它来解决宇宙学问题的可能性。

如果我想写一篇相关的论文，在奥肯给我电话后我立刻就可以写出来。但我并未这样做，想都没想，因为那是不诚实的。但当然，我知道基本的想法是怎样的，也知道它为什么不对。我没有采取任何行

动。实际上，我挺沮丧的。因为这个想法是那么显而易见的精彩，而我从鲁巴科夫那学来的更是棒极了。这个想法没能成功实在是令人扼腕。我们遇到的问题极为困难。

一年之后，阿兰·古斯与埃里克·温伯格（Erick Weinbery）一起写了一篇长达70页的论文来证明古斯的暴胀模型不可能再改进。幸运的是，再次感谢美国到苏联的那慢吞吞的邮政系统，我在已经改进了它之后收到了这篇论文。当他们致力于其他论文时，我在努力寻求解决办法。我在1981年的夏天找到了办法。为了检验这个结果，我打电话给最初引我介入这些想法的鲁巴科夫求证。事实上，我的解是如此明显，以至于当你看到它时，会觉得它这么简单，之前怎么就没想到呢？

我是在晚上给鲁巴科夫打的电话。因为当时我的妻子和孩子在睡觉，我拿着电话到了盥洗室，坐在地板上打给他确认。他跟我说：“没有，我从未听说过。”所以那时我激动地叫醒了妻子，跟她说：“你知道吗？我想我终于知道宇宙是怎么诞生的了。”我马上写了一篇论文，那是在1981年的夏天，但一直等了3个月论文才得到发表的许可。

那时候的苏联，如果要在国外发表论文，首先要在你的研究所内做一大堆官僚工作。把论文用俄语打出来，申请一连串的签字，然后发给苏联科学院，他们再把论文发给其他部门审核是否适合发表、是否含有不宜发表的机密。然后发还给你，你再用英文打出来等待预印，然后再打一遍字，那时可没有复印一说。直到这时，你才可以将论文送去发表。这整个流程通常要花掉两个月，有时要三个月。我直到10月才拿到许可。但10月在莫斯科有场关于量子宇宙学的会议，业内顶尖人士会来。史蒂芬·霍金也来了，还有许多优秀的科学家到来，我在这次会议上做了一次报告。大家对我的结果非常感兴趣，甚

至可以说颇为激动，他们立刻决定帮我将这篇论文的预印本从苏联偷运出去，不管有没有许可，都要帮我发表。这就叫朋友，好朋友就会这样帮你。但之后的情况却有些让人意想不到的复杂。

天啊，有意思的来了！就在我做完报告之后的当天上午，我参加了一场在莫斯科大学斯滕伯格天文学研究所（Sternberg Institute of Astronomy）举办的演讲，演讲者是霍金。我是偶然去参加的，因为我听人说霍金在那作报告，后来他们就请我做翻译。我有些惊讶，但还是答应了。一般来说，霍金会预先准备好报告，然后由他的学生代为传话，他则在一边时不时地补充一些东西，再由他的学生作出相应的修改，这样霍金就可以纠正并指导他的学生。但这一次他们是全无准备的。这次报告是关于暴胀理论的，讨论了改进阿兰·古斯暴胀理论的不可能性。

因为霍金的学生没有准备好，而且也只是刚刚完成了自己的论文，所以结果就是，霍金说一句，他的学生再说一句，然后再等着霍金回答，然后由我来翻译。而礼堂中苏联最好的科学家们都在等着，忍不住问：“这到底怎么回事？这是要做什么？”所以我决定，既然我都明白他要说的，那就由我来解释吧。结果就是霍金说一句，他的学生说一句，然后我说上个5分钟来解释他们要说的东西。

差不多有半个小时，我们就以这种方式讨论并向大家解释了为什么阿兰·古斯的暴胀模型不可能改进，具体的困难又在何处。然后霍金说了句话，他的学生接着说道：“安德烈·林德提出了一种克服这一困难的办法。”我非常意外，然后高兴地将之翻译成俄文。然后霍金说道：“但他的建议错了。”然后我翻译了……大约有半个小时，我都在翻译霍金的话，仔细地解释了为什么我做错了。这一切就发生在莫斯科的顶级物理学家面前，而我的物理学前程就指望他们对我的看法。我这辈子还从未那么窘迫过。

等报告结束后，我说道：“虽然我翻译，但我并不赞同。”我解释了原因。然后我问霍金：“你愿意听我更详细地介绍我的观点吗？”他说：“当然。”接着他坐着轮椅出去了，我们找了个房间进行讨论。在之后的大约两三个小时，斯滕伯格天文学研究所里的人都慌了，因为这位著名的英国科学家不见了，谁都不知道他去哪了。

在那段时间，我就在黑板边上向霍金解释到底是怎么回事。时不时地，霍金会说句话，然后他的学生翻译：“但你之前可没说这一点。”之后我继续，然后霍金再说一句，他的学生再次说出同样的话：“你之前可没说这一点。”等我们在那谈完，他们又让我上车回宾馆继续讨论，一直到最后，他向我展示他家人的照片，与我结为挚友。后来他邀请我参加了一场在剑桥举办的专门讨论暴胀理论的会议。这就是最初的情况，颇具戏剧性吧。

由于霍金对我的结论提出了一些异议，于是我在论文的末尾针对他的异议进行了回应。我并未把论文交给朋友偷运出苏联，而是在10月份发给了出版社，并最终在《物理快报》（*Physics Letters*）上得以发表。但由于延迟，发表时已经是1982年而非1981年了。我也发了不少预印本去美国，保罗·斯坦哈特和安迪·阿尔布雷克特（Andy Albrecht）都有收到，他们也在研究相似的理论。在我发给他们我的论文3个月后，他们将自己有着类似观点的论文提交发表，并引用了我的论文。

政府竟然允许我去剑桥，这简直是奇迹。我以前去过意大利，但不久之后，由于某种我不知道的原因，他们不愿再让我离开苏联。但那一次却成行了，而且那简直是我这辈子参加过的最棒的会议。那是暴胀宇宙学领域的一次尖端会议，简直无与伦比！整整三周，我们都在热烈地讨论和工作着。

那次会议是在1982年。整场会议都在讨论新暴胀理论，我是这样称呼我研究出的新理论的。但这一理论就像古斯提出的旧理论一样，早早夭折了。因为这场研讨会，新暴胀理论在1982年它刚形成时就基本失败了。这个理论对密度扰动的预测过于巨大。这一模型需要的改动包括，宇宙中不存在热力学平恒和宇宙相变。所以不管怎么看，都不可能是我和古斯提出的情景。有趣的是，现在大多数天文学书籍仍将暴胀描述为宇宙相变时期的指数级膨胀。这一理论是如此流行，以至于没人注意到早在1982年它就已经终结了。但在一年后，即1983年，我提出了一种实际上简单得多的不同景象，我称之为混沌暴胀。它并不要求宇宙要从高温开始。

在混沌暴胀情景中，不需要假定宇宙初始是高温状态，就可以得到一个暴胀区域。我放弃了构成古斯的旧暴胀理论和我的新暴胀理论基础的诸多概念，比如宇宙相变、亚稳态（metastability）和假真空。经过这些修改后，暴胀区域变得更加简洁、更加一般，并可以在更广泛的理论领域内存在。我在1986年发现，混沌暴胀理论中，由于量子涨落的影响，暴胀将会在宇宙的某些部分永远进行下去。亚历克斯·维连金在新暴胀情景中也发现了相似的效应。这说明我发现的这种效应是非常普遍的。我称之为永恒暴胀。

维连金研究的是一种新版本的暴胀理论，它可以开始于势能的顶点，但能量场并不确定沿哪个方向降低，它在定点的不确定状态可能持续很久，在这期间，宇宙的膨胀会创造出巨大的空间。在混沌暴胀中，势能并不需要特别的平坦形式，只需是最简单的抛物线形式。就在这样的模型中，如果能量场足够高，就会有量子涨落。而在这个标量场想要降低时，量子涨落有时会将它变得更高。这种可能性很低，但一旦发生，就会有指数式体积的新空间诞生在宇宙中。宇宙的一个微小部分不断扩散又扩散，就好像一个连锁反应。这被称为分支扩散过程（branching diffussion process）。

这就是永恒混沌暴胀的基本概念。在我1986年发表的有关永恒混沌暴胀理论的论文中提到，如果将永恒暴胀应用到新理论中，宇宙将会被分成众多的对应不同弦真空、具有不同性质的指数级庞大的部分。这是其一大优点。因为上述正是后来被称为弦理论景观的情景。

我必须说，暴胀理论最重要的预言之一，就是导致了星系最终诞生的量子涨落理论。想一下，如果暴胀不产生不均匀性，那当它爆发后，宇宙将变得恰好是均匀的，那就没得玩了：没有星系、没有生命。我们无法在一个刚好均匀的空空宇宙中生存。

幸运的是，还有办法。早在我介绍新暴胀理论之前，我就对列别捷夫物理研究所的根纳季·切别斯夫和斯拉瓦·穆克哈诺夫（Slava Mukhanov）的有趣工作有所了解。穆克哈诺夫较为年轻，但他却是这个组合的意见领袖。我们前面已经说过，斯塔罗宾斯基模型是暴胀理论的版本之一。通过对这一模型的学习，他们发现，在此模型中的暴胀中，量子涨落逐渐增强并可能最终导致星系的诞生。在我们看来，这难以理解，只能说：“噢，得了吧，哥们儿。你肯定错了。这不可能，宇宙可是典型的大家伙，而你却从空无着手，竟然从量子涨落入手。”

他们解释的东西是我们之后工作的基础：当宇宙变得足够大时，量子涨落不可或缺，正是它们引发了星系的形成。他们在1981年发表的论文是这一课题上的第一篇。在此之后，1982年，一组人重新提出了类似的观点，这些人都曾参加了那次剑桥的研讨会，其中包括霍金、斯塔罗宾斯基、古斯、巴丁（Bardeen）、斯坦哈特和特纳（Turner）。他们的观点在新暴胀理论的应用上得以发展，但都是以切别斯夫和穆克哈诺夫的研究为基础的。之后，穆克哈诺夫进行了更加深入的研究，并发展出了一套量子涨落一般理论。在我看来，这是暴胀理

论中最重要的部分之一。它不仅对星系形成理论至关重要，永恒混沌暴胀理论也因其而存在。

暴胀宇宙学近期最有趣的一些进展与弦理论有关。我对这一理论的了解主要基于我与我妻子雷娜塔·卡罗希（Renata Kallosh）的共同工作。她也是斯坦福大学的一名教授，主要研究超引力和弦理论。我将对这些理论作简要介绍。

爱因斯坦晚年梦想着，能有一种统一空间对称性和基本粒子对称性的终极理论。但没能成功。我听说他晚年不断在黑板上写着新理论的各种方程，尽管最终没能成功完成，他仍然很开心。然后，人们得出了一个不可行定理（no-go theorem），这事就是无法完成。爱因斯坦的大一统理论梦想是不可能实现的。之后又有人发现不可行定理有漏洞。如果理论内具有超对称性，涉及其他玻色子（标量场、光子）和费米子（夸克、轻子），不可行定理就不复存在。

这要从超对称性讲起，然后再进阶到一个更高级的理论：超引力。在这一理论内，引力理论和基本粒子理论可以得到统一！这一理论在20世纪70年代中期至80年代兴起，它解决了量子引力的一些难题。量子引力理论中存在的一些无限表达式在超引力理论中消失了。大家都为此惊喜万分，直到后来发现这些无限表达式仍可能在超引力理论的三级近似或者八级近似中出现。还是有些地方不对劲。尽管最近的一些结果也表明当时的人们可能太悲观了，部分版本的超引力理论还是不错的。

但在那时，他们的想法是：“好吧，这个理论没成功，还有存在一些问题，我们能改进它吗？”接下来就诞生了超弦理论。科学的发展不像“哦，得了吧，我们可以向右走，可以向左走，可以向任何方向走，让我们直走吧”这样简单。我们本想实现所有力的统一，但不可行定理告诉我们，除非使用超对称性，否则是行不通的。接下来它

就变成了超引力。如果要描述超对称性理论中的弯曲空间，就必须采用超引力理论。结果，超引力理论也不能奏效，必须让它更一般化。接着，弦理论就被发展出来了。

这就好像山间的峡谷。没有什么向左走向右走，峡谷已经指出了最好也可能是唯一的道路。这就是人们如何发展到弦理论阶段的。之后大家变得非常乐观。这是1985年。他们觉得可以很快完成所有的工作。我不得不说那时并不是所有人都这般乐观，尤其是约翰·施瓦茨（John Schwarz），他是弦理论的创造者之一。施瓦茨说：“也许要过20多年，弦理论才能成为一个关乎一切的唯象理论。”他给出了警示。但激情之火一旦燃起，就难以被熄灭，这是一件喜忧参半的事。喜的是，许多有才能、有天赋的年轻人投身到这一领域；忧的是，传统超引力理论在一定程度上被遗忘了。在欧洲，对传统超引力的研究依然存在，数量还不少，而在美国则没那么多了。

弦理论的想法以我们的宇宙有不止四个维度为基础。这个想法也是某些版本的超引力理论和很久之前的卡鲁扎-克莱因（Kaluza-Klein）理论的一部分。一般来说，弦理论假设空间是十维的，其中六维处于压缩状态。除此之外，有三个巨大的空间维度和一个时间维度，另外的6个维度应该非常小。超弦理论研究人员常用卡拉比-丘流形（Calabi-Yau manifold）来描述6个额外维度的压缩状态。这一空间有着非常复杂的拓扑结构。

问题是，我们怎么证明这是真的呢？很长时间以来，没人能构造出一套理论使得卡-丘空间足够小。为什么它必须很小？因为我们太过庞大无法进入这6个维度。我们可以前后左右自由来去，但却无法在这6个方向上运动。至少，从没有人说他们尝试去过那。

6个维度啊！我们要解释它们为什么这么小。不过，根据弦理论的性质，如果不加特别处理，这6个维度实际上是需要解压的，它们想要

被散开、变大。弦理论中，作为不同真空的起源，有多种压缩空间的方法。但问题是让这些额外维度保持这种压缩的状态。

大家对此的态度是：“好的，我们会想办法解决的，会解决的。”但这个诺言持续了差不多20年。没人认真思考这个问题，因为弦理论中还有大量的其他问题，大家就想，“让我们向前看”。但我们需要研究这些弦真空。“真空”意味着从我们四维空间的角度看去空无一物，但它的性质取决于被压缩的卡-丘空间，也就是那六维空间的性质。真空没有粒子。如果我们向其中加入粒子，我们得到的将是我们的宇宙。这种没有粒子与星系的真空，到底有什么性质呢？如我所说，为了自洽地研究它，我们必须使其他6个维度的空间保持稳定。这一理论中还有其他方面需要稳定。大家不知道如何做到这一点，曾几何时这种需要也不那么急切。但到了20世纪90年代末，宇宙学家发现了宇宙的指数级加速膨胀。这种现象是由我们称为暗物质或宇宙学常数的东西导致的。这一发现对弦理论的发展产生了巨大冲击。

有传言，在印度的一次会议中，弦理论方面的泰斗爱德华·威滕（Edward Witten）说，他不知道如何以弦理论来解释宇宙的急速膨胀。当连威滕都不懂的时候，大家才有点慌了神，开始认真考虑这个问题。那时他们才开始认真研究弦理论中真空的属性问题。他们想要解释宇宙这种明显开始于50亿年前并进展缓慢的指数级膨胀。人们开始试着解释这个问题，但都没有成功。于是他们更加投入地研究这个问题：是什么定义了真空态，又是什么使它稳定？

2003年，我和妻子卡罗希以及沙米特·凯奇鲁（Shamit Kachru）、桑迪皮·特里维迪（Sandip Trivedi），在斯坦福大学组成的工作组就这一问题给出了可能的解答。早先有一些已经很接近的工作，现在也有了很多新的方法，但在那时，我们的解答就像是一个关键节

点，从那时起人们才确信这个问题是可以解决的，弦理论中的真空是可以稳定住的。

当我们找到了一种方法后，就立刻意识到其实可以有许多方法来做到这一点。有人估计，能让弦理论的真空稳定下来的方法数量达到了令人震惊的10^{50}种。这一数量是由迈克尔·道格拉斯（Michael Douglas）和他的合作者一起给出的。这一事实对宇宙学产生了深远影响。如果将弦理论与永恒暴胀理论结合起来看就会发现，宇宙的一部分可能处于一种真空态，另一部分则可能处在另一种真空态，并且由于量子效应，真空态之间的跃变也是可能的。伦纳德·萨斯坎德给这种景象起了个引人注目的名字——弦理论景观。

当我们说是真空态时，“真空”说的只是我们这三维空间加上时间维度。但剩下6个维度的情况就不一定了，它们可能以各种各样的方式挤在一起。六维空间中除了大量不同的拓扑结构，还有许多不同的场存于其中，也就是所谓的“流”（fluxes）。

在那里还存在着其他东西，它们决定着我们空间的性质。它们存在于狭小的压缩六维空间，在我们的空间看不到它们。但它们却能决定我们真空的性质，也就是真空能密度（vacuum energy density）。真空能密度的水平取决于压缩空间中的情况。基本粒子的性质同样取决于此。在基本相同的弦理论下，不同的压缩方式会产生具有完全不同性质的三维时空。这就是弦理论景观所描述的景象。同样的弦理论却可以有不同的理解。这恰恰是我在1986年的论文中提到永恒混沌暴胀时所说的：我们面前有众多可能性，这一点很棒。

但1986年时我们对稳定的弦理论真空一无所知。我们只是期望能有许多真空态。2003年，我们知道了怎样去寻找这些真空态，并且发现这种真空态真的有很多很多。这就是我们目前的所知。

我再简单介绍一下我现在的研究工作。10^{500}是一个巨大的数字，它告诉了我们可以选择的真空数量。可能性多不胜数。这就有了一个很多人会问的问题：“你怎么知道的？”我们怎么知道宇宙的这些其他部分真的存在于我们的宇宙？

情况是这样的：宇宙巨大无比，被分成不同部分。弦理论真空告诉我们，在同一个宇宙中，远离我们的地方可能存在着一片不同的真空。因为遥远时空的分隔，在不同部分的人不知彼此的存在。要了解宇宙的全景就必须理解这一点，有的选择是非常重要的。但既然看不见，又怎么知道它们确实存在？又何必在乎它们存不存在？

通常我是这么回答的：如果不这样看，我们就无法解释发生在我们身边的种种巧合。比如，为什么真空能这样极端得低？因为存在着许多不同的真空，在那些能量极高的真空中，星系无法形成。而在那些能量密度为负值的地方，宇宙会快速坍缩。我们宇宙的真空能密度刚刚好，因此人类才得以存在，这就是人择原理。但如果没有众多的可能性来选择，就不能使用人择原理。这就是为什么多重宇宙理论令人满意，也是我为之寻找实验证据的原因。

1982年，我在暴胀多重宇宙的内容中介绍了人择原理。新暴胀理论是1981年提出的，而在1982年我写了两篇论文强调人择原理在暴胀宇宙学中的重要性。我的说法是，宇宙可能由许多庞大的部分组成。我没有用“多重宇宙”这个词，只是说宇宙可能由许许多多具有不同性质的迷你宇宙组成。从那时起的很多年里，我一直在研究这种可能性。

有一件事很重要，当研究暴胀理论时，我们要研究一些看上去形而上学的问题，比如平行线为什么不相交，宇宙为什么这么大。如果我们当时认为，“天啊，这是些形而上学的大问题，我们不应该涉足”，我们就永远不可能找到答案。现在我们又在思考关于人择原理

和类似事物的形而上学式问题，许许多多的人对我们说：“别做这个，这样不好，应该避开这种问题。”

我们不应该避开任何事情。我们应该尽可能地用最简单的方法来解释它们。如果你找到了宇宙学真空能常量如此低的原因，却因为意识形态的问题而不接受，那你可就大错特错了。你的意识形态决定了哪种物理是对的、哪种是错的，而我们不应该这样。一旦有了多种可能性，人择原理就有了科学前提，而不是哲学式的泛泛而谈。现在我们已经有了多重宇宙的自洽图景，所以我们可以说：“这才是物理学。”

审视我们自己这部分宇宙会发现，星系和星系团簇拥着我们。我们宇宙的形成是与众不同的吗？在某个遥远的地方是否可能生活着我的翻版呢？他离我有多远？为什么是我的精准复制？因为量子涨落一次次不断地创造不同的宇宙。亚历克斯·维连金称之为“诸世同一”。他就这一理论专门写了一本书。问题是，到底可以创造出多少不同类型的宇宙？“不同类型的宇宙”指的不仅仅是真空态的不同，质量分布也会有差别。我们这部分宇宙的质量分布，也即星系的分布，是由暴胀期间的量子涨落决定的。

举例来说，暴胀结束时，标量场缓慢降低，但量子涨落会使它局部地增高一点点。因此这些地方的能量就会增加，变得越来越多，就在这些部分，我们生存于其中的星系诞生了。如果这种跃变停止，就不会有星系出现。这个过程在暴胀期间于不同尺度上反复发生，到底有多少不同的跃变发生过？

这些跃变造就了后来各种不同的宇宙，星系与空无点缀其中。到底有多少种可能性？有一个组合答案：若n是宇宙增大一倍的次数，那暴胀后宇宙的体积就增大了2^{3n}倍。由于跃变而发生的结构变化的总次

数与此成正比。基于此，就可得出这个大概的数量，它要比10^{500}还要大上许多。

当然，在永恒暴胀理论中，暴胀将永远持续下去，所以这个数字可以是无限大的。不过在永恒暴胀中，跃变是可以重复的。标量场可能跳到它之前的状态，再跳到之前的之前的状态，直到创造出相同的质量结构。

想象一下，以前我们认为我们的宇宙是一个球形的泡泡。在新的图景中，我们的宇宙像是一个正在产生新的泡泡的泡泡，而这个它正在产生的新泡泡也正在产生新的泡泡。这是一个巨大的不规则体。古希腊人认为宇宙是理想球形的，这是因为那是他们能想象出的最好的景象了。20世纪的观点是，宇宙是优美的分形。我们已经对这些分形有所了解了。那到底有多少种分形及其元素是不可替代的？数量十分巨大。在最简单的模型中，这个数可达10的10次幂的10次幂的7次幂。尽管没人能看到整个宇宙，但实际数字可能比这个数字还要大上许多。

在发表他的暴胀理论后不久，阿兰·古斯曾有一段著名的言论，他声称，宇宙就是一顿终极免费午餐。确实如此，在暴胀理论中，宇宙是无中生有的。一年之后，在剑桥的第一次暴胀理论会议上，我扩充了古斯的宣言：宇宙不仅仅是一顿免费午餐，还是一场各种美食应有尽有的永恒盛宴。但那时我还没想到，所有可能宇宙的菜单庞大得令人难以想象。

BRANES ALLOW FOR AN ENTIRELY NEW SET OF POSSIBILITIES IN THE PHYSICS OF EXTRA DIMENSIONS.

膜的存在给了额外维度的物理学机制一种全新的可能。

——《弯曲的旅行》

05

Theories of the Brane

弯曲的旅行

Lisa Randall

丽莎·兰道尔

理论物理学大师，国际权威的额外维度物理学家；著有宇宙三部曲——《叩响天堂之门》《弯曲的旅行》《暗物质与恐龙》

从质子内部的物理学机制到可观测宇宙的演化过程，粒子物理学帮助我们了解了很多现象背后的本质。尽管如此，仍然有许多基础问题亟待解决，这也促使科学家们不断在已知上探索未知。这些未解之谜包括：元素粒子的质量问题；占据宇宙大部分体积的暗物质和暗能量的本质；将量子力学和广义相对论结合得最好的一种理论即弦理论，将如何解释我们的可观测宇宙。对这些问题的好奇心，促使我去研究一个可以成为目前已知的奠基理论。近期，我的研究集中于额外维度的物理学机制，并且得到了超出预期的结果。

粒子物理学的主要研究方向为一些已知力，即电磁相互作用，伴随核衰变的弱相互作用与使夸克结合形成质子和中子的强相互作用，以及仍有待了解的引力在其中究竟扮演了什么角色。弦理论是解释这

个问题的强有力的“竞争者”。然而，弦理论如何重现我们可以看到的粒子和物理学定律，我们并不清楚。究竟如何从这个存在于十维空间的理论出发，来形成我们身边的四维（三维空间加时间）世界呢？在弦理论中，哪些粒子和维度是多余的？

有时候，解决一个庞大且棘手的问题的最有效办法是提问，而这些问题最可能的答案将取决于实际实验的结果。这些问题最终将归结于一些我们已知的物理学定律或过程。而新的见解往往会指引我们找到一些更加基础的问题的答案。例如，我们始终不了解夸克、轻子（例如电子）、弱电规范玻色子等基本量粒子的质量是由什么产生的，为什么这些质量比与量子引力相关的质量要小得多。这两个质量标度间的差距达到了16个数量级！只有可以解释这个巨大差异的理论，才可以作为支撑标准模型的备选理论。虽然我们目前还不知道这个理论是什么，但现在大部分粒子物理学研究，甚至包含对空间额外维度的研究，都在试图去找到这个理论。而这方面的研究将在日内瓦的大型强子对撞机的实验中得到进一步探索。大型强子对撞机的实验主要针对在兆电子伏特量级上的粒子物理学研究。其实验结果将对目前提出的所有备选理论作出快速和准确的筛选。如果选出来的理论是关于超对称或者我提出的额外维度理论，将对我们对宇宙的理解产生深远的影响。

目前，我正在研究在兆电子伏特量级上的物理学定律。粒子物理学中衡量能量用到的单位是电子伏，兆电子伏表示的是10^{12}倍的电子伏。所以这个能量是非常大的，对我们目前的技术水平来说是一种挑战，但对量子引力来说，就算是兆电子伏特，仍然是远远不够的。这个能量量级非常引人注意，因为根据目前还未被完全发现的与基本粒子相关的理论，它们的质量应该就是在这一量级上的。

大多数研究这一方向的人都怀疑，如果想在这方面取得进步，那么我们必然先建立一个理论体系，以将引力与微观世界联系起来。当我们追溯到最开始的时候，宇宙就是被压缩到了与基本粒子大小相当的区域中。量子涨落有可能颠覆整个宇宙，那么宇宙学和微观世界之间必然存在一定的联系。当然，弦理论和M理论是目前解释这个问题最有可能也最被广为认可的理论。当应用这些理论时，我们至少可以对宇宙刚开始时发生的一切作出一些物理学方面的解释。但有一个问题，我们可能会发现，由于空间和时间的复杂性，我们并不能真正讨论时间初始时的状况。并且越靠近这些极端情况，我们就不得不接受一个事实：我们需要放弃越来越多的常识。

目前最大的一个障碍是，与这些理论相关的数学实在是太过复杂，导致我们不能将这种十维或者十一维空间与我们可以观察到的现象联系起来。除此之外，虽然这些理论从理论方面看非常具有美感，并且解释了引力本身的性质，但依旧没能够说明为什么三维空间中存在目前被物理学家研究的那些粒子。我们希望有一天，这个理论不仅能加深我们对引力的理解，也能通过解释目前标准粒子物理学模型没能解释的微观世界的特征，来增加理论自身的可信度。

尽管罗杰·彭罗斯（Roger Penrose）尝试构建出了四维模型，但在我看来，目前这些理论学家都不能通过想象来描述其他额外维度。当然他们可以将其构建成数学模型，并且数学模型是一定可以被写出来然后进行研究的。从社会学或者科学史的角度来看弦理论，它具有一点非常独特的性质：它是少数在缺少相关数学基础的前提下建立起来的物理学理论。一般来说，物理学家在研究物理学理论的过程中，一般都会选取相对比较“过时”的数学方法。比如，爱因斯坦利用了19世纪的非欧几里得几何，而最早研究量子理论的人只用到了群论（group theory）和微分方程，这些在很早之前就已经完全建立的数学方

法。弦理论所涉及的数学问题目前还不可解，所以弦理论在很大程度上将数学和物理学更加紧密地结合了起来。

弦理论是科学界目前占主导地位的一种理论，并且已经得到了一些结果。但是目前最大的问题是，它是否可以继续发展到下一步，也即它所得到的实验结果可以通过观测来验证。如果我们不能跨过这个十维理论和观测事实之间的鸿沟，那么这个理论就只能停滞不前。在不同版本的弦理论中，除正常三维外的额外维度都折叠成一个非常紧密的结构，所以我们正常空间中的每一点就像是六维空间中的一只“纸鹤”。我们仅能看到三维空间，余下的维度因为折叠成紧密的结构，所以是不可见的。如果你从非常远的距离来看一根针，那它看起来就像一根一维的线，但它本身是一个三维物体。同样，如果你凑得非常近的话，你也是可以看到这些额外维度的。空间在非常微小的尺度上有着复杂的结构，但当你从大尺度观察时，所有差异都被抹平了。以上就是弦理论的传统观点。

而在最近的两三年中，有一种新的观点认为，其实这些额外维度并不是完全被折叠了，从大尺度的角度来看，至少还存在一个额外维度。我和拉曼·桑卓姆（Raman Sundrum）在对膜的研究过程中，产生了这个想法。根据这个观点，除了我们生存的宇宙外，还应该存在另外一个宇宙，有可能与我们只有毫厘之差，但是这段距离是在四维空间中测得的，所以我们并不清楚。我们被困在三维空间中，所以不能直接探测到另一个宇宙。这就像一队虫子在一个巨大的二维书页上爬行，但它们不能察觉到在另一页上爬行的其他虫子，虽然从三维空间来看，它们之间的距离非常近。这个观点在保罗·斯坦哈特和尼尔·图罗克建立的循环宇宙模型中占据了非常重要的地位。而且这个观点也将带给我们一些看问题的新视角。它对引力波的涨落作出了一些未被证实的猜测，所以目前关键的问题就是，他们是不是掌握真理的一方。或许当我们了解更多细节时，就可以对这个问题进行判断了。

目前解释巨大能标差异的两个“潜力股”是：超对称性和额外维度的物理学机制。其实直到最近，超对称性还是解决兆电子伏特量级的物理学问题的唯一备选答案。超对称性是一种将玻色子的性质与其在超对称性下的对应体费米子的性质联系起来的对称性。玻色子和费米子是量子力学中的两种基本粒子。玻色子自旋量子数为整数，费米子为半整数，而自旋量子数是一种内禀量子数。在不具有超对称性的前提下，这两种粒子类型是无关的。但当处于超对称性结构中，粒子的质量以及相互作用力与其超对称性对应体是基本相同的。以电子为例，当处于超对称性结构中时，电子具有一种对应超粒子，它与电子具有相同的质量和电荷，我们管它叫超电子。

在下一代的粒子对撞机中，发现超对称性的特性，还是存在可能性的。而这种超对称性的发现将是一个非常重要的成就。这是继爱因斯坦在20世纪提出广义相对论之后，有关空间时间对称性的第一次重大进展。而且如果超对称性经过验证是正确的，它还可以解释很多其他问题，例如暗物质的存在。如果我们想将标准模型纳入弦理论之中，则需要超对称性作为前提，所以这项研究对弦理论学家也非常重要。无论是从理论还是从其潜在的实验可证性来看，超对称性都是一个非常激动人心的理论。

然而，像很多其他理论一样，当我们笼统地看超对称性理论时，似乎没有任何问题，但当我们追究与实际相关的细节时，就会发现还有很多问题有待解决。在某些能量下，超对称性势必会瓦解，因为目前我们并没有发现任何“超对称对应体”。也就是说，一对粒子，比如电子和超电子，质量是不同的，因为如果相同，我们就会同时看到这两种粒子。如果这个对应体至今仍未被发现，那么它应该比它的“小伙伴”拥有更大的质量。我们想知道的是，在目前已知基本粒子各种性质的前提下，这件事情是如何发生的。大多数理论解释超对称破缺时遇到的问题是，所有的相互作用和衰变都已经被实验结果排除

了。最有可能的候选解释允许不同种类夸克间的混合，并且允许不同种类夸克间几乎没有明确的区别。所以，未混合的夸克和不同种类夸克性质保留，是目前物理理论与超对称性破缺相互无法融合的主要原因，也是目前人们并不满意用超对称性来解决兆电子伏特量级问题的主要原因。要建立与超对称性相融合的理论，就需要引入一种物理学机制，使目前所有的已知粒子都存在超对称性对应体，并且不引入任何我们不需要的相互作用。因此，目前我们需要寻找另外一种理论来解释为什么粒子质量与兆电子伏特能量量级相关，而不是更大的16个量级。

当有人第一次提出可以用空间的额外维度来解释兆电子伏特量级的由来时，引起了众多关注。空间额外维度理论在一开始看来是非常疯狂和不切实际的，但是一些非常有力的证据让我们相信额外维度的确是存在的。其中一个原因是弦理论阐释的，弦理论假定粒子并不是最基础的构成，它们只是基础弦的不同振动模式。与量子引力理论的相互融合是弦理论的一个主要胜利。但弦理论依旧要求在可观测宇宙中存在9个维度，这明显比我们所感受到的多了6个。这6个看不到的维度到底发生了什么，是弦理论中一个非常重要的问题。但如果从相对低能量的角度来考虑这个问题，你还可以提出这样的问题：这些额外维度是否会在不远的未来对我们目前可观测的粒子物理学，或者将被观测到的粒子物理学产生什么有趣的影响？这些额外维度可以解释在三维粒子物理学中尚未解决的问题吗？

人们其实在弦理论之前就已经提出过额外维度的观点，但是当时的研究往往被忽略了或者不受重视。其实提出“如果空间有额外维度会发生什么”这样的问题是非常自然的，毕竟我们只能看到三维空间并不意味着只有三维空间存在，而且爱因斯坦的广义相对论对三维宇宙也没有任何偏爱。宇宙中应该有很多不可见的构成。但是，这是人们第一次提出了如果额外维度存在，它们的尺度会非常小，只有这样

才能逃过我们的注意力。弦理论的标准假设是，这些额外维度卷曲到了一个超级小的尺度，大概只有10^{-33}厘米，也即所谓的普朗克长度，以及与量子效应相关的尺度。在这样的前提下，这个量级就是最可能的候选者：如果存在额外维度，那么它一定对引力结构非常重要，并会表征为在这样一个特殊距离尺度上的量。但是如果这样，对我们世界的影响就比较小。这样的维度可能对我们看到或经历过的任何东西都没有影响。

如果从实验的观点来看，那你就可以质疑，这些额外维度真的需要在这么小的量级上吗？在不被我们看到的前提下，它们最大可以到多大？在没有任何新的假设的前提下，我们发现这些额外维度的尺度可以比10^{-33}厘米高上17个数量级。要想理解这一极限，我们需要更深刻地理解额外维度对粒子物理学意味着什么。

如果真的存在额外维度，那么一种被称作卡鲁扎-克莱因模的粒子可以向我们传达这一信息。这些KK粒子与我们所知道的粒子拥有同样的电荷量，但是它们在额外维度中有动量。所以KK粒子的质量都非常大，并且拥有由额外维度的尺度和形状决定的特殊质量谱。所有我们已知的粒子都有它的KK对应体，那么如果额外维度的尺度很大的话，我们就可以找到这些KK粒子。而由于目前我们在任何实验中都没有看到这种粒子，这给额外维度的尺度限定了一个范围。我之前提到过的10^{-16}厘米的兆电子伏特能量已经可以被探测到了。由于我们目前还没有观测到KK模（KK modes），10^{-16}厘米的KK粒子对应质量在兆电子伏特量级，这意味着额外维度的尺度上限是10^{-16}厘米，这比10^{-33}厘米要大得多，但想得到人们重视，它还是太小了。

这是在最新发现之前关于额外维度理论停滞的地方。之前的理论认为额外维度可能存在，但尺度会非常小。不过，我们的看法在1995年发生了巨大变化。这一年，加州大学圣巴巴拉分校的乔·坡钦斯基

（Joe Polchinski）以及其他理论物理学家意识到，弦理论中存在另外一种不可获取的物体——膜。就像浴帘一样，是三维空间中的两维物体，膜是一种在高维空间中的低维物体。膜非常特殊，尤其在弦理论的框架中，因为它具有非常特殊的天然机制，所有的粒子都被限制在膜上，因此尽管可能存在额外维度，也不是所有的东西都需要在其中运动。被限制在膜上的物体只能沿膜方向存在动量和运动，就像水珠只能沿着浴帘的表面滑落一样。

膜的存在给了额外维度的物理学机制一种全新的可能，因为限制在膜上的粒子，与粒子在三维空间加一维时间的世界中的状态多少有些相似。质子、电子、夸克，所有的基本粒子都有可能被限制在膜上。那么你会问，虽然额外维度存在，但组成我们这个世界的所有粒子都不会穿越这些维度，那研究它们的意义在哪里？尽管所有标准模型中的粒子都会“黏”在膜上，但是对于引力来说，事情却并没有这么简单。那些将粒子和以光子、质子为介质的力限制在膜上的机制，对引力是完全行不通的。根据万有引力定律，引力存在于空间中所有几何结构中。更进一步说，引力理论要求引力的介质粒子也即引力子，可以与所有的能量源相耦合，无论这个源是否被限制在膜上。因此，在一个拥有更高维度的全部几何结构区域中也应该存在引力子，一般称这一区域为主体，因为在这一区域中可能存在能量源。最终，弦理论为引力子没有冻结在膜上提供了一种解释：引力子与闭弦相关，但只有开弦会被膜限制。

这种认为粒子会被限制在膜上，而引力则与更高维度相关的想法，让我们得到了新的结论：这些额外维度的尺度可能比我们之前认为的要大得多。因为与引力相比，其他力要更加难以探测到，所以如果引力是唯一经历过额外维度的力，那我们对尺度的限定就要宽容得多。我们对引力的了解并不如大多数其他粒子，因为引力是一种弱相互作用力，所以对引力的精确探测十分困难。物理学家认为，如果真

的只有引力存在于高维空间中，那额外维度的尺度可能会达到毫米量级。这与我们之前得到的结论简直是云泥之别。这是一个微观可见的尺度。但由于光子也是被冻结在膜上的，所以至少通过传统方法，这些维度对于我们来说依旧是不可见的。

当膜的概念被引入之后，我们就可以讨论大尺度的额外维度了。如果额外维度尺度非常大，就可能解释为什么引力这么弱。引力对于你来说可能并不弱，因为是整个地球提供了对你的引力，而将一个引力子与一个粒子耦合时，这个力就非常小了。根据粒子物理学的观点，由于它研究的是单独粒子间的相互作用，所以引力是一种极弱的相互作用力。这么弱的引力实际上是一种所谓等级问题的再形成。为什么与引力相互作用有关的普朗克质量比我们看到的粒子质量大了16个数量级？当引力传播到这些额外维度的时候，就被稀释了。这些引力场由于扩散到大尺度的高维空间而导致留存于膜上的部分非常小。这正是最近由尼马·哈姆德（Nima A.Hamed）、萨瓦斯·迪莫普洛斯（Savas Dimopoulos）和吉雅·德瓦力（Gia Dvali）等理论物理学家提出的观点。这个观点的问题在于，它无法解释为什么这些维度的尺度这么大。质量比值过大的问题可以转化这些卷曲维度尺度过大的问题。

我和拉曼·桑卓姆两个人突然意识到，引力极弱现象可能是与膜自身相关的引力吸引的直接后果。除了限制住粒子之外，膜还携带了能量。从万有引力定律的角度来看，这意味着膜周围的空间都将发生弯曲，改变了它附近的引力。当空间中的能量与膜上的能量相互关联时，在高维空间中将产生一个平直的三维膜，这时候承载引力的引力子将被膜吸引。所以并不是随意地散布于高维空间，引力将会稳定地存在于靠近膜的区域内。

我们将附近存在引力的膜称为普朗克膜。膜周围引力子的聚集很容易解释了有两个膜的宇宙学等级问题。根据解决爱因斯坦方程的特定几何结构，当与额外维度相隔一定距离时，你将看到被指数级压缩的引力。这是一个非常有意义的结果，因为这意味着16个数量级的差异，可以由膜之间的分隔来解释。如果我们生存在除普朗克膜之外的第二个膜上，我们就会发现，引力势非常弱。而膜之间这样适度的距离是可以达到的，并且比大尺度额外维度模型中所必需的要小很多个数量级。所以，静止不动的引力子和一个已建立了粒子物理学标准模型的膜相隔一定距离的第二个膜，构成了等级问题的解，也即解释了引力极弱的问题。引力的强度决定于你所处的位置以及距离普朗克膜的远近，在普朗克膜上它被指数级地压缩了。

这个理论对实验具有非常重要的指导作用，因为它适用于粒子物理学尺度或者说兆电子伏特尺度。在这个理论中的高度弯曲的几何结构中，KK粒子，也就是那些在高维空间中具有动量的粒子，它们的质量大概就在兆电子伏特量级；因此在不远的未来，人们真的有可能通过粒子对撞机来产生它们。它们会像其他粒子一样产生和衰退。然后可以通过实验来观察它们的衰退产物，来得到质量和自旋等这些粒子本身独特的性质。引力子是唯一一个我们所知道的自旋为-2的粒子。如果许多与引力相关的KK粒子自旋也会为-2，就会非常容易被证实。对这些粒子的观察将是额外维度存在的铁证，也会证明这一理论的正确性。

虽然解释了大质量差异存在的原因已经足够激动人心，但我和桑卓姆发现了可能更令人惊喜的事情。弦理论的传统观点认为，额外维度必须是卷曲在一起或者被限制在两个膜之间，要不然我们就可以看到高维的引力。之前提到过第二个膜存在的意义有两个：第一，它解释了等级问题，因为引力子不太可能出现在这个膜上；第二，它将额

外维度束缚在一起，这样当我们在非常遥远的超过维度尺度的距离上看它们时，只能看到三个维度。

而普朗克膜附近引力子的聚集将产生完全不同的影响。如果我们暂时不考虑等级问题，第二个膜就将失去存在的必要性。这也就是说，即使真的存在尺度无限的额外维度，而我们就生活在无限大维度中的普朗克膜上，那我们也不知道它的存在。在这个“弯曲的几何结构”中，根据我们所知的空间中的引力子丰度呈指数级下降，那我们看事物时就仿佛这个维度不存在，世界也只是三维的。

因为引力子存在于远离普朗克膜区域的可能性非常小，所以所有远离普朗克膜的物体的物理性质都应该与它无关。而遥远地方的物理学机制与额外维度是否无穷大没有任何关系，所以我们从三维角度来看也没有问题。引力子只会在非常偶然的情况下偏移进主体中，第二个膜或者卷曲的维度对建立一个描述三维世界的理论并不是必需的。我们可能生活在普朗克膜上，然后通过另外一种方式来解决等级问题。或者我们可以生活在主体中的第二个膜上，但这个膜并不是目前无穷空间的边界。引力子偶尔逃出普朗克膜的范围，却并不会产生很大影响，因为它高度聚集在膜周围，所以普朗克膜可以被看成一个三维的世界，额外维度好像根本不存在。一个四维空间看起来与三维空间几乎相同。因此我们所有指向三维空间的证据都可以作为一个无穷四维空间的证据。

这是一个非常让人激动又给人以挫败感的过程。我们过去认为，我们首先排除的就应该是大尺度的额外维度，因为大尺度的额外维度与低能量相联系，而低能量是我们目前可以在实验中做到的。然而现在，由于空间曲率的存在，所以有理论认为，存在一个无穷的四维空间，并且还与三维空间的特征相似，无法直接区分。

如果它们之间存在差异，那也是非常小的。例如，可能两个世界中黑洞的行为不同。由于能量可以从膜上泄漏，所以当黑洞衰退时它可能向额外维度中吐出粒子，导致黑洞的衰退速度加快。目前物理学家们正在做一些有趣的模拟实验，看如果引力子集中于膜周围的额外维度，那么黑洞看起来是怎么样的。然而，初步实验表明，像其他物体一样，三维或四维理论中的黑洞并不会表现出明显的差异。由于额外维度的存在，空间的整体结构会有无数种可能性。空间可能有不同的维数，或者空间中会存在任意数目的膜。膜并不必须有三维加一维，它可能有其他与我们所处的或与我们平行的膜不同的组成方式。这就带来了一个关于空间总体结构的一个非常有意思的问题：当膜的个数不同时，空间随时间的演化是不同的。那膜上或许会汇聚一系列我们不知道的力和粒子，这将会对宇宙学产生很大影响。

在以上例子中，物理学定律无论是在膜上还是在主体中，看起来都是三维的。就算在远离普朗克膜的地方，尽管有着更加微弱的引力耦合，物理学定律依然是三维的。在与安德烈亚斯·卡奇（Andreas Karch）的合作中，我们发现了一种更加惊人的可能性：不仅额外维度可以是无穷大的，不同区域的物理学定律也可以反映不同的维度。引力只位于我们附近，因为我们附近的区域看起来是三维的，而更远处的区域则反映了更高的空间维度。所以我们看到的三维并不是因为空间只有三维，而是因为我们被困在膜上，引力只集中在膜的附近，而周围空间并未察觉我们这个低维的“孤岛”。物质还是有可能进出这个孤立的四维区域的，当它们进入或离开我们的领域时会出现或消失。这种现象在实际中很难被观测到，但关于这些结构是如何互相融合的，在理论上有很多有趣的问题。

这些理论是否正确，从实验的角度来回答这个问题并无必要，但在理论方面还是有一定的探讨价值的，比如它们中的某些是否挑战了基本理论。我们用到了弦理论的基本构成元素，即膜的存在和额外维

度，但我们很想了解是否真的存在膜结构。你能利用弦理论给出的膜来构建一个引力只存在于膜附近的宇宙吗？你是否能通过弦理论或者一些更加基础的理论来推得这个模型，是非常重要的。我们目前并没有做这件事情，并不说明它不存在，我和安德烈亚斯在弦理论基础上建立的理论已经是一个进步。解决这些复杂的几何结构是异常困难的。总之，已经被解决的问题虽然看起来非常困难，但从很多方面来看已经是简单的问题了。还有很多工作亟待去做，很多惊喜等我们去发现，并且还会对其他领域的工作产生一定的影响。

以宇宙学为例，阿兰·古斯提出的暴胀模型对于宇宙的迅速膨胀模拟得非常好，但还有其他理论提出了一种可能性：保罗·斯坦哈特的循环宇宙模型，也就是说这种宇宙膨胀会反复发生。这种理论将促使你提出一些问题。首先，这些模型和我们所看到的宇宙真的是相符合的吗？每个模型都提出了一种全新机制吗？在某种程度上说，循环宇宙的观点依然沿用了宇宙暴胀理论的观点，认为是暴胀使宇宙平稳地增大。有时候，想到这些理论可不怎么容易。你的理论是基于什么？是什么约束了它们？是什么使你的工作无法继续下去？它真的是一个全新观点吗？我们真的可以将这种机制应用在实际工作中吗？这个理论与一些更基本的理论有联系吗？如果有，这些基本理论可以帮我们进一步完善这个新理论吗？

最近，我正在研究额外维度对宇宙学有怎样的影响。结果发现，似乎暴胀理论在额外维度存在时比不存在时更加完善。这个理论最为美好的一点是，在不需要任何假设的前提下，你就可以计算额外维度的影响。此外，这个理论无疑会对宇宙学实验产生影响。自始至终，我都在强调我们真正看到的是什么。我希望时间和实验可以帮我们甄别所有的可能性。

注：丽莎·兰道尔，理论物理学大师。“宇宙三部曲”——《叩响天堂之门》（一本书读懂宇宙求索的漫漫历程）、《弯曲的旅行》（一本书读懂神秘的额外维度）、《暗物质与恐龙》（一本书读懂暗物质以及恐龙灭绝背后的秘密），是科学小白与科学大V都不可错过的年度科普巨作。该系列图书中文简体字版已由湛庐文化策划，浙江人民出版社出版。

我们生存在其中一个薄膜上，而且它并不孤单，
周围还有其他的薄膜“伙伴”。

——《时间之前》



WE LIVE ON
ONE OF THESE
MEMBRANES, AND
THIS MEMBRANE IS
NOT ALONE, THERE'S
ANOTHER PARTNER
MEMBRANE.

06

The Cyclic Universe

时间之前

Neil Turok
尼尔·图罗克
理论物理学家，加拿大圆周理论物理研究所成员；
著有《无尽的宇宙》《宇宙的秘密》

在过去10年间，我主要致力于研究一个问题：宇宙是如何开始的。又或者说，宇宙根本没有起点？大爆炸的时候发生了什么？对于我来说，这个问题似乎是科学的基本问题，因为就目前我们所知道的一切，无论是粒子、行星或恒星，甚至生命本身，都起源于大爆炸。

过去几年间，对自然界基本理论的研究，促使我们对宇宙大爆炸进行了更加深刻的思考。根据目前最前沿的理论，弦理论和M理论，所有物理学定律都是由宇宙结构决定的，更具体地说是由空间中微小、卷曲的额外维度的分布决定的。这是一个非常美丽的物理学图景：粒子物理学成为宇宙学的一个组成部分。如果你想了解额外维度的分布方式，就要了解宇宙大爆炸，因为它才是万物的起点。

直到最近，基础物理学仍旧没有解决这个问题。将时间倒回到20世纪20年代，现代宇宙学的奠基人，爱因斯坦、弗里德曼和勒梅特等意识到，大爆炸存在一个奇点，也就是说当我们追溯到140亿年之前，会发现一切都不太对劲。物理学定律将给出无穷或者无意义的结果。爱因斯坦并没有将这一情况解释为时间的起点，他只是说：“我的理论不能解释这个问题。”大部分理论都会在某些情况下“失效”，这时将需要一个“替代者”。当粒子运动速度非常快时，牛顿的引力理论就不再能描述物体的运动，于是相对论出现了。同样，爱因斯坦说我们需要一个新的引力理论来取代他的相对论。

但在20世纪60年代，当观测事实给了大爆炸理论强有力的支持时，物理学家们以其跳跃性的思维得到了时间存在起点的结论。我不确定他们为什么这样想，但有可能是由于稳态学说（Steady State theory）的支持者弗雷德·霍伊尔（Fred Hoyle）的影响。霍伊尔讽刺了宇宙大爆炸学说，说它只说明了时间的起点，听起来并没有什么意义。

之后宇宙大爆炸理论通过观测得到了证实。但此时所有人似乎都受到霍伊尔的影响：“好吧，宇宙大爆炸理论是真的，所以时间存在一个起点。”人们的思维开始进入一个既定但错误的轨道：时间以某种方式开始了，而那个过程或者说事件的开始并不能用物理学机制来描述。这是一个非常无力的现实，我们周围所有的一切都是那个事件残留下来的，但那个事件是什么，我们却无法描述。在之后的20年间，人们开始忙于研究其他方面的问题，这一宇宙学问题的研究却停滞不前。

时间走到20世纪80年代，当宇宙暴胀理论出现时，粒子物理学和宇宙学开始结合。虽然暴胀理论依然无法解决宇宙的起点问题，它却帮助我们向前迈进了一步。人们假设宇宙以某种方式开始，并且在它

开始时就充满了一种奇怪的能量，并将这种能量称为暴胀能（inflationary energy）。这种能量具有排斥性，它的引力场并不像普通物质一样具有吸引力。它的主要性质是，它可以导致宇宙迅速膨胀，就像宇宙一下被炸开一样。

暴胀理论风靡一时，并对宇宙进行了一系列与观测事实相符的预测。这些预测一般比较简单或是对宇宙某一特征的定性描述：宇宙在大尺度范围内是平滑的，并存在一些密度变化，这些密度变化类似于随机噪声，就像大海表面的波纹，并且在任意尺度上，密度的变化都是大致相同的。这一预测得到了观测的广泛认可。所以人们开始被暴胀理论所吸引，越来越多的人开始将其奉为“圣经”。但暴胀理论从未真正触及宇宙的起点这一问题，我们只是假设宇宙开始时就充满了暴胀能，却没有解释存在这种能量的原因。

我在这一方向的研究大概始于10年前，当时我从普林斯顿大学搬到了剑桥大学，在那里我见到了霍金。他和詹姆斯·哈特尔（James Hartle）一起发展了宇宙起源的理论。我加入了霍金的工作，通过计算来弄清究竟他们的理论会描绘怎样的未来。然而，我们很快得到的结果却显示宇宙是空的。其实这个结果可能并没有那么出人意料，当你从“一无所有”出发，比起一个充满物质的宇宙，你更有可能得到另一种“一无所有”。虽然这只是个玩笑，但如果进行精密的数学计算，霍金的理论得到的也更可能是一个空宇宙。

我们尝试从不同的方面来解决这一症结，意图使这一理论的预测结果更加贴近事实，但是我们所做的一切努力，都只是在破坏这一理论的美感。理论物理学真的是一门让人惊艳的学科，它会将一切错误“扼杀在摇篮中”。你可以在短时间内粉饰太平，用不同的条件来使你的理论看起来是正确的，但是时间一长，你的理论便会分崩离析。我们对这个宇宙或者说自然法则有了足够的了解，也了解它们之间是

怎样契合在一起的，根据这些建立一个自洽的理论体系是非常困难的。一旦你开始更改其中某些条件，你就破坏了某种特殊的对称性，而这种对称性是整体结构连续性的关键。这种对称性一旦被破坏，接下来整个理论都将崩塌。霍金的理论是一个还在发展中的研究课题，人们依旧在不断尝试，试图“修补”这一理论。但是在四五年后，当我确定这一理论不能解释宇宙起点的问题后，我觉得我们需要一种全新的观点来取代宇宙的零点充斥着暴胀能的想法。

与保罗·斯坦哈特一起，我们在剑桥大学牛顿研究所成立了一个工作组，挑战固有的宇宙学基本理论。我们面临的最大问题是：如何提出一种新的理论来解释宇宙大爆炸。我们将当时所有最前沿的理论结合在一起，弦理论、M理论、宇宙学，并不断思索，来试图找到一种不同的方法。工作组中的所有人都非常有想法，而我们目前的研究方向就诞生于此。

弦理论和M理论是爱因斯坦本人也在不断追求的理论。他的引力理论是一个非常精美的理论，并且仍然是目前为止我们所知道的最成功的理论，但是它和量子力学并没有那么“融洽”，而量子力学是其他物理学的一个非常重要的组成部分。如果你只是单纯地尝试将引力量子化，那么在不更改其他理论预言结果的基础上你将得到无穷。弦理论利用一个自洽的数学框架成功地将引力与量子力学联系起来。所以非常不幸的是，直到目前我们唯一可以利用弦理论计算的问题却与物理学不相关。举个例子，我们目前可以对一个稳定的、空的、存在一些引力波的宇宙进行精密计算。无论如何，由于紧密且连续的数学结构，许多人认为弦理论可能是朝着正确的方向在发展。

弦理论的一些新理念非常奇怪。第一个是，我们看到的每个粒子都是弦的一小部分；另一个是，有一种叫作膜的物体存在，简单来说就是弦的“高维版本”。所以那时我们产生了一个新想法：我们的三

个维度可能事实上是沿着其中一个膜的维度；我们所赖以生存的这个膜，可能是高维空间中某些书页状的飘浮物体。这一猜想成了一种新宇宙模型的支柱：这一模型和粒子物理学完美契合，并且表明宇宙由两个平行的膜构成，在两个膜中间有一个极度狭窄的缝。那时，我向组员斯坦哈特和伯特·欧洛特（Burt Ovrut）提出了一个问题：如果这两个膜发生碰撞将会怎样？在那之前，大家只考虑了静止的情况。他们只是说，膜在某个位置上，上面附着了很多粒子，而这一情况与我们当时所掌握的粒子和力的数据非常符合。但他们并没有考虑到膜也存在运动的可能性，实际上根据理论，这也是完全有可能发生的。一旦膜可以移动，就有发生碰撞的可能。我们认为，如果两个膜发生碰撞，这个碰撞或许就是大爆炸。碰撞是一个非常剧烈的过程，在撞击过程中两个膜将会产生大量的热、辐射和粒子，就像大爆炸那般。

我和欧洛特、斯坦哈特开始着手研究膜间碰撞的过程。我们意识到，如果这个理论可以成型，那么它就可以说明大爆炸并不仅是时间的起点，而是一个可以细致描述的物理事件。如果这一理论属实，那么除大爆炸之外还可以提供很多解释。例如，它不仅可以解释爆炸，也可以解释充满整个宇宙的辐射是怎样产生的，因为还存在一个两个膜运动之前的宇宙。你可能会问，这又怎样解释。这里就引入了循环宇宙模型。循环宇宙模型说的是，每一次大爆炸之后都会有下一次，而这个过程将无限循环。整个宇宙可能会永远存在，回溯遥远的过去或遥望无穷的未来，将会存在一系列这样的爆炸。

在过去的5年间，我们都在不断地完善这个模型。我们需要做的第一件事情，就是将这个模型与观测事实对应起来，来检验是否可以再现暴胀模型的成功。出乎意料的是，它竟然做到了，并且在某些方面比暴胀模型符合得更好。如果两个膜互相吸引，当它们互相拉扯靠近时产生了细微的“涟漪”，就像海上的波浪。当膜碰撞时，这些小

“涟漪”变成了密度差，释放出物质和辐射，而之后这些密度的“不平坦”处形成了宇宙中的星系。

当我们进行一些非常简单的假设之后，循环宇宙模型对观测事实的解释和暴胀模型一样准确。这是非常具有建设性的结果，两种差异甚大的机制得到了同样的结论。两种模型都解释了宇宙的一些简单特征：宇宙在大尺度上基本是均匀的，像欧几里得空间一样，是平坦的，存在一些小的密度差异，单位长度上差异基本相同。这些特点无论在膜碰撞模型或者暴胀模型中都得到了解释。当然也有可能存在更好的模型，只是目前无人想到。科学界良性竞争的环境十分有利于不同理论的诞生，并且差异越大越好。这可以帮助我们确定观测数据、数学还有逻辑等一系列检测方法，哪些是检验理论正确性所必需的。模型间的竞争大有益处：它帮助我们看清理论的优势和劣势。

在这一前提下，更早建立的暴胀理论和新生的循环宇宙理论的主战场，就是理论上的瑕疵和疑团。暴胀之前发生了什么？是大部分宇宙都发生了暴胀还是只是很小一部分？循环宇宙模型可以计算出膜碰撞的所有细节，然后将粗略的讨论推进到精确的数学计算上吗？我们作为理论物理学家的任务就是将这些问题延伸至极致以寻找解决办法，或者证明这些问题是模型的致命之处。

同等重要的问题还要从观测上来验证这些模型，毕竟脱离观测事实的科学也就不再是科学。尽管循环宇宙模型和暴胀模型拥有同样的预测结果，但至少我们还有一种方法可以区分它们。如果在暴胀过程中存在这样一个阶段，即宇宙刚刚开始之后的极速膨胀期，那么宇宙曾经就会充满引力波，而这些引力波到今天依然可以被探测到。目前有很多实验正在对它进行测量，欧洲空间局的普朗克卫星将进行目前为止最精确的一次尝试：它应该可以探测到由最简单的暴胀理论预言的引力波。而根据我们的模型，无论是普朗克卫星还是其他与普朗克

观测任务类似的实验，都将一无所获。此类实验可以对我们的理论进行证伪。

我们目前在做的工作中最让我感到兴奋的是，我们正在对大爆炸本身的数学模型进行更细致的分析。我们对奇点有了更加深刻的了解，根据爱因斯坦的理论，一切物质在奇点处都将变为无穷，空间全部缩成一点，导致辐射密度和物质密度都趋于无限大，在那一点上，爱因斯坦方程将分崩离析。

我们最新的工作是基于大约10年前弦理论中一个异常美丽的发现：反德西特共形场理论（Anti-de Sitter Conformal Field Theory）。简单来说，它是一个非常美丽的几何观点：如果我有一块非常大的时间和空间的区域，那么在某些情况下，我可以想象宇宙被边界所包围，也就是说是类似于一个被盒子包围的区域。大约在10年前的观点是，尽管盒子的内部可以用引力来描述，但伴随着它所带来的许多无法解释的部分，像黑洞的形成和众多的佯谬，这一理论所描述的情景更类似于，这个盒子内的所有物质都附着在盒子壁上，包围着内部。一个引力理论与另外一个不存在的引力理论互相符合，而并没有产生任何引力方面的佯谬。我们最近在做的事情就是利用这一个框架来研究宇宙的奇点。我们通过对环绕宇宙的盒子表面发生了什么这一间接方法来研究奇点。这样，我们发现，如果宇宙的坍缩产生了奇点，将伴随着“弹跳”，而这种弹跳将使宇宙恢复。当它通过奇点时，宇宙将充满辐射，然后产生密度差，这一情境与膜碰撞模型所描述的非常相似。

这是一项崭新的工作，但是当这一理论完成的时候，我觉得将会耗费相当长的时间来说服人们，大爆炸或者类似的事件，是可以用数学理论来描述的。我们所研究的模型并不依靠物理，因为这是一个四维空间的宇宙。就算是从技术层面来考虑，这也是一种最简单的切入

法。当然，真正的宇宙只有三维空间，但是我们对此刻建立起了一个四维模型来简化数学的运算。定性地说，这个研究表明你可以在引力的框架下对奇点进行研究，并且这一研究是讲得通的。在我看来这是非常激动人心的，并且我们正在沿着一个十分有趣的轨迹在前进。我希望我们将来可以真正地理解在引力前提下奇点的形成，宇宙在这一过程中怎样演化，还有这些奇点又是怎样“离去”。

我认为循环宇宙模型将可以解释大爆炸，因为大爆炸就是宇宙中奇点的形成。通过对以上问题的理解，我们可以更好地解释目前我们所看到的物理学定律是怎样产生的：为什么会存在电磁学，为什么会有强相互作用力、弱相互作用力等。所有这些都是宇宙结构在小尺度上结出的“果”，而这一结构则是由大爆炸导致的。这是一个非常有挑战性的领域，但我很开心我们的确“有所作为”。

我认为目前我们的问题在于，理论物理学的主要研究方式是错误的，因为从我的角度来说，人们应该研究奇点和大爆炸，因为这才是万物的源头，但是大多数人却在回避这样一个问题，即根据弦理论所知的一切物理学定律都是空间额外维度的特殊形态所导致。我们有已知的正常三维空间，但在弦理论中还应该存在其他6个维度，卷成一个迷你球。在世界的每一点，都会存在其他六维，不过它们团成了一个结。问题是这些额外维度团成结的方式有千千万万种甚至无数种。粗略地说，你可以把它们用膜或者其他物质包在里面，把它们像手绢一样用很多弦和橡皮筋编起来。

这一点导致了很多人抓耳挠腮却百思不得其解。弦理论应该是一个独一无二的理论，并且只能根据它产生一套物理学定律，但现在这个理论却允许了由于额外维度的不同卷曲方式导致的多种宇宙的存在。我们到底生活在其中的哪个宇宙中呢？一些人曾经假设宇宙就是简单地从大爆炸之后开始，所以他们所做的工作就像掷骰子一样。他

们说：“好吧，如果这些额外维度可以这样卷曲，也可以那样卷曲，我们也没有办法来判断哪种会好于其他方式，那我们不妨假设它是随机的。”但最终，他们没有得到任何结果。因为他们没有关于大爆炸的理论，也不知道那些维度为什么会成为它们最终的样子。他们将这称为大格局，而所有可能的宇宙形态组成了大格局，并且接受了我们生存在这个大格局中的一个特殊点。那么他们到底做了什么？

他们或许又会说，“也许我们需要加入人择原理”。人择原理认为，宇宙是它今天的样子是因为如果有任何不同，人类这种智慧生命将不复存在。这一观点是说，存在这样一个大格局，其中存在不同形态的宇宙，而只有一个容纳了人类的存在，即符合了我们目前已知的物理学定律的那个。这是一个非常奇怪的论证，它并没有作出任何预测，是后测理论的典型。它只是在说：“这件事必须是这样发展过来的，因为如果不这样的话，我们就不会在这里讨论它。”这一论证有很多缺陷，但最基本的问题是，这个论证并不能给出任何建设性的结果。不仅嚼之无味，弃之也并不可惜。人择原理对目前研究的进展不能提供任何帮助，更有甚者，它还会阻止人们去解决一些重要问题，像弦理论的本质，因为目前我们所了解的部分仍旧不完善，需要继续拓展才能用于解释大爆炸。然而，这样明显的一点，竟然很少有人去关注。

我对大格局存在的真实性还持观望态度。因为仍然存在一些数学方面的疑问有待解决，比如不同卷曲形态的合理性，目前还并未证实。但是如果所有卷曲形态都合理，那么下一个问题就是：宇宙在无数种形态中到底“选择”了哪种？对于我来说，无论你要以何种方式解决这个问题，都不能绕过大爆炸。你需要一个数学模型来描述大爆炸是怎样发挥作用的，时间是怎样开始的，或者描述宇宙在经历类似于大爆炸这种事件时发生了什么，它在经历这些事件时对那些卷曲维度产生了怎样翻天覆地的影响。最能说服我的一个解释是，宇宙的动

力学特征将选择一种特定的形态，这种形态可以让它最有效率地挨过每次大爆炸，并且可以在之后的超长周期中维持稳定。

举个例子。如果你问，“为什么房间里的空气分布得非常均匀”，我们需要用一个物理学理论来解释这个问题。但如果回答说，“如果空气分布不均，房间里就会存在一些真空区域，一旦人不小心踏入，就会送上小命。因此如果空气分布不均，我们就不会活很久”，这对回答这个问题没有任何帮助。而这就是人择原理给出的答案，并没有从科学的角度来解决这个问题。其实是因为分子在整个房间里“四处乱晃”，当你了解它的动力学机制后，就可以明白它们最可能的稳定结构就是均匀分布。与人类存在与否并没有直接关系。

同样，我觉得解决宇宙学谜团的最好方式应该从了解大爆炸的机制开始。之后，通过研究爆炸的动力学特性，我们希望可以发现导致宇宙演化成今日之貌的动力学机制。如果你不明白动力学，就不能进行深入的研究，而只能转而求助人择原理。这是非常明确的一点，但是奇怪的是，这却是少数人的观点。在我们的课题中，大多数人持有的观点是，在大格局中，某些随机过程替我们选择了我们目前生活的宇宙。

循环宇宙模型背后蕴含的原理是，我们正在经历的世界或者说三维空间，实际上是一个延展物体，你可以将它画成一个薄膜。但你要记得它是一个三维结构，而我们将它画成两维是为了更直观。根据这样一幅图景，我们生存在其中一个薄膜上，而且它并不孤单，周围还有其他的薄膜“伙伴”，它们之间有着非常狭窄的间隔。一个薄膜存在3个维度，而第4个维度使2个薄膜分开。这个理论中也存在着其他6个维度，也都卷曲成迷你球，但我们先不做考虑。

所以你目前已经建立了这样两个在几何上平行的世界，它们被小间隔所分开。我们并不是凭空想象了这样一幅物理图景。这幅图景诞

生于由基本粒子和力建立起来的最为复杂的数学模型下。当我们试图去讨论实物比如夸克、电子、光子和所有的事物，我们就会被牵扯进这样被小间隔分割的两个平行世界的图景中，并且我们的出发点就是假设这一理论是正确的。

这些薄膜有时候被称为“世界尽头的膜”。本质来说是，因为它们更像镜子或者说反射镜。在它们之外是空无一物的，就像是“世界的尽头”。如果你跨越两个薄膜间的间隔，你将会撞到其中一个薄膜上，然后被反弹回来。在它之后什么都没有，所以你拥有的就只有两个平行的膜和一个间隔。但是这两个膜却是可以移动的。想象一下，我们所在的宇宙是其中一个薄膜。在离我们非常近的地方还有另一个，但由于光只能沿着薄膜传播，所以我们看不见它。但我们之间的距离比原子核的尺度还要小，甚至趋于无限小。我们还知道，宇宙中存在一种叫作暗能量的东西。暗能量是空宇宙的能量。在循环宇宙理论中，两个薄膜之间吸引力的能量与暗能量相对应。

想象这样两个薄膜，它们互相吸引。当把它们拉远时，你需要向系统中增加能量。这种能量就是暗能量，并且暗能量导致了两个薄膜间的相互吸引。我们由观测得知，现在的宇宙充满了暗能量。根据我们的模型，暗能量实际上是不稳定的，并且不能永远存在。将它与球滚上山作一个类比，当球的位置越高时，它储存的能量也在不断增长。同样，膜之间的距离越远，暗能量也就越大。但到某一点后，球就开始转向，向山下滚动。类似地，在暗能量主宰一段时间之后，两个膜开始相互靠近，然后碰撞，这就是大爆炸。循环宇宙模型认为，暗能量的减少将导致下一次大爆炸的发生。

暗能量在1999年被观测确定，这给了暴胀模型一个不小的打击。在暴胀模型中，它的存在是毫无道理的：暗能量在早期宇宙中只是无

名之辈。而在循环宇宙模型中，暗能量却至关重要，它的衰减预示着下一次大爆炸。

膜循环碰撞的图景解决了循环宇宙模型中多年来悬而未决的谜团。循环宇宙理论并不是一个新理论：弗里德曼及其他科学家在20世纪30年代就建立了这一模型。他们想象了一个有限的宇宙，在碰撞和反弹间循环往复。但是理查德·托尔曼不久后指出，这个理论并没有解决时间起点的问题。循环宇宙理论未能一展身手的原因在于，每次反弹都会产生更多的辐射，这意味着宇宙将承载更多的物质。根据爱因斯坦方程，这将导致每次碰撞后宇宙尺度的增大，所以每一个周期都将长于之前的周期。我们往前追溯就会发现，碰撞的间隔将越来越短，周期终将减小至零，这意味着，宇宙仍然在有限的时间之前存在一个起点。所以在旧的理论框架内，永恒循环宇宙模型是不可能存在的。而我们的理论中新加入的内容就是暗能量，以及在无限宇宙中，每次爆炸产生的辐射和物质都得到了稀释，所以可以得到一个永恒循环的宇宙。

WE REALLY NEED TO THINK HARDER ABOUT WHAT THE **UNIVERSE** SHOULD LOOK LIKE.

我们需要更深刻地思考宇宙应该是什么样子。

——《宇宙为何是今日之貌?》



07

Why Does the Universe Look the Way It Does?

宇宙为何是今日之貌?

Sean Carroll
肖恩·卡罗尔
加州理工学院理论物理学家；著有《宇宙尽头的粒子》

“宇宙为何是今日之貌”这个问题的答案虽然看起来显而易见，细想却又十分难以回答，因为我们并没有“参照系”。毕竟我们的宇宙不是众多宇宙中的一个。我们并没有见过不同种类的宇宙让我们可以说，“这是一个非同寻常的宇宙”或者“这是一个非常典型的宇宙”。然而，当从物理学角度出发，我们的确可以确定“纯天然”的宇宙应该是什么样子。但随着步伐不停向前，我们发现宇宙并非天生如此。这就是指引我们发现未知之物的线索。

近年来，大家都十分关心的一个经典案例就是宇宙的加速膨胀和暗能量。1998年，天文学家对宇宙中距离我们十分遥远的一种天体即超新星进行观测，试图弄清楚宇宙中到底有多少“填充物”。因为如果“填充物”变得越来越多，也就是说物质和能量变得越来越多，宇

宙将会膨胀，并且由于这些“填充物”间的相互拉扯，宇宙膨胀速度会越来越慢。

然而，通过对IA型超新星的观测，这些遥远的明亮天体告诉我们的结果却是，宇宙在加速膨胀，天体间互相远离的速度变得越来越快。对这一观测事实最好的解释是暗能量。这是一种当我们将空间中每一立方厘米或者说每一个非常小的空间中的所有原子、暗物质、辐射、可见物质全部清空后，依然存在的一种能量。它“寄居”在真空区域中。我们可以通过计算得出真空区域中需要多少能量，才能与宇宙加速膨胀的事实相符合，而且这种真空能推动这个宇宙。它提供了一种推动力使得宇宙保持加速。我们得到的答案大概为10^{-8} erg/cm^3。

我们还可以估计它的量级有多大；也可以提出这样的问题，“这些真空能的‘前世’是什么”；也可以利用已知的量子场论（研究空间存在虚粒子突然出现和消失的理论）进行一个大概的计算。我们可以确定应该有一定量的真空能存在。实际的计算结果应该为10^{112} erg/cm^3。也就是说，理论预言的量级比观测事实大了10^{120}倍。这是一个宇宙并非天生如此的例子。宇宙存在一个参数，这个我们生活其中的宇宙，其真空区域中能量的多少与我们所预测的并不符合。

试图解释物理学定律与观测事实的差别，是过去10年间或者在那之前最受瞩目的研究主题之一。人们提到了人择原理，试图用“如果真空能更大一些，我们人类就不可能在这里讨论这些问题”这种说法，来解释理论和实际观测的不符。也有人提到选择效应，认为人们只能生存在物理参数经过精细调整后的宇宙中。但是还会存在不同的调整方式以及其他种类的非天然状态，那种宇宙应该是什么状态，无论是现在还更早期。这里我们就要引入熵与时间箭头。

这是我目前最感兴趣的一个问题。目前对我们观测的宇宙来说有这样一个事实，那就是宇宙中的粒子有各种各样不同的存在形态。我们有很多种不同的方式来重新组合宇宙中的不同成分，以使它看起来不同。根据19世纪由波尔兹曼、麦克斯韦、约西亚·吉布斯（Josiah Willard Gibbs）和其他科学泰斗们提出的统计力学，任何物质的自然形态都是其处于高熵的状态，即极度的无序。熵告诉我们可以有多少种不同的方式来重新配置物质中的成分，而使它看上去并没有变化。在一个充满空气的房间中，我们有许多种不同方法在不被察觉的前提下，来重新分配房间中的空气。如果房间中的所有空气都被压缩到角落，那么重新分配的方式就非常有限了。当采取这种分布时，空气处于低熵状态。空气充满整个房间，才是高熵状态。物理学系统总是从较低熵开始，向高熵发展，而发展成高熵的方式有很多种。

如果你除了以上知识，对宇宙学的其他方面统统不了解，当你被问到宇宙应该是什么样子、应该以什么形态存在的时候，你可以这么回答：它将以高熵的形态存在。处于高熵形态有很多不同的方式，处在杂乱而混沌的状态的方式，总要比处在有序和均衡的状态的方式要多得多。

然而，真实世界是非常有序的，它的熵要低得多。形成这一现状的原因在于，早期宇宙即大约在140亿年前的大爆炸时期，那个时候的熵要远远低于我们对它的期待值。这是宇宙学中的一个绝对谜题。现代宇宙学家无法回答这个问题：为什么我们的可观测宇宙开始于这样一个相当规律、有序并且低熵的状态？我们知道，如果万事万物存在，则必然有其存在的意义。可以这样设想，如果我们从超低熵状态开始，沿着我们现在生活的宇宙描绘未来。宇宙并不会再次回到低熵的状态，而是会变为超高熵，并且永远维持着一种状态。这就是我们目前描绘宇宙发展过程的最好模型，它在140亿年之前从超低熵状态开始，并将以高熵状态在未来永远存在。

为什么我们处于距离这样一个超低熵离奇事件（大爆炸）这么近的时间范围内？我们并不清楚答案。人择原理不足以解释这个问题。我们需要深刻思考的问题是：在大爆炸甚至大爆炸之前发生了什么？我最喜欢的一种猜测是，宇宙之所以从如此低熵的状态开始，和鸡蛋从低熵状态开始是类似的。

> 在熵的领域中一个最经典的例子是，你可以将一个鸡蛋变成荷包蛋，却不能把荷包蛋再还原成鸡蛋。这是因为当你将鸡蛋搅散时它的熵增大了。那鸡蛋为什么一开始是处于低熵状态呢？因为它在宇宙中并不是唯一的。宇宙一定会有不只一个鸡蛋存在。鸡蛋由鸡生出来，它是被某些低熵的物质创造出来的，是更大系统的一部分。

将这个观点移植到宇宙学上，就是说我们的宇宙是一个更大系统的一部分，然后在这个基础上来思考为什么宇宙要从低熵状态开始。事实上我认为，目前我们观测到早期宇宙的超低熵性质，是证明我们生存在一个多重宇宙中的最好证据。我们观测到的宇宙并不是全部，而是被镶嵌在一个更大结构上的一部分而已。

我们目前处于科学史上一个不同寻常的阶段，物理学开始成了它自身成功的受害者。我们拥有的理论与数据拟合得非常完美，这对于理论物理学家而言是一个噩耗。因为人们都想成为发明这些理论的人，而并不想生活在一个理论已经被完全建立的时代，因为一旦已建立的理论与观测事实相符，再想对它作出修正就会难于登天。所有人都希望当用数据检验理论出现异常情况时，却没有现成的理论来解释这种异常。

目前，我们有两套非常成功的模型；如果把引力也算上的话，应该是三套。在引力领域，我们有爱因斯坦的广义相对论，这套理论早在1915年就已经建立。从太阳系到非常早期的宇宙（大爆炸之后一秒），它对引力在这中间的每个过程是如何作用的，作出了完美解释。

在粒子物理学领域，我们有基于量子场论的粒子物理学标准模型，它预言了一系列粒子。这套模型大概在20世纪六七十年代就已经基本成型，之后在八九十年代被证明是正确的。我们得到越来越多的证据证明它与目前所有的数据都是相符合的。标准模型毫无疑问与我们的观测是一致的。

在宇宙学领域，我们有宇宙大爆炸标准模型，这个理论阐释了我们的宇宙开始于大爆炸附近的高温、高密状态。之后的140亿年，宇宙不断膨胀和降温。对于宇宙的初始状态我们也有一套理论，在那个时候，宇宙存在细微的密度涨落，最终发展成星系或星系团。

这三个主要理论分支，即广义相对论、粒子物理学标准模型和宇宙大爆炸标准模型，合在一起基本符合了目前我们所掌握的所有观测数据。这使得我们很难继续发展，但是由于这三个理论并不互洽，所以继续完善这些理论又是非常必要的。这三个理论并不会是解释万物的“终极答案”。我们还有不少悬而未决的问题。你如何使量子场论，或者从更广义的角度来说，量子力学这个基于标准模型的理论，与广义相对论这个描述引力的理论互洽？量子力学和广义相对论这两个理论完全在自说自话，所以如何让它们“互相理解”非常困难。

在宇宙学领域，我们有大爆炸理论，而它本身就是一系列谜团的源泉。宇宙是怎样开始的？为什么初始状态是高温、高密的？这是我们需要搞清楚的问题。除此之外，还存在与模型不那么符合的“异类们”。像暗物质就与粒子物理学模型相悖，而使宇宙加速膨胀的暗能量，更难被目前的理论解释。我们其实可以很简单地在模型中增加一个经验系数来使数据和它相符，但是接下来的问题就变成了如何解释增加的项、它从哪里来。

我们想做的事情，是要更新这些仅在表面上与观测事实相符的模型，并对其进行更深入的思考。除了引力和粒子物理学之外，还有哪

些基础的理论分支？大爆炸时发生了什么？目前，有很多人提出了很多不同的理论。

对于基础物理学来说，我们有弦理论作为主导的理论框架。但我们并不知道弦理论是否正确。它可以是错的，但是对弦理论有多年研究的科学家们提出，我们可以用微小的弦端环套来替代组成宇宙的各种微小粒子。而根据这一想法，他们得到了很多非常激动人心的预言。但不幸的是，这些物质或现象目前只存在于预言中，并没有被实际观测到。这个问题就变成了，我们实验水平的高低决定了弦理论是否能在理论体系中占有主导地位。我们不能制造出弦。我们也不能观测到普通粒子的弦性，因为能量太高。

在弦理论中，人们预测空间中存在额外维度。空间中不只有我们所知道并且热爱的三维——上、下、前、后，还应该有额外维度，而这些维度人是看不到的。它们都会卷曲成迷你球，只是我们看不到而已。事实上，我们永远不能看到它们，因为它们太小。或者有一些可能大一些，但我们却因为某些原因看不到。根据弦理论中我们生活在膜上的这个观点，我们无法到达那些额外维度。弦理论提出并重点关注的一个问题是，如果弦理论本身预言了额外维度的存在，那么它们在哪里？它们为什么是不可见的？宇宙中发生了什么才使这些维度不可见？这些问题的答案多种多样。

最近我与丽莎·兰道尔和马特·约翰逊（Matt Johnson）写了一篇文章，关于拥有额外维度的宇宙是怎样开始并演化至目前的状态，而某些维度发生了卷曲。这是一个非常有挑战性的观点，并且涉及了宇宙学。在不涉及宇宙学和宇宙初始状态的情况下，是不可以仅仅简单地试图将广义相对论和量子力学互相融合的。我们需要迈出的第一步，是探究大爆炸时发生了什么。目前，对大爆炸时发生了什么解释得最好的模型是暴胀模型。这个理论描述了宇宙存在一个短暂的快速

膨胀过程，在这个过程中，宇宙从一点开始增大，并且充满能量，之后这些能量加热成了普通物质粒子和暗物质，也即我们今天所说的大爆炸。

不过，暴胀理论存在很多它自己也无法解释的问题。最明显的一个是，为什么宇宙会发生暴胀？你可能会回答说：“因为存在一个与周围环境不同的点，这个点被某些形式的能量所主导。”这件事情发生的可能性有多大？罗杰·彭罗斯和其他科学家曾强调过，这件事发生的可能性微乎其微。所以，除非你可以给我一个答案解释为什么宇宙会开始暴胀过程，否则暴胀理论就无法解释早期宇宙的形态。我们需要回到暴胀与大爆炸之前，针对宇宙的不同部分来理解为什么发生了暴胀而不是其他过程。这个时候你就要用到膜理论和循环宇宙模型。

我实在不喜欢目前已提出的所有理论。我们需要更深刻地思考宇宙应该是什么样子。如果忽略实验结果，而不对这个问题有任何偏见，我们就要从基本原则出发来推测宇宙是什么样子，然后将结果与实际宇宙相对比，来观察它们之间是相差不多还是相距甚远。只有我们确认理论所预测的宇宙的样子，然后将它与观测到的宇宙相比较，才能充分利用实验给我们的线索，来对量子力学、万有引力、弦理论以及宇宙学的观点进行更正，以使它们可以互洽。

弦理论所带来的一个非常有意思的问题是，成功的标准发生了一定的变化。不再是这个或那个理论提出一个预测，然后你可以来验证。我们都希望最终可以检验我们的理论，但当无法找到与已有理论不符合的数据时，这就变成了一个长期目标。我们都知道这些已有理论是有问题的，因而需要对其进行修正。

量子力学和广义相对论是不相容的，但是自然与其本身却并不互斥。大自然找到了一些方法，来让这些理论共存。弦理论就是其中之

一，并且这一从20世纪六七十年代被提出的理论，经过了80年代的兴起，已经得到了充分的研究和发展。直至2010年，在与实验没有任何联系的情况下，这一理论已经成了一股不可忽视的力量。有些人或许会要求给出一些实质性的成果。从这一理论中到底可以得到什么？弦理论学家已经对弦理论有了充分的研究，但问题仍旧存在。我们能否从中得到对自然更本质的了解？这目前还是一个开放性问题。

弦理论之所以如此盛行的其中一个原因是，它的确可以引导人们发现新的东西，并且硕果累累。这并不是说你必须要作出一些像“或许时空是不连续的”、宇宙是由小原子组成的等假设，然后问“你从这些中得到了什么”。而是当我们将这些猜测粒子用弦代替的话，将引导你思考“如果我将这些带入量子力学的框架中，我将得到十维空间”，以及“我还需要一个超对称结构。在自然界中我们实际可以看到很多种不同的粒子，如果尝试将这些额外维度折叠，并将它们隐藏，我们将会得到与标准模型相似的东西。我们目前的确是走在正确的道路上”。

20世纪90年代，第二次超弦革命的确说服了一些对弦理论持怀疑态度的人，让他们相信我们在正确的道路上前进。但仍有很多人持怀疑态度。我们所了解的一点是，不同版本的弦理论都是基于同样的基础理论的。与其称其为不同版本的弦理论，不如说它是在同一个基础理论的不同表现方式上建立起的弦理论。不同的人可能会对宇宙、物理学定律有不同的看法，实际上是对物质的不同形态有不同看法，比如水有液态水、冰和水蒸气三种相态。随着水所处的环境变化，它可以表现出不同的相态，以及不同的密度、不同的声速以及其他性质。弦理论探讨的则是时空会发生怎样的变化。时空也可以存在不同的相态，像液态水和冰。在不同的相态里，物理学定律或者说你周围事物的状态，可以完全不同，甚至是产生翻天覆地的变化。

最著名的例子是由胡安·马尔达希纳（Juan Maldacena）发现的。这位年轻的弦理论学家提出，五维存在引力的时空和四维不存在引力的时空，需要两种不同版本的弦理论。空间维数不同，一种里面存在引力，另一种则没有，但是它们却应用了同一种理论。这说明了存在引力的弦理论已经不能应用于所有情况了。这个理论在某些情况下存在引力，在另一些情况下没有。

这个问题十分重要的原因在于，当你想量子化引力的时候，将会出现很多哲学问题，而这些问题在讨论不考虑引力的粒子物理学理论时是不存在的。例如，时间的自然属性。宇宙存在起点吗？空间和时间是突然出现的，还是一直在那里？这些都是非常好的问题，但根据之前的理论，我们无法回答。弦理论现在给了我们一个具体并且细致的框架，在这一框架下，原则上我们可以回答这些问题。实际上，我们可能需要付出很多努力才能达到这一目标，但是你可以将任何问题转换为在没有引力的普通场理论中的问题来解决。在这个理论中，时间没有起点，空间和时间是本来就存在的，就像普通粒子物理学中描述的一样。

我们从弦理论中得到很多量子引力的信息。无论这些信息是否属实，也无论量子引力在真实世界中是否存在，目前得到的信息依然是仁者见仁、智者见智的。因为存在太多种不同的时空形态，所以拥有一个新的相态很容易。这并不是说你有10种或者12种不同的可能性，然后你把它们与真实的宇宙去对比，然后找到对的那个。而是你有10^{1000}种甚至无限种可能性，然后你说，“好吧，一切皆有可能”。这样，你就陷入了证伪的问题中。当你可以从一个理论中得到些什么时，如何证明这个理论是错的呢？我的回答是，我们目前还不知道。但这并不意味着我们永远无法了解。

我们通过弦理论预言的另外一件事情是多重宇宙。这并不仅仅是一种可能性，而是说当你在宇宙的不同地点时，你将会得到不同的情况。如果将弦理论的观点同暴胀理论结合在一起，我们就可以想象我们所观测到的宇宙，也就是我们目前居住的宇宙，其实只是一个更大结构中的一部分，而这个大尺度结构与我们目前所处的环境有很大不同。

人们总会问我：“作为一个科学家，你怎么可以说出这样的无稽之谈？你说的这些东西我们永远也无法通过观测来验证。”你需要铭记于心的一点是，多重宇宙并不是一个理论，而是一个理论所预言的结果。这个理论包含了弦理论和暴胀理论，它预言了可观测宇宙之外还有更大的区域，在那一区域中，情况与我们所知的一切大相径庭。这种差别十分重要，因为只有这样，即便我们不可以直接检验多重宇宙，我们也可以用其他方式来验证这个理论。多重宇宙的观点可能会改变我们对可观测宇宙中一些具体事物的看法。比如，它可以说我们宇宙中的真空能并不是问题，因为我们只是众多宇宙中的一个并不具有代表性的区域。

这个冗长故事的简洁版本是，我们正处于一个长期项目中。我们通过弦理论使量子力学和万有引力实现互洽。虽然并不知道这一理论是否正确，但我们的确在不断改进。而那些我们不知道确定结果的问题，像大型强子对撞机、引力波探测或者宇宙学等实验，我们并不知道这些实验的结果怎样。但无论怎样，这些问题也都不能证明弦理论是错误的。我们一方面要推动实验继续向前，深入挖掘，更加了解宇宙学、暗物质和暗能量，同时也要推动理论继续向前发展。将其发展至一定的水平，就可以预测我们某些未来实验的实验结果。

我们需要一些可以由现在推知未来的观点，就我个人来说，我们希望是理论方面的观点。大多数情况下，实质性的进展都是从实验方

面获得的，不仅是实验方面，而且是你从未在意过的实验中得到了出人意料的结果。目前人们正在做的实验有一些大型试验，比如探测引力波的LIGO、寻找新粒子的大型强子对撞机；还有一些小型的桌面实验，比如寻找牛顿引力理论的偏差、寻找自然界中的弱相互作用力，或者难以探测的新粒子。我必须要指出的一点是，在这些实验中，某些实验非常可能会以出人意料的方式来打破我们现在僵化的思维，给我们带来新的灵感。

关于宇宙学的基本观点，我有些离经叛道的想法。阿兰·古斯所倡导的、安德烈·林德和保罗·斯坦哈特等人推崇的宇宙暴胀理论是一个非常不错的理论。我认为，暴胀理论对于宇宙历史的阐释有一部分是正确的，即宇宙从非常小的区域以极快的加速度向外膨胀。然而大部分人，甚至包括提出这个观点的人，对于暴胀的理解都是错误的。他们过于乐观地认为暴胀解决了早期宇宙可能出现的一切问题。这种感觉就像将暴胀视为告解，抹去了之前所有的罪恶。我认为这是不对的。如果我们不将宇宙一开始为何发生暴胀这个问题纳入考虑范围，那么我们将无法解释那些需要解释的问题。有许多人认为这个问题是不需要回答的，因为一旦暴胀发生，它将回答你提出的所有问题，而这种想法本身就是错误的。

当我在研究生阶段阅读这些不同角度的文章，并且学习他们提出的不同方向的观点时，我读过罗杰·彭罗斯的文章，他对当时正流行的暴胀理论的守旧经验提出了质疑。彭罗斯不断重申自己的观点：暴胀理论并不能回答我们好奇的问题，因为它不能解释早期宇宙为什么处于低熵状态。这一理论阐释了宇宙如果开始于一个比以往假设更低的熵的状态，那么宇宙将沿着目前我们所知的过程进行演化。当然如果你要提出这样的假设，所有的事实都与其相符，但是彭罗斯说我们并没有理由作出这样的假设。我读过那些文章，并且知道那里面提到

过一些更有说服力的观点，但我想彭罗斯可能遗漏了一些，我暂时不予理会。

之后我读了一些澳大利亚哲学家休·普莱斯（Huw Price）的文章，他提出了基本类似的观点。他说，对于宇宙的熵，宇宙学家们闹了一个大笑话。他们假设早期宇宙处于低熵状态，晚期宇宙处于高熵状态。但是事实上，根据物理学定律，并不会有如此不对称的状况发生。物理学定律在深层级上对过去和未来是相同的。但宇宙学对待过去和未来却是不同的。

你可以从这个角度来考虑。如果你在宇宙中飘荡，那对你来说上下左右并没有什么不同，空间中并没有什么特殊的方向。在地球上，是因为地球在我们脚下，所以才会产生上下方向上的偏好。正是因为这个特殊的物体才会在空间中产生方向的指向，比如上和下。同样，如果你处在一个空的宇宙中，那么过去和未来并没有任何不同。时间的一个方向和另一个方向并没有任何差别。

而现在这个时刻我们在房间，或在厨房炒鸡蛋或者将牛奶倒入咖啡中时感受到了时间的方向，并不是因为我们处于一些特殊物体的周围，而是因为我们处于某些特殊事件的余波中，而这一特殊事件就是大爆炸。大爆炸启动了世界上所有的时钟。当我们开始研究人类是怎样进化的，为什么永远是先出生后死亡，为什么我们可以记住昨天的事情，而不能记住明天将要发生的事情……所有这些过去和未来的不同表象都拥有同样的源头。这个源头就是大爆炸的低熵状态。

就这个问题，其实早在19世纪，热力学的大佬们波尔兹曼和麦克斯韦，在试图搞清熵作用的原理和热力学的作用原理时，就已经触及了。波尔兹曼成功地定义了熵，并且阐明了低熵状态会向高熵状态发展。这就是我们所说的热力学第二定律。但是他被卡在了一个问题上，即熵为什么从低的状态开始。他应用了一系列理论，也就是今天

宇宙学家们依然在使用的那些。波尔兹曼创造了多重宇宙理论、人择原理、宇宙的某些区域与其他区域不同并且我们生存在一个并不特殊的区域中等诸多理论与理念。但是他并没有在他的众多理论中选定一个最终答案。这是一个非常有意义的决定，因为到目前为止我们也不清楚到底哪一个才是正确答案。我们可以解释为什么记得住昨天而不是明天，但这只能建立在我们假设宇宙从低熵状态开始这个前提上。

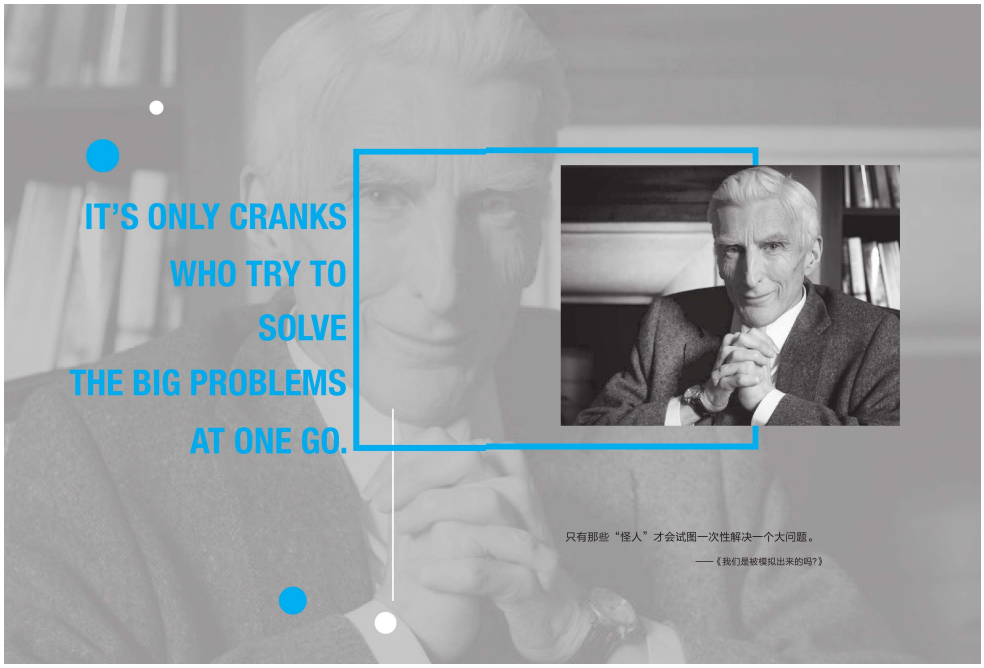
我喜欢称观测宇宙学为最容易入手的科学。每当你将牛奶倒入咖啡，看着它们混合，并且意识到你不可能再将牛奶从咖啡中分离出来时，你都在思考大爆炸理论中最为深远的一个方面，思考那些关于最早期宇宙的问题。这是真实宇宙给我们的关于基本物理学定律如何作用的线索。目前我们仍不知道如何将这个线索应用于解决悬案。我们仍不知道这本侦探小说的结局，也不知道谁是导致宇宙如此的幕后黑手。但是对这些问题的重视，本身就是我们尝试去了解可观测宇宙是如何融入一个更大结构中所迈出的重要一步。

想观看本文作者肖恩·卡罗尔的TED演讲视频吗？

扫码下载“湛庐阅读”APP，

“扫一扫”本书封底条形码，

彩蛋、书单、更多惊喜等着您！



只有那些“怪人”才会试图一次性解决一个大问题。

——《我们是被模拟出来的吗?》

08

In the Matrix

我们是被模拟出来的吗?

Martin Rees
马丁·里斯
英国皇家天文学家，曾任皇家学会主席；剑桥大学宇宙学和天体物理学名誉教授；
著有《从当前到无限》

目前这个时代对宇宙学家来说正是黄金时代，因为我们终于可以根据过去多年的研究描绘出宇宙的基本轮廓。例如，现在我们可以说，宇宙的主要组成部分为4%的原子、25%的暗物质以及潜伏在真空中的71%的神秘暗能量。这让我长达35年的宇宙学研究生涯终于尘埃落定。

我们也了解了空间的形状。宇宙是“平的”，从技术层面来说，也就是就算我们画一个超级大的三角形，它的内角和也等于180°。而在几年前，我们是不敢轻易得出这个结论的。宇宙学目前已经进入了一个全新的阶段。

在科学领域，一个巨大的进步往往伴随着一系列新问题。而目前我们重点关注的，的确有两种不同方向的问题。

第一组问题是关于客观环境的。我们试图弄清楚，140亿年前的宇宙如何从大爆炸开始，最终形成了我们今天所看到的复杂结构，充满了恒星和星系；在某些星系中如何诞生了恒星和行星；至少一个行星上，生物过程如何得以发展，并使原子组合成了像我们一样的生物，让我们现在有机会考虑这一切问题。追寻宇宙如何由简到繁，是一个永无止境的过程。回答这些问题，我们需要建立更多模型，并且要应用目前灵敏度最高的望远镜以获得全波段数据。

另一组问题如下：

- 为什么宇宙会如此膨胀？
- 为什么宇宙的组分不是其他比例，而是目前的4%、25%、71%？
- 为什么宇宙现象都可以用目前物理学家所研究的那些理论来解释？

我们目前可以用一种全新的角度来解释这些问题。传统观点认为，自然界的各种规律是独一无二的，它与不知道如何产生并且符合这些自然规律的宇宙本身没有任何关系，是本来就存在的。

我曾经非常迷惑，为什么自然规律被设定成这个样子，允许大量复杂事物的存在。这是个谜，因为我们可以非常容易地就想象出一套自然规律，它和我们目前所观察到的相差不多，但它所产生的宇宙却比较乏味。例如，这个宇宙中只有暗物质而没有任何原子；或者只存在氢原子而没有更复杂的粒子，所以在这个宇宙中化学过程不复存在；这个宇宙中没有引力，或者引力特别强，把物质全部挤压得变了形；这个宇宙存在的时间极短，在演化前就结束了。

对于我来说，我们的宇宙为何如此“亲生物”，一直是一个谜。为什么宇宙允许复杂事物的存在？用数学领域的一个例子来类比。回

想一下曼德勃罗集合（Mandelbrot Set），你可以利用一个非常简单的公式和运算法则来描述一个层层累积的复杂结构。你可以写出一个与其类似的公式，应用同样的运算法则，但是描述的却是一个单调结构。让我一直百思不得其解的问题是，为什么决定我们宇宙的那些“公式”或者“运算法则”，拥有如此丰富的计算结果，而不是“计算”出一个不存在我们这些复杂生物的乏味宇宙。

在过去的20多年间，我一直怀疑这个问题的最好答案或许是：我们的宇宙并不是独一份的，甚至自然界的规律也并非只有这一种。或许存在很多种不同的大爆炸，它们会向不同的方向膨胀，由不同的物理学原理主导，而我们只是处于最为宜居的那个宇宙中。这个想法与我们对行星或者行星系统的看法类似。

人们过去常常想，为什么地球这个围绕着一个并不特殊的恒星、以并不特殊的轨道运动的行星上会有水，甚至承载了生命的进化。这看起来是有一定规则的。但是目前我们并未察觉任何值得关注的细节，因为我们知道有上百万个恒星周围存在行星系统：在这么庞大的数字中，总有某些环境是适宜生命生存的。而我们恰好就生活在了这个小子集中的一个“元素”上。所以，看起来存在“内幕”的地球轨道，其实只是因为我们恰好生活在了对的环境中而已。

大爆炸理论只是诸多理论中的一种，这一理论吸引了不少目光。就像我们的地球恰好属于适宜生命生存的那个集合一样，我们的宇宙、大爆炸都是允许生命产生，允许复杂事物存在的子集中的“元素”。这个想法在一开始只是一个猜测，用于解释我们宇宙的种种和谐，顺便根除那些所谓的“神的指示”——自然规律。

在过去几年间，支持多重宇宙这一观点的理论基础得到了加强，并且多重宇宙的尺度也比我们之前所想的更加宽广。而理论基础的增强，得益于目前解释自然规律最好的理论，超弦理论（superstring t

heory）。超弦理论认为，宇宙应该有很多种可能的形式，并且存在很多种可能的自然规律。

一开始，我们以为这个方程组只存在一个解，只有一个三维宇宙，一个可能的真空态和一套可能的自然规律。但是现在看来，根据专家的说法，我们有着庞大数量的解。事实上，伦纳德·萨斯坎德声称，宇宙的种类比我们目前宇宙中原子的种类还要多。这些宇宙组成的系统将比地球的生物圈还要错综复杂。这实在是一个让人瞠目结舌的想法，尤其是当我们认为这些宇宙都是无穷大的时候。

乍看上去，你可能会觉得无穷个无穷大的东西会让你手足无措。要解决这个问题，我们需要利用一个叫作超限数理论（transfinite number theory）的数学方法，这个理论在19世纪由德国数学家康托尔（Cantor）所建立。就像很多物理学家已经开始利用纯数学的知识一样，这个十分晦涩的理论也开始被应用于物理学领域，因为我们需要解决无穷个无穷大。而事实上，或许甚至在无穷之上还有更高的层级：除了我们的宇宙是无穷大以外，还会有无穷多种自然规律，我们想将量子力学中所谓的多重世界理论（many-worlds theory）包含到我们的理论中。每个经典宇宙，都被无穷多个叠加宇宙所替代，所以当需要做量子选择时，就会存在多种可能。这个极其复杂的结构是根据某些存疑观点建立的，而目前这些观点的正确性正逐步得到证实。21世纪最激动人心的发现，就是利用新的数学和宇宙学结论得到这些结果。

我们的宇宙其实只是某些无穷大的一部分，这就允许了在和我们同样的时空中存在很多我们的复制品，只是远离我们的观测范围所以看不到罢了。就算是无穷大的宇宙，也只是被众多不同宇宙包围的其中一个罢了。这就是宇宙学和某些弦理论所描绘的轮廓。我们所称的

自然规律并不是普适的，它只是我们这一宇宙碎片中的局部规律而已，在整体中其他地方还会存在符合不同区域的局部理论。

我最近想到了一个问题，而这个问题令我非常不安：一旦接受了以上理论，我们就陷入了一系列有关物理实在本质的问题。这是因为在其他宇宙中甚至在我们的宇宙中，肯定有很大的可能性存在比地球生命更高级的生命。我们可能并不是地球上生命进化的顶点，地球的未来和从单细胞生物进化到我们的时间长度一样。在后人类时代，生命将会离开地球。在其他宇宙中，存在生命和更为复杂事物的可能性会更大。

生命和复杂事物意味着承载信息的能力，所以最为复杂的事物可能不是有机体，而是某种大型计算机。一旦你接受了这个观点，即在我们的宇宙中或者在其他宇宙中存在极端复杂的事物，超越人类的大脑，超越我们目前拥有的计算机，甚至接近赛斯·劳埃德所提出的计算机极限，你将会得到不同寻常的结论。这些超级计算机不仅可以模拟物理实在的某些简单部分，甚至可以模拟整个宇宙的一部分。

那么问题来了：如果模拟的部分甚至超过了宇宙，那我们会不会只是被模拟出来的？我们会不会并不是我们所想的物理实在的必备部分？我们会不会只是某些超人类的想法？如果真是这样，那么是谁进行了这些模拟？如果模拟部分超过了宇宙本身，就像一个宇宙中有很多这些超级计算机进行了很多模拟，那我们很可能只是“人造生命”。这种观念开启了时间旅行的一种新的可能性，因为那些模拟了宇宙的高等生命，实际上只是重演了过去。在传统意义上来说，这并不是时间跳跃，而只是过去的重建，从而使得高等生物可以探索他们的历史。

所有这些多重宇宙的观念都促使了宇宙学和物理学的结合。但同时也得出了一个结论：我们有可能并不是最基本的物理实在，可能只

是被模拟出来的。这种想法模糊了唯物论和唯心论、模糊了自然和超自然的界限，这会导致一个可能性：我们诞生于某种母体（matrix）中而非物理学规律下。

一旦你接受了多重宇宙这个观点，接受某些宇宙可能有高阶生命，那么你就可以得出这样的结论：在某些宇宙中，它的其中一部分会自我模拟，导致你进入一种无限回归状态。因而，你无法确定物理实在从何时开始被思维替代，也不知道自己是处在真实的宇宙中，还是处在模拟的宇宙中。

多重宇宙改变了我们对自己和所处位置的看法。传统宗教想法太过狭隘，并不能将思维和宇宙的复杂性包含在内。我们期望能有一个全新的观点来解释这个问题。思维和物质之间的分歧是目前我们无法解释的。当某些思维进化到可以产生其他思维时，自然和超自然间的界限也就不再清晰。

我对宗教的态度具有两面性。首先，根据目前的宗教活动来看，我是欣赏且乐于参与的，但是我对与其互通有无持怀疑态度。除了那些天真的神创论以及与其类似的思想之外，宗教和科学之间本没有冲突。但与某些基金会成员不同，我认为神学观点无法帮助我解决某些物理学问题。我十分乐意和哲学家甚至某些神学家讨论他们的工作，但我觉得他们并不会给我带来什么帮助。所以相比于科学和神学间的建设性对话，我更倾向于两者的和平共存。

我十分关心21世纪的科学所带来的挑战和机遇以及如何应对它们。有一些非常棘手的危机源于科学，所以我们必须接受我们对科学热情的减退，以及科学对社会所带来益处的减少。我相信这样一种观点，在21世纪末，我们的文明将有50%的可能性发生一次非常严重的倒退。很多人觉得这种观点太过悲观，但是我却不这么认为。单单只考虑核威胁，这种可能性都是存在的。

回顾“冷战”时期的历史，我们侥幸逃过了一次大毁灭。但在古巴导弹危机40周年的纪念活动中，很多人回忆起当时的情况都会提到，当时整个世界简直是命悬一线。多亏了肯尼迪与赫鲁晓夫的英明决策和快速应对，才使世界避免了一次灭顶之灾。只要类似“冷战”的事件重演，对我们来说又将是一次不可避免的灾难。那些超级大国的核军火库的爆炸威力平摊到每个美国和欧洲居民头上的话，相当于每人受到一个美国军方目前所使用的杀伤性炸弹的伤害。一旦发射，所有的一切都将被毁于一旦。

随着“冷战”的结束，我们所受到的威胁的确明显变小了，但如果我们考虑一下一个世纪之后的事情，并不能保证目前稳定的政治格局可以一直维持下去。20世纪发生了两次世界大战。在下一个百年中，因为核武器已经存在，很有可能还会出现与“冷战”类似的僵局，这种情况带来的恐惧或许要甚于当年，因为参与者可能不只两个国家，更多的参与者将导致更严重的动荡。即使只考虑核威胁，那也有很大的可能性（或许是50%）发生一次天翻地覆的灾难，导致我们的文明倒退。

而事实上，除了核威胁以外，还存在很多新兴威胁。在过去的一个世纪中，不仅科技进步的速度远超从前，其广度也在不断增加。截至目前，根据所有历史记录来看，一直保持不变的，只有人的本性和人类体质；尽管科技和环境都在变，人类本身却并未变。在这个世纪，人类将开始改变自身。随着基因工程的发展，科学家们开始使用靶向药物，甚至靠移植大脑来增加脑容量。这些看起来像科幻小说里的情节，都开始一一实现。很多基础领域的发展，像生物科技、纳米技术、人工智能，开启了一个更加激动人心的新世界。但或许同时也打开了一个潘多拉魔盒，我们必须面对潜在的社会危害甚至灾难。

想通过这些新技术获益而避免灾祸，我们无疑要十分慎重。就近期来说，最严重的威胁可能来自生物科技和基因工程的发展。根据美国科学院发表的一份非常权威的报告，随着基因工程的发展，越来越多的人可以接触到这项技术，并利用它改造某些病毒，而使目前某些已有的应对疫苗失效，导致流行病扩散。

而我意识到的最可怕的事实是，完成这个工作并不需要一个庞大的恐怖组织，类似纵火犯这种心术不正的人就可以完成。他们可能会利用某些病毒。一旦这种病开始流行，也许可以将其限制在发生地城市之内，但根据SARS期间的经验来看，传染病将会很快扩散到全世界，而只要它到达某些第三世界国家的大城市，就如脱缰野马一样再也无法被人类控制。美国《连线》杂志曾经有过这样的预言，20年后，一例生物学差错或者一次生化恐怖袭击将会导致死伤上百万人的灾难。这并不是过度悲观：只需要一个怪人向第三世界国家投放一个病毒。这是一个让人深感恐惧的可能性，因为根据目前的技术水平，这是完全可能发生的事情。这种技术需要的仪器尺度非常小，要控制它也是不太可能的。由于这些技术会被应用于有着良好目的的实验中，所以除非完全停止药物和生物科技的研究，否则这种威胁将一直存在。

可以预见，一旦这样的事情在美国发生一例，之后会发生什么。假设有一种传染病，虽然不会造成大量人员死亡，但是这种传染病是由某些怀有恶意的人或者无意的人释放出的经过基因改造的病毒所致。所有人都知道，这种事情可以发生一次，那就可以发生第二次。唯一可以防止再次发生的方法，就是将每个拥有这项技术的人都登记在册，对他们进行监视和管理。所以一旦发生这种事件，一些研究者的基本人身自由将被限制，对科学产生强大的“后坐力”。这是近期我最为担心的一个问题。

作为一个宇宙学家，并不会使我对明天、下周甚至明年的担心少于其他人，但确实给了我另一种看待问题的方式，因为宇宙学家了解在遥远的未来将会发生什么。大多数受过教育的人都知道，人类是自然界百万年来演化的产物。经过约40亿年的自然选择，我们才从最初的微生物进化而来。但尽管如此，大多数人都认为或者潜意识中认为，人类是生物进化的顶端，是自然选择的最终结果。

任何一个学天文学的人都知道，太阳目前只度过了其一生的1/2，而我们的宇宙是无穷无尽的。自然界继续向前进化的时间至少和进化至今的时间是相等的，所以后人类阶段的进化时间至少等于从单细胞生物进化至人类的时间。因此你可以仅仅通过阅读科幻小说，就可以得到这样的结论：地球上的生命将继续进化，甚至更有可能散播到地球之外；如果时间足够长，或许地球上的生命可以遍及整个银河系。而事实上，这样长的时间的确存在。

作为一个宇宙学家，我深知，如果我们在这个世纪毁掉地球目前的环境，我们对未来的长期预测终将成空。这种观点给我们以更大的动力，来珍惜这个宇宙中非常脆弱的蓝色小点。因为在遥远的未来，她将承载那些可以走出地球的生命。

我已经在宇宙学领域工作了35年，而其中最能使我保持初心的一个原因是，宇宙学发展的脚步从未停滞或减缓。20世纪60年代是一段非常令人激动的时期。在那段时间内，天文学家们第一次找到了大爆炸发生过的证据。也是在那段时间内，人们发现了第一个高红移类星体、第一次发现了黑洞和中子星存在的证据，等等。20世纪60年代，作为一名年轻的宇宙学家是十分幸福的，因为这些新发现，老天文学家们经验的适用度大打折扣，所有的一切都要从头开始。

而在过去三四年间发生的事情与我印象中的任何时期一样，令人激动不已。在宇宙学中，我们不仅有许多奇思妙想，像宇宙如何开

始、复杂结构如何发展、额外维度不同可能性的作用等，我们也有了很多新的证据来限制宇宙的某些重要参数。我们都知道宇宙是平直的，原子构成了人类、恒星、行星以及星系，这些普通物质总共占了宇宙的4%；宇宙中25%是为星系提供引力束缚的神秘暗物质；剩下的71%则更加神秘，它们是潜藏在真空空间的暗能量。解释暗物质对物理学家来说是一个挑战：它可能是大爆炸后残留下来的某些粒子。

解释暗能量则更使人沮丧。超弦理论学家认为这是对他们理论的最大挑战。因为暗能量的存在意味着，我们生存的空的空间中或者说真空中，并不是如我们认为的那样平淡无奇，它存在一种有明确定义的能量和张量。而这种暗能量又影响了整个宇宙的动力学特征，使宇宙的哈勃膨胀是加速的。

另一个非常重要的进步，是对宇宙结构的理解。将这个问题放在整个宇宙的演化中，我们可以想象宇宙从一个炽热的火球开始，不断膨胀，温度降低，辐射减弱，波长增长。在大概50万年后，宇宙进入了所谓的“黑暗时期”，因为温度的降低，辐射转移到红外波段，在可见光波段进入黑暗时期。黑暗时期一直持续到第一代恒星形成，重新点燃整个系统。

我试图弄清这一切是如何发生的，并将此作为一项长期兴趣。近期依靠某些地面大型望远镜以及WMAP卫星，我们从观测上得到了一些新的线索，并且可以通过计算机来模拟宇宙中第一个结构是如何形成的。我们试图通过将理论和观测相结合的方式，来搞清星系的形成阶段，从比星系小很多的结构开始，第一代恒星如何形成，它们如何聚集在一起形成星系。像氢、氦一样的简单原子，如何在第一代恒星中变形成碳、氧、硅和铁这些重元素，而它们同时也是组成行星和人体的元素。

我们也需要了解多久之后第一代行星出现，多久之后第一个潜在生命出现，多久之后这些亚结构才会形成大的星系。通过观测数据，我们获得了越来越多的线索。而这些观测数据无一不是利用目前世界上最为先进的望远镜得到的，其中最大的一个是欧洲南方天文台（ESO）在智利建造的甚大望远镜（VLT）。这个望远镜由4个子镜组成，每一个口径都为8米，4个望远镜可以连接到一起作为干涉仪使用，以提高观测精度。

这些巨大的望远镜让我们可以探测更加微弱和遥远的天体。你看到宇宙中越远的地方，你就追溯到了越久远的时候。目前的目标是看得足够远，这样我们可以直接看到星系的形成时期，甚至看到星系形成之前第一代恒星的形成时期。

这种可能性是建立在我另一个研究领域——伽马暴之上的，这是宇宙中最为强烈、能量最大的爆炸。伽马暴实际上是某种特殊的超新星以一种极其激烈的方式，结束自己的一生时所产生的爆炸。由于其能量非常高，所以我们甚至可以探测到第一代恒星产生时期的伽马暴。如果某些第一代恒星死亡时产生了伽马暴，那我们可以利用它们来探测星系形成的最早期阶段，也即黑暗时期如何结束以及宇宙中的结构如何建立。这些大型望远镜可以给我们一个机会来窥探宇宙过去不同时期的样貌。

目前天文学领域在研究宇宙结构方面已经取得了惊人的成就。但是如果让我再提出天文学另一个激动人心的进展，毫无疑问我将会谈到我们对大量行星系统的发现。1995年，天文学家才第一次发现了在类太阳恒星周围存在行星的证据，而现在类似的行星系统已经发现100多个。一种非常可能的猜测是，我们在天空中看到的恒星，大多数周围都存在行星系统。

10年或者20年之后，“仰望天空”将是更加有趣的体验，因为我们不只能看到恒星在闪烁，还可以了解关于其周围行星的一些性质，比如它们的质量、运行轨道，或许还可以看到最大行星的地表地形。这会使夜空变得更加有趣，宇宙变得更加丰富多彩。虽然大多数行星并不宜居，但天文学家会找到其中与地球更为相似的伙伴。这就会引发人们对宇宙地外生命的关注。我们可以分析来自这些类地行星的光，去探索这些行星的大气层中是否存在臭氧层，而臭氧层是生物过程存在的一个重要标志。对于其他行星上是否存在生命，这也给了我们一定的线索。当生物学家通过实验或者计算机模拟了解了生命的起源之后，这种设想或许可以实现。我非常看好在未来20年内，我们会充分理解生命的起源，我们会知道地球上的生命是否可以遍及宇宙，我们或许也可以指出围绕某颗恒星的行星上可能存在生命。

还有另外一个问题：简单的生命是否都可以进化到我们所称的智慧生命或更复杂的生命呢？这个问题非常难回答。有些人说，从简单生命进化到复杂生命的过程中要经历很多障碍，而地球上的生命非常幸运地冲破了这些障碍。还有一种观点认为，无论怎样，生命都会找到自己从简至繁的方法。在我的朋友和同事中，就存在这种观点的差异。

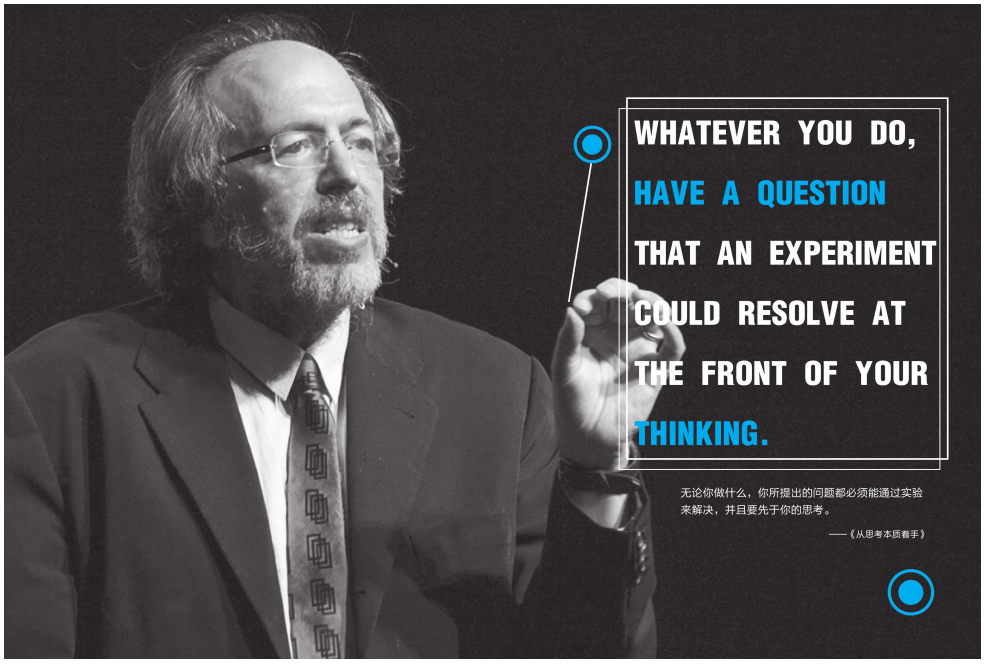
作为一个天文学家，我经常问这样一个问题：“我们总是试图在不同程度上解释庞大的星系或者距离我们十分久远的大爆炸，无论我们对自己的看法很自信或者持怀疑态度。我们这样做是不是有些放肆？”我对这个问题的看法是，使事物变得难以理解并不是因为尺度有多大，而是因为结构过于复杂。对星系或者大爆炸来说，它们有一些共同的特点，例如它们不像昆虫一样具有层层叠叠的复杂结构。所以，理解生命的复杂性相比于大尺度的星系或者小尺度的原子来说，难度更大。

有趣的是，这个宇宙中最复杂的人类，却是非常明确的，他们处于原子和恒星的尺度之间。很多很多人的质量加起来才相当于太阳的质量，而一个人又是由大量原子组成的。有一个非常精确的表述：质子和太阳质量的算术平均值约为55千克，与人类的平均体重处于同一量级。这是一个出乎意料的巧合，但意料之中的是，最复杂的结构就是在这样一个介于宇宙宏观世界和微观世界之间的尺度上。任何一个复杂的事物都由大量原子构成，并且有层叠的结构，与原子相比它的尺度要非常大。另一方面，这也存在一个上限，因为任何结构一旦过大就会被引力扭曲。地球上不可能存在身高为2000米的生物，这个道理从伽利略时期就已经被提出了。而那些拥有恒星或者行星尺度的物质内部在引力的作用下，不会留存任何结构。所以结论非常明晰，复杂的结构必然存在于中间尺度上。

展望下一个20年，我期待对大爆炸的研究会更进一步；通过计算机模拟和观测之间的结合，我期待对宇宙结构及其产生能有更深刻的了解。我们或许可以尝试整合计算机模拟、观测以及生物技术，来探究行星的形成以及生物圈的进化过程。

宇宙学仍旧保持其活力，我仍旧对其充满热情。不仅因为其发展迅速，还因为其正面的形象不会对公众产生任何威胁。这使它与其他高收益的科学，如基因技术和核技术，都不一样。而且天文学是一个拥有广泛群众基础的科学。如果我只能对几个专于这方面研究的人诉说我的研究结果，那我对自己的满意度将会大大降低。对天文学来说，大众对宇宙起源的兴趣就像额外福利。就像20世纪的进化论一样，宇宙学和基础物理学目前也成了大众文化的一部分。达尔文试图了解地球上的生命如何进化；我和其他宇宙学家试图将地球放在整个宇宙中，追寻组成它的原子的来源，也就是回到大爆炸时期。大众对一切如何开始十分感兴趣：宇宙是否有起点，又是否有终点？

作为研究者，我们十分幸运，因为我们在解决大众好奇的问题。这让我们可以从大的地方着眼。我的意思是，在科学研究中，我们一般都会关注于自己可以解决的一小部分问题，只有那些“怪人”才会试图一次性解决一个大问题。如果你问一个科学家在做什么工作，他们并不会回答说自己在“试图治愈癌症”或者在“试图了解宇宙”，他们会指出非常具体的问题。而每一种进步都是为了每次解决的一个小问题。虽然这样的方法没有错，但有些时候，一味这样下去，会让人失去全局意识。而大众总会提出一些大问题，一些非常重要的大问题，这帮助我们看清，只有通过这些小努力在向解决终极问题一步步迈进的情况下，这些努力才是有价值的。



无论你做什么，你所提出的问题都必须能通过实验来解决，并且要先于你的思考。

——《从思考本质着手》

09

Think About Nature

从思考本质着手

Lee Smolin
李·斯莫林
加拿大圆周理论物理研究所创始人之一，理论物理学家；著有《时间重生》

我总会问自己这样一些问题，宇宙学是一个将万事万物都集合起来才可以解决的问题，那么如何进行研究？如何提出一个可以将宇宙作为一个整体来研究的理论？目前这个时代被称为宇宙学的黄金时代，从观测角度来说，这是毋庸置疑的。但从理论角度来看的话，这个时代简直可以说是宇宙学的灾难性时代。我们脑中尽是一些疯狂的想法。我总是试图回到最基础的地方，去研究基础理论、基础法则，试图通过物理学理论来描绘整个世界。

数学目前又扮演了怎样的角色呢，数学如何被引入物理学之中？时间的本质是什么？这是两个关系非常密切的问题，因为数学表述一定是与时间无关的。从20世纪80年代到现在，我的想法发生了巨大的转变，今天我所提出的观点，与我的起点已是背道而驰。我将一点一

点地介绍我的思想转变过程，并介绍在这一过程中我所面临的困难和问题。

最初，我们从一个非常简单的物理情境开始，我将它称为“盒中物理学”，或者称为小孤立系统理论。我们解决这种问题的方式是去计数，或者列出一个表格，在上面记录这个系统的所有状态。这个系统如何存在？可能的分布方式有哪些？可能的状态有哪些？如果有一瓶可口可乐，那么瓶中原子的位置和状态都有哪些可能？一旦得到了这个“表格”，我们是否就可以继续发问“状态之间怎样转化”？

在回答上述问题的时候，有一种潜藏的原子论观点，它由德谟克利特和卢克莱修提出，那就是，物理学只是关于原子在空间中的运动，原子本身并不会发生变化。原子具有某些特征，比如质量和电荷，这些特征是不会随着时间变化的。而原子运动的空间，根据过去的观点来说，也是不会随着时间变化的。所以空间是固定的，原子在其中以一定的规律运动，这个规律最早由笛卡儿和伽利略提出，由牛顿将其完善。直到近代物理学产生，当我们用量子力学来描述粒子，这些规律依旧不变。当我们知道所有原子在某一时间点的位置，那么根据这些规律，就可以推得这些原子在之后任一时间点的位置。这就是我们进行物理研究的方式，我们将它称为牛顿范式，因为这是由牛顿发明的。

在牛顿范式背后隐藏的观点是，这些自然规律全都是依赖于时间的。它们作用于系统，举个例子来说，从系统外作用，从过去演化到现在再到未来。如果你知道任意时刻的状态，就可以推测另一时刻。这就是物理学研究的基本框架，目前来说是比较成功的。当然，当其作用于宇宙的一小部分时，它的正确性毋庸置疑。

而我指出的问题，在我看来是植根于我们目前所有工作的根本问题，同时也是困扰了当代物理学家和天文学家的问题：我们并不能直

接将这种方法应用于整个宇宙这样大的尺度上。如果你这样做了，就会得到一系列你无法回答的问题。你最终得到的结果也只能是个谬论或者某些愚蠢的观点。无法解决的其中一个原因是，当面对宇宙学尺度的问题时，我们想知道的不再只是“规律是什么”，而是“为什么是这些规律在主导，而不是另外一些？这些规律从何而来？是什么使其发展至今”。如果这些规律是被植入到这些方法中的，那么利用这些方法将无法解决以上问题。

同样，如果给出宇宙某一时刻的状态，利用这些规律我们可以预测之后某一时刻的状态。但是，初始时刻的状态是由什么导致的呢？根据之前的观点，当然是初始时刻之前发生的某些事情导致的，所以我们要追溯到更久远的时候。而那一刻的状态又是由什么导致的呢？就这样，我们不停地向回看，最终回到了大爆炸时刻。我们为什么现在坐在这个房间中？为什么地球以目前的轨道围绕着太阳公转？解释这些问题的所有方式都是不停地向前追溯，利用这些规律，达到一切的最初始状态——大爆炸。

那接下来我们就会问了，为什么我们会选择目前这些事件作为初始状态？它们有什么独特之处吗？现在我们将采用另一套理论体系来回答这些问题，不再讨论例子和牛顿范式，我们利用量子场论。但是，问题依旧未变：初始状态如何被确定？当我们将这些初始状态与建立在牛顿范式上的方法相结合，就无法利用这种方法来解决这个问题。所以如果我们想提出一些宇宙学问题，如果我们真的想解释宇宙中的事物，那我们需要另外一套方法、一个全新的起点。而如何寻找这种新的方法，从20世纪90年代初开始就成了我的“心头大患”。

目前，关于这个问题的思考已经不新鲜了。美国哲学家查理斯·桑德斯·皮尔士（Charles Sanders Peirce）在19世纪后半叶就提出了我之前提到的问题。但是他的想法并没有对大多数物理学家产生影

响。事实上，在我接触到皮尔士的文章之前，就已经思考过关于规律演化这个问题。但是在他的观点中，有很多我用很长时间去思索、我认为很重要的结论都被一笔带过，比如，如果想解决规律如何被选择这样的问题，我们就不得不假设规律是可以随着时间变化和演化的，它存在一个动态的过程。所以我开始尝试去找寻，并对这种动态过程提出一些假说，因为目前的现状是：我们要么成为所谓的神秘主义者，说“规律就是这样”，然后终止我们的研究；要么就要解释这些规律。而如果想解释这些规律，我们就需要这些规律变化的历史、演化进程以及动态变化的情况。

这对许多人来说是比较难以接受的。事实上，虽然从20世纪80年代到现在，我一直在思考这个问题，对我来说这也是一个新奇的观点。但如果你往回看，其实是可以看到一些先例的：在保罗·狄拉克（Paul Dirac）的某些手稿中，你会发现他提到了宇宙的某些规律在更早的时候和现在可能存在差异，所以它们必然存在变化。甚至费曼也提到过。我在网上找到了费曼的一段录像，他说：“这是我们所说的规律，可是这些规律如何随着时间的发展变为它们现在的样子的？或许物理学中真的存在所谓的历史因子。”你看，他其实是认为物理学与其他科学是不同的。因为物理学不像生物学、系谱学、天体物理或其他科学那样，存在历史因素。但他的话却以“或许物理学中真的存在历史因子”结束。在之后的采访中当被问到“如何处理这一问题”时，费曼的回答是：“不不，这太复杂了，我无法想象。”

所以在听过这些话之后，我发现说自己“从20世纪80年代到现在一直在思考这个问题”，实际上有些厚颜无耻了。

我开始思考规律演化这一问题的原因非常值得一提，其实是因为我的朋友安迪·斯特罗明格（Andy Strominger）对弦理论的一个评价。斯特罗明格是美国一位非常著名的弦理论学家。我印象中大概在1

988年，斯特罗明格刚刚完成一篇论文，内容是关于找到了存在大量弦理论的证据。一开始，只有5种，这还是可以接受的。但是之后却产生了成百上千种额外维度卷曲的方式。之后斯特罗明格找到了另一种可以产生更多种可能的方法。他对我说：“将这个理论与实验对应起来完全没有意义，因为无论物理实验的结果是什么，总有一种弦理论与其对应。”

为了得到与斯特罗明格同样的研究结果，很多人花费了很长时间，直到2000年以后，这个观点才被广泛认同。但是那次对话深深地震撼了我。之后我开始思考：你如何创建一种理论，从大量的备选规律中选择对的那个？不只这个问题，规律为什么是它们现在的样子？这个问题还存在很多谜团，因为从某些角度来看它们是有特殊之处的。其中一个特殊之处是，它们被选择的原因是因为它们可以构建出宇宙中的各种结构。宇宙中的结构有各种尺度，从分子和生物分子，到生物系统，再到地球上所有的结构和其他行星，再到星系，到星宿团，这些结构的尺度就可以组成一个非常大的集合。

无论你从哪一个尺度来观察宇宙，都不会乏味。这是为什么呢？解释这个问题有两个相互关联的理由，其中一个是因为规律的特殊性。特殊性的一个方面是，它们中都存在参数，我们并不知道这些参数取某些固定值的原因。这就像不同基本粒子的质量，比如电子、中微子、夸克以及基本力的强度。我提到的这些例子已经将由实验得到的30个参数值加入到了理论中。之后我们就得到了一个模型也即标准模型，与事实十分贴合。但我们却不知道为什么要取这样的30个值。所以我开始想象一种情境，在某些剧烈事件中，这些值发生了变化。或许大爆炸并不是时间的起点，而只是某次剧烈的事件，在这次事件中，我们目前的宇宙从旧的宇宙中产生，这些参数才拥有了目前的数值，使宇宙产生了与之前宇宙不同的现象。

我开始以这种角度来看待问题，试图搞清楚如何利用自然选择规律对我们目前的宇宙作出预测。这些预言将验证自然规律是否会沿着某些特定的方向变化。从这个过程中，我明白了一件事情：已经存在关于多重宇宙或者说我们的宇宙只是众多宇宙之一的这种假设，也已经有人猜测是人择原理选择了我们今天的宇宙。但是我意识到，我们不能在假设我们的宇宙只是众多宇宙之一的这个基础上来继续进行科学研究，因为我们并不能观测到任何有关证据。虽然我一直这样认为，但很多人似乎并不能洞察到其中的问题。

做科研并不是写小说，不会像哈利·波特一样讲述一些有极小可能会发生的神奇事件。科学必须是可以验证的，你提出的假说必须是可以被验证并且证实的。如果你提出的假设是我们的宇宙和许多其他宇宙同时存在，而我们和他们之间并没有任何联系，你并不能验证这些假设。但是如果你提出的假设是关于我们的宇宙如何从过去演化到现在的话，你的假设是关于过去实际发生过的事情，这是可以验证的。所以通过这些思考，我得到了一个结论：自然规律必然随着时间演化。这也是关于宇宙学和自然选择的结论。

同时，我目前的工作重心也停留在将引力量子化上。在量子引力中，我们将量子力学带入爱因斯坦的广义相对论方程中，然后我们得到一个不存在时间项的理论。这个结论曾由霍金和朱利安·巴伯等人通过不同的方式得到过。时间变量，即一切物理过程对时间的依赖。当我们将量子引力应用于宇宙学时，产生了量子宇宙学。在这个学说的基本方程中，时间变量不复存在。而时间在宇宙尺度开始增加时才显现，类似于温度被用来描述分子随机运动所具有的能量，压力被用来描述原子与壁碰撞时所有力的和。

时间在量子宇宙学的基本方程中是不存在的。我对量子宇宙学的研究已经进行了很多年，一开始时是与泰德·雅各布森（Ted Jacobso

n）合作，后来是与卡洛·罗韦利合作。我们解出了这个方程的一组解，而这是我研究量子引力的根基。所以在很多年间，我有两个研究方向在同时进行：一个是规律是随时间演化的，另一个是时间是从规律中显现出来的。而后一个观点实际上是说明了，规律中是不存在时间项的。

第一项工作实际上只是副业，我只是时不时地在我主要工作的间隙思考这个问题，所以经过很长时间我才发现，原来这两个研究方向之间是存在冲突的。虽然提到这个问题让我觉得有些羞愧，但是将其摊在桌面上来说，对我之后的讲述是有好处的。之后发生了一些事情，让这两者间的冲突更加明显，也帮助我找到了解决方法。

第一件事情是关于量子引力本身的。如果想重现在无时间项的量子宇宙学中时间出现的过程，我们会面临很多技术方面的问题。虽然我不应该在这篇文章中提到很多有关技术方面的问题，但是我一直抱有这样一个观点：如果一个技术问题存在了很长时间，而经过很多人的研究依旧没有解决，这个时候我们或许应该检查一下这个问题背后的理论。之后或许会发现这并不是由技术不足导致的，而是基本概念上存在问题，甚至是哲学方面的问题。

这个观点是当我还是研究生时，费曼对我讲的。我不知道为什么自己总在引用他的话，但这也没什么不好。他曾说：“有些事情是所有人都相信，但没人可以证实的，如果你投身于这样的事情中，你的科学生涯可能会变得没有意义。”事实上，他说得更加直白：“如果你投身于这些很多人相信，却没有人可以证实的事情上，就是在浪费你的时间和生命，因为当这么多优秀的人都没办法证明的时候，有很大的可能性说明你也无法证明。或者你也可以提出一个新假设，来证明所有人固守的理念都是错的。”我常常会想起费曼说这些话时的语气和神态。在那个时候，他正在试图验证量子色动力学（QCD）中的限

制条件是错误的，虽然这种想法本身可能不正确，但是他的确做了很多努力来自证。

所以我开始思考，或许我们对量子宇宙学中时间产生于规律的想法是错误的。我想到一个新的观点：在量子宇宙学中，或许时间是本质量，而空间则是从某些基础结构中诞生的。这就是第一件事情。

第二件事情是关于规律演化的，它伴随着所谓景观理论的形成。最初我参与研究这个理论的时候，只是一小部分人的想法而已，但是在大概2003年左右，随着越来越多的弦理论研究者得到同样的结果，这个理论才逐渐被重视。整个理论研究工作主要在斯坦福大学展开。这个理论的产生对弦理论有一定的促进作用，使弦理论与正暗能量、正宇宙学常数和真空能结合起来。

斯坦福大学的这些合作者们发现，他们仅仅通过存在很多弦理论这一先决条件，就可以得到一个正的真空能。所以，事实上，他们的工作又与安迪·斯特罗明格1988年的想法不谋而合。然后突然之间，很多关于景观理论的讨论，或者关于景观理论动态和变化的理论开始涌现，当然伦纳德·萨斯坎德在这之中扮演了重要角色。而在这种状况下，我开始有些动摇了：如果所有人都将这个理论纳入考虑范围，那我是不是也该认真思考一下这种可能性？

第三件事情是我开始同一位哲学家进行交流。巴西哲学家罗伯托·昂格尔（Robert M.Unger）也曾从自己的角度思考过规律演化的问题。这段对话大概发生在六七年前，他带着责备的语气说了以下内容：“你已经对规律随时间的演化作了大量思考和计算，但是你从来没有深入思考过这个过程对我们理解时间有什么意义。如果规律可以随时间演化，那么时间必然是基础。”我回答说：“是的。”但他继续说：“你并没有深入思考，并没有认真思考。”所以在这段对话之后，我们开始一起工作和讨论。

大概发生在五六年前的这三件事情，促使我开始重新思考，并且将规律随时间演化的问题与在量子力学中空间和时间的性质一起进行研究。我开始有了一个新观点，那就是，在量子引力中时间可能是最为基础的存在。

这个新的想法改变了我的研究方向，在过去的一年间，我工作的重心都在思考规律随时间演化的不同方式、不同假说，思考如果我们了解时间的性质可以得到怎样的结论，思考如何提出可以验证的理论和假说。这些事情仅通过思考就有很多种可能，于是为了限制这些可能，我主要集中于那些可验证的假设。

费曼曾对我说过：“如果你要研究量子引力，就必须做一些疯狂的事情。但无论你做什么，都要考虑其自然属性。如果你讨论一个数学公式的性质，你就只是在做数学，而没有联系实际。无论你做什么，你所提出的问题都必须能通过实验来解决，并且要先于你的思考。”所以我一直遵循这句话。

我要事先声明一点，宇宙自然选择理论的确提出了一些预测，而那些预言目前看来还是站得住脚的。让我来谈一些更新鲜的观点。

举几个例子来说，因为宇宙的自然选择发生在很久之前。有一个法则我称其为优先原则（principle of precedence），我认为它非常有趣，由于它源于量子力学，所以用量子力学的观点来描述。优先原则源于对量子力学基础的思索，这是我偶然会思考的另一个问题。我们选取一个量子系统，我一直认为量子系统是宇宙中我们可以操纵、测量或对其进行实验的那一小部分。我们经常对量子系统做些处理。我认为在量子宇宙之下不会存在除此之外的任何东西。

我们假设有一个量子系统，一些离子处于离子阱中，我们想测量它们的量子力学性质，所以我们将其放置在初始状态。通过改变它们

或使它们与外部作用来使其发生演化，例如外加磁场、电场或者利用不同探针来探索它们，然后进行测量。因为是量子力学，所以我们并不知道确定的实验结果，每个结果都有不同的可能性。

我们来考虑一个经过多次研究的系统。在过去对这个系统的多次实验中，我们已经知道了结果的统计分布。如果再次进行实验和测量，那么必然会得到过去已出现过的结果中的一个。如果我们继续重复多次实验，又将得到一个统计分布规律。这次分布必然同之前得到的相同。就算明年甚至100年、10亿年之后再做这个实验，我们也会非常自信能得到同一个分布规律。这种自信从何而来？因为我们都有一种形而上学的观念，就是这些规律并不会随着时间而变化，所以由这些规律导出的结果也不会随着时间而变化。规律现在以这样的方式作用于这个系统，过去也是这样作用，未来一年、100万年、10亿年都会以这种方式作用，结果不会有任何变化。自然会重复它自身，由于自然规律的不变性，实验也是可重复的。

如果你细细品味，就会发现这真的是一个非常古怪的想法，因为它包含了很多非物理学性质的神秘主义和形而上学的想法，包含了不属于这个世界的一些状态：某些系统外的不变量使系统发生了变化。每每想到这个问题，我都认为这是宗教思想的残余，就像有人认为我们的世界之外存在上帝，上帝操纵了一切一样。

让我们来尝试另外一种假设。如果当我们设定了系统的初始状态，使其发生改变，然后对其进行测量，自然会不会用其本身的方式去回顾过去，然后想：“过去有没有发生过类似的事情？如果有，那就从之前发生过的事情中随机选取一个，然后重复一下就可以了”。这就是自然的习惯。自然会回顾过去有没有发生过类似事件，如果有一次，那可不可以直接给出同样的结果；如果有很多次，那就从里面随机选择一个，给出对应的结果。这样的方式也会给出我们与过去一

样的统计分布规律，因为从根本上来说，你只是在对过去的整体取样，所以根本不需要什么不随时间变化的规律。只需要我刚刚提到的优先原则，当你进行实验的时候，自然会回想过去然后给出过去的结果。

那现在你可以说，这其实也是一种形而上学的思想，因为自然需要接触到它的过去，当相似的事件或测量发生的时候，还要鉴别出来。的确是这样，但是这种形而上学的观念与之前提到的规律作用于系统外部的形而上学观念不同，并且也会导致完全不同的结论。当我们选取这种观点时，就可以在不考虑规律与时间之间关系的前提下，重现标准量子力学的预言。

你能验证这个观点吗？就像我提到过的，我只对可验证的理论感兴趣。所以，你当然可以验证它，目前有很多人都在研究量子技术，在制造一些之前没有任何先例的新系统。

例如，在滑铁卢大学量子计算研究所（Institute for Quantum Computing），雷蒙德·拉弗莱姆（Raymond Laflamme）、大卫·科里（David Cory）和他们的同事们正在制造一个全新的系统。我和他们交流过，我说：“你们在做的这个全新系统之前并没有先例。或许它并不会得出你们预计的结果，因为它并不知道如何做，所以你们会得到一些完全随机的输出结果。”他们笑了，我问他们这有什么可笑的。他们回答说：“当我们第一次做实验的时候，当然会得出一些完全随机的结果，因为实验必然会存在一些设计方面的问题，还有一定的实验误差。当我们第一次设计好这个实验并在实验室里首次进行的时候，我们从未得到过预期的结果。”

“这正是我想要的回答。是不是最终实验结果会稳定下来，然后开始输出重复的结果？”我问他们。他们的回答是肯定的。所以我继续发问：“那么当实验结果稳定下来时，你如何区分是因为你的实验

成功导致的，又或许是由于我的假设——自然已经养成了‘习惯’所导致的？”他们只是给出了模棱两可的回答。所以我们继续对区分这两种原因的可能性进行讨论。

所以目前，就像大多数理论一样，它虽然有可能是错误的，但却是可以验证的。对于我来说，这就已经证明了它是科学的。

目前的状况让人稍稍有些担忧。在过去的20年间，一些非常聪明的人都在试图发展理论物理学，我们目前处于一个比较尴尬的境地。因为20世纪70年代中期已经基本建立的粒子物理学以及80年代早期的宇宙学，已经被目前的实验多次验证，并且不断提高精度，但却没有新的发现。

在粒子物理学方面，大型强子对撞机证实了希格斯粒子的存在。这种粒子的性质类似于希格斯粒子的标准模型，但除此之外没有其他新发现。没有任何关于超对称结构、额外维度、新一代的夸克或者亚结构的证据。这些不同的观点，有些比较流行，有些虽然不太被大多数人认可，但至少已经被拿来讨论。无论流行与否，这些处于标准模型之外的理论，目前没有一个被实验及观测证实。在宇宙学中，普朗克卫星给出的结果看起来与暴胀理论的观点是一致的。这是标准模型和暴胀模型的胜利。

保罗·斯坦哈特有一个非常有趣的观点，他认为普朗克卫星的结果不应该用来证实暴胀理论。我非常尊敬甚至崇敬斯坦哈特，但是对这个观点我却并不能轻易接受。当然，从比较单纯的层面上来说，宇宙就是暴胀理论所描绘的样子，这是提出暴胀理论的人该为之自豪的方面。但是这种情况导致了一个难题，就是我们没有任何证据来证明任何超出这个模型范围的事物存在。

在我研究的量子引力领域，有一部分人对这样一个观点感兴趣：某些天体物理学实验应该可以看到空间和时间结构的分解，而时间和空间结构是从广义相对论得到的，并且这些天体物理学实验可以从伽玛暴的传播或某些宇宙射线中给出量子空间和时间的证据。我们等待量子时空的信号已经等待了10多年，而截至目前并没有得到任何可靠的结果。这令我们非常受挫。

还记得我引用过的费曼的话吗？当很多非常聪明的人在某一假设下，进行了很长时间的研究却没有得到任何正面的结果时，或许我们应该重新评估所做假设的可靠性。而事实上，费曼本人当时所做研究的基本观点都已经存在很久了。这段话的意思并不是说每个人都要去质疑，这是一部分人应该去做的事情。而我自己正在做，因为我的研究历程，我一部分的研究是针对量子引力，还有一部分是关于宇宙自然选择，而剩下一部分原因是我的个人喜好，因为我曾经学过一段时间哲学。虽然我的博士专业是物理学，但我在本科阶段的确曾投身于哲学，并一直对哲学抱有很大的兴趣，且一直对物理学基本问题的研究历史有很深的兴趣。所以我开始对一些假设进行重新评估。对于结果我们可以拭目以待。

我得到的结论在我看来并不模糊，而是可以一一明确列出的。第一个就是我曾经考虑过的问题，这种通过固定的规律得到的，作用于固定空间状态的方法，是自我限制的（self-limiting）。而性质不随时间变化的原子根据同样不随时间变化的运动规律，在空间中的运动也是自我限制的。当然这种方法在作用于宇宙的小部分时，是正确的。但当我们将其作用于整个宇宙或者考虑更加深层次的问题时，它就不再适用了。

我给出一个利用这种方法失效的例子，就简化法好了。简化法是一个非常好的解决问题的方法，并且已经存在了上百年。它的内容大

概是：当你想了解一个由部分或材料组成的系统的性质时，可以通过解释每一部分或者组成它的材料的性质来解释。这是一种常识，很多科学的成功都可以归功于与常识的一致。

那当你想了解基本粒子的性质时，采用这个方法会怎么样呢？基本粒子有其自身的性质。它们有质量和电荷量，并且受到不同的作用力而运动。但根据目前的观点，它们是不可以再细分的。就算可以，你只是在重复以上问题，因为一再细分下去，你总会达到某个不拥有子结构的结构。

是否还有其他方法可以解释基本粒子的性质？当然不是通过简化法。所以我们需要一种新的方法论。这就是我得到的第一个结论：我们所信奉的、已经经过百年验证的物理学定律并不是错误的，而是在到达某个节点的时候就会失效而已。当你想解决极小问题的时候，简化法不再可用。同样，当你推之另一个极限，不断用其来解释更大的系统，直到到达整个宇宙的时候，这一方法同样无效。

虽然我已经提到过其失效的多种原因，其实还有更多。我只再多说一个：当对宇宙的小部分做实验时，我们会一次次地重复实验。这是科学方法的一部分，你不断做实验的目的是为了重现实验结果。而通过这一次次的实验，你成功地将规律的影响和初始条件的影响分开了。你可以从不同的起点开始，来观察那些在结果中保持不变的现象，这些就是由规律导致的。所以你可以非常清楚地区别规律和初始条件相关的性质。

而当我们面对的是整个宇宙时，就不能这么做了。因为我们只有一个宇宙，而宇宙只有一条时间线。我们不能对其进行任何设定，因为不是我们“启动”了它。而事实上，这在宇宙学或者暴胀理论的研究中，是一个很严重的问题，因为我们不能分别检验对基本规律的假设和初始条件的假设，由于宇宙只存在一个初始条件，而我们正处于

这个初始条件导致的结果中。这就是一些研究方法失效的另一个原因。所以我才会说我们需要一个新的方法论。

找寻这个方法的一个非常好的领域就是与之相关的旧观点。而这个旧观点是由莱布尼茨、马赫和爱因斯坦提出的，即时间与空间和基本粒子的性质不是本征的，而是与时间相联系的。这就是我所得到的第二个结论。

第三个结论是，时间必须是最基本的量。时间是一直存在的，而不是突然出现的，并不只是个大概现象，当然也不是一个推论。这就是我所得到的结论，而我最近的工作也是建立在这些结论的基础上的。

我应该将自己置于一个怎样的位置上呢？与我工作紧密联系的两个领域：一个是量子引力，另一个是宇宙学。在量子引力领域中，目前有很多研究项目都在进行，而其中我最为关心的就是圈量子引力论。圈量子引力论目前得到了比较好的结果，我会花上一点时间来介绍，因为我们之前并没有涉及。

圈量子引力论是一个比较有争议的研究项目。它直接将量子力学应用于广义相对论，不再考虑对额外维度、粒子和自由度的假设。这其中利用的广义相对论的特殊形式与规范场论相近。它与杨-米尔斯理论（Yang-Mills theory）也很相近。这种形式是由阿贝·阿希提卡（Abhay Ashtekar）提出的。目前这是一个非常繁荣的研究领域。

每隔两年，我们都会举办一个国际会议。今年我是会议的组织者之一。今年的会议在加拿大圆周理论物理研究所举办，时间定在7月，会议有几百人注册。这种方式与20世纪80年代时我与卡洛·罗韦利、阿贝·阿希提卡坐在一起讨论问题，并且将其记录在笔记本上的方式

非常不同，虽然我本人非常喜欢那种方式。作为某些事情的倡议者是一种非常好的体验，所以我时常回忆起那个美好的时代。

圈量子引力论给了我们量子几何在普朗克尺度上的微观结构，它大概比原子尺度要小20个量级。圈量子引力论必须要面对的一个关键问题是：我们目前所看到的周围的时空是怎样从量子图景中出现的？广义相对论方程是如何出现并用于描绘大尺度时空的动力学特征的？在过去5～10年间，回答这些问题的理论物理学家们已经取得了一定的进步。所以这个项目依旧是一个充满活力的项目。

然而，这个项目还面临着两大挫折。其中一个是，理论不能与实验相结合。我和其他人曾经希望可以直接测量到时空的几何量子结构。这些天体物理学实验目前还没有任何量子结构的迹象。另一个是，圈量子引力论对宇宙小部分结构的处理是非常成功的，但我不认为当考虑广义相对论方程后，并将其作用于整个宇宙时，它还依然有效，因为这样做之后，时间项就会消失。而我认为时间是基础项。但圈量子引力论仍旧是一个非常有前景的理论，因为它不断在前进。虽然不能说明它的正确性，但是这说明它正在不断解决需要解决的问题，这就是真正的科学。

目前有很多优秀的年轻人在这个领域工作，他们非常有天分，经常给我一些惊喜，这对我来说是一种享受。对于这个研究领域，我其实是一脚门里，一脚门外的，因为我对宇宙学的兴趣以及对时间本质的兴趣将我拉出了这个领域。但我很多好朋友依旧在那里，我依然会参与一些会议。而我所做的部分工作也与圈量子引力相关，所以作为这个领域的一分子，我感到非常开心。虽然不再处于中心区域，但目前的领导者比起我来更适合那个位子。

而另一项我所参与的工作，弦理论，虽然也非常有前景，但目前也存在一部分停滞。我们不再常常听到弦理论学家讨论弦理论或M理论

的基本构想，而这是我最感兴趣并且曾尝试去做的部分。我们也不再听到弦理论学家提到一个非常“跃进”的观点，即弦理论是解释一切的理论，虽然我认为仍旧有很多人相信这个论点。

而弦理论在两个领域有非常不错的表现。其中一个是数学领域，与其相关的数学或数学物理学都是非常漂亮的。通过ADs/CFT对偶（或称为马尔达希纳猜想），弦理论能应用于一些普通的系统，比如液体、流体或某些固体系统。弦理论也可以推导出某些实验现象。虽然这对完成弦理论没有任何帮助，但是它在这一方面的确发展得比较好。还有一些其他项目，存在因果动力三角论（causal dynamical triangulations）、量子引力、因果集等一些少部分人在做的事情，这些人支持景观的观点。

在宇宙学中，暴胀理论和宇宙学标准模型与实验结果是十分符合的。但是我十分同意尼尔·图罗克和保罗·斯坦哈特所提出的一个非常重要的观点。他们假设，暴胀理论是正确的，在这一前提下，如果不处理奇点的话，就没有办法解决初始条件的问题，或者以我的观点是解决自然规律的问题。奇点指的是，在暴胀之前，宇宙处于高密状态，在某段有限时间内广义相对论失效的状态。

一个必要的假设是，大爆炸并不是时间的奇点，而只是一个事件、一次转变。在这次转变之前，可能存在一个性质和物理学定律与现在完全不同的宇宙。所以大爆炸变成了一次相转变，类似于之前宇宙中形成的黑洞。因此应该存在一个可以形成黑洞的奇点，然而这个奇点被量子效应抹平了，这就是我们所说的反弹。也就是说，当一颗恒星开始坍缩，当其达到无穷密度时，量子效应将其反弹并使其再次开始膨胀。这就形成了新的时间和空间区域，也就是新的宇宙。

这是关于大爆炸只是一次转变的假设，而图罗克和斯坦哈特有一个完全不同的假设，整个宇宙都要经历这样一个相转变。量子引力领

域的人们有不同的假设。他们说，如果目前我们所知的空间性质像一块冰，那么当宇宙通过大爆炸的时候，空间将融化为液态并再次冻结。大爆炸就类似于一次短暂融化后的大面积冻结。这个假设对我来说是非常必要的，因为它解释了初始条件，而这是暴胀理论所没有做到的。在这一假设中，其初始条件是可信的，或者说解释了为什么宇宙早期非常特殊。

而无论图罗克和斯坦哈特的循环宇宙理论会怎样发展，我认为他们的假说、他们对暴胀理论的评论是正确的。不论暴胀理论正确与否，我认为他们所提到的相转变都是存在的，这样宇宙早期的性质就要追溯到大爆炸之前了。

这当然就要与我在量子引力方面的兴趣有一定的重叠了，因为在相转变发生的尺度上，量子引力的作用是十分重要的。而在量子引力领域，我们有量子宇宙学模型，也就是所谓的圈量子宇宙学模型，这是由马丁·波乔瓦尔德（Martin Bojowald）、阿贝·阿希提卡以及很多此领域的研究者共同发展的理论。这一模型显示，反弹是会发生的，而奇点将总会被反弹抹平。

因为宇宙学标准模型的成功，宇宙学仍旧是一个发展良好的学说。但我们面对的问题和粒子物理学家相同：为什么是这样一个特殊的宇宙？我们已经测量了宇宙的各种性质。无论暴胀理论正确与否，我们所在的宇宙都是一个特殊的宇宙。所以，为什么是这个宇宙？为什么不是一个根据已知物理学定律所给出的一个更加典型的宇宙？

这是关于初始条件的问题。我的一个很主要的观点是，我们不能在某些已经建立并使用很多年的方法论的基础上，来得到这些问题的答案。我们需要一套新的物理方法论，其中，规律是随时间演化的。

有没有与我有同样想法的人呢？有，也没有。同时在做宇宙学和量子引力研究的人并不多。举个例子，我的朋友卡洛·罗韦利，在某些领域，比如圈量子引力论，我们非常有共同话题。但是即便我们经常互相讨论，他却依然信奉不随时间变化的量子引力和量子宇宙学。

在哲学领域中，我所做的并不新鲜也不那么令人意外。我提到过的罗伯托·昂格尔，我们的合作就像毕加索对他与布拉克的合作的描述一样：就像偶尔在山上一起跳绳似的。与昂格尔一起工作是一种非常美妙的经历，一起提出某些新的观点，然后再互相否定。我们曾在讨论中回到了美国实用主义的传统思想中，回到了查理斯·皮尔士的想法。在这种时候，我的任何想法都不再新颖和独特。所以哲学家对此怎么看并不是十分清晰，但是我会坚持我的看法：时间是真实的，自然规律是随时间变化的。这个问题他们已经讨论和辩论了大概一个世纪。

我总是试图用自己的观点去说服其他人，因为我的思考过程并不是一蹴而就的，我现在得到的结果也并不是计划之内的。我并不喜欢和自己的想法作对，也不像我提到的其他人一样享受矛盾和冲突。我觉得我的工作只是提出一些观点，然后不断完善，以使它们变为科学的观点而不是哲学的。毕竟发展哲学观点是哲学家们的任务。

我还要提到另一个有关时间是真实的而不是幻觉的观点。热力学第二定律早就被完全建立了，并且在微观尺度是完全正确的。不规则度增加，熵就会变高，我们身边的大部分过程都是不可逆的。时间是支箭，有非常明确的指向性。我们不能回到过去。我们出生、长大、变老，然后死亡。如果我们将可乐洒在地毯上，无论怎样都不能再将其完全装回杯中。婴儿的出生是不可逆的。对朋友无意中在言语上造成的伤害也是不可逆的。生活中的很多事情，大部分事情都是不可逆的。这很大程度上是由热力学第二定律决定的。

19世纪晚期，玻尔兹曼成功地证明了热力学并不是基础科学，因为物质是由原子组成的。他提出，热力学可以由原子的行为来解释，所以热力学定律是由原子的基本定律决定的。温度并不是基本量，只是分子热运动的平均动能。熵也不是基本量，只是原子分布的不规则程度。

玻尔兹曼是正确的，但是当时的人们在他的解释中却发现了悖论。虽然对目前来说这是很大的冲击，但是在19世纪原子假设还没有那么流行，物理学家们对原子理论还没有统一的观点。所以反对他的人说：“你根据牛顿的基本运动理论推导出了有时间指向性的理论，但是牛顿的理论本身对时间却是可逆的。”如果你将原子在空间中的运动和相互作用拍成照片或短片，你可以将短片倒回，根据牛顿的理论，同样的事情依旧会发生。所以这是一个悖论，因为玻尔兹曼也可以通过牛顿的理论非常简单地证明反热力学第二定律：熵在过去高于将来。

事实上，这些反对者说的并没有错。正确解决这个悖论的方法是利用埃伦费斯特定理。这个定理是由爱因斯坦的两位好友，保罗·埃伦费斯特（Paul Ehrenfests）和塔季扬娜·埃伦费斯特（Tatyana Ehrenfest）建立的。他们搞清了玻尔兹曼证明的问题是对时间对称的。他证明的问题是，如果你找到这样一个系统，在某个时刻它的熵很低，那么很有可能它的熵在将来会增大，因为当事物随机运动时，其不规则性会增大。但是也有可能熵在过去比较大，你所看到的现象只是一个意外，玻尔兹曼将其称为波动。所以问题不再是“什么可以解释热力学第二定律”，而是“什么可以解释初始条件”。

要解释热力学第二定律，你需要假设初始条件是可改善的，所以系统才会以比想象中更加规则的方式开始。这对玻尔兹曼来说是一个更大的谜团。因为他并没有活在20世纪，所以他只能假设宇宙由牛顿

定律所统治，并且宇宙是永恒的。玻尔兹曼只能假设我们生活在一个巨大的波动中，而宇宙有很大可能是平衡的，也即熵最大的状态，宇宙大多数时间都处于平衡态，而由于波动，偶尔会偏离一些。这些偏离形成了太阳，形成了我们所生活的世界。从目前来看，这种想法毫无疑问是错误的。

所以如果物理学定律都是对时间可逆的，那么为什么时间有如此强的指向性？罗杰·彭罗斯有一个想法我认为是非常值得探究的，它分为两个部分。第一个在他1979年的一篇文章中提到过。他提出，如果我们想通过观测宇宙来解决时间的指向性，那我们只能假定大爆炸的初始条件是极度特殊并且发生的可能性极低。我非常同意他的观点，而这个观点和我的谈论主题也不谋而合了。

所以，要解释目前规律的可逆性和大量观测事实的不可逆性之间矛盾的重心，就转移到了宇宙学上，宇宙学家需要解释为什么初始条件是这样一个可能性极低的事件。而作为一名宇宙学家，就我目前所知的是，没有任何一个宇宙学家在研究这个问题。因为他们有足够多的工作要做，有属于自己的问题要解决，所以更别提解释什么自然的不可逆性和热力学第二定律问题了。而目前，彭罗斯提出另一个观点，基础规律可能是关于时间不对称性的，而那些关于时间对称的规律则是衍生的和近似的。所以那些我们对部分宇宙拍摄下来的影片，如果将它们倒回重放的话，可能并不能说明大爆炸开始之后的真实宇宙的发展历史。让我来举个例子。

当环顾四周，我们看到了来自过去的光。当然通过望远镜，我们可以看到更久之前恒星发出的光。我们从未看到过来自未来的光，从未看到过来自未来恒星发出的星光，也从未看到过未来超新星爆发传出的辐射。但是光传播所遵循的规律即麦克斯韦方程组对时间是可逆的。它的解包括来自未来的光以及来自过去的能量和信息，解的个数

和我们用到的解相同。所以这个规律对时间是对称的，但将其应用于实际情况时，我们却舍去了大部分解，只要其中有任何从未来到过去的项。

彭罗斯会说：“或许麦克斯韦方程组背后的真实理论是只能从过去向未来传递信息和能量，这样就不会存在问题和悖论。”我同意这个观点，这有可能是真正的量子引力理论。而之后这就成了一个挑战。我们是否可以提出一个假说，来说明这些基础规律如何对时间不对称、不可逆，并且了解目前这些规律如何变得可逆。我和我的一个同事玛丽娜·科尔特斯（Marina Cortes）正一起研究这个问题。

所以这是另一种方式，我们目前在基础物理学和宇宙学领域碰到了巨大的障碍，而这些哲学方面的批评对我们理解这些障碍是非常必要的，它们也成为我作为一名科学家不断进行研究的动力。之后这个工作将通过标准的科学方式来进行检验，那就是，它是否能引出一个可以由实验验证的假说？

注：李·斯莫林，著名理论物理学家，在圈量子引力论领域成就卓越，被誉为“现今最具原创力的理论学家之一”。其著作《时间重生》对如何统一相对论与量子力学、当代物理学的危机、宇宙的未来等一系列重要问题进行了深度思考。该书中文简体字版已由湛庐文化策划，浙江人民出版社出版。



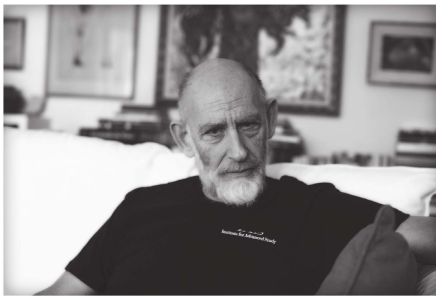
想观看本文作者李·斯莫林的TED演讲视频吗？

扫码下载“湛庐阅读”APP，

“扫一扫”本书封底条形码，

彩蛋、书单、更多惊喜等着您！

WE SIMPLY LIVE ON THE PLANET THAT WE CAN LIVE ON.



我们就生活在我们能生活的星球上。

——《我们的宇宙风景宇宙景观的一个角落》

10

The Landscape

我们的宇宙只是宇宙景观的一个角落

Leonard Susskind
伦纳德·萨斯坎德
弦理论之父；斯坦福大学费利克斯·布洛赫（Felix Bloch）理论物理学教授；
著有《量子力学》《理论中的最小值》

约翰·布罗克曼的导言：

对有些人来说，宇宙是亘古存在的。而对于我来说，它还是件新鲜事。2003年，我与弦理论的提出者伦纳德·萨斯坎德进行了一次谈话。因为被他引人入胜的故事吸引，等他走后我才想起来我忘了问他“宇宙里有什么新鲜事”。于是，我又给他发了封邮件。下面是他的回复。

21世纪的开端是现代科学的一道分水岭。我们对宇宙的认知将被全部改写。正在发生的事情远不止发现几个新现象或者新方程那么简

单。这是历史上少见的几个时期之一。在这些时期，整个物理学和宇宙学的认知、我们的思维框架和世界观都发生了剧变。宇宙的年龄大概为100亿年、横纵大概为100亿光年，具备一系列独一无二的物理学定律，20世纪狭隘宇宙观正让步于更为宏大的全新理论。新的可能性孕育其中。

物理学家和宇宙学家渐渐认识到，我们这100亿光年，只是一个巨大得惊人的多重宇宙中巴掌大的一个地方而已。与此同时，在理论物理学家提出的新理论中，我们的一般自然规律只是一幅在数学上具有无数可能性的宏大景观中，一个不起眼的角落而已。

这一可能性景观是一个数学空间，它代表着理论上可能存在的一切环境。每一个可能的环境都具有自己的物理学定律、基本粒子和自然常数。有些环境与我们这一角相似，只是稍有不同。它们可能也具有电子、夸克和其他所有常见粒子，但引力却可能比我们强10亿倍；也可能，它的引力跟我们差不多，但电子却比原子核重；还有可能这些都与我们的世界类似，但却存在剧烈的斥力作用（称为宇宙学常数），使得原子、分子乃至星系分崩离析。就连空间维度也不是一成不变的了。这一景观的不同区域可能具有五维、六维直至十一维的空间。20世纪的老问题，“宇宙中会发现什么”正在变成“宇宙中不会发现什么”。

宇宙景观的多样性与空间的多样性相辅相成。作为我们目前发展得最完善的宇宙学理论，暴胀理论正引导我们走向多重宇宙的概念。用暴胀理论之父阿兰·古斯的话说，多重宇宙由数不尽的“口袋宇宙”填充而成。有些口袋很小，且永远没有机会变大；有些则可能像我们所处的这个一样大，但却空无一物。它们都存在于宇宙景观的一个个小角落里。

人类在宇宙中的地位也在经受重新审视和挑战。一个多样化的多重宇宙不太可能在它膨胀产生的这一小片区域之外的地方存在智慧生命。我们过去常思考的一些问题，比如“为什么自然常数是这个数而不是其他数”，会有许多让物理学家始料未及的答案。根据数学一致性，并不会有什么独一无二的值被选出来。因为宇宙景观允许巨量的可能值。上述问题的答案可能会是：“多重宇宙中的自然常数有些地方是这个数，有些地方是那个数。而我们这一小片的数是恰恰与我们这样的生命存在相匹配的数值。就这样，没其他答案了。”这种“如果不是这样，就不会有人的存在来问这个问题”式的答案，被称作人择原理。大多数物理学家对这种答案由衷地憎恶。它被视为一种妥协，放弃了对真理的高贵追求。但物理学、天文学还有宇宙学中空前的新发展，使得这些物理学家不得不重新审视他们对人择原理的偏见。这一巨大变革主要有四大理论支撑。其中两个来自理论物理学，两个来自实验和观测。

理论方面，诞生于暴胀理论的永恒暴胀理论认为，多重宇宙充满了子宇宙，也被称为口袋宇宙。这些口袋宇宙就像打开的香槟冒出的泡沫一样，在暴胀的空间中诞生着新的口袋宇宙。同时，作为我们最有希望的统一理论，弦理论提出了一个宏大的景观。根据这一理论，大约有10^{500}种不同的环境可能存在。

最新的一些天文发现与新的理论恰好匹配。关于宇宙大小和形状的最新天文数据证实了，暴胀就是宇宙早期的正确演化理论。几乎没什么好疑虑的，我们的宇宙是镶嵌在一个巨大得多的多重宇宙中。但最引人注目的是，在我们这个口袋宇宙中，臭名昭著的宇宙学常数并不像我们想的那样为零。这一发现引起了巨大震动，唯一合理的解释似乎就是那饱受轻视的人择原理。

我不知道在探索这一巨大景观的过程中，我们的观点会经受多么匪夷所思的颠覆。但我知道，当22世纪到来时，那时的哲学家和物理学家将以怀旧的目光审视现在，并称之为宇宙学的黄金时代。在这个时代，20世纪的狭隘宇宙观让步于更宏大、更完善的多重宇宙观，随之诞生的是一个大到烧脑的宇宙景观。

下面是伦纳德在2003年11月的Edge论坛上就人择原理和弦理论早期历史的发言记录。

我常常思考世界是怎么变成现在这样的。物理世界中有很多未解的谜题。有些很艰深，有些很奇怪，我想要搞懂它们。我想知道是什么让这世界运行的。爱因斯坦说，他想知道上帝创造世界时在想什么。他不是一个有宗教信仰的人，但我明白他的意思。

我现在想搞明白的是，为什么宇宙是恰好适宜人类生存的？这事很奇怪。问题的关键是，为什么物理学定律中的常数是那些数。是巧合吗？它们的取值极端精确，如果差一点，人类可能就不会存在，这会是巧合吗？

举例来说，宇宙学常数是一个确定的数。如果这个数稍作变化，宇宙中可能就不会诞生星系、恒星、行星等天体。它是恰好取了这个数，才诞生我们所见的宇宙的吗？又或者说，宇宙形成方式的某些特征使得创造生命成为必然？

这听上去不可思议，以至于大多数物理学家认为是胡说八道。但我可以举一个例子。假设我们处在一个由于太多云雾而看不见外界的行星上。我们会想知道为什么这颗星球上的温度刚好适宜我们生存，既不会把我们烤熟，也不会把我们冻死。是巧合还是故意？知道答案

的人会说，如果看向外太空，就会发现各种各样的行星、恒星和空旷区域等。有些太热、有些太冷，有些温度适宜却没有水。有各种各样的行星存在着。

答案是，我们就生活在我们能生活的星球上，因为条件恰好合适。并不是我们生活在一个精心准备、适合我们生活的环境中，而是环境就是如此，只不过恰好适宜我们生存罢了。并不是有什么自然规律要求所有的星球都适宜居住，已知宇宙中大约10^{20}颗行星，这一庞大数量使得其中总有那么一些处在适宜的温度与气压下，并有水的存在，等等。这就是我们生活的地方，我们无法在其他地方存活。

那么问题来了，更广义地来看，我们的环境，也就是我们的物理学定律、基本粒子及其相互作用力，是在宇宙中的一个特殊部分区别存在的，还是说整个宇宙都完全相同？如果是区别存在的，那不同部分之间的环境可能会变化很大。我们感兴趣的一些子问题将得到解答。因为事情就是这样，否则我们也不会存在来问这些问题。环境必须是适合我们生存的。

另一方面，如果宇宙各处从头到脚都是相同的，那我们就不明白了，为什么就得恰恰好、差一点都不行地适合我们的存在呢？这其中蕴含着物理学领域的一大争论：我们所知的自然规律仅仅只是数学理论推导出的结果，还是说可能随着不同位置而发生变化呢？这是我想要搞清楚的。

美国的物理学家一点都不喜欢人择原理，而英国人却对它喜爱有加。令人吃惊的是，在美国，当我说起人择原理，像我一样对理论、数学问题感兴趣的物理学家，比宇宙学家更能接受这一理论。人择原理很大程度上是起源自英国宇宙学家，比如马丁·里斯和约翰·巴罗（John Barrow），还有生活在美国的俄罗斯人安德烈·林德和亚历克斯·维连金，不过他们却不是我要说服的对象。

我要说服的对象是高能物理学家和弦理论学家，包括布赖恩·格林们、爱德华·威滕们、大卫·格罗斯（David Gross）们等。原因是，在过去几年中，我们发现弦理论允许多得不可思议的环境多样性存在。弦理论的解是如此多样，简直无法想象是什么选了其中一种置于宇宙中。更可能的情况是，弦理论宇宙有着众多具有不同属性的子宇宙，即古斯所说的口袋宇宙。当然了，它非常大，但又有一小块是这个环境，一小块是那个环境。

大多数物理学家不喜欢人择原理，他们希望自然常数可以从数学理论的对称性中导出。而现在像我和乔·坡钦斯基这样的人却在告诉他们，宇宙中的环境是因地而异的。这里、那里的环境是不同的，具有特定属性的质子、电子、中子也不总是可以求出的。因为在那部分宇宙，它就不是那个样子。

物理学家总是希望答案是唯一的。尽管这一答案有些特别，但我认为唯一答案是蠢人才会坚持的事。有些人相信存在一些非常基础、强大、简单的理论，一旦明白并求解方程组，就可以独一无二地确定电子质量、质子质量以及其他所有自然常数的值。如果这是真的，那么各处就应具有完全相同的自然常数。如果存在求解后显示世界就是我们看到的那种基础方程，那么其他所有地方也应该是一模一样的。

另一方面，也可以有一个包含许多不同环境的理论。这一理论中，各处的环境中都将有不同变化。在过去几年中，我们发现弦理论容许巨大数量的解也即无比的多样性，允许各式各样的环境存在。许多数学理论工作者都想要否认它。他们不愿意承认其合理性，始终相信存在一个优雅和谐的唯一宇宙。但实际并非如此，它在这里是一个样子，在那里又是另外一个样子，在另外的地方又像一个鲁布·戈德堡机械[3]。这导致了一些物理学家否定这一理论事实的情绪。但这一理论终会成功，而妄图否定它的物理学家将一败涂地。

这些人可不是闹着玩的。比如大卫·格罗斯，他就坚定地反对这种多样性的观点。他认为世界应该是独一无二的，他希望弦理论学家将所有东西都算出来，发现世界的特殊性，具有独一无二的属性，一切都是可以从方程中求解出来的。格罗斯认为人择原理放弃了寻找独一无二性的希望。他引用丘吉尔的话对年轻人说：“永源，永源，永源，永源不要放弃。”[4]

爱德华·威滕也很不喜欢这一想法，但据说他很担心这个想法可能真的是正确的。他为此不太高兴，但我想他知道事实就是如此。乔·坡钦斯基是世界上真正伟大的物理学家之一，也是提出这一想法的人之一。在弦理论领域，他是最早意识到多样性存在的人之一，并完全赞同这一想法。斯坦福大学的人都在朝这个方向努力着。我想布赖恩·格林也在考虑这一点。一定程度上，布赖恩从硬弦理论转移到了宇宙学。他是位非常优秀的物理学家。布赖恩考虑了一些非多样性的其他想法，但都没有奏效。保罗·斯坦哈特也讨厌这个观点，而阿兰·古斯显然更容易说服，正是他提出了“口袋宇宙”这个词。

弦理论具有如此多样性的原因是，这个理论具备大量我称为移动组分（moving parts）的东西由人摆弄。正如布赖恩所说，建立一个弦理论模型时，其中会涉及布赖恩赖以成名的内部紧致空间（internal compact spaces）。拟合它们要用到大量变量，摆弄它们又需要更多。这许多的变量造就了巨量的多样性。很久之前，弦理论并不是作为万物理论、量子引力理论或万有引力理论而存在的。它被提出是用来理解强子的。强子包括质子、中子以及在质子间飞舞产生作用力的介子。这些都是那个时期实验室中发现的基本粒子。

曾有一群极具数学头脑的物理学家建立了一个散射振幅（scattering amplitude）公式。这一公式决定了两个粒子碰撞时可能发生的事情。物理学家研究粒子的方法颇有点蠢，有人形容说，这就像为搞清

楚一块表的内部构造，就用大锤子狠狠地砸这块表，看看有什么零件飞出来。物理学家就是这样研究基本粒子内部构造的。不过你必须对飞出来的东西所对应的粒子结构有所了解。由此，1968年，一位非常年轻的物理学家，加布里埃利·韦内齐亚诺（Gabrielli Veneziano）构造出了一个数学公式。该公式描述了两粒子相撞时在不同方向产生各种不同东西的可能性。这是一个完全基于数学性质的纯数学公式。不具有物理学含义也不清楚其描述的景象如何，仅仅是个数学公式。

那时我还是纽约一个非常年轻的教授，研究领域不涉及基本粒子，而更倾向于我感兴趣的量子光学。某次，我的同事赫克特·鲁宾斯坦（Hector Rubinstein）狂喜地来拜访我和我的朋友亚基尔·阿雅诺夫（Yakir Aharonov）。他说：“全都搞定了！我们把所有事情都搞清楚了！”

我说：“你说什么呢，赫克特？”

上蹿下跳好一会后，赫克特终于在黑板上写下这个公式。我看过之后说道：“这事也没那么复杂。如果就是这样，我就可以搞清楚这是怎么回事。我不用担心过去的粒子物理学理论。我只需要用简洁明了的数学说明这个公式就可以了。”

我研究了它很久，消磨了不少时间，最终意识到它其实是在描述两个弦环凑到一起时会发生什么。它们接触、轻微震动然后又飞散开。这是一个可解的物理问题。可以解出不同事情发生的可能性，与韦内齐亚诺所写的恰好匹配。这实在是令人激动不已！

我感觉我是这广阔世界中唯一一个知道这件事的人！当然，这只持续了两天。然后我就发现，芝加哥的一位物理学家，南部阳一郎（Yoichiro Nambu）恰好也有相同的观点。而且巧合的是，我们差不多在同一天得出了相同的结论。那时候还没有弦理论呢，我称其为橡胶带

而非弦。我兴奋不已，我心想：“我要成功了！我将会成为著名物理学家。我将成为爱因斯坦、成为玻尔，所有人都会关注我！”我在手稿里这样写道。

那时，我们没有计算机，也没有电邮，所以要手写文稿然后交给秘书。秘书将其打出来，然后你要再看一遍秘书打错的方程，进行修正。尽管研究工作都做完了，需要做的只是写出来，这个过程却要耗掉大约两周，才能将论文准备好。然后就是把论文装进信封，通过慢悠悠的邮政系统寄给《物理评论快报》（*Physical Review Letters*）的编辑。《物理评论快报》现在是一个非常浮夸的期刊，它们声称只发表顶级的论文。当他们开始这么办事后，结果是只有最差劲的论文才在它那发表。因为当标准变得太高，没人愿意费这个劲了。大家都把论文送到更容易发表的地方去了。

我把论文发给了《物理评论快报》，然后你懂的，我准备、打印论文用了几个周，我变得越来越紧张，担心有人会发现它。我跟朋友们讨论我的论文，后来还把手稿寄了出去。等它到达期刊后，期刊又要再次用慢悠悠的邮件将它寄给同行评审。审稿人看完后再把它寄回去。这前前后后要花掉几个月。结果如何呢？他们这么说的：“这篇论文不是太重要，没有预言任何新的实验结果，我们认为不适合发表在《物理评论快报》。”

轰！我感觉好像被一个垃圾桶砸中头顶，非常非常沮丧。我回到家，焦虑而沮丧。我的妻子拿着镇定剂跟我说：“吃完去睡觉。”我吃了然后去睡觉了，等我醒过来，有朋友来看望我。我们喝了几杯酒，我不仅喝醉了，还晕了过去！我的一个物理学家朋友不得不把我从地上拖到床上。那真是一段非常难受、不愉快的经历。

当然我不打算就这么算了。我把文章又发回去，要求“再找一个审稿人”。他们又给我发回来说：“我们不会再找审稿人。”我又发

回去说：“你们必须再找审稿人，这很重要！”他们又发回来：“不，我们不会再找的。”最终我把论文发给了《物理评论》*(Physical Review)*，不像《物理评论快报》，人家立马就接收了。

弦理论的发现一般归于我和南部阳一郎。此外还有另一个略微不同的版本，尽管发展得不够完善，但大体意思是对的。它的提出者名叫霍尔格·尼尔逊（Holger Nielsen），是一名在尼尔斯·玻尔研究所（Neils Bohr Institute）工作的丹麦人。他对相关概念也非常熟悉。在之后不久，他给我发了封邮件解释他的观点，实际上是非常相似的。

论文发表之后并未被接受。人们对图景式建模的看法还非常保守。他们喜欢方程，不喜欢在事物背后存在一个可以描绘出来的物理系统的想法。对那时的人来说这还有些奇怪。那是1974年或1975年标准模型问世的5年前。

我首先意识到，这不是一个关于强子的理论。我知道原因，但我也意识到这一理论的数学太优秀，不可能不蕴含什么意义。事实确实如此，它不是关于强子的正确理论，尽管也非常接近正确了。这理论被当成关于强子的理论有两三年之久。我知道的更多，但没打算公之于众，因为我还有其他事要忙。我压根儿就没被当回事。成了局外人，并未被广泛接受。

等我崭露头角，又是一个新的故事了。

已经是业界传说的默里·盖尔曼（Murray Gell-Mann）在科勒尔盖布尔斯（Coral Gables）的一场大讨论会上发表了演讲，当时我也在场。他的演讲与我的工作毫无关系。他的演讲结束后，我们都回到了汽车旅馆，进了同一部电梯。电梯卡住了，里面只有我们两个人。

盖尔曼问我：“你做哪方面的工作？”我回答道：“我研究的理论认为强子就像是橡胶带一样的一维弦状物。”然后他就开始笑个不停。我当时恨不得找个地缝钻进去。我被圈内名人的评论狠狠打击到了，无法继续这个话题。于是我说：“那你的工作是哪方面的呢，盖尔曼？”他理所当然地说道：“你没听我的演讲吗？”谢天谢地，电梯这时候终于开始动了。

直到两年后我才再次见到盖尔曼。费米实验室（Fermilab）举办了一次大型讨论会，约有1000人到场。而我依然还是个默默无闻的小人物。而盖尔曼正一如既往地与理查德·费曼竞争世界最伟大物理学家的名号。

当我与我的一群朋友谈话时，盖尔曼走了过来，一瞬间就改变了我的职业生涯。他打断了我们的谈话，在我的朋友和同事们面前向我说道：“我要向你道歉。”我不知道他还记得我，所以我问他：“为什么？”他回应说：“为那次在电梯里嘲笑了你。你在做的工作意义重大，简直太了不起了！我要在我的会议总结演讲中介绍你的工作，只讲你的，不讲别的。会后我们找个时间好好谈谈你的工作，你要给我解释清楚，这样我才能正确理解。”

惊喜突如其来，我有点飘飘然了。在接下来的三四天，我到处跟着盖尔曼：“现在可以吗，盖尔曼？”然后盖尔曼说：“不，我得去跟一个重要的人谈话。”

在某些时候，会上会有很多人排队联系旅行代理。因为我打算去以色列，于是不得不改签我的机票。我花了45分钟才排到前面，接下来你可能也猜到了。盖尔曼走了过来把我从队伍里拉了出来：“我现在想谈了，开始吧。”我当然不会拒绝盖尔曼，所以我说：“好的，我们谈吧。”他又说道：“我只有15分钟，你能在15分钟内给我讲清楚吗？”我说可以，然后我们开始坐下谈。

前14分钟就是这样的。他问我：“你能用量子场论解释吗？”我说：“好的，我试试，我用部分子的形式给你讲。”然而我不知道的是，1968年左右，费曼提出质子、中子和强子是由更小的粒子组成的。他不清楚具体如何，但他可以从数据中准确地看出质子是由更小的基础粒子构成的。当用质子散射电子后，剩余的物质就好像被打了一堆小点点。费曼称其为部分子。他不知道它们到底是什么，部分子只是他起的名字，意为部分质子。

接下来你就要知道盖尔曼和费曼的竞争有多激烈了。盖尔曼跟我说：“部分子？！部分子？！上火，上火，你真让我上火！”我心想：“怎么回事？”我实在是说错了话。他最终说道：“这些部分子具有什么属性？”我说：“它们有动量、有电荷。”他又问道：“它们有SU（3）吗？”SU（3），即三阶特殊酉群，是粒子的一种属性，就像电荷一样，它是中子和质子的区别所在。它能将一些非常相似的粒子区分开。它是由盖尔曼和尤瓦尔·尼曼（Yuval Ne'eman）在20世纪60年代早期发现的，盖尔曼也因此声名鹊起，而且它直接指向了夸克的概念。我回答道：“有的，它们可以有SU（3）。”他听后说：“哦，你说的是夸克！”14分钟之中他都在力图使我说出他的“夸克”，而非费曼的“部分子”。14分钟就这样过去了，然后我用1分钟解释所有事情。接着他看了下表，说道：“抱歉，我得去和一位重要的人谈话了。”

我就好像在坐过山车。升上去又掉下来，上、下、上、下、下、下、下、下。我心想：“盖尔曼根本没明白我在说什么。他不感兴趣，也不会在报告中提及我的工作。”然后我就在某个角落看到盖尔曼站在大约15个人前面，滔滔不绝地谈论我告诉他的事情，并对我赞不绝口：“萨斯坎德这样说，萨斯坎德那样说，我们要听萨斯坎德说的。”而且，他在会议结束时的报告中全都是“萨斯坎德这样、那样

说”。就是从那时起，我才真的算崭露头角。我欠盖尔曼实在太多。他是一位正直、追求真知的人，同时也是一位个性极为有趣的人。

我职业生涯的这一次飞跃发生在1971年左右。当时我在叶史瓦大学贝尔弗科学研究所（Belfer Graduate School of Science）任教，离住宅区很远。曾几何时，那是一个无与伦比的地方，有着一群世界上最棒的理论物理学家。那地方后来破产了，我不得不搬到斯坦福大学。当时，我是一个基础粒子物理学家。我只对这东西的数学结构感兴趣，也由此对基础粒子产生了兴趣。有人开始意识到，我的理论并非正确的强子理论，尽管很接近了。

我应该往回退一点。这理论有很多地方错了，但不是错在数学理论，而是错在不应与自然、与强子相比较。约翰·施瓦茨和安德烈·内维尤（Andre Neveu）等一群极具数学头脑的弦理论学家，精巧地修正了其中一部分，并提出了一系列新版本。这些新版本恰好就是发现弦理论不可思议的多样性的开始。每一个新版本都略有不同，我们总希望其中一个看起来恰好能解释质子、中子和介子等。但始终不能成功。这个理论存在致命缺陷。

一个问题是，这个理论只在荒诞不经的十维空间中才有意义。这对生活在四维空间的人来说可不是好消息。后来这一点得到修正，看起来也不那么糟糕了。另一个问题是，这一理论求解后，它包含了粒子间像引力一般的作用力。这理论不像是核物理学领域的，倒像是牛顿引力理论。粒子间的作用力不是让质子和中子聚在一起的那种，而是让太阳系聚在一起的那种。

我有点对它失去了兴趣，因为我那时对引力没什么兴趣。约翰·施瓦茨和包括乔尔·舍克（Joel Sherk）在内的其他几位物理学家看出了其中蕴含的机遇。他们说：“别把它想成是强子理论，把它当作引力理论。”为免于一败涂地，弦理论被从强子理论转变成引力理

论。而我那时对引力不感兴趣，了解得也不多，于是我继续研究基础粒子物理学。那时的基础粒子物理学家都对引力兴趣乏乏，而对引力感兴趣的人又对弦理论缺乏兴趣。所以，只有一小群孤立的科学家，比如约翰·施瓦茨、迈克尔·格林（Michael Green）、皮埃尔·雷蒙德（Pierre Ramond）等人，继续做着相关研究。

后来我因为黑洞而对弦理论再次产生了兴趣。霍金对黑洞的研究发现，它们会辐射、有温度、有溢流，还可以发出光。我在沃纳·埃哈德（Werner Erhard）旧金山的家中阁楼里见到了霍金和杰拉德·特·胡夫特。埃哈德是西德尼·科尔曼（Sidney Coleman）的粉丝。理查德·费曼、我以及大卫·芬克尔斯坦（David Finkelstein）则是他的精神导师。当然了，我们对他那傻兮兮的生意毫无兴趣，不过他那里的雪茄、美酒和食物都非常棒，他本身也很有意思，而且可谓聪慧无比。

霍金来了，向我介绍了他对黑洞的看法。其中之一就是落入黑洞的事物会从宇宙中彻底消失，永不返回，不管以什么形式。信息是不应该丢失的，这可以说是一条物理学基础。这意味着你总可以对事物进行足够精确的观察，通过逆推来无限精确地发现过去发生的一切。

而霍金所说的是，当东西落入黑洞，它们就会彻底丢失，永远也无法重建是什么掉了进去。这违反了一系列量子力学的准则，我和特·胡夫特都呆住了。其他人都没注意，但我们俩是真的呆住了。我记得我和特·胡夫特就那么站在那盯着黑板，足足有15分钟一句话也没说。我和特·胡夫特都确定，霍金错了。而霍金确信自己一定是对的，信息在黑洞中永远消失了。

我时不时地会想起这个问题，想了有13年。直到13年后，我意识到，在弦理论中就有这个问题的答案。所以我对弦理论再次燃起了兴

趣。我不得不回过头读自己的文章，因为我试过读别人的，但看不懂。

在中间的这些年，大量数学被运用到弦理论中。我觉得有些枯燥，因为几乎全是数学而少有直觉的、物理的图景。主要的进展包括发现了5个新版本，还找出了除掉额外维度的窍门。不是真的除掉它们，而是将其卷曲成小的维度。具体内容可以去看看布赖恩·格林的著作《优雅的宇宙》（*The Elegant Universe*）。这么做实际上是件不错的事。

约翰·施瓦茨、迈克尔·格林与其他几个人一起精细求解了这一理论中复杂的数学问题，并得出结论，这个理论与人们所想的并不一致。当他们证明数学计算可信后，爱德华·威滕非常激动。一旦威滕开始研究这一理论，他就成了真正的数学发动机，支配了整个研究领域。威滕写过许多著名的文章，但其中最重要的是1990年前后写的那篇。他和他的合作者研究出了卡拉比-丘流形的数学开端。

威滕也是一位物理学家，他非常想让弦理论成为基本粒子的真实理论。他没能成功，但在研究过程中他发现了很多漂亮的数学形式。我觉得有些枯燥，因为没有提出我感兴趣的那一类物理问题。对我而言数学太多了。我更倾向于少一些数学、多一些图画的形式。

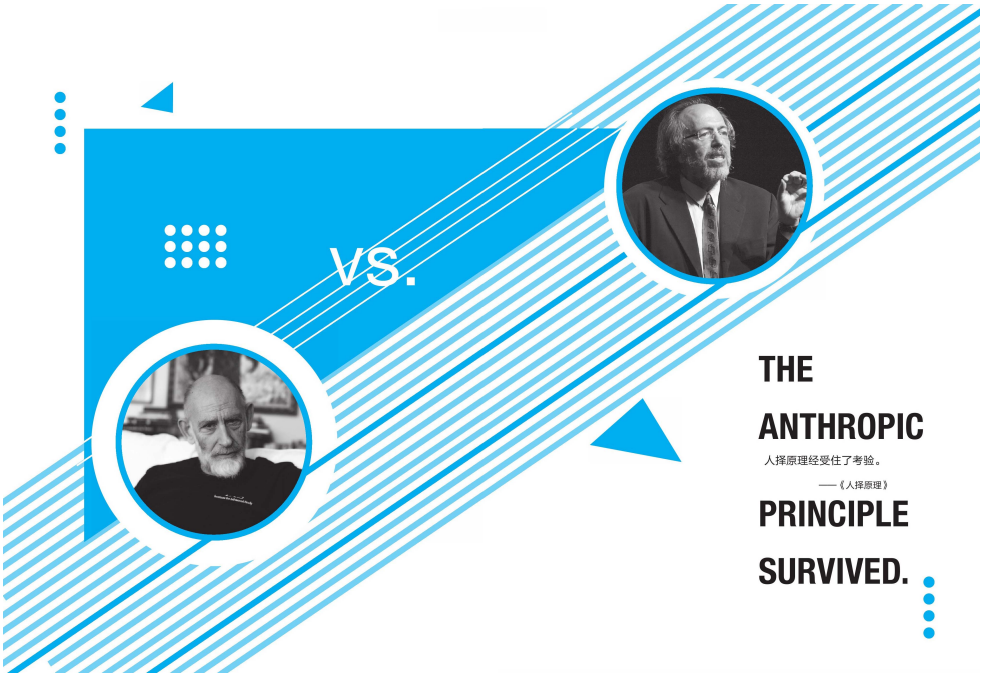
那时我还没有真正深入了解这一课题。我还对黑洞抱有兴趣，直到1993年我才开始怀疑在弦理论中就有解决霍金谜题的原材料。所以那时我就决定真正投入其中。我开始思考弦理论与黑洞之间的联系。弦理论是关于引力的理论。有引力就会有黑洞，所以弦理论必须把黑洞囊括在内，它应该有这个问题的答案。经过几年的工作，它确实给出了答案。事实上，结果表明霍金错得十分离谱。但当一个人开始研究这种层次的问题时，不管他是对是错，都会对这一课题产生深远影响，霍金就是这样一个人。

我研究出一些简化的方法来思考这一问题，结论是黑洞不会丢失信息，东西落入黑洞不会消失，最终还会再出来。它们都混在一起，但不管怎样总是会出来的。我开始写文章说明我的看法，也就是在弦理论中东西不会在黑洞中丢失。这一观点还激发了弦理论研究群体开始考虑黑洞。新的论文不断涌现，其中包括我的、乔·坡钦斯基的、安迪·斯特罗明格的、库姆兰·瓦法（Cumrun Vafa）的……真真切切地把这个问题解决了！我们解决了黑洞、理解了黑洞。那时候，弦理论真正解决的物理学问题就是黑洞。它引发了一些具有革命性的奇怪想法。

到目前为止，弦理论对宇宙学没作出什么解释。没人明白弦理论与大爆炸、暴胀以及宇宙学其他方面的联系。我常去有弦理论学家和宇宙学家参加的会议，通常弦理论学家的报告总会向宇宙学家致歉，抱歉还没有什么有趣的东西能与宇宙学家分享。局面很快会有所改变，因为人们已经意识到了弦理论所包含的巨大多样性。

大家还在试图走老路。他们试图用弦理论去做他们本应用更早的理论去完成的事，这没什么意义。他们应该着眼于弦理论独一无二、与众不同的地方，而非它与旧的理论有哪些相似性。弦理论最独一无二、最特别的性质就是它所具有的这种多样性，它引出了一个不可思议数量的各种环境的存在，物理学就蕴含在这些环境中。

注：萨斯坎德的著作《量子力学》《理论中的最小值》中文简体字版即将由湛庐文化策划出版，敬请期待。


VS.
THE
ANTHROPIC
人择原理经受住了考验。
——《人择原理》
PRINCIPLE
SURVIVED.

11

The Anthropic Principle

人择原理

Leonard Susskind
伦纳德·萨斯坎德
弦理论之父；斯坦福大学费利克斯·布洛赫理论物理学教授；著有《量子力学》《理论中的最小值》

Lee Smolin
李·斯莫林
加拿大圆周理论物理研究所创始人之一，理论物理学家；著有《时间重生》

约翰·布罗克曼的导言：

2004年的夏天，我收到了一封伦纳德·萨斯坎德发给一个科学家小组的电邮副本，还带着一份名为“答斯莫林”的附件。一场学术争鸣的序幕就此拉开。斯莫林认为，“人择原理不能得出任何可被证伪的预测，因此不能称之为科学”。就此，萨斯坎德与其展开了激烈的辩论。

阅读了两位物理学家的数封邮件后，我问他们是否愿意将部分内容分刊登在Edger.org上，同时写一篇新的最终版“回信”公开发表。

他们都表示同意，但有几个条件：第一，每人最多一篇；第二，彼此都不能事先看到对方的文章；第三，事后不能更改。一局定胜负。

对Edge的读者来说，这样一次物理学家之间的对话无疑是十分有意义的。了解科学是怎么来的，了解真理越辩越明的过程，对我们的思考极具启发意义。最后，这还是一个很好的例子，展示了Edge所关切的，作者们分享其研究领域前沿、同行相处体验以及应对挑战、批评和洞见时的态度。隐喻变幻莫测，自觉棋高一着，知识分子们乐在其中。Edge所做的，就是吸引更多人关注知识分子们生活的方方面面。

2004年7月24日，李·斯莫林发表了一篇名为《人择原理的替代科学理论》*（Scientific Alternatives to The Anthropic Principle）*的论文。他后来发邮件给萨斯坎德，征询他的意见。由于事先没有机会阅读这篇文章，萨斯坎德请斯莫林做一个总结。以下是斯莫林的电邮全文。

斯莫林答萨斯坎德

亲爱的伦纳德：

非常感谢，很乐意为你做概括。我将从我的主要论点开始这封信。

我认为史蒂芬·温伯格（Steven Weinberg）和加里加（Garriga）以及维连金的观点是错误的。其中的微妙之处在于，他们的观点与其他一些观测事实结果包装在一起。他们在已经是正确的东西之上，添加了人择原理的内容。也正因如此，人择原理只不过是一个正确观点上的附加之物，算不上什么真正的科学论点。

让我们从结构形成理论（theory of structure formation）讲起。这一理论认为：“太大的正Λ值会妨碍星系的形成。”

而我们确实观测到了星系的形成。因此我们预测，宇宙学常数不会太大。这是合理的观点，也与实际观测相符。

温伯格和其他人的错误之处在于，将人择原理与这一正确的论点糅合在一起。由于其中一个论点确实是正确的，因而这一错误很难被发现。人择原理的加入与这一论点其实毫无干系。

他们的论证逻辑是：A推出B；B是观测结果；B与理论C一起推出D。

A代表任何形式的人择原理以及平庸原理（principle of mediocrity），与先验的假设、宇宙的概率分布等一起，再加上我们自身的存在，得出结论，我们应该观测到B。

B代表星系已经形成。

C代表结构形成理论。

D代表不太大的宇宙学常数。

谬误之处就在于，他们没意识到，第一行的存在根本无关紧要，没了它，D的预测依然坚实可信。要证明这一点，我们可假设D的预测未实现，那么我们会去质疑理论C（因为观测结果B是毋庸置疑的），而不会去考虑A的正确性或者A能否推出B。

这跟霍伊尔关于碳的谬误如出一辙。因为碳一定是在恒星中形成的，他从碳在宇宙中的丰富存在轻易地推论出，一定存在特定能量的

共振现象。后来的观测证实了这一点。但他错误地将其归因于生命的存在，而这两者之间并不存在必然的联系。

在我的论文中，我指出，人择原理在物理学或宇宙学中的应用要么是犯了以上谬误，要么是含糊不清地想要什么结论都行。通过混乱的假设，它可以与任意观测结果相符。

之后我解释了一个多重宇宙理论要如何提出一个与多重宇宙密切相关的可证伪预测。我给出了可行条件，并指出我们的旧版自然选择思想就可以满足这些条件。

因此，人择原理对我们的科学工作并无帮助，还有不少应对多重宇宙的其他方法。

李

2004年6月29日，萨斯坎德就斯莫林的宇宙自然选择理论（theory of cosmic natural selection）写了一篇名为《斯莫林宇宙自然选择理论浅谈》*（Cosmic Natural Selection）*的论文。全文如下。

萨斯坎德回应斯莫林

斯莫林宇宙自然选择理论浅谈

伦纳德·萨斯坎德　斯坦福大学物理系

摘要：我就斯莫林的宇宙自然选择理论谈了一些想法。

在一篇未发表的文章（电邮“答斯莫林”）中，我批评了斯莫林的宇宙自然选择理论[1][5]。他认为，我们生活在所有可能宇宙中我们最适应的那一个。斯莫林所指的“适应”意为可再生。我在批评中举了永恒暴胀理论的例子，这一理论就具有极高效的可再生机制。如果将斯莫林的逻辑应用到这一例子，那将会得出结论，我们生活在具有最大宇宙学常数的宇宙中。事实显然并非如此。

斯莫林提出，真正的可再生机制是，跳跃的黑洞奇点导致在黑洞视界之后新的宇宙形成。由此，斯莫林认为自然规律由宇宙中黑洞的最大数量决定。

斯莫林还认为，包括小值宇宙学常数在内的物理参数使得黑洞形成最大化的观点，也没有明显错误。要使这有意义，就必须假设存在一个非常致密的可能性连续集（discretuum of possibilities），换就话说，就是弦理论所支持的那种丰富景观[4][5][6][7]。

斯莫林的估算中涉及的天体物理学细节十分复杂，至少对我来说是这样。但我们还是可以对其基本的理论假设进行评估，尤其是在弦理论所知景观和黑洞知识的前提下。

如我所说过的，有两种机制对再生有主要贡献，一是永恒暴胀，二是黑洞形成。在斯莫林的理论中，黑洞必须占主导地位。考虑到我们宇宙中黑洞的低密度和指数级暴胀的超高效率，这让我们很难相信黑洞可以胜过永恒暴胀，除非因为某些原因，永恒暴胀不可能发生。

斯莫林辩称，我们对永恒暴胀几乎一无所知，但对黑洞我们却了解不少，尤其是它确实存在。这有点不老实。尽管努力许久[8][9]，但我们了解最少的就是黑洞的求解和宇宙奇点。与之相反，假真空中的永恒暴胀只基于经典的引力理论和半经典的科尔曼-德卢西亚气泡核合成理论（Coleman-De Luccia bubble nucleation）[2][3]。

虽然有关，但这里的问题不在于通常的唯象暴胀理论是不是永恒暴胀一类的理论。发生在景观中任意假真空最小值内的永恒暴胀，按斯莫林的意思，将偏爱最大宇宙学常数。但为了论点考虑，我同意先忽略永恒暴胀作为再生机制之一。

到底有多少黑洞诞生呢？答案仍然含混不清。如果两个黑洞合并成一个呢，这算一个还是两个？严格地讲，既然黑洞是用球面几何定义的，那这就只算一个黑洞。如果所有恒星最终都落入星系的中央黑洞中了呢？这肯定会大量减少黑洞的数量。所以我们得假设，黑洞越大，可能就涵盖了越多的黑洞。一个巨大的黑洞可能包含10^{22}个小一些的星际黑洞。

这带来了一个问题：黑洞到底是什么？我们在过去10年中学到的最深刻的一课就是，基本粒子和黑洞之间没有根本区别。就像特·胡夫特反复强调的，黑洞是基本粒子谱的自然延伸[10][11][12]。这在弦理论中尤为明显，黑洞就是高度激发的弦状态。这是否意味着我们要把所有粒子算作黑洞？

首先，斯莫林的理论不仅要求黑洞奇点处于跳跃状态，还要求宇宙学常数之类的参数在这种跳跃中只有微小变化。我有很多理由相信这不太可能。弦理论的连续集确实允许非常密集的宇宙学常数、数谱的存在，但景观中临近的假真空一般不会有非常接近的真空能。就像大山包围的峡谷，彼此之间的样貌深浅不会是一个样的。

其次，斯莫林假设，黑洞的跳跃状态中的能量密度是普朗克式的。就算他的理论说得通，那新诞生的宇宙也应该是普朗克式的能量密度。而斯莫林想要最终的真空能密度值与初始时相同。这就好像从山谷中向山上滚保龄球，到顶后不指望它滚回来，却要滚到10^{120}个具有差不多相同能量的其中一个山谷中去。我觉得这不太可能。

最后，我在过去10年间已经发现，黑洞不会丢失信息。这是霍金也同意的[13]。这意味着[14]，如果黑洞内部存在着宇宙创生，那新诞生的东西将具有完全独特的量子态，并与初始状态毫无联系。这就使得斯莫林所期待的缓慢突变率（mutation rate）不再可能。

斯莫林似乎认为，他的奇点革命理论即将得到重要证据，也就是他所说的圈量子引力论就差临门一脚。也许吧。但它要么是信息守恒的（新创生的东西对母体没有记忆），要么不是。如果不是，那圈量子引力论就是前后矛盾的。

作者：阿兰·古斯，伦纳德·萨斯坎德，待发表。

参考文献：

[1]Lee Smolin, Scientific alternatives to the anthropic principle, hep-th/0407213.

[2]S. R.Coleman and F.De Luccia, *Phys.Rev.*D 21, 3305[1980].

[3]S. K.Blau, E.I.Guendelman.and A.H.Guth, “The Dynamics of False Vacuum Bubbles, ”*Phys.Rev.D* 35, 1747[1987].

[4]Raphael Bousso, Joseph Polchinski, Quantization of four-form fluxes and dynamical neutralization of the cosmological constant, hep-th/0004134, JHEP 0006[2000]006.

[5]Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde, Sandip P. Trivedi, De Sitter vacua in string theory, hep-th/0301240.

[6]Leonard Susskind, The anthropic landscape of string theory, hep-th/0302219.

[7]Michael R. Douglas, The statistics of string/M vacua, hep-th/0303194, JHEP 0305[2003]046; Sujay Ashok, Michael R.Douglas, Counting flux vacua, hep-th/0307049; Michael R.Douglas, Be

rnard Shiffman, Steve Zelditch, Critical points and super-symmetric vacua math.CV/0402326.
[8]G. T.Horowitz and J.Polchinski, Phys.Rev.D 66, 103512[2002][arXiv: hep-th/0206228].
[9]L. Fidkowski, V.Hubeny, M.Kleban, and S.Shenker, The black hole singularity in AdS/CFT, JHEP 0402, 014[2004][arXiv: hep-th/0306170].
[10]G.'t Hooft, "The unification of black holes with ordinary matter." Prepared for Les Houches Summer School on Gravitation and Quantizations, Session 57, Les Houches, France, 5 Jul-1 Aug1992.
[11]L. Susskind, Some speculations about black hole entropy in string theory, arXiv: hep-th/9309145.
[12]G. T.Horowitz and J.Polchinski, "A correspondence principle for black holes and strings, "Phys.Rev.D 55, 6189[1997][arXiv: hep-th/9612146].
[13]*New York Times* 7/22/04.
[14]G. T.Horowitz and J.Maldacena, The black hole final state, JHEP 0402, 008[2004][arXiv: hep-th/0310281].

2004年6月29日，斯莫林回应了萨斯坎德的批评。

斯莫林再次回应萨斯坎德

亲爱的伦纳德：

感谢你能够花时间回复我的邮件。我将尽可能简短地做一些回应，因为最关键的要点都已经在我的论文《人择原理的替代科学理论》中呈现出来了。另外，在我的书《宇宙的生命》（*The Life of the Cosmos*）中以及早前的一些论文中也有详述。

简明起见，我在论文的5.1.6节中概括了温伯格论文的两大论点。我在总结中对其中之一进行了批评。你举出另一论点对此进行了回应。实际上，这一论点我也在论文中批评过，只不过在我发给你的总结中并未提及。

第二个论点基于加里加和维连金版本的人择原理，叫作平庸原理。他们为发展这一理论付出了不懈的努力。他们声称，“我们的文明在全宇宙的文明集合体中十分典型”。

我在论文的5.1.5节和5.1.6节中详细讨论了这个观点。我认为，平庸原理不能得出任何可证伪的预测，因为它建立在一个集合体的定义之上，在这个集合体中我们的文明是一个典型。同时它还依赖概率分布的假设。上述观点的得出结合了一般的看法和温伯格的特例。

如果温伯格的预测如你所说是正确的，那这还对吗？事实上，温伯格的预测并不那么尽如人意。按照他所说的样子，预期的宇宙学常数将比实际观测到的大一些。根据集合体的不同选择和概率分布的不同假设，Λ 如观测结果般大小的可能性在10%到万分之几之间。实际上，看上去不太可能的值反而更合理，因为它们得自于密度扰动尺度Q可以变化的集合体。在这方面我不是专家，从我阅读到的结果看，似乎是若要使现在宇宙学常数值的概率大到10%，必须假设Q的值由基础理论固定。很难想象，理论中的其他参数不断变化，Q却保持不变的样子。因为它就是依赖暴胀潜能中的参数的。

但是，由于存在太多变数，缺乏严格的可证伪的预测，任何人都可以继续使用人择原理，随意调整假设，提高概率分布的可能性，使真空能的观测值从10^{-4}提高到现实值。没人能说他们不对，这也正是问题所在。

我坚信可证伪性的重要性，因为只有这样才能避免理论学家任意地调整理论使其与数据相符。

萨斯坎德在他的论文中精心论述的观点我很不放心，弦理论真的可以得出我们现如今的情景吗？我因此提出了宇宙自然选择理论并出版了我的第一本书。我的动机是，避免不同理论学家群体间的隔膜，各信各的而不是基于证据的辩论而达成共识。

宇宙自然选择理论的提出不只是为了它本身，也是为了证明人择原理可以用可证伪的理论代替。这个理论同样可以解释所有人择原理所宣称的事情。我选用了弦理论中“景观”这一术语，目的是提出“适应性景观”（fitness landscapes）。这一术语来自一个解释了为什么自然选择理论可证伪的数学模型。

正因为宇宙自然选择理论是可证伪的，所以它欢迎如你一般的科学家进行批评。我简单提一些。

首先是最近的。你认为生命在宇宙的集合体中是一个例外。宇宙自然选择理论不这么认为。在我的论文5.1.4节和5.2节中描述的逻辑模式，贯穿宇宙自然选择理论的始终。我提出，多重宇宙理论可以得出可证伪的预测，只要宇宙的分布不是随机的。宇宙自然选择得出的分布在参数空间的一个小区域内达到峰值。所以在这种分布中，典型的宇宙在任何随机选取的集合体中都将是极为特殊的。我详细说明了其具有可证伪性的理由。我还说明了为什么黑洞再生作用可以得到一个多重宇宙，在这个多重宇宙中，生命存在的条件十分普遍。尤其是

这些生命条件，比如充足的碳元素，也能促进足以形成黑洞的大质量恒星的形成。

其次，永恒暴胀的再生机制与黑洞跳跃的再生机制的说服力大不相同。它源自这样一个事实，任何选择机制只能作用于对再生率有极大影响的调制参数。鉴于标准暴胀理论作用于大统一尺度，永恒暴胀理论的微分再生率只对大一统理论尺度中的参数和真空能敏感。因此，永恒暴胀无法解释任何低能参数的值，比如光夸克和轻子的质量。这意味着它无法解释为什么有许多长寿恒星或处于稳定核束缚状态中的复杂化学过程。

黑洞的再生作用解释了低能物理学的一切谜题和巧合，因为碳化学和年老的恒星等对大质量恒星，也就是后来变成黑洞的那些恒星的形成，至关重要。这能解释一系列已经观测到的事实，并给出了很多可靠的预言。这些内容都在论文中进行了介绍和总结。

至于宇宙自然选择和宇宙学常数，如果两种再生机制存在，那么它们之间就将有一场竞争来决定这个常数。正如你所说，永恒暴胀理论，更倾向于大一些的宇宙学常数。但根据温伯格的第一条论据，如果 Λ 太大，就不会有星系，黑洞也就更少。据我所知，尚无人尝试对这两种机制展开深入的探讨。维连金指出，如果 Λ 太小，会使得旋涡的并合更加常见，进而影响单一宇宙中黑洞的形成率。这一点在我论文第6.2节中简单探讨过，我提出，观测值可使黑洞的形成最大化。但我的这一想法还未被仔细研究过。

当然，如果再生的唯一机制就是永恒暴胀，那么宇宙自然选择理论就是错的。但我们知道，有黑洞存在，而且我们有可靠的理论证据证明黑洞奇点的回弹现象。马丁·波乔瓦尔德（Martin Bojowald）和他的同事曾用于研究宇宙学回弹的方法，基于此，我想明年我们就可以有可靠的量子引力学结果来解决这一问题。所以，通过黑洞再生作

用的结果，似乎很值得探索。不仅如此，由于恒星和黑洞的形成已被观测到，并可由我们所知的物理学和化学知识来解释，因此我们的研究是牢靠可信的。

我们对永恒暴胀还知之甚少。我们无法观测到它发生与否，也难以单独检验其支撑理论的可靠性。因为与之类似的早期宇宙理论，比如暴胀理论，可以与所有的宇宙学数据匹配，但不会经由永恒暴胀得到再生过程。

我不知道宇宙自然选择理论是不是得到可证伪多元理论的唯一方法，但我只能想到这个。10多年来，我一直强调，宇宙自然选择理论可以被证伪，如果人们能受此启发，发展出更多可证伪的理论来解释观测参数，那就再好不过了。目前宇宙自然选择理论还未被证明是错误的，但我每天都会阅读天体物理学方面的前沿论文，看看是否有可以否定这一理论的超大质量中子星的被发现。

我很高兴你给这些问题带来了更多的曝光度。但如果弦理论学家最终接受了可预见性问题，妥协于不能产生可证伪理论的困境，那就太糟糕了。不可证伪理论的关键就是无法证明它是错的。如果我们同行中的大多数人都能接受一个无法被证伪的理论，那科学的发展就会受阻。那么就可能会导致出现错误却不能被证伪的理论主导科学界的局面。

祝好

李

萨斯坎德的“最终回信”

当我被问起是否愿意在Edge网站上继续与斯莫林争辩时，其实我是拒绝的。原因是，一般大众听起来最容易理解的答案往往不是最正确的。门外汉会说：“我懂了，为什么那家伙说得这么麻烦呢？”好吧，这是因为那些你听得懂的简单答案往往带有极深的技术漏洞，而正确的答案又往往很难用几句话解释清楚。像我这样的人能说的只有：“相信我。我知道我在做什么，那个人可就未必了。而且，还有谁谁谁同意我的观点。”这容易给人留下不好的印象。大家可能会不欢而散。那我为什么又同意了呢？可能是因为我爱物理学，但主要是……我也不知道为什么。简而言之，以下是斯莫林所质疑的物理学和宇宙学观点：

（1）在遥远的过去，宇宙暴胀到了极大尺度，要比我们现在看到的这部分大许多个数量级。大部分宇宙存在于宇宙视界之外，无法被直接观测到。

（2）暴胀机制的结果是一个填满了阿兰·古斯所称的“口袋宇宙”的多样性宇宙。我们就处于其中一个。有些人称这个超级宇宙为“多重宇宙”，我则更喜欢“超宇宙”（megaverse）这个词。这种口袋宇宙的不断生长和增殖被叫作永恒暴胀。

（3）弦理论包含了一个口袋宇宙中局域自然规律可能具有超量可能性的情况，我们将这种局面的总和称为“景观”（Landscape），而种种可能性则叫作“环境”（environments）。大多数环境与我们所处的环境差别很大，并且不允许生命存在。至少是不允许我们所知的生命存在。

（4）结合（1）（2）（3），宇宙就是一个由巨量局域环境组成的超宇宙。对我们而言，这个超宇宙的绝大多数环境是绝对致命的，也有一小部分可能比较宜居。我们就生活在那一小部分里。

仅此而已。

结合理论与实验物理，我们有充足的理由相信（1）～（4）条。实际上，我想没有人会不同意（1）。假设（2）并非（1）的伴随结果，但在传统暴胀理论中很难避开（2）。

这其中用到的物理学知识与量子场论和广义相对论中运用的方法很相似。这种极为可靠的方法叫作科尔曼-德卢西亚半经典瞬子隧道效应。这一方法源自业界泰斗西德尼·科尔曼和他的合作者弗兰克·德卢西亚（Frank De Luccia）的一篇著名论文。它从20世纪30年代就被用来解释放射性原子核的衰变。

对于（3），弦理论学家对它是好是坏有分歧，但几乎没人质疑其正确性。只有一个人曾认真地挑战过它，但结果是他错了。不管怎么说，我和斯莫林是都同意（3）的。我们应该也都同意，大部分“景观”对于我们来说都是致命的。最后说到（4），问题来了。在我看来，第4条就是将前三条的简单汇总。但斯莫林有别的想法，（4）的存在与之格格不入。

就让我们先假设这4条都是对的。那我们所处的环境是由什么决定的呢？换句话说，为什么我们是处于这样的口袋宇宙中，而不是在其他宇宙中？为了搞清问题所在，我们用更熟悉的背景做一下替换，将（1）～（4）类比替换为众所周知的宇宙。

（1′）宇宙很大，半径大约为150亿光年。

（2′）宇宙的膨胀导致了大量致密天体的诞生，最少有10^{23}个太阳系统。

（3′）从寒冷的星际空间到炽热的恒星内部，行星、卫星、小行星和彗星点缀其间。引力定律、核物理学、原子物理学、化学以及热动力学综合作用的结果是环境的丰富多样性。即使是行星，环境的多样性也十分明显，正如从水星到冥王星那样。

（4′）宇宙中充斥着各种各样的环境，大多数是不适宜生命存在的。但宇宙是如此之大，从统计上讲，是可能存在一个或更多宜居行星的。

我想没人会质疑上述几点。但是什么决定了我们处于哪种环境中呢？尤其是，是什么决定了我们星球的温度处于冰点和沸点之间？答

案是，没什么能够决定。宇宙环境的温度跨度从接近绝对零度到几百万摄氏度。没什么能决定我们所处的环境，只是因为我们存在，才有人去问这个问题！介于冰点与沸点之间的温度是因为生命需要液态水。仅此而已。没有其他解释[1][6]。

这种缺乏想象力、老生常谈的逻辑有时被称作人择原理。要强调的是，我说的人择原理是种很浅显的东西。我可不是说一切物理学定律都可以从生命存在条件中得出，只有那些存在于局部环境中的生命必须条件才是如此。

我们假设地球是完全被云覆盖住的，或者我们生活在海底。一些不喜欢我们观点的哲学家可能会反对说，我们的（1′）～（4′）条假设是不可证伪的。他可能会说既然不能穿透云层观察到那些不宜居住的环境，那这个理论就是不可证伪的。在他看来，这是一名科学家所能犯下的最大罪过。他可能会这样说：“科学意味着可证伪性。如果一个假设不能被证明是错的，那它就不能算是科学。”他甚至可能引用卡尔·波普尔（Karl Popper）来作为权威。

在我们看来，那些迷糊的可怜同行是可笑的。如果都明白这是正确的事，谁还关心它能不能证伪。

更过分的是，就连可证伪性，他说的也不对。这就有个办法，不用穿过云层也能证明人择原理是错误的：假设以无与伦比的精度测得地球的平均温度是T=50.00000000000

斯莫林对（1）～（4）的批评集中在它们的不可证伪性。但人择原理其实不难想到证伪的方法。比较有名的就有温伯格的预言，如果人择原理是对的，那宇宙学常数就不应正好是0，这与我举的例子非常相似。温伯格试图对人择原理进行证伪，他失败了。人择原理经受住了考验。在温伯格的《终极理论之梦》*（Dreams of a Final Theory）*一书中对此有详细介绍。

斯莫林说的“不可证伪的”大概是指，其他口袋宇宙永不可能被直接观测到，因为它们都被不可穿透的面纱，也就是宇宙视界遮挡在后。根据我多年的科学研究经验，我听过太多的优秀理论被不可证伪性所纠缠。所以我现在都觉得只有招来这种批评的理论才是真正的好理论了。我举一些例子来说明。

在心理学中，你可能会觉得，大家都同意潜意识的存在。斯金纳（B.F.Skinner）就不这样想。他是行为主义科学运动的领袖，将一切不能直接观测到的东西都斥为不科学。行为主义者认为，心理学唯一有效的课题就是外部行为。关于情绪或者病人大脑的看法都被指责为不可证伪。现在，大多数人都会说这实在是愚蠢之极。

在物理学领域，在夸克理论发展早期，众多反对者斥其为不可证伪的。夸克在质子、中子和介子中被永恒地禁锢在一起。它们永远不可能被分开而单独检验。因为它们就好像藏在另一种面纱之后。进行指责的物理学家都有自己的理论，而夸克的存在与其不符。但到了现在，就没有人再质疑夸克理论的正确性了。它已经是现代物理学基石的一部分。

另一个例子是阿兰·古斯的暴胀理论。1980年，要回溯暴胀时期找到这一现象的直接证据是不可能的。因为有一层叫作“最后散射表面”（surface of last scattering）的不可穿透面纱阻碍着对暴胀进程的任何观测。我们很多人确实担心没有合适的办法检验暴胀理

论。有些人，通常是那些有着竞争性观点的人，宣称暴胀理论是不可证伪的，因此不是科学。

你可以想象拉马克学派的人批评达尔文的样子：“你的理论是不可证伪的，达尔文。你不能回到过去，回到自然选择发挥作用的百万年里。你最多只能有一些旁证和不可证伪的假设。与之相反，我们的拉马克理论就是科学的，因为它可以证伪。我们只需要造一群人，让他们每天去健身房举重几小时。数代之后，他们后代刚出生时就会肌肉发达。”

拉马克派学者说的没错，他们的理论确实被轻易地证伪了，但这并没有让他们的理论比达尔文的更好。

有些人用地质构造、同位素形成、恐龙骨头来声称世界创始于6000万年前。绝大多数科学家都会指斥说：“它不可证伪！”我相信斯莫林对此会表示同意的，我也一样。但它的对立面，宇宙并非这样形成，也同样无法证伪。事实上，创世论者也正是这样声辩的。根据僵硬的证伪性教条，“创世的科学”和科学的科学都是不科学的。我希望这荒谬的情景还没把读者弄糊涂。

好的科学方法不是哲学家指定规则的抽象集合。它是由其自身和创造它的科学家所限定和决定的。对一个在20世纪60年代探测到独立粒子的粒子物理学家来说科学的证据，对现在的夸克物理学家并不适用。因为夸克是不可能被单独拿出来的。我们不要本末倒置，科学就是那匹背负着哲学缰绳的骏马。

夸克、暴胀理论、达尔文进化论，在我所举的每一个例子中，指责者都犯了同一个错误，他们都低估了人类的创造性。高精度的间接检验夸克的理论没管用几年。做实验确认暴胀理论用了20年，对达尔文理论的决定性检验则用了100多年（有些人甚至觉得还需要验证）。

100年后的生物学家所能采用的科学手段是达尔文及其同辈人无法想象的。那些指责不可证伪性的人，实际上是他们自己缺乏验证那些理论的想象力。我们有可能对永恒暴胀和景观理论进行验证吗？反正我觉得有可能，尽管可能像夸克那样，只能间接验证，而且包含不少理论性，可能不为某些人所喜。

最后我要指出，提出不可证伪指控的人都有着自己的目的。斯莫林有他自己的理论，基于黑洞内部的一些想法。这当然没什么错，斯莫林完全可以这么做。

斯莫林相信，在某种意义上，宇宙可以再生，母宇宙可以孕育子宇宙。就这一点，我和大多数宇宙学家也是同意的。现在需要谈谈语义学了。“Universe”这个词在英文中就是为了表述所有一切存在集合的，所以它不应该有复数。但现在物理学家和宇宙学家们已经习惯这个语义学错误了。有时我们说的是一切存在集合，但有时我们说的是具有特定属性的一个膨胀空间。比如，我们可以说，在我们的宇宙中电子比质子轻；在某些更远的宇宙，电子比质子重。阿兰·古斯的“口袋宇宙”用在这里可能更妥帖一些，但就是不太好听。

虽然我们都同意某种形式的宇宙再生过程可以发生，但其机制存在分歧。一般的膨胀就是一种形式的再生。比如，如果宇宙的半径加倍，那你可以想成1立方米拉伸成8立方米，或者也可以认为是原始的1立方米产出了7立方米。暴胀是空间的指数级膨胀。可以将它理解成区域群的指数级增殖。还有，根据绝对标准原理（absolutely standard principles），这些后代的环境可以与上代有所不同。在这个意义上，一群口袋宇宙以指数级的形式随着暴胀再生着。

现代永恒暴胀理论认为，上宇宙永远在暴胀，不断产生新的口袋宇宙。这可以类比为生命之树。任何物种最终都会灭绝，但树却在不断萌发新的枝丫。同样，一个口袋宇宙最终会走向死亡，但永恒暴胀

还会继续前进。就像有机生命的族群，在数量上处于统治地位的是那些再生最快的生物（细菌），空间的体积主要会被暴胀最快的环境占据着。这种环境，我认为是完全致命的。如果永恒暴胀是对的，那我们这种局部环境就不可能是典型的。典型的应该是具有最大宇宙学常数的那种。斯莫林的再生机制要想成功，永恒暴胀就不能发生。

斯莫林提出的再生过程发生在黑洞内部。他相信在黑洞的深处，奇点是新宇宙的源头。无限压缩、加热的物质收缩、反弹而后膨胀成新的宇宙。根据这种机制的假设，一个新的宇宙就在黑洞的内部诞生了。这意味着新的宇宙可以隐藏在母体之后，视界之外，膨胀、生长成一个真正的宇宙。还有，按照斯莫林的宇宙自然选择理论，子宇宙还必须具有与母宇宙不同的性质。随机突变必然存在。

斯莫林根据生物学范式又追加了一条假设。在生物学领域，孩子会通过基因遗传父母的特征，突变的影响只有一点。斯莫林必须假设后代宇宙与前代宇宙的差别非常小。更精确地说，他假设子宇宙中的物理学常数与母宇宙中的相差无几。自然选择理论必须要有这条假设才说得通。

那这条假设有什么用呢？因为在生命进化中，只有再生能力最强的会传承下去。由此，斯莫林认为黑洞形成能力最强的口袋宇宙将占大多数。所以斯莫林认为我们的宇宙中物理学定律和自然常数就应该是调成了能够最大化黑洞形成的情形。斯莫林认为，因为不需要人择原理，所以他的理论更“科学”。

这个想法真是棒极了。你可以在网上查阅斯莫林的论文。登录http：//www.arxiv.org，物理学家们会在这个网站上发表他们近期的工作。在“广义相对论和量子宇宙学”分类中，查找gr-qc/9404011。这是斯莫林提出宇宙自然选择理论的第一篇论文。他1994年的这篇文章写得不错，读起来也赏心悦目。但却没有吸引多少物理学家或宇宙学

家关注。当我查询这篇论文的后续文章，看看有没有新进展时，我发现这篇论文只被引用了11次，其中4次来自斯莫林自己，还有两次是对它进行反驳（其中之一我认为是错误的）。

我不知道为什么斯莫林的想法没引起多少关注。我真的认为它不应如此。但我知道我为什么持怀疑态度。有两点理由，一点比较偏技术，另一点为非技术原因。

首先说非技术原因。坦白讲，我很怀疑我们的法则使得我们宇宙中的黑洞数量最大化了。假设我们这个口袋宇宙中每颗恒星都会最终坍缩成黑洞，那么目前观测到的宇宙部分中黑洞的数量最终会达到大约10^{22}个。但随着时间流逝，一个给定星系中的所有黑洞都会落入星系中心的中央黑洞。那最终黑洞的数量将会是星系的数量，即大约10^{11}个。斯莫林希望黑洞越多越好，因为根据他的理论，我们宇宙的黑洞要比其他可能存在的宇宙多。但根据严格的黑洞定义，较小的那个数才是对的。我再大方点，用一个宽松的黑洞定义，将那些临时看起来像黑洞的也算在内。但要按这个规则，那么物理学定律简单改动一点，就会有比现在多很多的黑洞存在。

比如，如果宇宙早期的分钟密度反差不那么小，小到不自然的10^{-5}，那么宇宙就会被小黑洞所占据。这些黑洞可能会合并成大一些的黑洞，但我说了要大方一点，把这些都算在内。

密度反差的增加再结合引力强度的增加以及快速暴胀的背景，将会得到巨量的黑洞。如果引力变得尽可能大，那么除了光子和引力子之外的每一个基本粒子都将成为黑洞！

我与斯莫林的观点正好相反。如果宇宙被黑洞占据，那么全部质量都会被吸进去，生命也不可能存在。在我看来，很显然我们居住的

世界令人意外得平滑，无须担心那些饥不择食的怪物吞噬我们的生命。我认为黑洞的缺少正是人择原理的一个标志。

现在，我再来说更严格、更具有科学意义的技术性理由，这个理由我觉得很关键，但门外汉看起来可能没什么大不了的。斯莫林的观点与霍金的旧断言紧密相连。霍金曾声称，信息在落入黑洞后会被困在视界之后。斯莫林认为母宇宙在跳跃的奇点传递给了子宇宙大量的信息。但近10年的黑洞物理和弦理论研究已经表明，没有这么传递的信息。

部分读者看到我正在说的这个话题可能觉得熟悉。任何看过最近丹尼斯·奥弗比（Dennis Overbye）在《纽约时报》上发表的文章的人都知道，关于落入黑洞的信息的最终命运这一课题，已经争论不休了很多年。霍金、我本人，还有著名物理学家杰拉德·特·胡夫特以及许多其他的著名物理学家都参与其中。霍金曾认为信息会消失在视界之后，也许是进了子宇宙。这与斯莫林黑洞中的后代宇宙观点相一致，子宇宙多少会保留一些母宇宙的信息。而我和特·胡夫特则认为什么也不会损失。有趣的是，就在一两周前，关于宇宙自然选择理论的辩论之时，同一个话题引起了媒体的注意。霍金改变了他的看法，收回了自己的观点。

从斯莫林提出他的观点到现在，在过去的10年间，黑洞争论已经基本解决了。黑洞不损失信息已经成为共识。这里我列举一些颇具影响力的文章，你可以自己查阅：hep-th 9309145，hep-th 9306069，hep-th 9409089，hep-th 9610043，hep-th 9805114，hep-th 9711200。这6篇文章的引用数总和已接近6000次。其中一篇的作者最近还与其他人联合发表了一篇文章（hep-th 0310281），直接攻击斯莫林的论文。我提醒过你，我会说“除此之外，谁谁谁也同意我的观点”，但你至少自己先看一下。

这些论文的推论是，没有信息能在黑洞中心无限剧烈的奇点活动中幸存。即使这个子宇宙真的存在，也不会与其母体有任何特别的相似性。鉴于此，宇宙的自然选择进化史实在是无稽之谈。

尽管引用数众多，我肯定还有物理学家觉得上述文章不够令人信服。他们完全有权保持怀疑，但本文的读者应该明白，他们是在逆流而行。

最后我引用一段斯莫林的评论，我觉得很有启发性。他说：“萨斯坎德在他的论文中精心论述的观点我很不放心，弦理论中真的可以得出我们现如今的情景吗？我因此提出了宇宙自然选择理论并出版了我的第一本书。我的动机是，避免不同理论学家群体间的隔膜，各信各的而不是基于证据的辩论而达成共识。”

首先，“不同理论学家群体间的隔膜”作为提出一条科学假设的理由是非常荒谬的。

但让我更加迷惑不解的却是，斯莫林倾向于让自己成为好科学与坏科学的裁判。那些认为人择原理值得认真对待的人都是些著名的物理学家和宇宙学家，他们有着杰出的科学研究经验和成果。这些人包括：史蒂芬·温伯格[2]、乔·坡钦斯基[3]、安德烈·林德[4]以及马丁·里斯先生[5]。这些人可不是傻瓜，他们也不需要被教导什么才是好科学。

注释：

[1]当然你可以说，是地球与太阳之间的距离决定了温度。但这只不过是换了个问题：“为什么我们的地球就恰好处在这么一个距离上？”

[2]得克萨斯大学物理学教授，1979年诺贝尔奖获得者。

[3]卡弗里理论物理学研究所（Kavli Institute for Theoretical Physics）物理学教授。
[4]斯坦福大学物理学教授；众多奖项和荣誉获得者，包括狄拉克奖（Dirac Medal）和富兰克林奖（Frankin Medal）。
[5]英国皇家天文学家。

斯莫林的“最终回信”

非常高兴萨斯坎德能花时间回应我关于人择原理的论文《人择原理的替代科学理论》，并讨论了宇宙自然选择理论。对我而言，萨斯坎德是他那一代基本粒子物理学家中最具启发性的人物。实际上，圈量子引力论的最初想法就来源自我将他关于规范场论的工作应用于量子引力理论的过程之中。20世纪90年代末，因为他的几篇论述狭义相对论与弦理论相容的论文，我再次开始研究弦理论。

因此，当萨斯坎德开始讨论我以前提出的一种弦理论观点后，我是非常高兴的。但我也有些困扰，他和其他弦理论学家是认可人择原理的，而我在再三考虑后认为，它不是一个成功的科学理论基础。

为了提出更好的理论，我构造了一些条件，得到了一个基于真实科学理论景观的理论。也就是我提出的宇宙自然选择理论。这些都已囊括在我的书《宇宙的生命》中。

萨斯坎德就这些问题所写的文章使我进行了重新思考，检查是否有新发现能够改变我的想法。因此我写了一篇文章，小心讨论了人择原理和它的替代原理[a][7]。开始时存在了一些误解，萨斯坎德的回应是针对一篇总结而非文章全文。不过我的主要观点也都体现出来了，并没有什么需要修改的。这封回信是针对萨斯坎德在我们讨论期间发表的一篇文章的回应，他在文章中对宇宙自然选择理论给出了一些批评[b]。

我们在若干重要问题上能够达成共识。比如，在基础物理学领域，我们都同意一系列可能理论组成了景观；在宇宙学领域，大量像我们的宇宙一样的区域共同组成的多重宇宙理论。我们主要在一件事上存在分歧：多重宇宙的再生机制。

我的主要看法是，如果再生主要是通过黑洞，就像宇宙自然选择理论论述的那样，那么弦理论会更有说服力。这是我非常想说服萨斯坎德和他的同事的一点，因为我认为他们依赖的人择原理和永恒暴胀理论是不堪一击的。

萨斯坎德认为永恒暴胀才是再生的模式。但就算萨斯坎德所认为的永恒暴胀和弦理论景观都是对的，会发生什么呢？

温伯格、维连金、林德等人认为，这样真空能的值就可以得到解释。因为是真空能决定了在永恒暴胀中有多少宇宙产生以及每一个宇宙有多大。

然而更细致的检验暴露出两个问题。第一，目前该理论作出预测的方法存在逻辑漏洞，或者说含混不清，可以任意设置假设而得到不同的预测。这一点在我的论文的5.1节有详细论述。第二，即使第一点勉强通过，这一理论也无法解释除了真空能之外的更多东西。正如我在我的论文5.1.4节讲到的，这是因为统计学选择机制只作用于那些强烈影响宇宙形成数量的参数。这种永恒暴胀理论中选择机制涉及暴胀，所以它发生在极大尺度之上。那么那些低能参数，比如光子质量和轻子，则对宇宙形成数量没什么影响。

为了协调低能参数，就必须有一个选择机制对低能物理学敏感。那么，哪种多重宇宙中的宇宙再生机制里的宇宙诞生数量，是对光夸克和轻子质量敏感的呢？我的回答是，应该在弦理论景观中寻找答案。

而我唯一能想到的答案就是通过黑洞的再生机制。它之所以有效，是因为黑洞形成的多少牵扯到大量低能物理学和化学机制。

萨斯坎德抱怨说这太复杂了，但不复杂不行。我们面对的问题很奇怪，正如那些发明了人择原理的人所说，低能物理学似乎都调整好了，以产生碳化学和长寿恒星。宇宙自然选择理论可以解释这一切，因为质量大到足以形成黑洞的恒星的形成，就依赖于碳以及较长寿命恒星的存在。

因此，如果你因为永恒暴胀理论能够解释真空能的数值，那你应该更喜欢宇宙自然选择理论。因为它更具说服力，它可以提供目前唯一一个能根据弦理论对低能物理学参数作出解释的理论。还有，正如我在论文中所说，宇宙自然选择理论中的选择机制是可证伪的，而永恒暴胀理论提出的那些却是含混不清的，难以给出一个清晰的预测。

不止如此，在这种选择机制中低能物理学和化学占据主导作用，所以我们对它的了解比永恒暴胀理论更充分。其中的动力学、参数我们了解很多，我们还可以用检验相对充分的天体物理学模型，来研究参数的微小变化对宇宙数量的影响。这些都是永恒暴胀理论无法实现的，它有一大堆可以符合观测的模型，但是却都可以根据永恒暴胀给出不同的预测。

当然也有可能两种机制都起了作用。这个研究很有意义，目前还没有人进行。说萨斯坎德所谓的永恒暴胀是宇宙再生的主导机制，还言之尚早。我们的宇宙中“仅”有10^{18}个黑洞，但宇宙自然选择理论中的总数要远远大于这个数值，如果不是这样，这个机制就无法成立。

萨斯坎德对自然选择理论的直接批评很容易回答，其实我早就考虑过。

他就每个黑洞能产生多少新宇宙提出了疑问。在最初的自然选择理论中，我认为是一个，但后续的估算显示，这个数值可能是变化的。我在《宇宙的生命》的第320页就此进行了讨论，读者可以查阅。我的结论是，如果宇宙创生的数量随质量的一次幂以上增加，那么这个理论就很容易被证明是错误的。虽然尚未发生，但并非不可能，这也是证伪宇宙自然选择理论的方法之一。这并不是坏事，因为一个理论越乐意接受证伪，就越是一个好的科学理论，而且一旦它经受住了考验，我们就会更重视它。

宇宙自然选择理论有一个假设：新的宇宙诞生时，低能参数的平均变化很小。萨斯坎德说他直觉上对这一假设在弦理论中能否成立表示怀疑。如果萨斯坎德是正确的，那么宇宙自然选择理论和弦理论就不能共存。但我对他的直觉并不认同。要解释这一点我得用很多专业术语，不过你要知道的就是，目前还没有精细的计算对此作出定论。但现状很快会改变，如在前面提到的，圈量子引力论中的方法可以解决这一问题。这些方法也许可以帮助我们研究新理论中的奇点是怎么回事，还可以提供一个更好的框架来理解永恒暴胀。

接下来是萨斯坎德对黑洞的论述。他说：“我在过去10年间已经发现，黑洞不会丢失信息。这是霍金也同意的。”他由此得出结论：“这意味着，如果黑洞内部存在着宇宙创生，那新诞生的东西将具有完全独特的量子态，并与初始状态毫无联系。这就使得斯莫林所期待的缓慢突变率不再可能。”

关键问题来了，萨斯坎德认为，在不违反量子理论的准则和弦理论的前提下，黑洞无法起到它在宇宙自然选择理论中的作用。我很确定他错了。这个问题的关键要落在量子引力理论上，而那些粒子物理学出身的弦理论学家可能很难理解。

关于黑洞“丢失信息”的讨论涉及黑洞形成和蒸发的过程。霍金在1974年推测，在这个过程中，宇宙初始状态信息会丢失。萨斯坎德等人对此一再反驳，认为这会违反量子物理学的基础定律。

霍金最初提出这个问题时，认为黑洞会完全蒸发，宇宙与原来的样子相同，但少了些信息。这确实是个问题，但不是我们现在要讨论的。现在说的是，黑洞奇点处于跳跃状态，在其位置上产生新时空区域的情况。那时会存在两个空间区域，原来的和新的。如果是这样，那么部分进入黑洞的信息就会到达新的空间区域。在原宇宙的人看来，信息就好像是丢失了，但它们并没有被摧毁，它们只是留在了新宇宙。

首先要说明的是，如果事实如此，就并没有违反量子力学的定律。我们所知的量子力学中可没有不允许观测者无法看到全局的情况。多数的量子信息理论和量子密码学都是这个情况。应用于此情况的一般量子理论也早有提出，能量守恒、概率守恒等基础性质也得到了保留。马可·波罗和他的同事就利用这种量子信息论中的方法，构造出即使观测者无法得到全部信息来识别量子态，也能成立的量子宇宙学[c]。信息从未丢失，只是并不是所有观察者都能看到。

所以没什么好担心的：子宇宙在黑洞中创生，而部分原宇宙信息留在其中并不会对量子物理学理论有什么大影响[d]。

其次，我们有理由相信，在量子引力中，由于缺乏理想时钟，本地观察者看到的信息是零碎的。在粒子物理学中，是以理想的方式处理时间的，时钟被假定存在于量子系统之外。但当将量子物理学应用到全宇宙时，我们就不能这么假设了。时钟必须作为系统的一部分研究。正如米尔本（Milburn）[e]以及甘比尼（Gambini）、波尔图（Porto）、普林（Pullin）三人[f]分别独立指出的那样，这将会导致信息丢失。这是因为，在读取时钟的过程中，存在量子力学的不确定

性。因此我们无法得知指针的移动对应了多少物理时间。所以我们若想知道时钟有确切读数时的量子态，就会有随时间增加的附加统计不确定性混杂其中。（尽管如此，能量和概率还是守恒的。）但是，正如甘比尼、波尔图和普林所说，即使使用最好的时钟，黑洞中困住的信息也会被这种不确定性左右。这意味着，即使信息在黑洞蒸发中丢失，也没人能用一个真的物理时钟做实验，并将其展示出来。

我相信这些可以回答量子力学的担忧，但我其实还没说到萨斯坎德的断言，“我在过去10年间已经发现，黑洞不会丢失信息”。

我发现，要想清楚、客观地考虑弦理论中的问题，就需要先将假设与事实区分开。因此，在过去的几年，我一直在认真阅读，了解弦理论关键假设的进展。研究结果发表在两篇论文中[g]。

鉴于此，我不得不说，在弦理论中，真实的结果而非目前尚未被证实的假设，并不像萨斯坎德说的那样支持他的断言[h]。

弦理论中关于量子黑洞有两类结果。一类涉及特殊黑洞的熵，这种黑洞有着接近最大值的电荷和角动量。这种特殊类型的黑洞令人印象深刻，但在结果发表后差不多10年间，大家都无法将它们囊括到典型黑洞的范畴中。弦理论成功解释的黑洞具有一个天体物理学黑洞不具有的属性：它们有正比热（positive specific heat）。这意味着当加入能量时，它的温度会上升。但多数引力束缚系统和大多数黑洞有着相反的属性：加入能量，温度降低。弦理论中用到的方法目前看上去只对具有正比热的系统有效，因此还不能对典型天体物理学黑洞作出结论。

另外一些结果则与胡安·马尔达希纳的一个假设有关。根据这个假设，具有负宇宙学常数的时空中的弦理论，与一种没有引力的普通量子系统相同。这种普通量子系统叫作规范场论，是电磁学的一般化

应用。即使马尔达希纳的假设是正确的，存在使观测者在很长时间内看不到部分原宇宙信息的子宇宙也是不合理的。只有不同区域真正能够随机接触，那么在有限的时间内，也是有可能接收到进入子宇宙的信息的。

但马尔达希纳的假设毕竟还未被证实。有大量证据表明两个理论间存在联系，但目前所有结果与两理论间的弱关系都比马尔达希纳假设更一致。这个较弱的联系最初是威滕在论文中提出的，就在马尔达希纳假设提出后不久。除了个别情况，所有证据都与威滕的较弱假设相一致。那些特殊情况也可以用特殊对称性来解释。在这里我们要介绍一条基本逻辑规则，当一系列证据可以由两套假设来解释，一个强一些、一个弱一些，那么只有弱的那个才能被认为是有证据支持的。

但是威滕的假设只要求两个理论中有部分近似的联系。它并不反对子宇宙的存在或是黑洞的信息丢失。比如，威滕展示了如何用其他理论中的结果研究某些黑洞，但这些黑洞又是非典型的正比热黑洞。

讨论涉及全息原则（holographic principle），它由特·胡夫特提出，并由萨斯坎德引入弦理论。萨斯坎德提出了全息原则的一种强作用形式，并认为一个系统的完整描述存在于它边界的自由度之中。他将马尔达希纳假设作为范例。在这里，我依然相信与马尔达希纳假设相反的较弱形式，根据这一形式，面积与信息存在关系，而边界则不需要具备对它内部情形的完全描述[i]。

我还要对萨斯坎德的另一段话表示怀疑：“就像特·胡夫特反复强调的，黑洞是基本粒子谱的自然延伸。这在弦理论中尤为明显，黑洞就是高度激发的弦状态。这是否意味着我们要把所有粒子算作黑洞？”

如我所说过的，弦理论相信它所描述的黑洞只是非常特别的一类黑洞。只有在这种情况下，它们才间接地与弦理论描述的状态相关，但它们实际上并非是弦理论中的激发态，反而是一种叫作D膜的东西。那么萨斯坎德肯定把弦理论的任何状态都叫作“一种高度激发的弦状态”。但在这里，这种论辩空洞乏力，因为恒星、行星以及人也是“高度激发的弦状态”。无论如何，除非弦理论中有对典型黑洞的详细描述，否则评价萨斯坎德和特·胡夫特的假设正确与否，还言之尚早。

萨斯坎德还试图借用霍金的权威。没错，霍金曾声明了他改变对这个问题的看法。但他到现在也没发表一篇论文，他最近的转述演讲也没提供足够的细节，我们难以判断他对这种改变的认真程度。

接着，萨斯坎德提到了一篇霍洛维茨（G.T.Horowitz）和马尔达希纳的论文，他就此声称：“这意味着，如果黑洞内部存在着宇宙创生，那新诞生的东西将具有完全独特的量子态，并与初始状态毫无联系。这就使得斯莫林所期待的缓慢突变率不再可能。”

我阅读了那篇论文，并与其作者取得了联系。萨斯坎德误解了它的推断。实际上那篇论文并没有证明黑洞中不存在信息丢失。它只是假设其成立，然后提出了一种信息不会丢失的机制，作者本人也承认这完全是猜测性的，并非得自理论。他们并没有排除信息进入子宇宙的可能。实际上，马尔达希纳还回信给我说：“如果黑洞真的能跳跃成第二个大区域，那我也认为我们的提议是错误的。”[j]

最后，萨斯坎德说，除非圈量子引力论同意他关于黑洞的假设，否则它就是自相矛盾的。我必须强调，目前已经有足够严格的结果[k]来构建圈量子引力论的量子几何描述的自洽性。它能否应用于自然或者它对于黑洞奇点的理论还有待验证，不过两方面的进展都比较缓慢。

最后，让我用萨斯坎德和我都同意的一点来作总结，这也是我在研究所时从他那学来的：根据一个叫作弦/标尺二象性（string/gauge duality）的想法，以延展物体的形式，规范场（就像电磁学中的那样）具有与量子色动力场等价的描述。对于萨斯坎德来说，那些延展物体就是弦。马马虎虎地讲，我相信这可能是对的，但问题是，我们只知道如何在经典时空几何的情况下让弦理论有意义，因为它给了弦移动的背景。

但广义相对论告诉我们，时空不可能是固定的，它像其他场一样跳跃。所以一个量子引力理论必须是不依赖于背景存在的。那我们要问了，这种二象性是否存在一个没有固定经典背景的版本，这样时空几何就可以进行完全量子力学式的研究了？还真的有，那就是圈量子引力论。不止如此，一条最近的单值定理从根本上证明了[1]，任何自洽的、不依赖背景的二象性版本都等同于圈量子引力论。因此，我认为如果弦理论不是彻头彻尾的错误，那么它早晚会找一种更基础的以圈量子引力论来表达的形式。

实际上，我们在所有问题上分歧的根本在于，量子引力理论是不是不依赖背景的。大多数弦理论学家目前还完全赞同爱因斯坦广义相对论那一套；他们的物理直觉还停留在事物移动于固定的时空背景之中。比如，萨斯坎德想要保存的时间演化观点与固定背景的存在紧密相连。这引导他提出了全息原则的一个版本，它只在固定背景的情况下才有效。马尔达希纳假定量子引力等价于固定背景中的物理学。弦理论对黑洞的研究只是部分成功的，因为它们将黑洞描述为固定背景中的事物。永恒暴胀理论也是一个依赖背景的理论；实际上，它的一些支持者将其视为一种朝着用永恒、静态的宇宙的回归。

另一方面，那些致力于研究量子引力的人，从圈量子引力论和其他方法中学到了如何用不依赖背景的方式进行量子时空物理学研究。

在得到大量成功计算之后，我们发现了一种新的物理学观点，它将引导我们对我们正在讨论的问题产生完全不同的新想法。路还很长，但可以确定的是，我们完全不必走回前爱因斯坦时空观。任何想通过讨论事物如何在经典时空背景中运动，来解答物理学问题的人，无论说的是弦、膜或者其他什么，都只是在论述物理学的过去而非未来。

注释及参考文献：

[a]Lee Smolin, Scientific alternatives to the anthropic principle, hep-th/0407213.

[b]Leonard Susskind, Cosmic natural selection, hep-th/0407266.

[c]E. Hawkins, F.Markopoulou, H.Sahlmann, Evolution in quantum causal histories, hep-th/0302111.

[d]特别是，一旦全域时间坐标存在，全域统一性就自然而然地呈现了。如果无法满足这个条件，一切也就无从谈起了。本地观察者可接收到的量子信息，以密度矩阵的形式存在，遵循能量守恒和概率一致的规则。因为，用完全正向的图描述的另一项较弱属性得以保持。

[e]G. J.Milburn, Phys.Rev A44，5401（1991）.

[f]Rodolfo Gambini, Rafael Porto, Jorge Pullin, Realistic clocks, universal decoherence and the black hole information paradox hep-th/0406260，gr-qc/0402118 and references cited there.

[g]L. Smolin, How far are we from the quantum theory of gravity? hep-th/0303185；M.Arnsdorf and L.Smolin, The Maldacena conjecture and Rehren duality, hep-th/0106073.

[h]这是弦理论学家们广泛相信的猜想中，尚未被证明的关键情形之一。另一个尚未被证明的猜想则关系到理论的有限性。

[i]F. Markopoulou and L.Smolin, Holography in a quantum space time, hep-th/9910146; L.Smolin, The strong and the weak holographic principles, hep-th/0003056.

[j]Juan Maldacena, email to me, 1 November 2003, used with permission.

[k]L. Smolin, An invitation to loop quantum gravity, hep-th/0408048.

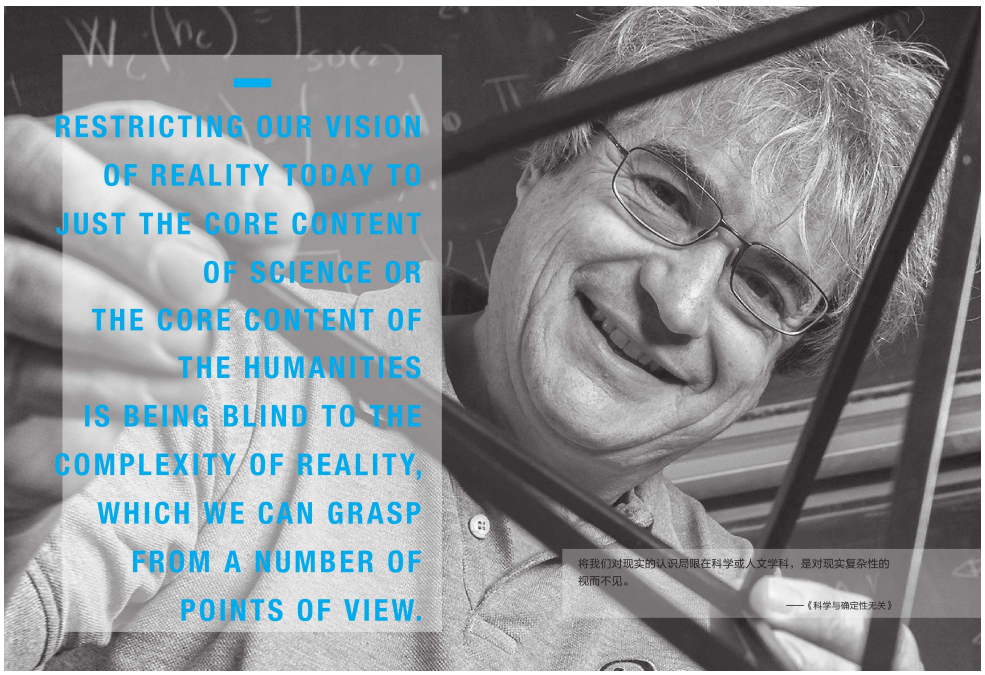
[l]By Lewandowski, Okolow, Sahlmann and Thiemann, see p. 20 of the previous endnote.

想观看伦纳德·萨斯坎德的TED演讲视频吗？

扫码下载“湛庐阅读”APP，

“扫一扫”本书封底条形码，

彩蛋、书单、更多惊喜等着您！


RESTRICTING OUR VISION OF REALITY TODAY TO JUST THE CORE CONTENT OF SCIENCE OR THE CORE CONTENT OF THE HUMANITIES IS BEING BLIND TO THE COMPLEXITY OF REALITY, WHICH WE CAN GRASP FROM A NUMBER OF POINTS OF VIEW.
将我们对现实的认识局限在科学或人文学科，是对现实复杂性的视而不见。
——《科学与确定性无关》

12

Science Is Not About Certainty

科学与确定性无关

Carlo Rovelli
卡洛·罗韦利
理论物理学家，法国马赛地中海大学教授；著有《第一位科学家：阿那克西曼德传奇》《七堂极简物理课》

李·斯莫林的导言：

卡洛·罗韦利是量子引力理论的主要贡献者之一，同时，他在量子力学基础和时间本质方面的研究成果也具有举足轻重的地位。在获得博士学位后不久，罗韦利就因其工作而被视为圈量子引力论的三大创建者之一，另外两人是阿贝·阿希提卡和我。在过去的25年里，罗韦利在该领域内作出的贡献不可胜数，其中最重要的就是提出了叫作自旋泡沫模型（spinfoam model）的量子引力时空模型。过去5年，一系列发现使他的理论得到了巨大发展，这些发现强有力地证明了量子引力理论的可靠性。

罗韦利编写的教材《量子引力》（*Quantum Gravity*）自2004年出版后，就一直是该领域最主要的入门书籍。他在马赛的研究组也一直是欧洲在该领域的工作中心。罗韦利的量子力学基础研究方法被称为关联性量子理论（relational quantum theory）。他还与数学家阿兰·孔涅（Alain Connes）一起提出了一种机制，在这种机制中，时间可以从一个无时间的时间内出现，这被称为热时间假设（thermal time hypothesis）。

我们常会对学生说，关于科学，我们还有一些理论。科学是关于假设演绎法的，我们有观测结果、有数据，数据再被组织成理论。这些理论是数据的结果，然后再以数据的方式得到检验。随着时间发展，我们再得到更多数据，理论也跟着演化，过时的被抛弃，更好的取而代之，如此循环往复。

这就是人们对科学的一般看法。这意味着科学是经验主义、注重实证的，科学的真实有趣且最核心之处就在于它的实证部分。因为理论是会变的，只有实证部分才是科学之所以是科学的牢靠所在。

作为一位理论科学家，我为此深感困扰。我觉得我们像遗漏了什么，应该不止于此。我不断地问自己：“到底遗漏了什么呢？”我不确定自己是否已经找到了答案，但我想分享一些我关于科学是什么的想法。

这对于今日的科学相当重要，尤其是物理学，因为在基础理论物理学这一领域，过去的30年里都没有什么像样的成果。这样说也许有点过分，但事实确实如此。在标准模型之后的几十年里，理论物理学就一直没有什么大突破。当然想法是有不少，或许有些也是正确的。圈量子引力论可能是对的也可能不是，弦理论可能是对的也可能不是。但我们现在还不知道自然将如何判定。

我认为这可能部分是因为我们对科学的观点存在问题，以及我们的工作方法有问题，至少在理论物理学中是这样，其他科学也可能面临同样的问题。为了更好地说明我的想法，我要讲一个故事。这个故事讲的是我最近在理论物理学之外非常感兴趣的一位古代科学家，他也常被称为哲学家，这个人名叫阿那克西曼德。这个人物令我非常着迷。我试图去了解他的所作所为，对我而言，他就是一名科学家。他的作为正是典型的科学，显示出了科学的一些方面。

> 在阿那克西曼德之前，这颗星球上的所有文明都认为，世界的构造就是头顶青天、脚踏黄土。上下有别，浊着落于下。事实也确实如此，天上地下，自有其序。直到阿那克西曼德出现，他说：“不，并非如此。大地是有限的，它飘浮在空中，不会下落，天空也不只在我们头顶，而是在四面八方。”

他是怎么知道这些的？显然，他观察了天空。你看星星、天空、月亮、行星们，所有的东西绕着我们旋转，很容易就会认为我们之下一无所有，这样想也算合理。但就是从未有人这样想。在一个又一个世纪的古老文明中，从未有人这样想过。中国人直到17世纪才知道，而且是利玛窦和耶稣教会告诉他们的。尽管有研究天空数个世纪的皇家天文学会，印度人也是直到希腊人告诉他们，他们才明白这点。非洲、美洲、澳洲，无人想到这样简单的一件事，明白天空不只是在我们头顶，同时也在我们脚下。为什么呢？

因为假设大地浮于空中并不难，难的是要必须回答为什么它不会掉下去。天才阿那克西曼德对这个问题早有答案。我们从亚里士多德以及其他人那里知道了他的答案。他并未回答这个问题，事实上，他就这个问题提出了问题。他问道：“它为什么应该下落？”事物落向大地，大地本身为什么要下落？换句话说，他意识到，大家的普遍想法，即所有重物会落向大地，所以大地自身也会下落，可能是错的。

他提出了另外一种可能，事物落向大地，而下落的方向则随大地而改变。

这意味着，上与下变成了相对于大地的概念。这对我们现在来讲很容易理解，因为我们早已学过。但你可以想一下，我们小时候要理解悉尼人在我们“脚下”生活有多难。显然这需要我们在理解世界的结构方式上作出重大改变。换句话说，“上”与“下”在阿那克西曼德的思想革命前后有着不同的含义。

阿那克西曼德通过在我们习以为常的认识世界的方法上作出改变，对现实有了新的领悟。他的所作所为并非建立新理论，而是领悟到在某种意义上永恒的道理。尽管有些消极，但真相由此揭开。他帮我们从偏见中解脱，这种偏见在我们思考空间的过程中早已根深蒂固。

我为什么觉得这很有趣？因为我认为在物理学前进的每一步上，都在发生同样的事情。但我将论文题目交给学生时，这些题目大多都是未解的。之所以未解，往往是因为问题的答案并不在于解答的过程，而在于思考问题本身；在于意识到这个问题本身隐藏着应该舍弃的偏见和假设。

这样来看，数据加理论再加一个理性的人用他的理性、头脑、聪明才智以及概念结构，构造出新的理论这个过程就没什么意义了。因为在每一步上经受挑战的不是理论，而是构造理论和阐释数据的过程中用到的概念结构。换句话说，我们前进靠的不是改变理论，而是改变我们思考世界的方式。

爱因斯坦发现相对论的过程就是一个极好的例子。一边是在实证方面极为成功的牛顿力学，另一边的麦克斯韦理论在实证方面同样不遑多让。然而这两者间却存在着矛盾。

如果爱因斯坦上学时学习科学是什么，如果他读过哲学家托马斯·库恩（Thomas Kuhn）的书，听过哲学家们解释科学是什么，如果他是我今天寻找物理学难题答案的同事之一，他会怎么做？他会说：“好吧，实证是理论最重要的部分。”经典力学中速度是相对的，忘掉它；麦克斯韦方程组，也忘掉它们；因为这是我们知识中不那么牢靠的部分。理论本身必须要改变。不变的是数据，我们要修改理论使它既能自圆其说，又与数据相符。

真实的爱因斯坦完全没有这样做。他所做的正好相反。他很重视现存理论，他相信这些理论。他说：“经典力学如此成功，它说速度是相对的，我们就应该认真考虑，应该相信。麦克斯韦方程组同样是如此成功，我们也应该相信。”他对理论是如此信任，而这些定性的理论部分正是库恩所说的总在改变，我们已经学着不太把它们当回事。正是出于这种信任，爱因斯坦为了使这两个理论相协调，选择了完全不同的挑战。他挑战了我们脑海深处关于时间的看法。

基于对物理学中过去理论的信任，爱因斯坦在改变常识，改变我们看待世界的根本方式。这与今天物理学中的工作恰恰相反。打开今天的《物理评论》，里面充斥着对之前理论的彻底颠覆。那些没有洛伦兹不变性、非相对论性、非广义协变性、非量子力学的理论很可能就是错的。

现在的物理学家们都能毫不犹豫地说：“我们过去关于这个世界的知识都是错的。让我们随便选点新想法。”我想，这在长期缺乏成功发现的理论物理学领域并不是少数现象。对世界的新看法要么来自新数据，要么来自对已有知识的深入思考。但思考意味着接受我们所学、挑战我们所想，并意识到我们思考的东西中可能存在需要修正的部分。

在科学研究中，有哪些方面是我认为被低估了，需要提上前来的呢？首先，科学是关于构造世界观的，关于重置概念结构的，关于创造新概念的，甚至是关于改变、挑战先验性公理的。这跟集结数据毫无关系。重要的是我们的思维方式、我们的时间观。在科学的进程中，我们不断探索新的思维方式，不断改变我们心中想象的世界的样子，以此找到看上去更好的样子。

在这个过程中，我们过去的所学是最好的养料，尤其是那些曾经的错误。既然知道了地球不是平的，那么未来就不会再有理论认为它是平的；既然知道了地球不是宇宙的中心，那就不会再有异议。我们不会再走回头路。如果从爱因斯坦那学到了同时性是相对的，就不会再捡起绝对同时性。因此当一个实验测量到中微子的速度超过光速，我们就应该持怀疑态度去检查是否有更深层次的原因。就因为一点异常，所有人就都跳出来说“爱因斯坦错了”，是十分荒谬的。科学从来不是这样。

过去的知识始终与我们同在，它是我们领悟的来源。“我们为什么不假设它可能发生呢？”这种想当然的看法会使我们裹足不前。

我所说的似乎前后矛盾。一方面，我们相信过去的知识；另一方面，我们又总是准备着在概念结构的深层次上去修正它们。这两点其实并不矛盾。矛盾的看法来源于我认为的对科学最深的误解：科学与确定性相关。

事实上，科学与确定性无关。科学在寻找以目前的知识水平来说最可靠的思维方式。科学是极度可靠的，但不是确定的。实际上，它不仅是不确定的，还被不确定性包围。科学观点的可信性不是因为它们是确定的，而是因为它们经受住了过去的种种批判。正因为摆在明面上接受所有人的批评，科学才是最可信的。

“科学地证明”是一种矛盾的说法。没什么是科学地证明了的。科学的核心就在于，深刻意识到我们有错误的观点，我们有偏见，我们有着根深蒂固的偏见。在我们理解现实世界的思维架构中，可能有不合适的、需要改进的部分。所以无论何时，我们都有一套高效的现实观念，它是我们目前所能达到的最好程度，是我们目前最可信的，也是基本正确的。

但与此同时，它仍不是确定的，它的任何一部分都允许改进。我们为什么要不断如此？一方面，我们生来如此，我们的大脑进化了百万年。它使我们能够跑过大草原，能够追赶并吃掉鹿，能够不被狮子吃掉。我们的大脑习惯于以米和小时为单位，而不怎么擅长处理原子核与星系的尺度。我们必须克服这一点。

我认为我们是被选中的，作为在狮子口下幸存的一族，人类走出森林，变得越来越聪明。这种不断改变思维方式，重新适应环境的能力，是人类的天性。我们的头脑并非在自然之外发生变化，这种变化是自然的。

关于科学思维方式，我再说最后一两点。首先，科学不在于数据。科学理论的实证部分并不是最重要的。数据帮助我们提出理论、证实理论、推翻理论。但它只是工具。我们感兴趣的是理论性的那一部分以及这种理论描绘了一个怎样的世界。广义相对论说时空是弯曲的。相应的数据是水星近日点相对于牛顿力学的计算结果每个世纪移动43°。

谁在乎呢？谁在乎这些细节？如果这就是广义相对论的全部内容，那它就太无聊了。广义相对论的有趣之处不在于数据，而在于它告诉我们，目前最好的时空结构概念就是弯曲的。相比于牛顿力学，它能将世界更真实的一面展现给我们。我们得知了黑洞的存在，得知了从前有那么一次大爆炸。这才是科学理论的关键内容。地球上的生

命有着共同的祖先。这就是科学理论的内容，而非用于验证它的那些数据。

所以科学思维的关键，在于过去那些早先的理论内容，从中我们知道哪些是前人确定无疑的，又有哪些是我们现在能够用目前的概念结构改进的。

我最后要说的，是贯穿了几个世纪的科学思维与宗教思维的矛盾。它常常被误解。有人疑问，为什么我们就不能高高兴兴地生活在一起？为什么人们就不能在安安稳稳地向神祈祷的同时研究这个宇宙？这似乎是不可避免的，不过原因并非人们常说的那个。不是因为科学假装全知全能，而是因为科学不断提醒我们的无知。这是宗教思维无法接受的。他们不能接受的不是有科学家说，“我知道什么什么”；而是有科学家说，“我不知道，你是怎么知道的”。很多，或者说一些宗教是建立与终极真理的存在之上的。这种想法自然就与认为一切都需要不断修正改进的想法发生冲突。

总结来说，科学不在于数据，不在于实证部分，而在于我们对世界的看法；在于战胜我们的局限并不断打破常识。科学是对常识的不断挑战，其核心不在于确定性，而在于持久的不确定性。甚至可以说，其中的乐趣就在于，明白我们今日的所思所想存在大量偏见与错误，同时努力学习以在将来看到一个更大的世界。

我们离这个世界的终极原理还早着呢，在物理学中更是远得看不到边。所有“我们就要完成了，我们解决了所有问题”的指望都是奢望。如若我们抛弃量子力学、广义/狭义相对论这样的理论，而随意尝试些新想法，那可就是大错特错。在已知的基础之上，我们应该努力学习更多，同时要形成自己对世界的看法。这个看法可能是目前所能得到的最好结果，但我们仍要去不断地发展它。

我所描述的这种科学方式与我所从事的物理学工作紧密相连。在我看来，现在的基础物理学工作面临着这样几个问题。其一是统一问题，试图构造一个包含一切的理论。更具体一些，就是我所从事的量子引力工作。由于广义相对论，这一工作意义非凡。引力的本质是时空，这是爱因斯坦告诉我们的。那么研究量子引力就是要搞清楚量子时空。而研究量子时空就需要我们用与众不同的方式来思考空间与时间。

现在关于量子引力有两大研究方向，一是我研究的圈量子引力论，另一个则是弦理论。它们不仅仅是两组不同的方程，在一定意义上，它们代表了两种不同的科学哲学。我所研究的这种理论正是基于我前面描述的哲学思想，这也正是我思考科学哲学的动因。

为什么？原因如下：广义相对论是我们目前所知的对时空最完善的解答，量子力学则是我们目前所知的对力学的最好发展。然而它们彼此之间却难以调和。困难也许是因为我们看问题的角度不对。我们对世界的认识都涵盖在这两个理论中。所以让我们尽可能地相信量子力学的正确性，并认真加以考虑。也许把它稍微放大一点，让它变得具有相对论性？怎样都好。我们同样也要认真思考广义相对论。广义相对论有着古怪的特点，特别的对称性、特别的属性。我们要尽可能深入地思索，看看如果将它们稍微改动一点点，它们会不会彼此兼容。也许就会由此给我们一个新理论，即使这个理论可能与我们原先的想法大相径庭。

量子引力理论正是按照这种思路被提出的。这种思路同样也贯穿在圈量子引力论以及我和其他人的工作之中。这使我们能在研究中认准一个方向，并以此得出方程、提出理论。弦理论的方向则刚好相反。它的意思大概是这样：“别太把广义相对论那一套当回事。”就连量子力学，它们也持有怀疑。“让我们假设量子力学可以用完全不

同的东西取代，我们来想点新东西出来。”在某些限制下，这种理论可以得出与广义相对论以及量子力学相同的结果。

这种野心令人心有不安，因为我们还没有能力去猜想这样一个宏伟的理论。弦理论是一个很漂亮的理论。它也许有用，但我深表怀疑。因为它不是建立在我们对这个世界已有的知识之上，尤其是它不依赖我认为是物理学主干的广义相对论。

弦理论主要靠猜。物理学从来都不是靠猜的。物理学是一个反向学习如何思考以及学习如何根据新的发现改变我们的思考方式，使得它与旧的知识相一致的过程。哥白尼并没有新数据，也没有什么新的思想启发他，他只是认真研究了托勒密的工作，发现了等分点、本轮、均轮具有特定的关系。只是用不同的角度去看前人的工作，他发现了地球不是宇宙的中心。

如我所提到的，爱因斯坦对麦克斯韦的理论和经典力学都十分重视，由此提出了狭义相对论。圈量子引力论要做的正是同样的事。将广义相对论与量子力学进行统一，由此得出一个新的理论，即使这个理论中没有时间。一方面，这一理论是保守的，因为它源于我们已知的知识；另一方面它又是激进的，因为它使我们不得不对我们的思维方式进行重大调整。

弦理论学家有不同想法。他们说：“我们要考虑无穷大，在那里，广义相对论的完整协方差不复存在，我们也能明白时间是什么、空间是什么。因为我们处于一个渐进的、巨大的距离之上。”这种理论更加狂野、更加不同、更加新颖，但在我看来，它还是更多地建立在旧的思维方式之上的。它更多地采用旧思维方式，而非那些旧有理论中已被证实的新思想。我对科学的看法与我的研究进展，即圈量子引力论，相一致。

当然，究竟谁对谁错我们还不知道。我想说的是，我认为弦理论是一群很棒的人作出的很棒的尝试。我只是偶尔听到“我们知道答案，就是弦理论”这种话时，才会很不服气，不过现在这种情况已经越来越少了。这样说当然是不对的。弦理论确实是由很好的想法组成的，而圈量子引力论同样如此。究竟谁对谁错，我们还得走着瞧。

这又让我想到另一个问题，科学家应该考虑哲学吗？现在的潮流是摒弃哲学，因为我们有科学，不需要哲学。我觉得这种想法很幼稚，原因有二，其中之一是历史角度。回顾历史，若不是因为着迷于哲学，海森堡就不会提出量子力学；若非痴迷于哲学，拜读诸位哲学大家，爱因斯坦也不会提出相对论；若非满脑子想着柏拉图，伽利略也不会有他的成就；牛顿也认为自己是名哲学家，是从与笛卡儿讨论开始工作的，有着很多哲学想法。

甚至是麦克斯韦、玻尔兹曼等人，过去所有的重大科学进展都是由那些对方法性、基础性甚至是形而上学式的问题了然于胸的人所推动的。当海森堡提出量子力学时，他脑海中存在一个完全哲学性的框架。他说，经典力学中的一些东西在哲学上是错误的，对经验主义重视不足。正是这种哲学式的思考使他构造出了无与伦比的新物理学理论——量子力学。

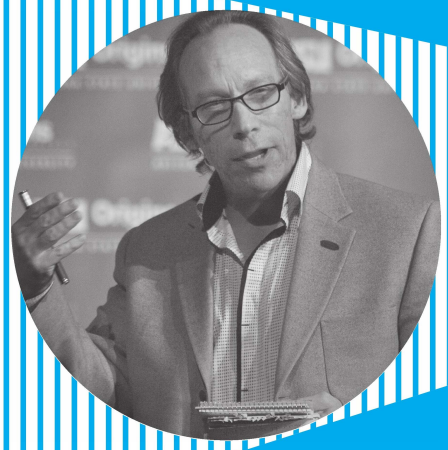
这种哲学家与科学家之间对话方式的分歧是不久前才出现的，准确地说是20世纪后半段。这种对话在20世纪前半段是卓有成效的，因为那时的人聪明绝顶。爱因斯坦、海森堡、狄拉克还有他们的同伴们，将相对论和量子力学放在一起，完成了所有的概念性工作。而20世纪后半段的物理学，在某种意义上，只是对20世纪30年代爱因斯坦、海森堡等人伟大思想的物理运用。

在进行这种运用时，在研究原子物理时，你需要的概念思考要少得多。但现在我们又回来了。当我们研究量子引力时，可不仅仅是应

用。那些说他们不在乎哲学的科学家大错特错，他们不在乎是因为已经有人给他们构造了一套哲学体系。他们用的正是科学的哲学。他们正在用着一种方法学。他们脑子里其实都是哲学的观点，只是他们没意识到。他们只是认为理所当然，而事实并非如此。他们持有了一个立场，却不知道还有很多可能更好、更有趣也更有用的立场。

也许我可以这样说，狭隘存在于我许多同事的心中，他们不想了解科学哲学。狭隘同样存在于哲学和人文学科的许多方面，它们的支持者反过来对科学的兴趣寡然。这是尤为狭隘的。将我们对现实的认识局限在科学或人文学科，是对现实复杂性的视而不见。而我相信这两种观点是可以互通有无、彼此增益的。

BECAUSE
IF IT'S
WRONG,
THERE'S STILL
WORK LEFT
FOR THE REST OF
US.



有错误，我们才有进一步工作的空间。

——《空非空》

13

The Energy of Empty Space That Isn't Zero

空非空

Lawrence Krauss
劳伦斯·克劳斯
物理学家；宇宙学家；亚利桑那州立大学“起源”项目（Origins Project）主管；
著有《空无的宇宙》

我刚从维京群岛回来，参加了一次令人难忘的活动。我与21位科学家共同在圣托马斯（St.Thomas）组织了一场学术会议。我喜欢这样的小型会议，因为我可以亲自挑选参会人员。这次会议的主题是“直面引力”。我想把关心基础物理学和宇宙学面临的基础难题的科学家们，聚在一起开一次会。而这些基础难题，仔细想来都或多或少与引力牵扯在了一起。会上有人说：“我们还不够了解引力吗？就是东西往下掉啊。”但实际上，现代粒子物理宇宙学的许多前沿问题的症结就在于，我们缺乏如何调和引力与量子力学的知识。

我邀请了诸多宇宙学家、实验学家、理论学家以及粒子物理学家。其中包括史蒂芬·霍金，三位诺贝尔奖得主：杰拉德·特·胡夫特、大卫·格罗斯和弗兰克·维尔切克；一些知名宇宙学家和物理学

家，比如普林斯顿大学的吉姆·皮布尔斯（Jim Peebles），MIT的阿兰·古斯，加州理工学院的基普·索恩[8]，哈佛大学的丽莎·兰道尔；一些实验学家，比如激光干涉引力波天文台的巴里·巴里什（Barry Barish）。我们中有研究宇宙微波背景辐射的观测宇宙学家，还有在欧洲核子研究组织使用大型强子对撞机工作的玛利亚·斯皮洛普鲁（Maria Spiropulu）。10年前没人能想到大型强子对撞机可以作为引力的探针，但现在归功于额外维度存在可能性的研究，这已成为可能。

我打算办一系列研讨会，这样每个人都可以畅所欲言，并有充足的开放讨论时间。这次会议有许多公开讨论和私下讨论的时间，还安排了一些好玩的活动，比如搭乘潜艇潜入海中。这是一次十分难忘的经历，我们也算是用浮力对抗了一把引力。

我从这次会议中意识到，寻找引力波可能会是下一个前沿课题。很久以来，它都萦绕在我的脑海中，因为如果它们真的存在，显然我们也还要很久才能探测到它们。而除了它们会存在，我们对它们有什么了解呢？我不太清楚。作为一名宇宙学家，现在让我忧心不已的是，我们有想法、有参数、有与理论相符的实验，但对其中蕴含的基础物理学却知之甚少。

这让粒子物理学家们深感挫败。甚至有人说这导致了幻觉造成的感官剥夺，也即弦理论。可能确实如此。在目前的宇宙学中，宇宙是如此荒诞不经。我们发现了一个巨大的数量。我们发现了宇宙是平坦的，这一点大多数理论学家都早有预料，因为只有这样，宇宙才是和谐美丽的。但为什么是平坦的？它不但充满了暗物质，还充满了被称为暗能量的疯狂物质，我们对它一无所知。这在1998年左右是一项令人惊奇的发现。

从那之后，每次实验结果都与这幅图景相符，却对背后的本质原因只字不提。相似地，所有的数据都与暴胀理论相符，所有的事情都符合这一预言，然而却都无法证伪。所有事情都与暗能量是个常数这种观点相符，但这实际上什么也没说。这有点微妙，我试着解释下吧。

我们注意到，宇宙中有种奇怪的反引力效应，使得宇宙的膨胀加速。现在，如果拿出广义相对论的方程组来看，能够有这种反引力效应的就只有空无所具有的能量。当我还是研究生时，这就是物理学中的一大难题。这一问题至关重要，我们却从未谈起。当你运用量子力学和狭义相对论时，真空就不可避免地具有能量。问题是，这能量太多了。它比我们所见的一切事物所具有的能量大120个量级。

这算得上现在最糟糕的物理学预言了。你可能会问：“如果这个预言这么糟糕，那我们是怎么知道真空有能量的呢？”答案是：“因为它充满了时而存在时而不存的虚粒子。当我们计算氢原子中的能级时，如果不把虚粒子算在内，就会得到错误的答案。”20世纪最伟大的物理学进展之一就是，发现如果将狭义相对论融入量子力学，就会得到虚粒子。它们出现又消失，改变了氢原子的本质。氢原子不再仅仅是一个质子一个电子，因为每时每刻都会有正负电子对时隐时现。负电子倾向于靠近质子。因为它们带异种电荷，异性相吸，而正电子则会被推向原子的外层。原子的电荷分布也由此而改变，虽然改变很小，但还是能够计算出来。费曼等人计算了这种效应，使得我们能够在理论与观测间得到小于9位小数的差异。这可谓是科学中最棒的预测。科学中没有其他地方能从基础原理中计算出一个数字，与实验相比误差如此之小。

然而我们又要问了：“如果它们确实存在，那么它们占了宇宙能量的多少呢？”然后我们就又得出了一个最糟糕的物理学预言。这个

预言说的是，如果真空中有这么多能量，人类根本就不会存在。像我这样的理论物理学家们，心里明白答案是什么，但就是不知道该怎么把它推导出来。这让我想起了西德尼·哈里斯（Sidney Harris）的卡通画，我们前有一个复杂的方程，后有相应的答案，得出答案的中间过程则写着“接下来是见证奇迹的时刻”。然后一个科学家对另一个说：“我觉得你得把这一步骤解释得更详细些。”

答案必须是零：真空的能量必须恰好为零。为什么？因为你已经知道这些虚粒子会贡献巨量的能量，那么也就可以想象，自然中潜在的对称性会将它们刚好抵消，且一直都是如此。对称会产生两个恰好彼此相等的数，因为存在着某种潜在方程的数学对称性。因此，对称性会导致真空的能量被恰好抵消掉。但令人不解的是，抵消掉一个巨大的数字，只留下一些比它小120个量级的东西。不可能取两个无比大的数，然后期待它们恰好相等彼此抵消，只留下比它们小120个量级的东西。但要想得到一个能与真空能的观测上限相当的理论能量值，就必须这样要求。

答案我们心知肚明：存在对称性，能量值也恰好为零。那实际呢？真空的能量不为零！这个发现狠狠地打了传统理论粒子物理学家的脸。这大概是20世纪后半叶影响最深远的思维冲击与谜题。而且在21世纪前半叶可能依然如此，甚至可能一直延续到22世纪。我认为，我们以后也无法通过实验解决这个问题。当我们眺望宇宙，如果暗能量并非真空的能量，而是其他什么东西，那我们就可以对它随着时间发生变化进行测量。然后我们就能知道真空的实际能量恰好为零，是其他一些奇怪的玩意儿假装成了空间的能量。这是众望所归，因为这样就不需要量子引力理论来解释暗能量了。

实际上，弦理论的众多错漏之处中最大的一个就是，它一直无法解释宇宙学常数问题。你会想，如果有了量子引力理论，就能精确地

解释真空能是什么。我们没有其他理论能解释这个问题。但如果这东西真的不是真空能，而是其他什么东西，也许你就可以一探究竟，而不需要弄明白量子引力。

问题是，每次当我们把目光投向太空，测量的结果都表明，宇宙中有一种常数能量不随时间发生变化。这就与宇宙学常数或者说真空能的说法相一致。因此如果你的观测结果与此相符，那就还是一无所获。因为它也没说它是真空能，也可能是其他东西隐藏其后。只有观测结果说明它随时间变化，才能得出些有用的结论。这样才能确定它不是真空能。

当我们越来越精确地测定这个值，很有可能它会看起来越来越像真空能，那我们就还是一无所获。解决办法就只能是提出一个新理论，这比实验要难得多。好的想法总是凤毛麟角。我们需要的就是一个好的想法，这需要对量子引力理论有所了解，需要放开思维大胆想象，这正是许多人乐此不疲的。

在维京群岛，我们有个讨论会说的是人择原理，令人吃惊的是，许多物理学家说道：“你看，也许答案真的是人择原理。”20年前，如果你问物理学家们，他们是否希望有一天我们能有一个理论告诉我们宇宙为什么是这个样子，你将会得到众口一词的回答，“希望。”他们全都会说：“这就是我投身物理学研究的原因所在。”他们会引述爱因斯坦那句说上帝但非上帝的话，也就是真正让他感兴趣的：上帝在创造世界时有其他选择吗？他这样说的意思是，只有一套协调的法则适用吗？如果你改变了其中之一，将物理事实变动一点，它会分崩离析吗？有很多物理事实是可以变动的吗？

20年前，绝大多数物理学家会说，基于450年的科学发展史，他们相信，大自然只有一套法则行之有效。最终我们会发现其中潜藏的基本的对称性和数学原理，使得大自然必须如此这般。这是科学曾经的

思路。但现在，由于真空能令人费解，如果它确实存在，那它的值实在没道理可言。这就使得人们不得不去想，也许这就是我们当前环境下的一个偶然事件，而物理学是依赖不同环境的。这种自然中的基本常数可能就是偶然的，也许有不同的宇宙，它们的物理学定律与我们的不同，我们宇宙中的常数取这些值的原因可能是因为我们在这里观察它们……

这不是智能设计论，恰恰相反，这是某种宇宙自然选择理论。因为我们能在这种环境下生存，所以才有那些取值。不就是自然选择吗？如果我们活不下去，也就没有人在纠结这事了。宇宙也是如此。我们生于这个宇宙，在其中进化，因为它是对生命有益的。可能还有很多不适合生命存在的宇宙，也就没有生命在其中。这就是宇宙自然选择。

我们有权作出任何假设。关键问题是，假设其他宇宙的存在还是个科学问题吗？这也是我们在会议上讨论的问题之一。比如，我在发言中提到，称弦理论是一个理论，是对进化论的侮辱。因为它显然同进化论又或者量子电动力学理论，不是同一个意义上的理论。因为这些理论是坚实可信的，它们能给出严格的理论预言并可被证伪。而弦理论，也许某天能够成为一种理论，但现在还只是徒具其表。当我演讲时，我谈到了科学，有人跟我说：“进化只是个理论。”我说：“在科学中，‘理论’有着不同的含义。”他们又说：“你是什么意思？比如弦理论，你能证伪它吗？它至少比智能设计论强。”

我确实认为弦理论和智能设计间有着巨大的差异。研究弦理论的人都在竭尽全力地提出一些可行的想法。持智能设计论观点的人可不会如此。但问题是，它可证伪吗？我们将假设、形式主义称为“理论”，是不是对真正理论的伤害？多重宇宙论算是科学吗？

我有些尖酸刻薄，声称那些弦理论学家抓住“景观”的概念不放，原因是新理论作不出任何预测，一个无法作出任何预测的宇宙实在是太省事了。那好，让我们不那么刻薄。如果你努力用这个想法来做科学工作，你可以作出真正的科学，计算诸多可能性，但无论你做什么，你会发现得出来的全是建议性的论点。因为如果你没有一个深层次的理论支撑，那就永远不知其所以然。

我说道：“如果真空能可以随不同宇宙而变化，那我们的宇宙存在真空能的可能性有多大？”这就会得出一些有趣的结果。史蒂芬·温伯格最早指出，真空能的值如果大于它现在的值，星系就不会形成，人类也就不会存在。这就引出了人择原理，也许这就是真空能为什么是它现在这么多的原因。但问题是，你不知道还有没有其他量也在变化。也许还有其他量在改变。不管你怎么做，总是具有一些片面性。你可以为之辩护，但也走不了多远。对我而言，景观的概念疲乏无力。最终它可能会给我们带来些有趣的观点，但真正的进步需要真实有力的新想法。我愿意相信弦理论可能是正确的，尽管没有证据。如果它真是对的，那么这个将形式主义转化为理论的过程中蕴含的方法原理，将会使我们获益匪浅。现在，我们还在苦苦挣扎。

身为一名理论学家，在参加会议时，我往往从实验学的演讲中收获更多，因为理论方面的进展我基本都知道，至少我自己觉得是这样。实验研究的进展让我深受启发。理论上，我们现在能测量到将一把3000米长的米尺改变成不足一个原子长的引力波。我们的技术能做到这个程度实在是了不起。而且要实现对引力波更深层次的研究是没有任何技术困难的。引力波很可能会指引我们走出目前一无所得的困境。这些感想让我记忆犹新。

同时，来自华盛顿大学的艾瑞克·阿德尔伯格（Eric Adelberger）也有一场演讲，他的工作是研究牛顿力学在小尺度上的适用情况。

你可能会想：“谁会去研究小尺度上的牛顿力学？”但额外维度的假设之一就是，引力在小尺度上有着不同的表现形式。一些似是而非的证据显示，在西雅图的一些实验中，出现了与牛顿理论的偏离。阿德尔伯格谈到了一些精巧的实验。这些实验让作为理论学家的我叹为观止。他给出了一些新结果。这些结果还不是很肯定，表明现在还没有证据能证明偏离了牛顿理论，对此我并不感到意外。

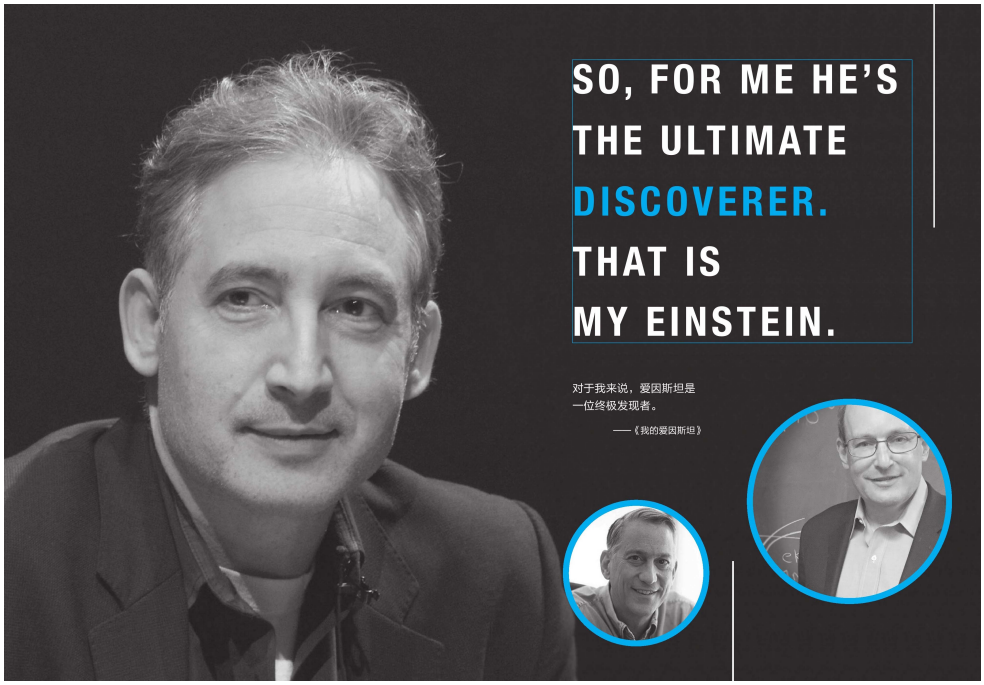
过去5～7年的粒子物理学论文都或多或少地牵扯到额外维度。尽管这个概念令人着迷，但在我看来它并不能让我们的工作有什么实质性进展。与其相悖的实验证据与我所见的理论扩散现象不谋而合，理论破碎又发展成许多不同部分。弦理论正是如此。我看额外维度也有这个趋势。令众多物理学家为之着迷，由这个观点引发的诸多进展，并不是刻意形成的。显然我们需要一些好的新想法。某种意义上，基础物理学正处在十字路口。观测结果证实宇宙是个疯子，但没告诉我们它是怎么疯的。相关理论十分复杂，但始终没有找到突破口。这令人沮丧又激动。对于年轻的物理学家而言，他们迫切渴望着能有让他们兴奋的新想法注入这一领域。

大型粒子加速器是粒子物理学家们的下一个希望所在，可能也是量子引力理论的希望所在。我们已经30多年没能有一个新的加速器来窥探亚原子世界的新区域了。本来我们能有的，但被我们目光短浅的立法者所阻挠。要不是他们关停了超导超级对撞机（SSC），我们就已经用它工作了10多年了啊！大型强子对撞机的结果可能有两个：要么它会揭示一个神奇的宇宙观测新窗口和一系列新现象，证实或推翻理论粒子物理学中的各种想法，比如超对称性；要么可能什么发现也没有。我不确定哪种结果更有可能。但它至少是个希望，我们能有实证的条件来多少约束一下像我这种理论学家的胡思乱想。

宇宙微波背景辐射研究对暴胀理论带来了冲击性的影响。我在《纽约时报》上读到，“阿兰·古斯笑了”。这次会议上古斯就坐在我身边。当我把这篇文章递给他看，他确实笑了。但他总是在笑啊，我不知道该怎么理解他这个笑。我认为宇宙微波背景辐射研究的这个结果有两面性。确实，就像《纽约时报》所说，它们证实了暴胀概念，不过我想那不过是记者没话找话罢了。

因为如果你看一下新结果的定量结论，就会发现，它与旧结果恰好一致。那也证实了暴胀。它们将误差缩减了两个量级。我不知道这算不算令人吃惊。令我感兴趣的是，当所有事情都与最简单的暴胀模型相符时，还有一处始终成谜。在最大尺度上，当我们看向宇宙深处，好像结构还不够多，没有暴胀预言的那么多。现在的问题是，这只是个统计学巧合吗？

我们生活在一个宇宙中，我们只是一个单一样本。有这一个单一样本，你就有一个很大的样本方差。也许我们就是运气好，恰好生活在这样一个宇宙中。这个宇宙中结构的数量比你预测的要少很多。但当你观看宇宙微波背景辐射图时，你会发现，观测到的结构以某种诡异的方式与地球绕日轨道平面相联系。是哥白尼又卷土重来了吗？这简直是疯了。我们看的是整个宇宙。宇宙的结构不可能与地球的绕日运动有关，这就等于是说，我们是宇宙的中心！这些新的结果要么说明整个科学界都是错的，我们是宇宙的中心，要么就是数据有错。又或许是微波背景的结果哪里很怪，也可能是我们在更大尺度上的理论有错误。当然，作为一名理论学家，我希望是后者，因为我要的就是理论有错误。有错误，我们才有进一步工作的空间。


SO, FOR ME HE'S
THE ULTIMATE
DISCOVERER.
THAT IS
MY EINSTEIN.
对于我来说，爱因斯坦是
一位终极发现者。
——《我的爱因斯坦》

14

Einstein: An Edge Symposium

我的爱因斯坦

Brian Greene
布赖恩·格林
弦理论学家；著有《优雅的宇宙》《隐藏的现实》

Walter Isaacson
沃尔特·艾萨克森
阿斯彭研究所（The Aspen Institute）主席及首席执行官；著有《爱因斯坦传》

Paul Steinhardt
保罗·斯坦哈特
理论物理学家；普林斯顿大学阿尔伯特·爱因斯坦科学教授；合著有《无尽的宇宙》

约翰·布罗克曼的导言：

2007年春天，沃尔特·艾萨克森出版的爱因斯坦传记《爱因斯坦传》（*Einstein: His Life and Universe*）冲到了《纽约时报》畅销书榜第一位，并且正巧赶上保罗·斯坦哈特和尼尔·图罗克合著的《无尽的宇宙》一书出版。这个巧合创造了一个非常有趣的契机。

我邀请了艾萨克森、斯坦哈特和哥伦比亚大学的弦理论学家布赖恩·格林参加一个关于爱因斯坦的专题讨论会。他们于2007年夏天参与了这次会议。一年前，在《我的爱因斯坦》（*My Einstein*）

这本由24位主要思想家所写文章的汇编文集中，我曾要求每位参与者回答这样一个问题：爱因斯坦对他们来说意味着什么。而这次我向参会者提了同样的问题。

“对于我来说，爱因斯坦存在于我学习的方方面面。在我初中的时候，有一种理论正流行：相对运动的人和相对静止的人之间，时间流逝速度是不同的，”格林这样说，“而当时我觉得这完全就是疯言疯语。所以我非常想了解这个说法的原理，这个想法促使我一点点学习，最终明白了其中的意义，并且继续深入研究，并想将这一理论向前推进。”

艾萨克森这样回答我：“爱因斯坦就像我的父亲，虽然是个工程师却十分热爱科学，并将这份热爱一点点地灌输给我。我也受到了爱因斯坦本人思想和政治方面的影响。我记得，在我逐渐长大的过程中，他总是在不断问我问题，推动我不断进步。作为一名传记作家，我学到的其中一点，甚至说我首先学到的一件事就是，你笔下人物的初始动力，都与他们的父亲有关。对于本·富兰克林来说，就是不辜负父亲的希望；对爱因斯坦来说在某种程度上也是这样，因为他的父亲是一名工程师。而之后我学到的第二件事是，就算对于传记作者来说，也有一部分动因是父亲，所以这就是为什么我想写一些关于爱因斯坦的故事。我不应该说我的父亲是爱因斯坦，他只是新奥尔良的一个工程师，但是他的工作在他心目中是神圣的，所以我写了这本书，并把它献给我的父亲。”

斯坦哈特的回答和艾萨克森相似：“我关于儿时最早的回忆之一就是，我坐在父亲腿上，听他给我讲科学家及他们的探索故事。父亲并不是一个科学家，他是名律师，但出于某种原因，他经常给我讲关于科学家和他们伟大发现的故事。我还记得关于居里夫人、爱因斯坦以及许多其他人的故事。听过这些人的故事之后，我想成为这些故事人物的其中一员。而我从爱因斯坦身上了解到的另一个让人印象深刻的事情是，他总有一种神秘的魔力，从当时人们学习

的众多现象中，挑出一些问题，一些可以回答的问题。你总有很多需要回答的问题，但是了解你是否拥有回答这些问题的技术、数学方法和正确的思路，这在当时那个年代，的确是一种天分。而爱因斯坦拥有的这种惊人天分使他总能挑出问题、解决问题，超越与他同时代的人。所以对于我来说，爱因斯坦是一位终极发现者。”

布赖恩·格林：当我们提到爱因斯坦的时候，都会为他作出的数目惊人的贡献而深感惊讶。就算只有一刻钟，如果能以他那样清晰的视角来看待这个世界，那简直像白日梦一般。

如果我只能问他一个问题，那我可能会选择一个更加实际的问题。他曾经说过一段非常著名的话：当面对广义相对论的时候，在某种程度上，他并没有在等待可以证明它的数据；这个理论太过美好，只能是正确的。所以如果得到数据，并证明它是正确的，他并不会感到惊讶。这段话中最精彩的一部分是之后的内容。他说，如果得到的数据证明广义相对论是错误的，那么他将对上帝感到非常遗憾，因为这个理论是必然正确的。这就是他对广义相对论的信心。

大多数做相关工作的物理学家们，都是在爱因斯坦的馈赠的基础上工作，都在试图寻找他找寻多年却仍一无所获的大一统理论，而最近这些年来，我们都听说了一种方法叫作弦理论。但弦理论完全是建立在理论上的、纯数学的，至今仍未与任何实验数据相联系。所以我的问题是：他对弦理论作为大一统理论有什么看法。他是否也能在弦理论上看出与广义相对论相同的美、相同的优雅，可以给他同样的自信心。

我们并不知道什么时候可以将弦理论与实验数据相结合，所以获得他的看法是一件非常棒的事情。我觉得在我们这个领域中的人，在没有获得实验数据的前提下，谁都没有绝对的自信，所以获得大师的

肯定是很棒的：他是否从中嗅到了任何可能，这个理论是否在朝着正确的方向前进。我们大多数人都认为这个理论是正确的，但能够听到他的意见则是锦上添花。

沃尔特·艾萨克森：我也想问格林问的那个问题，但是我会稍微延伸一点。爱因斯坦在他人生最后的20多年中，甚至他人生的最后两个小时，躺在病床上，都一直在写方程，试图用非常数学化的方法来得到大一统理论，将各种力与各种场论结合起来。

格林问爱因斯坦是否认可弦理论，我觉得他会的，因为如果你看过爱因斯坦为大一统理论做的12种理论尝试，会发现它们和弦理论在数学以及方法上有很多共同点，包括对额外维度的看法，试图去寻找解释这一切的最优美的数学解。

这就引出了我想问爱因斯坦的另一个问题，在他科学生涯的前半段，容我僭越，是比较成功的那一部分，他并没有过多地依靠数学形式。如果你去看他在1905年发表的所有文章以及1915年左右将他引向广义相对论的主要思想实验，他一直用一种物理学的视角来看待这些问题。事实上，研究广义相对论的人们，把其称为数学手段和物理手段。

很明显，这两者之间并没有很明显的分界线，而是不断重叠着进步，但对爱因斯坦来说，从1905年至少到1914年，他基本上将数学手段视为一种清洁收尾工作，一旦他理解了引力和加速度的等价原理或其他思想实验时，就会自然而然地有人帮助他完成。

如果你看向他后半生对大一统理论所做的一切，他的合作者巴纳希·霍夫曼（Banesh Hoffmann）以及其他人都说，在他们的研究中并没有物理学思想来引导他们，只能朝着越来越数学的方向发展。没有爱因斯坦所说的与实际更加贴合的“光束”来引导着我们，我们只能

说，希望不断朝着依靠物理的方向前进。有很多人都这么想，我也是一样，这也是我为什么采纳了这个想法的原因。在1905年到1913年或1914年间，曾经只依靠物理手段和方法，甚至在苏黎世的练习册中，他试图得到广义相对论和正确的万有引力方程，但却找不到头绪。他与德国哥廷根（Göttingen）的一位数学家大卫·希尔伯特（David Hilbert）比赛，这个人非常有希望成为一名更好的数学家，但正是由于数学太过优秀而限制了他成为一名更好的物理学家。希尔伯特并不用担心万有引力在弱场条件下会衰退到牛顿力学的范畴，他只是利用数学的手段引入协方差来得到正确的场方程。爱因斯坦最终采用了希尔伯特的这种方法，这就使他通过数学手段获得了第一次成功，所以他在之后的学术生涯中就更加依靠数学形式，而不再考虑事物背后直观的物理情景。

这是正确的方法吗？弦理论是否发生了同样的过程？这是不是一种更好的方法，这是否又是你必须采用的方法？就像爱因斯坦在被问到这些问题的时候回答的那样：这是你现在解决问题必须采用的方法，因为我们没有任何新的物理情景。

所以最终一个更大的问题是：首先，我觉得他寻找大一统理论的初衷是因为不能容忍量子力学。当他开始战斗，开始被推向那些在量子力学领域的人的时候，他们反推回来，并且说：“我们只是在做你当年做过的事情，我们质疑每一个假设，除非你得到了观测证据，不然没有理由说它存在。”爱因斯坦回答说：“的确是这样，但是这种想法现在没有任何意义。”他们回应：“你一直都在质疑权威，质疑未被验证的事物，而现在你却在反对我们这样做。”

爱因斯坦说：“为了惩罚我对权威的蔑视，命运将我变成了权威。”他想说的是，他不再只是个单纯的“反叛者”了。在他推进大

一统理论的过程中，他为什么会开始向传统观点妥协，不再充满反叛精神呢？

保罗·斯坦哈特：我想问爱因斯坦的问题与格林的相关，但是有一点变化。因为我看到了过去30年间理论物理学领域发生的一切，尤其是近几年，这使我看问题的角度有了些许不同。

在过去30年间，理论物理学领域大量新观点的井喷，简化了我们对宇宙的理解。其中一个观点是暴胀理论：宇宙曾经有一段极速膨胀时期，使宇宙变得平滑，这也就解释了为什么无论我们看向空间中哪个方向，似乎都是相同的。而这个理论当然是基于爱因斯坦的广义相对论，并且直接与他在1917年引入的宇宙学常数有关，更详细地说，这个快速膨胀过程只能发生在宇宙的早期，它在宇宙晚期并不存在。正好解释了宇宙的各向同性或者说看起来的各向同性。

另一个得到巨大进展的理论就是格林用“优雅”来描述的那个理论：弦理论。自然界中的任何事物都是由量子振动弦组成，在这个基础上，我们就可以推导出一个简单的统一理论来解释我们看到的所有物理学定律。

我们期望的是：弦理论可以用来解释微观世界，而暴胀模型可以用来解释宏观世界。

我们从这两个理论中学到了什么呢？在过去的很多年间，尤其是过去10年间，我们得到的结论是，至少是在我看来，这两个理论都没有达到预想的效果。暴胀理论并不会像它在20世纪80年代被提出时所说的那样能解释宇宙早期。它并不会将宇宙从最初的复杂性、不均匀性、各向异性，以及严重、弯曲甚至扭曲的结构抚平，成为我们现在看到的充满物质、均匀且平坦的宇宙。实际上，暴胀理论所描述的是，一旦暴胀开始发生，宇宙将会越来越不平坦，只在很偶然的情况

下会在宇宙中留下一些小区域，那里有我们熟悉的物质，并且有可能适合人类居住。

而在这些小区域中，存在一个与我们目前观测到的类似区域的可能性也更加微乎其微。所以无论暴胀理论是为了解释宇宙的均匀性，还是这种状况发生的可能性所提出的，目前来看，这个理论却完全背道而驰，我们几乎不能通过这个理论得到我们目前所观测到的平坦均匀的宇宙。

同样，我们对弦理论的期待是：对目前物理学定律唯一的解释。而从过去几年的发展来看，弦理论对物理学定律的预测并不唯一，反而有大量不同的可能，甚至是无穷的。而我们所观测到的这个并没有什么特殊性，至少没有必须发生的理由。

所以根据目前对弦理论和暴胀理论的看法能得出的一个关键结论是，宇宙的基本性质是随机的。尽管在外面可以观测到的范围内，宇宙看起来都是均匀的，但是根据目前的理论来看，我们观测到的这种情况非常稀有，从宇宙整体来说也是可能性很低的现象。我很好奇爱因斯坦对这些有什么看法。我好奇他是否可以找到一个同样类型的观点，来与目前观测的结论互洽。我自己的看法是，作为我们对宇宙的两大关键认识，我们不得不更换掉弦理论或暴胀模型中的一个甚至两个。要么进行大尺度修正，要么就完全用另一种观点来取代，这种观点需要一种强有力的观点，并且可以提出无法反驳的证据来证明宇宙为什么是现在这样。

艾萨克森：为什么会存在这种个人神学争论？山姆·哈里斯（Sam Harris）、道金斯一家以及克里斯托弗·希钦斯（Christopher Hitchens）同那些拥护者们，每每开始讨论弦理论，都会争得脸红脖子粗。

斯坦哈特：我认为大概是由于我将要提出的这个原因。在我还有其他一些人看来，基本理论已经开始分崩离析。它应该传达的是对粒子质量和它们之间相互作用的一个简单解释，然而我们得到的只是“弦理论允许大量可能性存在”。所以，对于我们目前看到的现象并没有办法提出具体的解释，它们只是被随机选中的。事实上，宇宙中很大一部分性质都是不同的。所以问题是，这是对物理学定律的一个令人满意的解释吗？从我的观点来看，如果我看到一个理论，并不叫弦理论，它提出的观点是：它可以解释观测到的结果，但同时还存在无数种其他可能。那么我会怀疑当面对这种状况时，我是否还能说出一些反对的话。

格林：你真的这样想？我不是指技术层面，但是就粒子物理学标准模型来说，经过量子场论研究者们多年的努力，这个模型终于成了理论物理学目前最高的成就以及一切理论的基石。当你研究粒子物理学标准模型所处于的框架相对论性量子场论时，你的确会找到无数种可能。如果不再有更多种可能的话，那现在这个宇宙或许可以利用这些来描述。粒子的质量可以任意变化，而这个理论仍然成立，这是内部的统一性，你可以改变力的强度、耦合常数的大小。

所以如果你将这个我们都认为十分伟大的标准模型视为景观理论的范畴，对我来说就像是你走进一扇门，对我们说：“我得到了一个能够描述全部物理学定律的标准模型！”这难道不会让大家感到兴奋吗？但如果根据你的基准来判断，我会完全忽略这个理论，因为它只是众多理论可能性中的一个。所以它和弦理论又有什么不同呢？

斯坦哈特：我觉得有一个非常重要的不同之处，没有人会觉得标准粒子模型是一个终极理论，而弦理论最初的设定就是理论的终结者。

格林：我们或许可以这样声称……

斯坦哈特：但是问题产生了，为什么人们会对它感到不安？答案是，因为无论你个人是否相信，弦理论都会被宣传为终极理论。

格林：那我不得不说，人们在这样的“风言风语”中开展工作真是非常不幸。如果你反观弦理论的历史，我在这一点上和你观点相同，人们的确在一段时间内认为弦理论是终极理论，可以描述任何事物。事实上，现在仍然可能是这样。

但我认为在20世纪80年代到90年代初期，当这个理论还处于初生阶段的时候，可能会留存下一种属于当时的繁荣。可能现在你去寻找不太容易找到，因为当时这个理论还太不成熟，你实在不能为它投入过多。许多弦理论学家认为弦理论将会帮助我们在研究物理学定律的过程中更进一步。这也可能是最后一步，但我们现在不能来评价。

但我还是认为看待这个问题最为清醒的方式是，我们有量子力学、有广义相对论，我们需要将它们放在某个框架下，让它们互洽。弦理论是完成这个任务的一种可能方法，所以我们需要继续研究它，看它最终引领我们走向哪里。如果仅凭一个理论的优势方面就来大肆宣扬它为终极理论，这种想法对我们的研究会是一种灾难。

斯坦哈特：你这种说法与现在大多数人所声称的相比，简直有着翻天覆地的不同。

格林：你真的这样认为？

斯坦哈特：当然了。情况甚至比这更严重。许多人甚至认为如果我们得到了大量甚至无穷的可能性，我们就应该接受，因为这是从弦理论中推导出来的，而弦理论毫无疑问是正确的。而它导致的多种可能，我们要将其当作真实的结论。

格林：事实上，科学家尤其是弦理论学家，他们经常会描述自己的工作，但却并不会提到与此相关的条件和对应的时间。例如，我说弦理论是一种可能的终极理论，它可能能将全部的力和所有物质都统一在一个框架下。我实际想说的是，这个理论目前还并未被验证，我们希望它可以达到这样的效果，但并不能确定它是否可以引领我们走向预期的方向，所以我们需要继续探索，看最终能走到哪里。

类似地，如果你坐下来与一些人聊天，这些人认为弦理论引出了多种不同的宇宙，它是我们要思考的全新框架，而我们则生活在其中一个宇宙中。他们会说：“事实上我们的意思是，弦理论可能会帮助我们解决这些问题，所以我们想去继续研究。”那一定要是这个框架吗？我觉得他们大多数人会回答你：“我们并不清楚，我们只是在黑暗中摸索，因为这是目前统一广义相对论和量子力学最好的方法，而我们将继续向前，看可以得到什么。”他们并不会说绝对会到达某个结果，只是我们研究问题必须要有一个预期的目标，如果你不知道会走向哪里，那就“跟着感觉走”，看它可以把你带向哪里。

斯坦哈特：但是人们甚至不满你可能会接受多种可能性：终极理论对物理学定律的解释有无数种方式。这是不应该被接受的观点。这应该被视为失败中的失败。事实上，我们看向宇宙的任何方向，只能看到一套物理学定律。并且，宇宙是平滑且均匀的，比人们生存所需要的更加平滑和均匀。而我们现在则需要接受这样一个观点，在我们看不到的地方，存在一个更完美的宇宙，与我们完全不同。这是科学还是一种形而上学的理论呢？

艾萨克森：的确是这样。我们刚才一直在讨论它引起了如此的热情，然后直接探讨了弦理论。我想把话题带回到爱因斯坦。在你说过的话中，有两处让我觉得特别有趣。第一，20世纪物理学的两大支柱，广义相对论和量子力学，我们应该找到一种方法让两种理论互

洽。当然爱因斯坦会完全相信，因为他热爱大统一。第二，他和牛顿在同一件事情上达成了共识：大自然热爱简单。但是我经常在怀疑一个更加形而上学的哲学问题：我们如何知道上帝喜欢简单？我们如何知道他想让这些东西互洽？我们如何知道量子理论和相对论必须是不矛盾的？

格林：的确有一些人提出过这样的观点，这些理论事实上并不需要互洽。我从来没有被这种想法说服过。对于我来说，我们谈论这些规律，尤其是量子理论不是仅仅用来描述小事物的，它们一开始的确是为了描述微小事物而生的，但是它们的某些特征证明它们可以描述更加广的范围。量子理论是用来描述各种尺度的万事万物的理论。

广义相对论一开始是用来描述宏观事物的，因为只有在这种状况下，引力才开始起作用。当你观察广义相对论的方程，在原则上它可以被用于任何微小尺度上。问题是，当你将其用于太小的尺度时，会注意到这两种理论存在很大的不相容性。此外你会意识到，宇宙的不同区域分别对应这两个理论的作用方位。例如，黑洞，你可以说它是从一个恒星开始演化，当其中的核能消耗完时，在自身的引力作用下坍缩，不断变小。在某个节点，这个恒星变得过小，而此时量子力学的作用开始变得重要。而引力的作用是一直存在的，因为这个恒星的质量非常大。如果这两个理论不是同时作用，你如何来描述恒星坍缩的过程？

艾萨克森：这对大爆炸理论来说也正确吗？

斯坦哈特：是的，这就是为什么宇宙学是解决量子物理学和引力如何关联的主要战场。你无法避免要同时使用两种理论来解释宇宙如何产生、是否有起点，或者在大爆炸之前发生了什么。

艾萨克森：那么想象这样一个宇宙，在其中，这两种理论并不是完全互洽的。这个宇宙是不可能存在的吗？

斯坦哈特：这会是个错误的结果，你将会在其中发现众多不和谐之处。

格林：尽管弗里曼·戴森（Freeman Dyson）对此有着不同的看法。

斯坦哈特：是的，我也想说，我不能理解他们……

艾萨克森：这就是我问题的出处。但是我试图避开弗里曼·戴森，怕我理解错了他的意思。

斯坦哈特：但是你问了一个很好的问题：“我们是如何知道这一切的？”答案是，我们并不知道事物会向简单的方向发展。但是历史上发生过很多有意思的事情让我们认定了这个结论。我们试图寻找一种自然所需要的简单性，来推进对宇宙小尺度和大尺度的理解，特别是当我们观察宇宙时。现在我们可以看到宇宙可观测的最远处，在那个位置上，宇宙的物理学定律还是相同的，物理条件与可观测的宇宙也是类似的。

在有十分强大的反对证据之前，我想我们都会一直坚持去寻找统一理论和自然的简单性，看看它们最终可以将我们带向何方。我对于科学方法没有所谓的道德原则，我只是单纯地认为，这是人类目前掌握的利用已知得到新知识的最有效的方法。如果我们发现其他一些理论可以帮助我们走得更快，我们当然会采纳，但就目前来说还不行。

艾萨克森：所以，认为物理学定律在某个水平上会得到统一，只是这个框架中非常基础的部分，而这样我们将会最终得到更为简化的自然规律，而不是更为复杂的。

格林：前提是只要你愿意根据你对宇宙越来越多的了解，来调整你对简单和复杂性的判断。如果你将量子力学引入牛顿的理论系统，一开始当然会觉得非常复杂，因为这两种理论完全运用了不同观点的数学方法，调用了一些你无法直观判断的不同概念。这当然会使你感觉到非常复杂。但是当你对它研究了很多年，适应了它与众不同的特质，你在看它的时候就会觉得这不过是一个简单的小方程——薛定谔方程罢了。

从单纯的数学出发，这是一个线性方程。从技术方面说，这是最简单的一类可求解方程，并且它描述了数据特征。所以这个时候你对复杂和简单的判断标准就发生了变化，因为虽然这个框架对于十六七世纪的研究者来说是非常奇特的，但是根据现代观点，当你重筑了审美体系之后，这个理论看起来就十分优雅和简单了。

艾萨克森：你经常用到“优雅”这个词。

格林：它现在已经逐渐变得平庸了，但是如果一个理论可以总结为一个小小的方程，而这个方程可以被印到一件T恤上，那在大多数人来看，的确是足够简单了。当然，广义相对论和量子力学都可以做到这一点。

艾萨克森：爱因斯坦曾和利奥波德·因菲尔德（Leopold Infeld）一起在1938年写过一本书，书名叫作《物理学的演化》*（The Evolution of Physics）*，现在想找到这本书可不怎么容易。我把这本书从头到尾读过两三遍，因为我喜欢他们的思路。他们写这本书是为了糊口，因为那是在30年代，有希特勒、有难民。这是一本非常流行的书，但是其中却蕴含着非常深的哲学讨论，出版商在我的敦促下，正打算再次发行。

书中非常深层的哲学讨论是，最终起作用的理论将是场理论。它从伽利略开始，谈论了物质和粒子，并且提出，最终这些融合必然是通过场理论。那本书还讨论了场理论和物质理论是否会存在巨大差异。

格林：其实你可以将这个问题更进一步：在取得巨大成功的场理论和弦理论之间是否存在不同呢？因为弦理论一开始提出的观点就与单纯使用场理论方法所得到的不同。

在过去的10年间，弦理论最重要的一个观点和最重大的结果，就是找寻相互关联，或者说场理论和弦理论的等价性。尽管弦理论开始于一个与众不同的观点，你对它的研究也可以完全不理会场理论，你意识到的。

艾萨克森：它们之间的数学方法难道不是不同的吗？

格林：数学方法一开始是不同的，但是关于弦理论，在过去10年间最惊人的一个发现是它的“二象性”。你可以将其看成一种东西，也可以看成完全不同的。但是如果你用充分的强度和精度去研究它们，你会发现事实上这两种可能是相同的，只是所用的语言不同。就像一本书有法语和梵语两个版本，它们看起来不同，但是如果你有一本字典将它们关联起来，你就会发现这其实是同一本书。类似地，我们有用弦理论的语言描述框架下的弦理论观点。**艾萨克森：**一种数学语言而已，它依旧还是非场理论。

格林：一种数学语言感觉起来是非场理论，看起来也是非场理论。然后你有一个在量子场论语言框架中的场理论，它们似乎不同，看起来也不同，但是我们已经对“字典”做了充分的研究工作，足够让你发现，“这其中的这些元素对应那里的那些元素”。反之亦然，

你会突然意识到，原来这是在描述同一件事情，只是用了不同的语言。

艾萨克森：这是不是一种基础的二象性在量子力学核心处的反应？

格林：不是，这是另一种不同的二象性。斯坦哈特对此可能有不同的观点。你所提到的二象性是每种方法所固有的，与它们所讨论的是同一理论的事实无关。它们之间有一种研究者不希望看到却埋藏很深的联系，但是在某种程度上的确显示出了弦理论与场理论并没有巨大的差异，它依旧是场理论。这是非常特殊的一种，用另一种不同的方式组织起来，使人们对它的第一印象与场理论不同。但是它基本上确认了你对70年前那本书所说过的话：场理论的确是一个可以引领我们走向下一步的工具。

斯坦哈特：我不知道你对这样的说法有多大信心，因为这基本上只是在描述你利用的数学方法。这就和说“我将利用微积分来解释这个问题”一样。而场理论的确可能是比较好用的数学工具之一，似乎我们在得到最终答案的过程中还要发现新的数学工具。我想我们中的大多数，包括爱因斯坦，都倾向于少依赖工具，而多依赖背后的物理学概念。

我想回答你提出的一个问题，即你对简单的质疑。我应该强调以下内容。当看向宇宙时，如果我们发现了不同的物理学定律、不同的引力、不同的电磁力，或者其他与我们附近宇宙的差异，就像相信弦理论的人所预言的那样，那么我们就会根据这样的实验结果得出一个结论：我们并没有生活在一个简单的宇宙中，弦理论的景观图景是正确的。我们也会生活在一个无法完全理解的宇宙中，因为它的不均匀性以及我们处于地球上的这一限制。接下来随机宇宙的观念将被引出。当看向宇宙时，一切将与我们在周围观测到的景象完全不同。

艾萨克森：我认为爱因斯坦事实上也有一点类似的想法。20世纪40年代后半期，量子力学得到了很大发展，此时他已经人入暮年，但依旧在不断发现越来越多的粒子和力，当他和瓦伦丁·巴格曼（Valentine Bargmann）、彼特·伯格曼（Peter Bergmann）以及他所有的助手站在黑板前时，他甚至都没有想过将这些粒子和力融入理论中。他被一个事实所压抑，那就是自然似乎非常乐于接受被发现的越来越多的粒子和力，虽然它们可能互相矛盾。

斯坦哈特：尽管我猜测爱因斯坦可能会非常喜欢弦理论的概念，但并不是所有弦理论学家都和我有同样的想法。但是我将这视为对爱因斯坦将物理学定律几何化的工作的继承。爱因斯坦将引力变成了晃动的果冻空间，而弦理论则将宇宙中的任何事物、所有力、所有物质构成，变成几何化的、振动或晃动的事物。弦理论还运用了高维的观点，这也是爱因斯坦心头好之一。

我之前的观点都是针对弦理论的近期发展的，我更情愿用崩塌来描述。我不确定爱因斯坦会如何看待，但我充分怀疑他会反对这个观点。我读过爱因斯坦在20世纪50年代说过的一段非常有意思的话。他说，在创建统一理论的过程中他失败了，并且他怀疑还需要更长的时间才能获得成功。原因是，物理学家们不再懂得逻辑和哲学。我认为这个观点非常有意思，他没有提到数学，反而提到了逻辑学和哲学。

艾萨克森：他实际上感受到的是，他越来越像一个现实主义者，而“是否存在需要科学去发现的、独立于我们观测事实的物理实在”这个问题，在他眼里更像是一个哲学问题。而这个问题太过时了，他将他们称为新实证主义者。你怎么叫他们都可以，但我认为量子力学领域的大多数人都不会认同独立于观测之外的、为物理学定律奠基的理论，而这将是你构建科学大厦过程中重要的哲学柱石。这就是他在哲学方面的问题。

斯坦哈特：我理解的颇为不同。在那个时代，有一种叫作美国态度的看法占领了主要地位。这种态度导致了物理学和哲学上连接的断裂。你要注重那些可以被计算出的东西：利用你的理论，作出一定的预测并计算，利用实验来验证计算结果正确与否，远离一切哲学问题。在这种方法下，有些观点认为我们可以在科学方面逐渐取得进步。

艾萨克森：是的，这是一个非常好的论点。他很有可能就是这个意思，因为他同样是这个观点的拥护者。

斯坦哈特：所以实际上大一统理论超出我们研究能力的原因是，如果你没有深层次的哲学思想引领，你永远也找不到前进的方向。我认为这是一种非常有趣的观点，因为它同时也反映了我对宇宙学和基础物理学走向的关心，我们有可能会迷失方向。当然引入哲学可能并不是一个十分时髦的方法，但或许是一种健康的方法。

格林：我们研究组中是有一些哲学家成员的。

艾萨克森：或许还需要美术、音乐。

格林：我并不是指那些。我们有一个组在研究时间的方向这类问题。时间的方向从何而来？为什么时间只有一个方向？这个问题是哲学家研究了很久的问题，而当我们讨论多种可能性的时候，他们会对我们的讨论方向做一个正确的引导。他们可以看到这些结果并对我们说：“等一下，你在说的这个问题我们早就已经解决了，所以让我来给你解释一下。”

我们发现，与哲学家们的交流非常有效，虽然他们没有学过量子场论，不像研究生和研究员那样有非常坚实的物理学基础，但是他们

会倒退一步，解决一个更广的问题，并且从更加基础的层次来思考。这真的非常有效。

艾萨克森：让我们来回顾一下历史。1900—1915年，对于我来说是充满了探索和发现的时代，或许因为对爱因斯坦的研究有些许偏见。在这段时间内，量子理论和广义相对论都有了长足的发展。而这些发展多数都是在哲学和哲学家的推动下发生的。如果你问爱因斯坦谁对他的影响最为重要，他可能会提到迈克尔逊和莫雷。他也会说："虽然我不知道我是否读过他们的论著，但我经常和恩斯特·马赫（Ernst Mach）和大卫·休谟（David Hume）等人一起讨论，正是他们带领我们迈出了创造性的一步又一步。"

如果我问为什么我们会在1900—1915年间取得巨大的成功，这一定是一个非常有意思的问题。显然在科学上，甚至斯特拉文斯基（Stravinsky）和勋伯格（Schoenberg）都说，"我们不需要拘泥于经典"。或者普鲁斯特和乔伊斯或者毕加索和康定斯基都冲破了经典的藩篱。但是尤其在科学上，这些进步背后的推手中，像恩斯特·马赫这类与其说是物理学家，不如说是哲学家的人，作出的贡献更为重要。

斯坦哈特：根据我的记忆，这些繁荣都伴随着20世纪20年代量子力学的发展而停止了。在之后，科学家们所作出的努力都是为量子力学寻找一个解释。他们说："不要再为解释的问题烦心了，我们要做的事情是去计算并且得到对新现象的预测。"然而由于存在太多新现象需要研究，所以这耗费了数代理论学家的时间，他们不再考虑如何解释以及其中的哲学思想，而只是单纯地沿着一个方向不断去计算。而当与哲学的联系被破坏时，物理学与哲学相结合的方法就遭到了轻视。当时甚至有人认为哲学会分散你的注意力，使你无法发现很多有趣的现象。现在或许就是纠正这一错误思想的时刻了。

你看，因为物理学家提出问题就可以立即用实验进行验证，所以近些年在物理学上取得了巨大进步。实验和理论之间快速的对应已经持续了大概一个世纪。每当获得新的观测结果或者一个新的实验被提出，就会存在一个新的问题；你可以进行新的计算，其他人则会做对应的实验。新的物理结果随着这种从理论到实验的反复过程，不断出现。但是现在我们到达了这样一个阶段，基础物理学方面的重要实验出现突破性结果的时间间隔很长，对粒子物理学来说，可能是几十年。我们并没有实验的引领，也没有哲学作为基础。或许我们需要的并不是一个新的实验，而是向哲学寻求一个“灯塔”。

格林：在美国公共广播公司（PBS）之前对弦理论做的特别节目中，许多人都接受了采访，内容是关于弦理论至今得到的预言，都没有被实验验证。而这些物理学家的回答，大多数的意思都是说，如果弦理论不能或者还未作出过这种预言的话，那这就是哲学，而不是物理学。

在看这个系列节目时，我心里一直对自己说：“可怜的哲学家。”哲学并不是不成功的物理学，也不是未达目的的物理学；它只是一种分析事实的方法，只是不像数学对物理学家来说用得那么频繁。我认为，现在哲学领域有很多值得深思的想法，在我看来，如果这种碰撞发生的越来越多，那么我们将会经历一个周期。

斯坦哈特：是的，我们曾讨论过弦理论中一个比较有意思的事情，即当我们面对如此多的可能性时，一种解决它的方法是人择原理，就是说人类存在这个事实本身就是选择效应。这可能是哲学家们考虑比较多的一个方面。他们相比于物理学家更早地发现了这个缺陷。

格林：我完全同意你的观点。我们可以回到你刚刚提到的对弦理论已经开始走下坡路的评价吗？它对我来说是非常强烈的负面评价，

我怀疑我是否完全理解了你的意思。

当人们观察弦理论的历史时，成就是非常多样化的，就像你熟悉的那些，比如对时空奇点的看法、镜面对称、拓扑变换、对某种对称结构的解释、对物质粒子广义结构的认识以及对规范理论的认识，除了可以统一广义相对论和量子力学之外，还有这些特征。事实上我对此感到非常兴奋，我们或许还有其他路可以走，因为目前我们并没有得到弦理论与实验间的关联。但对我来说，我们面前仍旧有一条路要走，无论它最终是否可以将我们带向同样的预测结果。我不认为我们现在可以评价它，并说这个理论已经开始崩塌了。我可以说这个理论已经走得足够远，但是我们还有更远的路要走，直到我们知道现在做的一切正确与否。这在你看来是不是一个不好的评价？

斯坦哈特：我的观点之前表达得不太清晰。我是说，多种可能性，如果是理论的终点的话，就是理论的崩塌。在多种可能中有一种……

格林：我打断你的原因是，我听过很多人和你有同样的观点，都是因为听某些理论学家将这个弦理论推向了一个特定的点：弦理论最终的结论就是，有很多很多的宇宙，我们的宇宙只是其中一个，之后并没有任何其他解释。这种观点可能是正确的，但也有可能是错误的。但现在这个时刻，我肯定不会说这个点就是弦理论的终点。这只是某些研究者停靠的小站，而其他一些人还在另外的路途上努力前进着。

斯坦哈特：相比于我听过的其他人的观点，你的说法更加合理。我很愿意看到你承认多种可能性是理论的崩塌，并且这不是一个可以接受的……

格林：弦理论的多重宇宙版本，你是想说这个吗？

斯坦哈特：是的。但是请让我补充一点，我可以想象有很多方法可以逃离理论的崩塌。其中一个是发现弦理论中一些新的观点，来证明多种可能性并不是弦理论的预测结果。毕竟，目前其中的数学方法也并没有那么牢靠。或者，第二个方法，就算是有多种可能性，或许有些人可以找到一些理由来解释宇宙中几乎所有地方都对应其中一个可能性的原因，这一个可能性就是我们目前观测到的。又或者弦理论现在的形式是没有问题的，但是你必须要更改宇宙学，而这个更改则将会使多种可能性消失。所有这些补救对我来说都是可信的。

我不能接受的是现在的这些观点，它们只是简单地接受了多种可能性。不仅因为它是一次理论的崩塌，而是因为它对之后所造成的影响非常恶劣。如果你一旦接受这样一个理论，有无数种可能，而我们所观测到的只是其中一个，那么科学真的无法否认这种观点。就算将来有新的观测事实或者新的实验结果，无论它是这样或者那样，你都可以声称我们只是恰好生活在这种可能性发生的区域中而已。事实上，这种观点最近已经被应用了，用来解释理论学家们发现的暗能量中与自身预测不相符的部分。问题是，你没有办法否认，也没有办法去证实。

格林：你可以想象，在多重宇宙中有某些特征是相互关联的。

斯坦哈特：你当然可以这样想象，但是你永远不能通过实验证实。

格林：不，我的意思是，你可以从数学上发现，在所有这些宇宙中，性质X可能是不变的。

斯坦哈特：你是说，从弦理论中推导出来的？我相信这不是真的，也相信没有这种可能。

格林：的确，这是一种“信仰”，它并不是建立在任何推算结果上的。

斯坦哈特：好吧，我觉得如果你向我提出这样一个理论，我可能会24小时不停地思考，然后得出一个替代理论，性质X并不是一个普遍性质。有些人会说：“某些性质是普适的，另外一些则不是。”然后第二天，则会有其他理论学家写这样一篇文章，反对这种观点。这对指导理论发展并没有任何决定性的作用。

格林：我同意这绝对是一种展现事物的方式。但是我听到你说你无法想象如何否定那些观点，事实上，我已经找出了否定的方法。

斯坦哈特：它或许在理论上是成立的，但实际上我认为不会发生。如果某天预言多种可能性的弦理论被否定了，我认为支持者也不会放弃弦理论的。我猜会有一个非常聪明的理论学家提出某种改变来规避冲突。事实上，我们在多重宇宙理论上所经历的事情就是这样的。在实际中，永远没有足够的观测实验或者足够的数学限制，来否定多重宇宙的可能性。同样的原因，这就意味着没有确信的预测可以决定这种多种可能性的正确与否。

格林：我同意你的观点。但是根据我的理解，你无法理解弦理论认为终点是很多很多宇宙这个观点。

斯坦哈特：是的，我认为这个观点是需要修正的。

格林：但是你也同意弦理论本身并没有崩塌，只是这种理论的一个特殊走向的结局你不能接受而已。或许你该想的更远一点。

斯坦哈特：是这样的，就像你之前说的，有些人认为那是终点，而我不能接受。如果你相信的话，那是时候抛弃这种想法了。

格林：但这只是那些人想法的失败。

斯坦哈特：是的，这个观点是错误的，并且需要改正。我并没有在争论弦理论需要被抛弃。我认为它承载了太多的承诺。我只是认为它现在的处境非常危险，需要一些新观点来解救它。

让我们回到爱因斯坦。一个非常有意思的问题是，与他同时代的激进物理学家们是如何被保守派的物理学们所完全替代的。

艾萨克森：我比较感兴趣的是，激进的爱因斯坦是如何被1925年保守的爱因斯坦所替代的。这么说虽然有些夸张，但是当他对量子力学作出最后的伟大贡献也即玻色-爱因斯坦统计之后，他几乎立刻从一个否定一切的斗士变成了一个反对量子力学的现实主义者。他在1927—1931年间的索尔维（Solvay）会议上，曾把量子力学的研究者们称为激进分子，而他们反称他为荒唐的保守派，并说他抛弃了他当年质疑一切时的激进主义。

这是物理学领域一个比较重要的主题：为什么你曾经认为自己是一个激进分子，然后等到了50岁，无论你是在编辑《时代》周刊或者做理论物理学研究，你就忽然开始说：“不，我们不能这么做，我们曾经尝试过，行不通。”

如果让我给爱因斯坦的保守主义一个原因，就会回到斯坦哈特谈到的问题，哲学，在其核心思想中，这就是所谓的现实主义。爱因斯坦不喜欢量子力学的原因有三四个。如果你要从中挑出一个，可能并不会发现什么十分严格的因果，尽管如此，他还是说严格因果是牛顿给我们最好的礼物。这是对现实主义的抛弃，而对他来说则成了经典物理学的基石。如果你要定义保守主义，我想这个定义会维护经典的规则，而激进地抛弃过去。这就是爱因斯坦在1925年所做的事情。



WE SHOULD DIG INTO THEM, AND DEEPLY, FOR THEY ARE TRANSFORMATIVE MOMENTS OF OUR CULTURES.

我们应该往更深处挖掘，因为这可能会是人类文化的转折点。

——《爱因斯坦与庞加莱》

15

Einstein and Poincaré

爱因斯坦与庞加莱

Peter Galison
彼得·伽里森
哈佛大学约瑟夫·佩里格雷诺（Joseph Pellegrino）驻校教授，哈佛大学科学仪器历史收藏馆（HSI）负责人；著有《爱因斯坦的钟表和庞加莱的地图》

当1979年庆祝爱因斯坦诞辰100周年的时候，在各种活动上的发言者们都只会谈论物理学理论。这在我看来非常奇怪，像爱因斯坦这样从专利局小职员起步的传奇人物，他对实验领域产生了非常深远的影响，却只在后人心中留下了如此印象。我对爱因斯坦的兴趣就始于那个时期。除了爱因斯坦之外，我还着迷于实验和理论相结合时碰撞出的惊人结果，并对工艺知识与理论物理学间的紧密关系而感到惊艳。

多年来，我的工作一直被抽象知识和具体事物之间的对抗牵引。科学史、社会学和认识论对于我来说是非常相关的，而我在科学史方面所做的工作总是被哲学问题推动和阐释。例如，我对如下问题十分感兴趣：什么可以作为示范？根据示范所完成的工作意味着什么？实验者如何区分实验结果是真实的，还是仪器或环境造成的影响？我们

认为自己了解数学推导的意思，但如果我利用计算机模拟，这又意味着什么？如果我做了一个模拟，表明彗尾会形成一个岛，那我得到的这个结果是否可以成为解释这个问题的开始，而它之后还需要更多的数学分析？

这个问题到现在依旧困扰了很多领域的研究者。这些问题无论是从历史学的角度，还是从认识论的角度看都是不可避免的，因为他们不仅是正常的科学实践，更是哲学的基础。当我选择研究某个问题时，常常是因为它的光芒是所有这些因素共同作用的结果。

20世纪70年代，我和其他一些历史学家、社会学家和哲学家开始关注仪器和实验室，虽然在科学史中强调实验方法有些奇怪。继哲学家托马斯·库恩的工作之后，大多数历史学家和哲学家对此非常热忱，以证实所有科学都是由理论产生的。我假设这是对20世纪20年代到50年代间实证主义的一种反应，哲学家们坚持认为所有知识都来源于看法和观测。关于什么是实验室，实验室从何而来，又是如何运转的，并没有多少实际工作。在那之后，对实验历史和动态变化的研究成了越来越重要的研究方向。我并不仅仅只是对实验室本身感兴趣，同时也对所有抽象的理论也感兴趣。举个最近的例子，我正在写关于弦理论的文章，尤其是关于数学家和物理学家之间的对抗，他们试图去找出什么是这个有史以来最抽象的科学理论的示范。

在所有的实例中最吸引我的就是，哲学问题是如何从具体和抽象两个层面阐释科学实践，并被科学实践阐释的。而且我常常强烈打击那些中庸的概括和探索，正如《爱因斯坦的钟表和庞加莱的地图》（*Einstein's Clocks and Poincaré's Maps*）一书所说的那般，它将最抽象和最具体结合在了一起。相比于考虑一个从紫外到红外容纳其中所有波段的平滑光谱，我更倾向于用弯曲光谱的边缘去研究每一部分的抽象理论和具体实验。

几年前在我开始工作时，科学史仅仅关注那些想法和理论的出处。而实验和仪器，似乎没人对它们有兴趣，只是对理论产生贡献最小的一个部分。我的工作开始于对某些特定仪器产生兴趣，或者说仪器是如何使用的，如何将知识作用于实践，解决人们所关心的问题。我的第一本书《实验是如何结束的》*（How Experiments End）*，当有某种特定的目的之后，实验学家们如何决定是利用小的桌面仪器进行实验，还是进行一个囊括数百人的大型实验。

之后我转向物理学中的另一群人，他们不仅对实验而且对机器本身感兴趣。我想知道某种特定的实验仪器是如何实现其价值的。举个例子，像类似于云室（cloud chamber）或者气泡室（bubble chamber）这样的仪器，如何产生图像，并成了几乎整个20世纪物理学家们所有证据的来源？像盖革计数器（Geiger counters）这种有趣的小东西，每当有辐射物质靠近的时候都会发出一个声响，如何产生了一种新的统计方法？而令我十分感兴趣的是传统和创新的冲击，传统科学家们总是试图拍照片，通过看到的东西来了解，而创新物理学家们则试图利用计算机程序来结合更多的信息，来产生一个逻辑上的示范。我的第二本书《图像和逻辑》*（Image and Logic）*就讨论现代物理学领域互相对垒的这两大阵营。

最近我一直在关注物理学中的第三种人群：理论学家。我想知道理论学家在提出一种物理学抽象观点时在多大程度上与某些特定的机器或设备有关，无论这些抽象观点是量子场论、相对论或者其他任意一种理论。特别是，在《爱因斯坦的钟表和庞加莱的地图》一书中，我就提到了19世纪末期人们同时对时间和钟表的广泛关注。在某种程度上，这是一个抽象且偏哲学的问题，但是这里面仍旧包含着纯粹的技术问题。比如，你如何创建映射，或者通过海底电缆传递信号？你如何定位和分流火车，这样它们在同一个轨道上相向而行的时候不至于迎面相撞？最终我对理论学家的关心引领我去关注对19世纪末期的

物理学家们来说最为紧迫的一个问题：当一个物体通过当时人们所称的“以太”的东西时，电和磁是如何工作的？

我对科学中物质的兴趣起源于童年时代。我那活到90多岁的曾祖父，曾经受训于柏林，之后成为托马斯·爱迪生实验室的一名电力工程师，而我和他一起在那个实验室的地下室度过了很有意义的一段时间。我被他所做的工作吸引了。那个实验室就像电影《科学怪人》描绘的一样，有着巨大的单刀双掷开关、黑暗中巨大的电弧、架子上排列着的一瓶瓶水银。我喜欢那个实验室的每一个角落。我17岁时从高中毕业，到巴黎综合理工学院（Ecole Polytechnique）学习物理和数学。我有幸从师于一位非常伟大的数学家，洛朗·施瓦茨（Laurent Schwartz）。我去过法国很多次，会说法语，并且因为对欧洲当时的政治非常感兴趣，所以希望再次去法国。我觉得如果我有唯一一次机会可以在一个有趣的地方工作的话，那么一定是和物理学相关的，所以我给不同的物理实验室写了信。而一个17岁的美国男孩写信给巴黎综合理工学院，这可能使他们对我的信格外重视。

当我开始在那里学习后，我对哲学问题非常感兴趣，并且认为学习物理学是解决其中某些问题的途径。我在一个等离子体物理实验室工作。当时那个实验室还可以做一些小型桌面实验，而现在他们只能利用实验室中的巨大机器来做实验了。我对实验室里的设备非常着迷，信号发生器、记录仪、示波器，并且对“理论知识是如何最终产生实验器械”这一问题感到十分好奇。在哈佛大学，我找到了将历史学和哲学结合起来的办法，并且利用这个方式进行了很多物理学研究。

这将我带向了爱因斯坦。

我们今天对爱因斯坦的了解都是基于他人生的后半段，也即当他开始将自己与世俗隔离开，将自己视为一个来自其他世界的人物时。

爱因斯坦曾说过，对理论物理学家来说，最好的生活方式就是去做一个灯塔管理员，与外界完全隔离，只有这样才能拥有最纯净的思维。让我们抱着对理论物理学家这样的看法，再去回看爱因斯坦的奇迹之年，1905年。你很容易就能明白他在专利局的那份工作只是为了糊口，他真正的工作是纯脑力工作。这样分裂的存在对我来说是完全不可能的。我开始思考他在机器和物体方面的细节工作对那些抽象观点有怎样的联系，并且开始考虑相对论本身是如何从与其相关的时间、地点和机械中产生的。

几年之后，在1997年的某一天，我在北欧的一个火车站，看着站台上那些完美设定的钟表。所有的分针都相同。我想：“天呢，他们当时做出了这些非凡的钟表！这是多么完美的机械！”但是我之后注意到，所有的秒针也都是同步的。于是我想，这或许是因为它们不是什么好的钟表，它们只是靠电子信号实现同步的。或许爱因斯坦在写关于相对论的文章时也有同样的这些表。

当我回到美国，我开始调查瑞士、英国、德国、美国的专利和工业记录，发现在19世纪末期的确有很多生产协调时钟的地方。突然，爱因斯坦在他1905年的文章中提出的那个隐喻变得没有那么独特了，文中他质问我们什么叫作“同步”（simultaneity）。他说，想象一列火车驶入你所在的站台。如果当火车停在你眼前的那一刹那，你的手表恰好指向7点，那么你就会说火车到达的时间和你的手表显示的时间是同步的。但是如果你说，当距你很远的火车站有火车到达时，你的表刚刚指向7点，这又代表了什么呢？

之后爱因斯坦提出了一套理论去解释什么是协调时钟，并解释了什么是同步。之后这个定义成了他理论的基础，并且引出了令人吃惊的结论：同步取决于参考系，不同参考系中长度的测量是不同的。他还得出了之后令人惊人的关于相对论的结果。突然间我意识到，爱因

斯坦所有对火车和站台的抽象比喻事实上也只是完全的比喻。除了将自己隔绝在灯塔中的那个人关心同步的定义外，有很多工业界的很多人也在关心远处的火车站有火车到达到底意味着什么。之后他们就通过电报向距离非常遥远的车站传递同步电信号来实现同步，这就和爱因斯坦在他的文章中所写的几乎完全相同。

所以我开始看向更远，除了上文提过的人之外，19世纪末期谁还会关心同步的问题呢。后来我发现，有一个伟大的法国哲学家、数学家和物理学家亨利·庞加莱和爱因斯坦有同样的观点。他也想对绝对同步的观点进行非难，试图得到一些可以测量的量。

不像爱因斯坦使用了火车和站台，庞加莱选择了他的喻体：一条线上的电报信号交换。在他1898年1月一篇非常著名的哲学文章中，庞加莱说同步就只是信号交换，就像两部电报机试图去确定它们之间的经度差是多少。你看，如果地球是静止的，我们可以非常简单地通过抬头看头顶的星星来确定自己所处的经度。但地球是转动的，所以对比两地的经度，要通过看两地上方的星星来确定，则需要同时测量。因此，几个世纪以来如何确定同步都是地图制作者们最头疼的一个问题。19世纪末期，人们通过海底电缆来传递电时间信号，有趣的是，庞加莱正处于这件事情发生的时代。1899年他当选为巴黎经度局（Bureau of Longitude）的主席。1900年12月，他将自己通过哲学和技术手段得到的时间定义带入了物理学。他展示了当电报机在以太中运动时，如果调整它们的时钟，那么就算是对“真正的”以太静止系，时钟也是同步的。庞加莱提出的同步的新定义建立在三个领域的基础：哲学、技术和物理学。

尽管庞加莱在他同时代的人中是一位非常著名的哲学家和数学家，他还是一个技术很好的工程师，曾在巴黎工程学校（Ecole des Mines）受过工程师训练，之后成了法国综合理工学院一名杰出的教

授。庞加莱的故事提醒了我：像爱因斯坦一样，当庞加莱在使用确定经度的电报机打比方时，他同时用比喻解释了字面上的意思。他改变了物理学的一个重要概念，同时又解决了地图制作者们的一个难题。

虽然不如爱因斯坦那么出名，在世纪之交，庞加莱最著名的哲学著作《科学和假设》（*Science and Hypothesis*）与《科学的价值》（*Science and Values*），成为法国当时的畅销书。它们对现代科学哲学有着深远的影响，并且今天仍旧被用作哲学课程的教材。这些著作最初被翻译成了各种语言，包括德语和英语，因而可以被广泛传播。庞加莱开启了数学的一片新领域，包括拓扑学。他帮助建立了混沌科学，我们目前所知的一些复杂科学都有他的贡献。他同时也对相对论和其他物理学分支有很多重要的贡献。庞加莱是一个真正博学的人，他甚至在工程学方面小有成就。他是拯救埃菲尔铁塔的人之一，因为他看到了它作为军事天线的用途。事实上，根据庞加莱的各种预测，埃菲尔铁塔本身就是一个巨大的天线，可以向全世界传递时间信号，帮助从加拿大到非洲最尽头的人们测定经度。他自如地在工程学和抽象的数学间转换，并在很多领域留下了丰富的财富。他对时间的思考也是其众多成就之一。

在对庞加莱有了更深的了解之后，我试图去理解为什么他和爱因斯坦可以从哲学的抽象角度、物理学角度理解那些科学问题，包括如何使两列火车不相撞或者怎样帮助横跨很多国家的地图制作者完成他们的任务，完全重置了我们的时空观。这一切始于一个非常简单的观点：如果在两个事件发生的地方放上两个时钟，而这两个时钟在这两个事件发生时是相同的，那么我可以说这两个事件是同步的。我如何调整这些时钟呢？我将信号从一个时钟发向另一个，并且计算其路途中经过的时间。这是基本观点，所有的相对论理论。$E=mc^2$以及爱因斯坦所有的工作都源于此。问题是，这个观点是从哪里来的呢？爱因斯坦和庞加莱两个人发现了这个关于同步的观点，我认为这是哲学、技

术和物理学共同作用的结果。他们两人正好处于这三个领域的交集中。

有时候人们会问我：“爱因斯坦和庞加莱的同步理论的基础是什么？是真正的物理学、基础的技术，还是哲学？”我认为这不是正确的提问方式。这就像问我戴高乐广场是在福煦大街还是在雨果大街。我之所以可以描述戴高乐广场的位置，是因为它处于这两条街的交叉处。这就和发生在同步上的问题相同。我们看到的是一个非凡的时刻，因为哲学、物理学和技术的交汇才导致了这个颠覆整个世纪的结论产生。这就像在一个巨大的剧院中用三束聚光灯照向同一个点，所以它受到了三倍的照明。这对铁路工程师和地图制作者来说，知道什么是同步非常重要。这对哲学家来说也非常重要，这帮助他们解决了什么是时间、什么是时钟、是什么定义了时间——是机械表、天文现象，还是在所有表象之后的抽象时间。这对物理学家同样非常重要，知道什么是同步就可以解释很多重要的物理方程，比如关于电和磁的麦克斯韦方程组。庞加莱和爱因斯坦考虑了三个方面的共同影响才得到了结论，所以这就是为什么不能单独提问某一个方面。当然，时钟不是导致相对论产生的原因，而是相对论导致了现代时钟同步化的进程。

对一些人来说，爱因斯坦和庞加莱是十分神奇的，因为你无法再想象出更加相近的两个人。他们有同样的朋友，在很多同样的出版物上发表了文章，并且研究了很多相同的问题。在他们的专攻领域，他们都是顶级专家，都喜欢写一些大众读物，都很看重哲学的作用，都对技术工程学有很大的兴趣，并受过相应的训练。因此你无法将他们分开来看。这使我想到了弗洛伊德，对他来说，读尼采的文章是无法容忍的，他曾经很多次提过这个理由：尼采的想法太过类似了，然而却是针对不同的问题。

庞加莱和爱因斯坦分别在19世纪和20世纪有了自己最辉煌的科学成就，在他们一生发出的和收到的成千上万封信中，从来没有来自对方的一个明信片。在庞加莱生命快要结束的时候，他们遇见过一次。当时庞加莱在主持一个非常重要的物理学会议，而爱因斯坦在这次会议上发表了他对光的量子态的研究。在这次会议结束时，庞加莱评价说，爱因斯坦的报告与物理学应该有的样子太不相同了，物理学应该可以利用某些因果关系、微分方程、规律和结论来表示，他不能忍受爱因斯坦的方式，并且说这不可能得到任何结果。他认为这对科学来说是个灾难。而爱因斯坦呢，回到家，就给朋友写了一封短信。信上说，他十分崇敬同事们的工作，甚至热爱这个结果，但是这一切却被什么都不懂的庞加莱污蔑了。他们就像黑夜中的两艘船一样错过了，在相对论研究领域，甚至都不知道对方的存在。但是就在这次会议几周之后，庞加莱给爱因斯坦写了一封推荐信，帮助爱因斯坦得到了一份对他来说十分重要的工作。在这封信中他强调说，就算这个年轻人的想法只有一小部分能得以实现，他都会拥有十分伟大的成就，他对科学界来说是个十分重要的人。这封信中包含了极度的赞美和慷慨之词。之后，他们再也没有互相交流过，也没有再见过面。

爱因斯坦和庞加莱的不同之处，以及他们对自身工作的不同理解，代表了20世纪现代物理学领域的两个对垒观点。尽管庞加莱的方程和爱因斯坦的相对论看起来非常相似，庞加莱总是认为他在做的事情是对过去的巩固、修正和延续。就像某个认识他人说的那样，他在填补世界地图的空白。而爱因斯坦则试图去做些不同的事情，过去的程序太复杂，我们需要的是从头开始的，纯净、朴实的定理。庞加莱认为自己在拯救法国，这是毫无疑问的，但他同时拯救的还有19世纪的物理学。他踌躇满志地想将物理学现代化，但和爱因斯坦的却并不相同。他的是修正的、改善的现代化，依赖于法兰西第三共和国的现代化。而爱因斯坦的破坏力则是更强、更纯粹的现代化。只有通过理

解哲学、物理学和技术三者的交汇，一个人才可以抓住这个世纪性的新观点真正意味着什么。

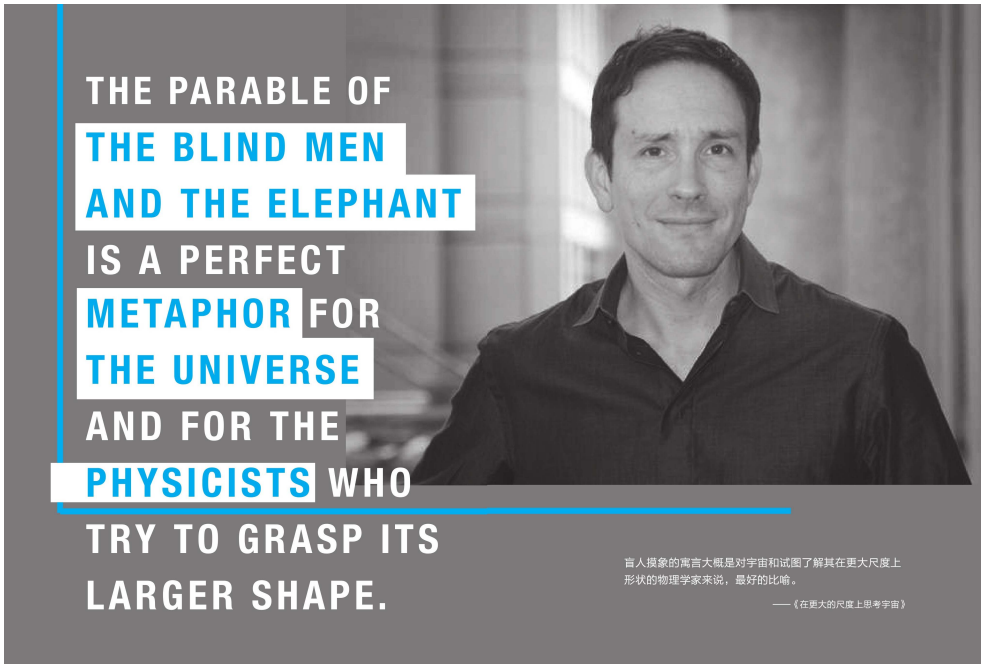
你可能会问，而且我也常常在想，现在如何考虑这个问题。或者换一种说法，现在有没有类似的三种学科的碰撞呢？我的想法是：当你考虑庞加莱和爱因斯坦的时候，你试图在很多不同尺度上理解时间的协调性和时钟的同步性。或者说，他们试图去了解如何在一个房间、一个实验室、一个区域或者一个城市中去调整时钟。而同时关心这个问题的其他人也在将电缆铺在太平洋和大西洋的海底。爱因斯坦和庞加莱不仅考虑了这些在地球尺度上的问题，也考虑了如何在宇宙不同参考系中解决。他们问：“同时性（synchroni-zation）意味着什么？同步又意味着什么？”这些问题发生在每一个尺度上，从小到大，从哲学到物理学，从电缆到火车轨道。从这种意义上来看，它并不像我们常提出的科学问题具有的性质那般，可以从某些纯粹抽象的理论开始，然后应用于物理学和工程学，最后通过实践解决。这同样也不是柏拉图式的提升，或者马克思主义的一个简单观点，其中，机械或者机械工厂将不断抽象化，最终变成宇宙中的一个理论。

一个关于时间的常规问题，即它如何和物理过程平起平坐的，是所有人都关心的。而我们需要解释这个在实际和哲学间循环往复的比喻，并不仅仅是从抽象到具体那么简单。它不是一个蒸发过程，在这个过程中，水的密度在变成蒸汽后会变小。相反，它是一种物理学家称为临界乳光（critical opalescence）的东西。常规乳光的颜色类似于牡蛎壳的颜色，所有的颜色都会被反射，就像你看到珍珠的表面或者某些壳的内部时，可以同时看到绿色、红色和白色。临界乳光发生在某些特殊的情况下，例如，在某些特定温度下的系统中水和水蒸气同时存在的时候。在这个临界点时，一些不同寻常的事情发生了。在不同的尺度上，从几个分子到整个系统，液体开始蒸发，并且同时气体也在凝结。突然间，由于产生了很多不同尺度的小液滴，导致所

有波段的光都发生了反射。如果你用蓝光入射，就可以看到蓝光，用红光入射，则能看到红光，黄光也是如此。

这是我们需要的类比现象。庞加莱和爱因斯坦在哲学问题、物理学问题和实际问题上踌躇不前。19世纪90年代末，庞加莱在杂志上发表了一篇文章，针对地图制作者和确定经度的人，同时他还在物理学杂志以及《形而上学和道德》（*Journal of Metaphysics and Morals*）杂志上发表了文章。他在这三个领域都游刃有余。

现在你可以问这个如何和现在对比。最近的科学中哪里可以看到临界乳光？在我看来是非常稀少的，但是你可以关注的一个领域是计算机科学。在这个领域，关于人脑，关于计算机功能，关于科学、代码和数学物理学全部都同时存在。冯·诺依曼利用设计计算机程序的思路，考虑了人脑和它的结构（记忆，输入、输出，处理）。之后这个程序成了人脑的模型。信息与计算技术的发展是息息相关的，它也变成了一种更加广泛的理解语言交流的方式，之后再反馈给设备。信息、熵和计算成了目前三个重要领域。这样的乳光出现的时刻并不常见，比我们所称的科技革命要稀罕得多。我们目前看到的临界乳光是完全不一样的尺度，我们在抽象和具体之间不断徘徊，它们在用一种全新的方式来解释对方，而不是像过去一样只是简单地蒸发和凝结。当看到这样的乳光时，我们应该往更深处挖掘，因为这可能会是人类文化的转折点。


THE PARABLE OF
THE BLIND MEN
AND THE ELEPHANT
IS A PERFECT
METAPHOR FOR
THE UNIVERSE
AND FOR THE
PHYSICISTS WHO
TRY TO GRASP ITS
LARGER SHAPE.
盲人摸象的寓言大概是对宇宙和试图了解其在更大尺度上形状的物理学家来说，最好的比喻。
——《在更大的尺度上思考宇宙》

16

Thinking About the Universe on the Larger Scales

在更大的尺度上思考宇宙

Raphael Bousso
拉斐尔·布索
加州大学伯克利分校理论物理学教授

伦纳德·萨斯坎德的导言：

盲人摸象的寓言大概是对宇宙和试图了解其在更大尺度上形状的物理学家来说，最好的比喻。每个人都感受到了大象的一部分，然后在此基础上开始想象整个大象的样子："它是一堵墙""它是一条绳子""它是一棵树"，意见不合几乎大打出手。而宇宙相比于大象来说，更是有过之而无不及，它在任何一个角度上都太过巨大，而我们大多数人都只是纠结于宇宙很小的一部分。

幸运的是，人类历史上总会时不时地有些人有足够的勇气与坚持，并且有足够清晰的头脑，试图探索一幅更大的图景，拉斐尔·布索就是这少数人中的其中一位。

从普适到特别，我们可以在不同层次或者不同深度上问自己一些问题。我认为，作为一位科学家，找到其中的平衡点是十分重要的。如果我们决定研究一些非常深奥的问题，我们倾向于不要走得太快。这些想法就像是指南针，但是利用某些方式来打破现状也非常重要。而我喜欢的方式是：“那些高深的问题是这一类的：如何统一自然界的所有规律？如何研究量子引力？如何理解引力和量子力学之间相互融合的方式，而这种融合如何同我们所知的物质和力是互洽的？”这些都是意义深远并且非常重要的问题。

另外一个意义深远的问题是：“宇宙在大尺度上是什么样子？”我们看到的这部分宇宙有多特殊？还有没有其他可能？这些问题都是相互联系的。但要回答它们，我们需要从一个特殊的模型开始，并且用一些特殊的方式来考虑这些问题。这些特殊的方式包括：将它们分成一个个小的部分，之后最重要的是，将它们与观测和实验结合到一起。

弦理论是一个存在很久的理论方法，然而起初它并不是为了解决这种深奥的问题而被提出的。起初它的提出只是为了了解强相互作用力，而之后它主宰了自己的“命运”，开始不断回答一些还未被提出的问题，例如量子引力。它开始先于你对量子引力进行了研究。

这是一个有争议的话题。还有很多其他方法也可以解决量子引力这一问题。我个人认为，目前弦理论是发展最好也是最有保证的一个，所以我开始利用弦理论或者探索弦理论的性质，来寻找关于某些问题答案的线索，来看看弦理论可以给我们什么。

另一个可以帮助我们打破现状，将问题难度降低到可接受范围的方法当然来自观测。我们透过窗户看到了什么？我们看到的所有东西中最值得一提的问题是：为什么晚上天不亮？这个问题听起来可能很蠢，但是当你认真思考的时候，这是一个十分深刻并且非常需要一个

合理解释的问题：“为什么星星不是出现在我们观测的任意方向？”或者和这个类似的问题：“为什么宇宙这么大？”从基础物理学的角度看，宇宙的大尺度实在是一个非常值得注意的问题。一定是发生了许多神奇的事情才使得宇宙达到了今天的大尺度结构。关于这个问题，我可以仔细谈一谈。其中一个必要条件是，真空空间的能量必须要非常小，才可以使宇宙达到今天的尺度。事实上，仅仅通过看向窗外，你就可以看到几公里之外的事物。这已经告诉我们真空空间的能量是异常小的，要在0.000和1之间加上数十个0。而这个结果，你只是看向窗外就可以得到。

有趣的是，如果你利用现有的理论来计算真空能，例如已经经过加速器验证的粒子物理学标准模型，你并不能得到确切的结果。但是你可以计算不同组分对真空能的贡献，然后就会发现，结果和你认为的可能值有着天差地别，不是10或者100这种尺度上，而是10亿或者10亿的10亿倍的10亿倍。

这需要一个解释。这只是其中一个使宇宙可以达到如此大尺度的先决条件，但却是其中最为神秘的一个。所以我们需要一个解释。

我们知道真空能或者真空的质量必须是一个非常小的值，所以在物理学的一部分领域中因为某些原因，都认为这个数值为零。然后某一天我们醒来，来解释这个值为什么为零。事实上，1998年的某一天我们醒来之后，发现这个值并不是零。我们听说，宇宙学家们做了一些实验来观察宇宙在其生命各个阶段的加速度的大小，发现宇宙是在加速膨胀的。而我们过去都认为宇宙从大爆炸之后，星系之间互相远离的速度是越来越慢的。这就像你数十亿年前松开了刹车，然后踩上了油门。宇宙是在加速膨胀的。如果我们认为真空能是非零的，并且是一个正值的话，宇宙加速膨胀正是这些条件的必然结果，然后你就

可以观察现在的加速度，并推出一个准确值。在过去的13年间，很多本来独立的观测都开始联合起来证明这个结论。

而我们需要解释的最主要的事情依然是，为什么宇宙学常数或者说真空能，不是一个巨大的数字。但现在我们至少知道这个解释不会是因为某些对称性，所以真空能才为零。我们现在需要的解释要同时满足这两点要求：不大并且非零。

而令人惊奇的是，并非为解释这个问题而创造出来的弦理论，提出了一个解释，根据我的记忆，这是观测和实验与弦理论的第一次正面交锋。拥有一个可以解释量子引力的理论无论什么时候都会令人激动。虽然一开始不被承认，但事实证明，弦理论的确有这种可以解释问题的潜力，来解释为什么真空能是一个非常小但又不为零的值。

我本来以为自己会成为一个数学家，但在最后一秒我决定学习物理学。因为我意识到，我对了解自然真的非常有兴趣，而不只是一些抽象的内容，虽然抽象也有其魅力。我在剑桥大学完成了博士学位。我和霍金一起研究了黑洞的量子性质以及它们是如何与早期宇宙相互作用的。之后我去斯坦福大学做博士后研究。在斯坦福大学，我与安德烈·林德、伦纳德·萨斯坎德有过很多交流，我们都觉得是时候让弦理论对宇宙学作出些解释了，因为弦理论过去对宇宙学并没有作出过什么大贡献。我们开始思考弦理论如何作出解释的各种方法。

其中一个观点是全息原理。这个观点主要解决了，如果你需要描绘时空某一区域的基础特性时到底需要多少相关信息。令人惊奇的是，我们需要的信息并不是无限的。而更令人惊讶的结果是，随着区域体积的增长，我们所需要的信息量并没有随之增长。根据特·胡夫特和萨斯坎德最初的想法，这个答案与周围区域相关。但这个观点并没有完全成功地被应用，尤其是在宇宙学领域。所以我工作的其中一个主题就是这个全息原理是否真正正确，是否可以被用于所有的时空

区域，例如黑洞，而不仅仅是在引力并不十分重要的“普通”区域。结论是：这个原理是正确的。这多么令人激动。

另一个我开始考虑的课题，是试图去理解宇宙学常数、真空能或者人们最喜欢的那个名字暗能量，为什么很小但又非零。我在加州大学圣巴巴拉分校的卡弗里理论物理研究所（KITP）和乔·坡钦斯基一起研究了这个问题。我们发现，弦理论为理解这个问题指明了一条路，而事实上要我来说这是目前解释这个神秘问题最棒的方法。离开斯坦福大学之后，我到圣巴巴拉做了另一期博士后，之后又在不同的地方停留过，包括在哈佛大学的一年。2004年，我成为加州大学伯克利分校的一名员工，现在我是其物理系的一名教授。我不做实验，我是指不会走进实验室然后开始连接导线的那种。但是对我来说非常重要的一点是，我所做的工作是为了解释自然的本质。问题是，物理学发展到越高的层次，我们所要求的技术水平越脱离我们现有的实验能力。我们无法提出有关量子引力的问题，然后期盼同时可以得到一些就像在19世纪满足量子力学的光谱数据一样的结果。并且我认为作出以下回答是十分合理的：“如果是这样的话，我认为我们对这个方向进行研究是十分冒险的。”另外一种合理的回应是：“这个问题的确是一个好问题。”当然，了解如何将量子力学和广义相对论融合在一起，是一个十分重要的问题。它们都是非常伟大的理论，却互相对立，而我们有很多理由相信，一旦我们同时了解两者，就将对我们了解自然的本质产生十分深远的影响。也许是因为现在我们的智慧不足以做到，尤其是在我们没有定期实验反馈的前提下。但是我们过去对太多的关键点都太过悲观，而且总试图寻找其他的路。

我并不认为我们可以通过搭建更多的粒子加速器来加深对量子引力的了解。我们的确会知道很多新知识，甚至包括一些与量子引力相关的知识，但只是间接的。但我们可以看向其他方向，可以利用宇宙学实验，可以通过宇宙来帮助我们了解高能。我们会提出一些目前想

都不敢想的观点。我总是对我实验室的同事的创造力感到敬畏，我一直都认为他们会是最终给出我们答案的人。

人们经常会说，过去的15年是宇宙学的黄金时代，的确是这样。我非常有幸把握住了时机。当我还是一名研究生时，COBE卫星发射了，并开始运转，传回数据。这意味着，宇宙学不再是只对一两个数据进行测量，人们对宇宙膨胀速度的不确定性也不再那么明显了。在过去，宇宙学家们甚至不能确定星系之间相互远离的速度有多大。从COBE卫星发射开始，我们进入了“富数据”时代，我们拥有的数据量之大令人难以置信，这些数据可以充分帮助我们描绘宇宙物质分布的细节、宇宙膨胀的速度，并且还可以描绘宇宙膨胀的今天与历史。一些几年前想都不敢想的观测数据，都可以轻易地获取。宇宙学再也不是一个可以被轻视的学科，因为在过去虽然你可以看到所有的事物，但却没有任何可以拿到手的数据。事实上，过去15年间，由于大量数据的获取，导致有很多理论消亡或者即将消亡。

其中一个例子是关于宇宙早期的结构是如何形成的。为什么宇宙不像一锅汤一样是均匀的？为什么会在这有一丛星系，在那有一块真空，而另一处又有一个星系呢？这些结构是如何出现的，它们的分布又是怎样导致的呢？为什么它们就刚刚好是现在的尺度，不大也不小？为什么不是只存在一个巨大的星系，剩余的全部都是空的呢？这些问题的确需要解释。

可以解释这些问题的，实际上有很多理论，其中一个是暴胀理论。暴胀理论非常好的一点在于，最开始它被提出的时候并不是为了解释这些问题，但是在发展过程中人们却发现它在解释这些问题上“天赋异禀”。之后还有其他理论也非常合理，比如宇宙弦，它不是弦理论中的弦，而是我们所说的拓扑缺陷。简单来说，就是有一些类似于弦的物体，而能量被锁在这个物体中无法脱离，因为宇宙从非常

早期就开始膨胀，所以它的温度是不断降低的。如果你有一些“正确”的宇宙弦，它们会导致某些结构，对这些结构，不同的物理学家有不同的看法。而无论其在宇宙微波背景辐射上留下了怎样的印记，COBE卫星都已经对其进行过了测量，而目前普朗克卫星正在进行精度更高的测量。

我们对宇宙微波背景辐射已经有了足够了解，可以帮助我们将宇宙弦导致宇宙结构形成这一理论排除在外。当然宇宙弦也有可能是存在的，只是它对宇宙结构的形成没有任何影响罢了。

暴胀理论看起真的相当棒。并不是因为我们有了确凿的证据证明它是对的，而是它经历了太多的考验。的确出现过它可能被排除的情况，但是目前看来，它仍旧是一个非常有趣的理论。

暴胀理论其实在细节方面有很多分支，但是它的确作出了一些非常优秀的预言。事实上，就算你挑出任意一个分支，几乎都可以得到这些预言。其中一个预言是，宇宙是平直的，就像你高中时代学过的几何一样，而不是数学家们列出的那种奇怪的几何结构。而目前，我们知道宇宙是平直的。暴胀理论还预言了天空中一种特殊的扰动，而根据我们现在拥有的非常精确的数据，这个结论被证明是正确的。暴胀理论作出的很多预言都可以帮助我们，但是目前我们并没有达到可以判定某一种暴胀理论正确，而其他理论不正确的程度。让我们看看更加细节的地方，暴胀理论的某些分支与模型已经被排除，但我们仍旧看不到正确的那个。我认为，找到正确的那个还需要花上一点时间。

我曾说弦理论真的给了我们很大惊喜，因为它解决了一些问题，而这些问题就算是利用“对症”的理论，都没有任何进展。例如，为什么真空质量很小？为什么暗能量的值也很小？而弦理论解决这些问

题的办法就像我们可以说出椅子、桌子和沙发之间的差距一样。这些都是什么？

它们本质上只是一些基础的组成部分，电子、夸克和光子。你有5种不同的粒子，你将它们放到一起，然后就有了很多很多粒子。虽然基本组成部分有限，但你有很多复制品。你有很多夸克、很多电子，当你将它们组合在一起，就会有千千万万种可能。就像一盒乐高玩具：你能利用它们搭出各种各样的形状。一大盒夸克和电子，你可以用它们做成一张桌子或者一把椅子。这是你的选择。严格来说，如果我拿出一个原子将它放到这把椅子的其他位置上，我就得到了一个不同的物体。如果用科学的语言来说，也就是标准模型的不同解。比如如果我有一大块铁，我将一个原子移动到它上面，这又是标准模型的一个解。

事实上，虽然粒子物理学标准模型有这么多解，这也并不意味着这是一个非常复杂的理论，不意味着它可以解释所有事物，也不意味着它不能提供任何可信的结论。这仅仅意味着，它可以容纳我们所看到的复杂自然界中的一切现象，并且是从非常基础的部分开始的。夸克种类是有限的，电子只有一种。将它们组合在一起的方式也是有限的，利用它们，你并不能构建出任意的材料。统计学规律会限制原子有多少种表现，所以尽管事情看起来颇为复杂，但当你达到一定数目之后，它就会开始简化。

在弦理论中，我们对铁块做了不同的构建工作。弦理论是一个建立在十维中的理论，即九维空间和时间。而我们生活在三维空间和时间中。所以这是弦理论比较尴尬的一点，不过这并不重要，因为想象这些空间维度只是蜷缩到了显微镜都无法看到的小尺度上，并不是十分困难的事情。如果这个理论和观测恰好相互对应，那就更好不过了。

当你意识到6个维度会有很多种不同的卷曲方式时，弦理论就和观测开始相互对应了。如何将这些维度卷曲起来呢？看起来它们并不会自发地卷成一些随机形状。它们会形成一些小圈，而形成怎样的形状是由周围的物质决定的。就像你的乐高玩具汽车是什么样子，是由你如何将每一块小零件拼在一起决定的。那把椅子的形状，是由你如何将原子组合在一起决定的，而额外维度的形状，是由你如何把某些基本弦理论物体放在一起决定的。

弦理论基础部分的要求要比乐高公司和标准模型的要求要高。你只有流量、D膜和弦。这些并非是我们人工放入理论的，而是理论给予我们的。所以6个维度是什么样的形状，取决于你如何卷曲弦、D膜和流量。这意味着，形成一个三维世界的方式有很多种。就像我们搭乐高玩具汽车和铁块一样，有很多不同的方式可以构成目前我们所看到的3+1维的世界。

当然，无论多少种，事实上它们并不是真正的3+1维。如果你可以建成足够强大的加速器，你就能看见所有这些额外维度。如果你可以构建更好的加速器，那么或许你还可以操纵它们，在实验室中构建和现在不同的世界。但是想达到这些目标，我们目前或者说在未来很长一段时间内，都不可能达到这样的能级。但是你需要考虑，弦理论可以给我们很多种3+1维世界的可能。

我和乔·坡钦斯基做了一个估计，构成3+1维世界的可能性并不仅仅是百万种或者十亿种，而是10^{100}种或者10^{500}种。这个结论的有趣之处有很多，但对我们来说最重要的原因是，它暗示了弦理论可以帮助我们理解真空能为什么这么小。因为，毕竟被我们称为“真空”的只是一种特殊的三维世界，也就是在它看起来是空的时候。但就算在看起来是空的时候，它依然会受额外维度中物质的影响。

对每一个3+1维的世界来说，你都会期盼其中的真空能是不同值，其中暗能量大小不同或者宇宙学常数不同。所以你有10^{500}种可能来构成3+1维世界，而在其中的某些可能中，真空能非常意外地十分接近零。

另一件会发生的事情是，在这么多种可能中，有一半的真空能为正值。所以就算你没有一个正确的起点，我说“正确的起点”是说将来会演化成我们现在看到的宇宙样子的起点，你都可以从一个非常随机的状态开始，这是另外一种可以形成3+1维世界的方式。将会发生什么呢？首先，宇宙会增长得非常快，因为正的真空能需要加速度，就像我们今天观测到的样子。它会快速增长，然后，由于量子力学过程会开始衰退，你就可以看到被放进额外纬度中物质的不同，之后你就可以观察到不同的3+1维世界。

这不是我编造出来的。这个理论先于弦理论被提出。这要追溯到20世纪70年代或者80年代西德尼·科尔曼和其他一些人的计算，这些计算没有依赖任何引力理论。这是一些枯燥的物理计算，甚至很难与之争辩。过程是这样的：这些不同的真空，拥有正真空能的三维世界，无限增长，然后开始衰退，新出现的真空企图吞掉“前辈”，但却不够快。所以你就有了一切物质。你用不同的真空将宇宙填满，而在其中真空可以拥有不同的重量。然后你可以问：“在这样一个理论中，观测者应该处于何处？”如果想为这个问题给出最原始的答案，那么全息原理就会派上用场。

如果你有许多真空能，那么尽管宇宙整体是在不断增长的，如果你坐在某处环顾四周，你周围将会有一条地平线。各区域合理地连接在一起，这样粒子可以相互作用并形成结构，反过来又与真空能的数量相关。这就是我之前为什么说仅仅通过看窗外，我们就可以知道真空能是非常小的值。如果有大量真空能存在，宇宙在任何坐在其中观

察它的人眼里，就会是一个非常小的盒子。而全息原理告诉你，小盒子的信息量将与它的表面积有关。如果每一部分真空的真空能都拥有一个非常大的值，那么表面所承载的信息量可能只有几个比特。所以无论你认为观测者们看到了什么，应该都会比几个比特要复杂一些。

所以你就会立刻明白为什么你不能期待观测者存在于典型的区域。他们所在的区域，真空能要恰好不同寻常得小，这是由于额外维度间不同成分会意外地相互抵消，因此复杂结构就有了存在空间。这样，你就可以理解为什么宇宙中存在真空能十分小的区域，也能理解为什么我们所处的环境是十分特殊的。

这个观点最有趣的一点是，它提出了一种可能：我们的宇宙有可能是多重宇宙，存在很多种不同的真空。为了解决宇宙学常数的问题，这个观点经常会被排除在弦理论之外。但要这么做并不容易。如果你仅仅想象，随着宇宙的增长，真空能越来越小，所有的真空部分都排列整齐逐步衰减，那么你将无法解决这个问题。你可以使真空能很小，但同时你也将宇宙排空。你将不再有任何物质。

值得一提的是，弦理论是第一个可以解决这个问题，却并没有作出“宇宙是空的”这一致命预言的理论。对我来说，这真的是非常卓越的一点，因为现有的理论都过于僵化，而弦理论则找到了一种方法绕过了僵局，并解决了问题。

很快人们会说：“如果宇宙真的在加速膨胀，我们就会知道它将会变得无穷大，而且同样的事情会不断发生。”如果你将某件事情的所有尝试都无穷化后，那么对应的结果都将变得无穷，无论这有多么不可能。这是在弦理论多重宇宙之前出现的。这是一个十分直接的问题，就算你认为弦理论就是一堆废话，你仍旧需要考虑这个问题，因为这只是基于观测的。宇宙现在正在加速膨胀，除非有什么巨大变故让宇宙的发展偏离轨道，这意味着你要从无穷的角度上看问题。但是

在弦理论景观的背景下，这个问题变得更加重要，因为如果你不接受这些无穷，那么在景观理论中作出任何预测都是十分困难的。

为什么？因为你需要说明你在实验中看到这些事情的可能性比另外一些要大，所以如果你看到一些不可能发生的事情发生了，你就可以排除你的理论，就像我们一直以来研究物理的方式一样。但是如果事情都发展至无穷很多次，那么你要站在什么基点上说一件事比另一件事发生的可能性更大呢？你需要排除这些无穷。这在宇宙学中被叫作测量问题（the measure problem）。这或许不是一个好名字，但我们的确会被卡在这个问题上。

这是宇宙学领域目前的主要研究方向。有很多相关的技术工作展开，并且有很多人都取得了进展。上文的那个问题可以使我们的研究成为一个闭环，我们将从中得到一些更深刻问题的答案，即关于宇宙大尺度结构是怎样的、量子引力是如何作用于宇宙学的。我认为如果我们不去解决这些问题，就无法从根本上解决测量问题，而测量问题给了我们一个非常独特的切入角度。这是一个非常具体的问题。如果你有一个提议，你就可以去检验它、排除它、检验其重复性或者某部分的重复性，观察与观测不相冲突的部分，观察作出了与事实相符的预测的部分，我们就可以得到某些和量子引力相关的结果。所以我认为这是目前最为富有成效的方向。这是一个很难的问题，因为你并没有很多经验可以学习。这并不是前进的一小步。从概念上来说，这是非常困难的新问题。但是同时，当你对如何解决它产生一些简单的猜测时，如何将其中一些排除是非常困难的。不过至少，我们目前还处于一个比较乐观的状态中，因为我们有一些有效的过滤器。你并不会同时有很多猜测，因为其中一些可能性微乎其微。

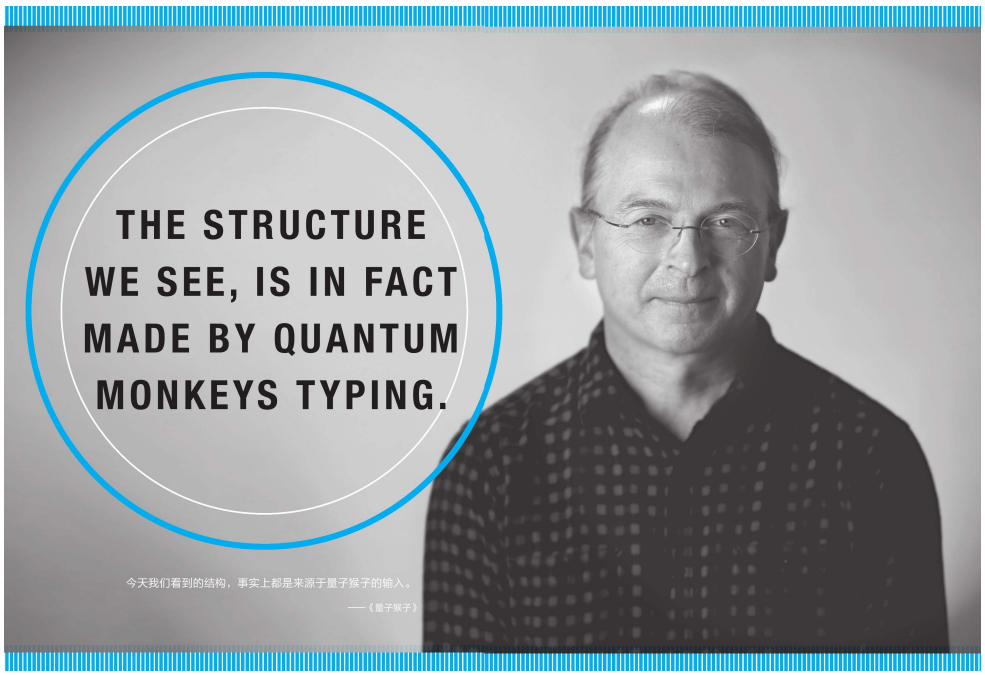
最神奇的事情，至少对我来说神奇的是，一开始我们都从不同的方向来接近这个问题，我们都有自己的偏见。安德烈·林德有一些想

法，阿兰·古斯有一些想法，亚力克斯·维连金也有一些想法。我认为，我们不能从整体上来考虑这个宇宙，因为没有任何一个观测者可以观测到全部。对一个观测者来说，他所观测区域的相关区域发生了什么才最为重要。而你在任一实验中可以做，并不是与物理学定律相对抗或者想达到超光速传播。如果我们想得到有意义的答案，就需要提一些遵循物理学定律的问题。

我想："好吧，我要试一下。"这与其他人正在做的完全不同，并且是由全息理论所促使的。我对此感到非常兴奋，因为这个提议并没有像其他那些简单想法一样，立刻就出现了致命问题。当你进入到细节部分之后，就会发现这个理论与数据的符合程度比以往的任何一种都要高。我仍旧认为我开启了一种新的思路。

但之后我们发现（我的学生I-Sheng Yang在此次发现中发挥了重要作用），这其中存在二象性，在大多数宇宙学家所推崇的整体宇宙与我们所想的局部宇宙之间存在等价性。当我们利用全息原理以某种特殊方法将整体宇宙分开时发现，我们持续得到了和利用相邻区域方法同样的结果。一开始，我们以为这只是某种巧合。一旦我们看向细节，就会得到不同的结果。不过最后我们证明了这个等价性，这两件事情是计算可能性的相同方法，尽管它们的初衷完全不同。

这并不意味着我们处在正确的轨道上。有可能这两种方法都是错的。它们的等价并不能证明其正确性。但是现在发生了很多并不需要发生的事情。发生的事情中有很多给了我们一些信心，让我们相信自己的方向是正确的。同时，我们也在学习如何在更大的尺度上去了解这个宇宙。


THE STRUCTURE
WE SEE, IS IN FACT
MADE BY QUANTUM
MONKEYS TYPING.
今天我们看到的结构，事实上都是来源于量子猴子的输入。
——《量子猴子》

17

Quantum Monkeys

量子猴子

Seth Lloyd
赛斯·劳埃德
MIT 量子机械工程教授；著有《为宇宙编程》

众所周知，我们目前正处于一场信息加工革命中。信息存储、加工和传播的电学与光学方法，在过去的半个世纪中呈指数级增长。在计算机领域中，这种飞速增长被称为摩尔定律。20世纪60年代，英特尔公司创始人之一戈登·摩尔指出，计算机部件的尺寸每隔一两年就会减小一半，而性能将提高一倍。摩尔定律目前仍然有效。事实上，这些由人类制造出来的机器，正依靠自身对信息的加工能力，慢慢变得比人类更强大。如果你对人类大脑和计算机的基本计算过程即二进制反转和突触发射进行计算，可能在接下来的十几年间，计算机可以利用二进制进行计算的能力就将超过人脑。

尽管如此，我们也不需要太过担心。因为计算机如何超过人脑并不是一个硬件方面的问题，而是一个软件问题。软件的进化速度要远

远慢于硬件，事实上，现在的某些软件好像是为了破坏硬件的完美性而设计的。现在的情况就像寒武纪大爆炸一样，硬件水平正呈爆发性地增长。人类和计算机，谁更聪明呢？这个问题可能需要几百年之后才可以回答。我认为，这可能需要成百上千年或者成千上万年，直到我们可以制造出足够有效和复杂的软件。同时，我们也将拥有更加强大的计算机。

我目前做的基本上是一些处于信息加工革命边缘的工作。而我现在所说的都源于我在制造量子计算机时所获得的经验。所谓量子计算机，是说你可以将信息储存在每个独立的原子上。大概10年之前，我第一次提出用物理学方法来构建一个计算机，使这个系统中的每个量子、每个原子、每个电子、每个质子，都可以储存和加工信息。在过去10年间，我有幸和世界上最杰出的实验物理学家和量子机械工程师一起，来完成这样一个设备。所以我今天要告诉你们的大部分内容，都来自我在制造这个量子计算机的过程中所获得的经验。克雷格·文特尔（Craig Venter）[9]说我们太理论化了，没有看到任何实际的数据。我认为这只是他的个人观点，因为我目前每天所做的就是去了解超导体电路。

数字信息加工革命只是最近的一次革命，但毫无疑问，它是迄今为止最棒的一次革命。例如，可移动的输入和印刷对人类社会产生的影响要远远超过电子革命。而信息加工革命也曾有过很多次。其中我最喜欢的一次来自巴比伦，他们发明了数字，尤其重要的是，他们发明了数字零。这个令人惊奇的发现，对信息的加工和记录是非常重要的。它首先起源于古巴比伦，之后传入印度。因为数字是通过阿拉伯人传入欧洲再传入美国的，所以我们称它们为阿拉伯数字。数字零的发明使我们可以将10写成一个“1”和一个“0”。这个看起来很小的一步，却对数学产生了全面的影响，包括比特也即二进制，成了目前数字计算革命的基础。

另一个信息加工革命是文字的发明。你无法否认文字的发明也是信息加工革命之一。

另一个我最喜欢的是第一次性别革命，即现存有机体的性别意识。对生命来说最为重要的一个问题是，如果不存在性别，那么进化就只能通过突变，而99.9%的突变都是朝向不好的方向。作为一个从机械工程系毕业的人，我要告诉你，如果仅仅通过突变来进化，你将面对一个工程学上的冲突：你的进化机制将会有各种不利因素。尤其是，生命的两个先决条件的碰撞，也即进化，但同时保持基因的完整性。这就是所谓的耦合设计（coupled design），这种设计非常不好。然而，如果你有性别选择的话，就可以从不同的基因组选取基因进行重新组合，然后在没有突变的情况下产生多种可能。当然，突变还会产生，但在没有突变的情况下，你仍旧获得了很多种不同组合。

我在几年前写了一篇文章，比较人类和细菌的进化能力。比较的点是，单位时间内一群人所产生的基因重新组合数和一组细菌所产生的基因重新组合数。在一游泳池的海水中，一群细菌中大概包含一万亿个细菌，每30分钟繁殖一次。把它与一个新英格兰有几千人口的小镇进行对比，小镇每30年有一代人。尽管在数量上有很大差别，但小镇和那群细菌几乎可以产生相同数目的基因组合。这意味着，细菌产生新基因组合的方式只能通过突变，当然事实不可能是这样的，但是在这样的前提下我们就可以说，细菌有性别之分。在日常的电视节目中，性别的重新组合和选择发生得更快。

有性繁殖是一场伟大的革命，而所有信息加工革命的“祖先”就是生命本身。信息可以在基因中被存储、加工，并可以在有机体内编码以达到某些效力，这一发现是一大惊人的变革。如果认为生命是在其他地方产生的，并且在40亿年或者50亿年前传播到地球上的话。宇宙历史只有138亿年，所以这一定发生在过去的138亿年间。

我们忘记讨论人脑了，或者我应该说我的大脑忘记了讨论人脑。人脑中存在很多信息加工革命，我或许省去了几千次和我们之前讨论过的那些一样重要的革命。

为了引出库恩主义策略，我需要指出，这些信息处理革命中很重要的一点是，每一次革命都是利用之前的技术达到的。举例来说，电子信息加工革命当然利用了文字，当然0和1也有一定的贡献，不然你没有办法复制和传输信息。如果没有文字，印刷机其实也没什么用处。没有语言，也不会有文字。而如果没有大脑，你就不能说话。除了使你有性别意识外，大脑还有什么作用？如果没有生命，就没法提性别。音乐来源于制造声音的能力，而制造声音的能力因为性别意识而发生了进化。你要么需要声带去唱歌，要么需要一个鼓槌来敲鼓。为了制造声音，你需要一个物理对象。每场信息加工革命要么需要一个有生命系统、电子机械系统，要么需要机械系统。对每场信息加工革命来说，都要有一种技术作为支持。

生命是最初的，是所有信息加工革命的始祖。但是什么样的革命使得生命得以存在呢？我认为，所有信息加工革命的本源，都是宇宙本身的计算属性。最初的信息加工革命是大爆炸。信息加工革命发生的原因是由于宇宙是包含信息的，并由比特组成。

当然，宇宙也是由基本粒子、未知的暗物质和其他一些物质组成的。我并不是在说我们要打破对宇宙的一贯描绘，即由夸克、电子和质子组成。但是事实上，在19世纪末期出现了这样一种观点：每个基本粒子、每个质子、每个电子，都具有一定量的信息。当两种基本粒子碰撞反弹时，它们产生了比特翻转。宇宙就是这样进行计算的。

这个“宇宙可以对信息进行加工”的想法听起来有些激进。但事实上，这在很久之前就被发现了。追溯到麦克斯韦、波尔兹曼和约西亚·吉布斯，这三位科学家在1860—1900年间发展了统计物理学。他

们展示了宇宙根本上就是关于信息的，他们将这种信息称为“熵”。如果利用20世纪的技术去看他们的科学发现，你就会明白他们所发现的熵就是每个原子所携带的信息量。事实上，这就证明了宇宙的本质就是加工信息。我的观点是，宇宙这种携带和加工信息的能力，是之后所有信息加工革命的源头。

我们如今如何看待信息呢？当代科学对待信息的态度基于的是克劳德·香农的理论。当香农第一次提出有关信息的基础公式时，他找到了博学的物理学家约翰·冯·诺依曼，并对他说：“我应该管它叫什么呢？”冯·诺依曼回答说：“你可以叫它H，因为波尔兹曼就是这么叫它的。”他指的是波尔兹曼最著名的H理论。这些信息理论的奠基人都非常清楚地知道，他们所用的公式都是在19世纪为了描绘原子的运动得以发展的。当香农谈到通过一个通信通道可以传输的信号量时，他用了与麦克斯韦和波尔兹曼相同的公式，而他们用这个公式来描述熵，需要的前提条件是气体中相互作用粒子的位置和动量。

一比特信息代表了什么？我们先从信息的定义开始说起。当你买一台计算机的时候，你会问这台计算机的内存有多大。一比特来源于两种不同可能性间的区别。在计算机中，一比特是一个小开关，有断开和闭合两种状态；或者类似于一个电容器，可以充电，这个过程称为“1”，或者断电，称为“0”。任何有两种不同状态的事物都可以记为一比特的信息量。在基本粒子层面上，一个质子可以有两个不同的状态：自旋加快或者自旋减慢。所以每个质子都携带一比特的信息。事实上，无论质子是否“愿意”、其携带的信息是否可以被理解，它本身都携带了一比特的信息。因为存在本身就携带了信息。一个质子拥有两种不同的状态，所以记录了一比特。

在制造量子计算机的过程中，我们试图去开拓原子本身的信息加工能力，因为许多量子计算机都有一系列质子会跟其周围粒子反应，

它们都携带一比特的信息。无论我们是否要求这些质子去翻转这一比特的内容，它们都存储了一比特的信息量。同样，如果你被一圈原子包围，它们之间会相互反弹。就拿小孩子气球中的两个氦原子来说吧。原子聚集在一起，然后反弹，再互相远离。麦克斯韦和波尔兹曼意识到，每个原子必然会有一系列的信息来描述它们的位置和动量。当原子相互反弹时，这些信息都发生了变化，因为原子的动量变了。当原子碰撞时，它们的比特发生了翻转。

每个原子携带的比特量是已知的，从麦克斯韦和波尔兹曼时代开始就已经被很好地量化了。举例来说，一个房间中的每个分子，当它们在空气中相互碰撞的时候，都携带了大概30或40比特的信息。宇宙这种在最基础层级上就可以携带和加工信息的特性，是毋庸置疑的，这个观点已经有120多年历史，并且基本已经成为物理学中的教条了。

宇宙在进行计算。我再次重申我的观点，宇宙这种本身自带的信息加工能力，是我们目前可以看到的信息加工革命，从生命到电子计算，这一切的源泉。或者换一种说法：宇宙是一个大型计算机，这并不是科幻小说，而是科学事实。从更加技术的角度来说，宇宙是一个超大型的信息处理器，因为它可以进行“宇宙级”的运算。这就是计算机的定义。

如果马文·明斯基（Marvin Minsky）[10]在这里的话，他也许会说：“爱德·弗雷德金（Ed Fredkin）和康拉德·楚泽（Konrad Zuse）在20世纪60年代就说过，宇宙是一个计算机、一个巨大的细胞自动机。”康拉德·楚泽在1940年第一个建造了电子计算机。他和弗雷德金在MIT时提出了“宇宙是一个大型的细胞自动机”这个想法。这个观点之后由史蒂芬·沃尔弗拉姆（Stephen Wolfram）继续研究。所以宇宙是一个大型计算机的观点也并不是什么新观点。

因此我说宇宙是个计算机这种说法要追溯到半个世纪之前。这个说法同样也可以从科学的角度来证实。你可以通过观察物理学的基本定律，来判断宇宙是不是一个计算机，如果是的话，是个什么样的计算机呢？我们有非常完美的实验证据，证明物理学的基本定律是支持这个观点的。我有一台计算机，并且它遵循一切物理学定律。我们知道宇宙是可以进行计算的，至少在宏观尺度上来说如此。我说的是宇宙可以在它最小的尺度上进行计算。因为我们知道，宇宙在最小的尺度上是可以携带并处理信息的，而在大一些的尺度上，它是可以进行大量运算，并产生类似于人类这样复杂的物体的。

宇宙实际上是一台计算机，这是一个很久之前就提出的概念。麦克斯韦、波尔兹曼和吉布斯在一个世纪之前就建立起了基础的计算框架。但由于某些原因，人们并没有以系统的方式得出宇宙的计算本性这一结果。对我们来说，宇宙可以进行运算意味着什么？这个问题值得科学领域重视。我做的许多工作都在研究这个可计算宇宙会产生怎样的科学后果。

我首先得到的一个结果是，宇宙这种先天的运算能力，导致我们周围的一切在没有任何外力干扰的情况下自然而然地产生了。实际上，如果宇宙可以进行计算，那么类似于人类的复杂系统是一定会产生的。所以相比于单单用基本粒子间的碰撞来描述宇宙，将宇宙描述为如何进行信息加工，可能更为有效。因为宇宙的计算本性会产生很多惊人的结果。

让我们说得更明确一点，为什么像宇宙这样本身就具有计算能力的系统，可以产生我们身边一切复杂的事物。

> 《不变逻辑》（*Inflexible Logic*）的作者拉塞尔·马洛尼（Russell Maloney），1940年在《纽约客》上讲了这样一个故事。有一个非常有钱的文学爱好者，他听说，如果你有足够多的猴子，并且让它们一直打

> 字的话，它们就可以输入莎士比亚的作品。而这个富人恰好又有足够多的猴子，所以他集结了一群猴子，并且找了一个专门的人来训练它们。在一次鸡尾酒晚会上，他与一名耶鲁的数学家发生了争执，因为这个数学家认为这简直是无稽之谈，无论怎样计算概率，这种事情都不可能发生。所以，这位文学爱好者邀请数学家到他位于康涅狄格州格林威治镇的家，并让他参观了猴子们的工作室。那个时候猴子们正在誊写《汤姆·索亚历险记》（*Tom Sawyer*）和《空爱一场》（*Love's Labour's Lost*），并且没有任何错误。数学家一气之下杀死了所有的猴子。

说实话，我并不太清楚这个故事的寓意到底是什么。这个猴子在打字机上打字的故事非常古老。我这个夏天花了相当长的一段时间，在网上搜索，并且和世界各地的专家讨论这个故事的出处。有些人认为是出自汤姆斯·赫胥黎（Thomas Huxley），在《物种起源》出现之后，他1858年和主教塞缪尔·威尔伯福斯（Bishop Samuel Wilberforce）进行的一次讨论中提到过。根据当时这场辩论的目击者描述，威尔伯福斯问了赫胥黎这样一个问题："他的父亲或母亲哪一方是猿的后代？"赫胥黎这样回答："我宁愿由愚蠢的猿人进化而来，也不愿意由一位将自己的天分浪费在错误观点的绅士进化而来。"当他说完这句话的时候，观众中的一位女士昏倒了。

尽管赫胥黎在这次辩论中维护了达尔文自然选择的观点，尽管他提到了猴子，但不可能会提到猴子打字这种内容，因为我们都知道打字机在1859年才被发明。实际上是亚瑟·爱丁顿（Arthur Eddington）在1928年推测猴子可以输入大英图书馆中的所有藏书。而后詹姆斯·金斯（Sir James Jeans）将这个打字猴子的故事安在了赫胥黎身上。

事实上，也可能是法国的数学家埃米尔·波莱尔（Emile Borel）在1907年提出了打字猴子的故事。波莱尔是现代数学理论组合学的创建人之一。波莱尔设想，有100万只猴子，每只猴子每秒随机敲入10个

字母。那么这些猴子将可以敲出世界上所有藏书丰富的图书馆中的所有书。但是他之后得到的结论是，完成这个任务的可能性非常小。

事实上，猴子当然可以胡乱地敲字母。如果你在谷歌中输入“打字猴子”（monkeys typing），你会找到一个网站，它可以让你的计算机模拟打字猴子。那个网站记录下来了需要多少年猴子可以键入莎士比亚戏剧的多少内容。目前的记录是《空爱一场》中的17个字母，将花费4830亿年。猴子打字只产生了一些随机内容。

在波莱尔之前，波尔兹曼对宇宙为什么是复杂的，进行了猴子打字般的解释。他说，宇宙只是一个大的热起伏。就像硬币翻面，宇宙只是一些随机的信息。他的同事很快对他这种说法进行了劝阻，因为很明显，事实并非如此。如果是这样的话，那你接收到的每一个之前没接收过的新信息都是随机的。但当你用望远镜看向宇宙时，总能得到新的信息，并且并不是随机的。甚至是，这些新信息都是有结构的。为什么会这样？

如果想了解宇宙为什么充满了复杂的结构，让我们来想象猴子是在计算机上打字，而不是用打字机。计算机并不只是单纯地用微软的办公软件输入，而是利用一些计算机语言，比如Java，将猴子输入的内容作为指令。现在，尽管猴子还是在胡乱敲击，但是会发生一些值得注意的现象。计算机开始产生复杂结构。

一开始这看起很奇怪：只是给出一些垃圾信息，得到一些垃圾信息。但是有些很短，看起来随机的计算机程序会产生非常复杂的结构。例如，第一个很短，看起来随机的程序会使计算机开始证明所有可证的数学理论。第二个很短，看起来随机的程序使计算机开始检验物理学定律的结果。有很多计算机程序可以做各种各样的事情，你不再需要额外的信息来产生猴子打字所得到的各种复杂结果。

有一个数学理论被称为算法信息论（algorithmic information），它可以告诉你当猴子在计算机上输入的时候会发生什么。这个理论最早在20世纪60年代被建立，由剑桥大学的雷·索洛莫诺夫（Ray Solomonoff）、巴西IBM公司15岁的格雷戈里·蔡廷（Gregory Chaitin）和俄罗斯非常有名的数学家安德雷·柯尔莫格洛夫（Andrey Kolmogorov）共同建立。算法信息论告诉了我们用一个随机程序得到复杂结果的可能性。结果是，如果猴子在计算机上打字，它们得到化学定律、自催化集、前生物生命的可能性是非常高的。猴子打字给了我们一个解释，为什么我们的宇宙可以产生如此复杂的结构。

猴子打字有可能会产生现有的几乎所有阶计算形式。如果在这个猴子宇宙中看到很多有趣的东西产生，你一定不会感到意外。你可能无法得到哈姆雷特，因为哈姆雷特需要极高的复杂性和社会的进化。但是类似于化学定律、自催化集或者某些前生命生物，是有可能发生的。

将这个解释应用于宇宙复杂性的产生，我们需要两种东西：计算机和猴子。我们有计算机——宇宙本身。就像一个世纪之前已经被提出的理论，宇宙自最基础的层次开始就拥有信息存储和加工的能力。所以我们已经有了可以向内输入的机器了。现在我们需要的仅仅是猴子。那么猴子又从哪来呢？

给宇宙编码的猴子是由量子力学规律提供的。量子力学本身就存在很大的不确定性。你可能听过爱因斯坦说的一句话，“上帝不掷骰子”，爱因斯坦错了，上帝的确会掷骰子。在量子力学的问题上，众所周知爱因斯坦是错的。事实上，正是在上帝掷骰子的时候，这个量子起伏才被编入我们的宇宙中。

例如，阿兰·古斯研究了这种微小的量子起伏是如何成为宇宙大尺度结构的种子的。为什么我们的星系在这里，而不是在一亿光年之

外？因为，当追随到宇宙最初的时候，在那附近有一个微小的量子涨落，导致这周围某一点比其他地方密度要大。这个超密度的点非常微小，但足以作为一个种子来聚集物质。今天我们看到的结构，像宇宙的大尺度结构，事实上都是来源于量子猴子的输入。

我们有了所有的组分，然后给出了一个对宇宙复杂性的解释。你并不需要宇宙计算非常复杂的过程，宇宙的计算过程可能非常简单。几乎所有的事物都可以成立。宇宙开始计算，之后宇宙中存在一些量子猴子，也即量子涨落，来进行编码。量子涨落的存在是由于宇宙本身所具有的计算能力，最终形成了我们目前可以观测到的一切。



我们需要努力去思考一些可以使我们留名青史的事情。

——《获得诺贝尔奖之后》

18

The Nobel Prize and After

获得诺贝尔奖之后

Frank Wilczek
弗兰克·维尔切克
2004 年诺贝尔物理学奖共同获得者；MIT 物理系赫尔曼·费什巴赫（Herman Feshbach）讲席教授；著有《存在之轻》

当我回顾过去时，我这才意识到，当诺贝尔奖一直悬在眼前，却从未向我靠近，对我来说无疑是一个很大的心理负担，几乎把我击倒。所以当我得到它时，对我来说实在是一个巨大的解脱。我从未想过得到诺贝尔奖会是一次梦幻般的体验。当时，在瑞士举办了很多盛宴，我在一个月内去了几次这样大型的活动。

诺贝尔奖对我产生的最为深远的影响，是同事们的变化：他们开始喜欢我，当然还不至于强烈到爱的地步。不仅是我感受到了变化，我们这个领域，基础理论物理学，也得到了大家的认可和关注。人们开始欣赏已经建立的理论，这导致了人们对我们这个领域的关注以及某种生活态度的转变。对此我感到非常开心。

但很快，那些宴会让我觉得有些厌烦，它们太浪费我的时间了。生活的突然变化让我开始思考下一步的计划。当我给自己制订了一个三点计划时开心不已，因为这给了我前进的方向。现在当我做某些工作时，我会这样问自己：它和第一点有关吗？它和第二点有关吗？它和第三点有关吗？如果和这三点都没有关系，那我就是在浪费时间。

第一点最为直接。比较低俗的说法是，它只是一块草皮或者撒在树上的尿，但是我不会这么说。我会说这是我在过去提出的一些物理观点，而这些观点将带来非常丰富的成果。有几点让我感到特别兴奋。第一个是欧洲核子研究组织的大型强子对撞机，将在未来一年间开始运行。[11]而那些我在20年前或者30年前参与提出的统一理论、超对称理论以及如何发现希格斯玻色子[12]，终于可以通过实验来检验。当然，如果这些理论被证明是正确的，这将是人类对世界认知的一次伟大进步，对我自身来说也是非常令人满意的。

还有一种现象是关于低温下电子的奇异行为，即所谓的任意子（anyons），其中蕴含更多的是技术方面的内容。在很长一段时间，世人都认为粒子不是玻色子就是费米子。20世纪80年代初期，我意识到还有其他可能，之后事实证明，这种其他可能的发生是有一定的物质基础的：电子集合在一起形成集体状态，这种状态的性质与单个电子完全不同，但却遵循了一些特殊的新规律，这就是任意子。这使电子学有了很多新的可能性。我称它为任意子学。最近，前沿任意子学引领了一种新手段，可以实现量子计算机的构建。

无论是成功还是失败，这种新形式的电子学——任意子学，都吸引了很多资金，并且有很多实验学家正在慢慢加入。同样，有些实验在我脑中存在了20年，因为很难，所以需要足够的资金支持和动力才可以去做，而这些实验最近也在慢慢实现。当你身处某件事情之中，而这件事可能会产生实际的结果并有可能改变世界时，这是一种非常

有意思的体验。而这些事情，也让我回想起我的童年时代。我的父亲是一名电学工程师，我小时候经常会看他带回家的电路图，我总是被那些图深深地吸引。而现在我开始考虑制造一种全新的电路图，这是非常酷的事情。我真的非常喜欢抽象和具体的融合。

从更深层次来说，在量子计算和整个量子信息加工领域最令我感到兴奋的是：它们触及了一些非常基础的问题，而这有可能导致一种新的智能的产生。人类对量子力学的了解史可不怎么光彩，人类花费了很长时间都无法掌握叠加态的含义，无法理解为什么薛定谔的猫可以同时有“活着”和“死亡”两种状态，因为这用我们的经验来看简直是天方夜谭。但是一种基于量子计算机的智能，机械量子思考，最初在它的骨子里就会带着这一点，或者说在它的电路中。这是它的基本思考方式。这是一个非常大的挑战，但是试图把自己的脚放在别人的鞋里是一件很刺激的事情，尤其是当这个鞋的主人和你有着完全不同的脑结构时：一个量子大脑。

这说起来可能有些尴尬，但我关于轴子的一些观点可能与宇宙暴胀理论融合得非常好，并且也给出了关于暗能量的一种新可能。这和人择原理有着非常紧密的联系，因为根据轴子的结果，多重宇宙的不同部分将会有不同量的暗物质。当然暗能量的多少是随所处位置的不同而变化的。唯一可以分辨某一位置需要多少暗能量的方法是：如果数量太大，类似于我们一样的生命就不会产生。

我认为，物理学中有很多内容还需要我们继续追踪并被公平对待。这就是我提出的第一点。

第二点是另一个非常有意思的方向：寻找周边兴趣，培养大众对科学的热爱，而非总是专注于科学本身。我正在写一部悬疑小说，将物理学与音乐、哲学、性，以及诺贝尔奖最多只能三人分享的规则和谋杀（或自杀）结合在了一起。当来自MIT和哈佛大学的4人科学小组

发现了暗物质的本质时，将有一个人需要消失！我希望这类工作能吸引大众的视线，使科学成为大众娱乐的一部分。

第三点我想将它称为奥德修斯计划（Odysseus project）。我是奥德修斯的“狂饭”，这个流浪者，机智、勇敢，并经历了各种奇遇。我真的很想再做一些伟大的工作，不是继续我现在的研究方向，而是一些与之前完全不同的方向。我进入理论物理学领域几乎是个意外。当我还是个本科生时，我倾向于学习关于人脑的科学或者神经生物学。但是我很快发现，我对这个课题需要的数学分析方法并不十分成熟。而我对这方面又非常感兴趣，所以抓住了这个机会，进入了我非常擅长的数学领域。但最终，我却走入了物理学领域。

当然我一直保持着对科学的热情，同时解决这些问题的工具在最近也呈现了爆发式发展。在大脑研究方面，图像技术、基因技术以及很多相关技术，已经得到了长足发展，并且计算机模拟技术也有很大贡献。计算机计算能力的爆发式增长和对计算机和网络的更深了解，对帮助我们思考智能的本质和大脑工作机制来说，是一个非常重要的资源。这是一个我非常想继续探索的方向。我阅读了很多相关内容；我并不知道我到底想做什么，但我专注于那些可能的方向。就像福尔摩斯所说的那样，在没有任何证据的情况下进行分析是最严重的错误。所以，我开始收集数据。

量子计算是一个给人以灵感的观点，但是目前如果想制造它，在技术方面我们需要做到哪一步还不是非常清晰。目前有很多提议，但是哪个最好，或者哪个实现的可能性最高，暂时也无法判断。

让我们往回走一点，因为就算在你拥有完全的量子计算机之前，仍旧有一些信息加工任务可以用比全幅量子计算机要差得多的量子机器来完成。全幅量子计算机的要求非常苛刻：你需要构建各种各样的门，用很复杂的方式将它们连接在一起，还要进行更加复杂的纠错。

这就像在莱特兄弟时代想象一个超音速飞机。然而，目前有一些已经成熟的理论可以应用。

最为成熟的一个是密码学：在量子力学中，这个部分被称为“波函数坍缩”。这就意味着，如果你传送一个量子力学的信息，拿光子的自旋方向来说，之后你就可以依次传入不同自旋方向的光子，将信息进行编码。如果有人想窃取你的信息，你立刻就可以发现，因为观测会导致你传入信号的变化。所以这是非常有用的。如果你想传递一些信息并且不想任何人窃取这些信息，物理学定律可以保证这一点。如果某个人偷看了，你就可以立刻发现。必要时，你还可以阻止它。如果保证一切都是正确的，那么别人偷看你信息的可能性就会非常低。所以这是一个非常切实并且有价值的应用，人们正试图将这些想法商业化。

我认为从长期来看，量子计算机的这些应用会利用量子力学的原理。通过数字来做化学研究，通过计算来设计分子、设计材料。一台量子计算机可以使化学家和材料学家在一个全新的层面上工作，因为他们不用再亲手将物质混合，观察产物，只需要通过计算。我们清楚地知道限制核子和电子行为的公式是什么、组成原子和分子的成分是什么。

所以大体上，这是一个已经有解的问题：仅仅通过计算就可以搞清化学。我们并不知道所有的物理学定律，但我们所知的已足够用来精确地设计原子，并预测它们的行为。但我们解这些方程的水平还很有限。这些方程式处于一个巨大的多维空间中，结构非常复杂，而我们只能解决非常简单的问题。但当有了量子计算机之后，我们可以解决更多。

就像我之前提过的，目前还没有一个确定的最佳长期方案可以成功建造量子计算机。人们都在进行模拟和制作小型的原型机。根据原

子核自旋、电子自旋、囚禁原子（trapped atoms）、任意子的不同，人们有很多不同想法。

我非常喜欢任意子这个想法，因为它融入了我一开始所做的基础物理学的工作。20世纪70年代至80年代，人们一直认为所有的基本粒子或者说所有的量子力学实体都可以被分为两类：玻色子，以印度物理学家萨特延德拉·纳特·玻色（Satyendra Nath Bose）的名字命名；费米子，以恩利克·费米（Enrico Fermi）的名字命名。当你将一个玻色子放在另一个周围时，量子力学波函数不变。而费米子则会在波函数前乘以-1。在很长一段时间内，玻色子和费米子都被认为是量子力学实体唯二的存在可能。20世纪70年代末到80年代初，我们意识到在2+1维时空（不是我们日常所说的三维时空，而是一个平面系统）中，还有其他可能。如果你将一个粒子放在另一个周围，你可能得到不止1和-1这两种结果，有可能得到一个复数因子。这就存在很多很可能。

最近，又有一种新的观点认为，如果你让一个粒子在另一个附近运动，波函数不仅有可能得到一个复数因子，还可能会发生变形，并在更大的空间中运动。这个新观点引起了很多人的兴趣。这样你就得到了一个非常有意思的映射，一个集合是真实空间中的运动，粒子间相互运动；另一个集合是波函数在希尔伯特空间或者说量子力学空间中的运动。这也就是说，如果你对真实空间事物本质的了解足够透彻，你就可以利用这一点来操纵与量子计算相关的希尔伯特空间，那你就有可能接触到更广阔的空间。

但在任意子领域，我们还处于初级认识阶段。这个理论是否正确还有待验证，因为相关实验也处于刚刚起步的状态，它们正在试图破冰。

量子力学的影响非常深远，它甚至改变了逻辑法则。在经典逻辑中，一个状态只有对或错这两种可能，并没有中间状态。但是在量子力学中，你可以在波函数中同时拥有某些状态，它既可以是对的，也可以是错的。当你进行测量的时候，结果是不确定的。你不知道将会得到什么。你有很多态，对计算来说非常有意义的态，你可以认为是意识的态，可以同时承载完全相反的观点，并且可以同时发挥作用。这个观点极大地解放并拓宽了我们的思维。经典的逻辑结构是完全不足以解释我们在物理学世界中的各种发现的。

要判断所有可能的态，即物体可以存在的状况，例如5个自旋，按照经典的方法，你要考虑其中每一个是自旋向上还是向下。在任意时间，它们都处于某种特定的组合中。在量子力学中，32种组合中的每一个都有其存在的理由。所以同时对物理情形进行判断时，不能单单只是说有多少种可能的组合，还要讲出每一种的可能性，并且这些可能性是不断变化的。不过这些口头描述都太过粗略，因为其中包含的并不是可能性，而是所谓的振幅。这之中的区别还是很大的。因为可能性是有其独立性的，而振幅是可以相互影响的。在物理实在中存在不同的态，而它们之间是相互作用的。从经典的角度来说，它们是完全不同的东西，并且不可能同时发生，而在量子理论中，它们是同时存在并且互相作用的。

这同样和我之前所提到的逻辑相关。计算机用来表示正确、错误的一种非常有名的方式是，用“1”表示正确，用“0”表示错误。自旋向上是正确，向下是错误。在量子力学中，利用一种创造性思维，正确和错误是可以相互作用的，你可以同时拥有相互矛盾的两个命题，并利用其进行有效的计算，类似于相互作用。我喜欢这个观点。我喜欢这种对立的存在，并且有相互作用。仔细思考一下吧，这真的是个非常性感的观点。

意识到这个观点就是一个非常大的进步。你很难知道到底需要多久，我们才可以得到有用的内容，更不必说产生可以与我们目前已有的计算技术相匹敌的结果，我们目前的发现已经非常有效并且还在不断进步；或者产生一些与目前我们所熟悉的想法完全不同，并且更强的想法。我们需要在很多层面上取得进展。

你可以不顾工程学的问题，然后这样问：“假如我有一台量子计算机，我要用它做些什么呢？我怎样在上面编程？它可以完成什么任务？”这是个数学方面的探索。你将其中的物理学抽走，之后这就变成了一个数学问题，或者还牵扯到了某些哲学问题。

之后还有一个更大的问题：“我怎样制造它？”怎样在实际中制造出这个量子计算机？这是个更物理学的问题。事实上，目前并没有最好的设计，人们仍然挣扎于制造小的原型机。我的看法是，一旦我们有了关于这种计算机的好想法，制造过程将非常迅速。这是我一直希望并且追随的。我对于如何制造它有一些基于任意子的灵感。

我一直在断断续续地思考这方面的问题。我在某些物理理论方面是先驱者，但是另外一些理论学家，包括阿列克谢·尤利耶维（Alexei Kitaev）和我之前的学生舍坦·纳亚克（Chetan Nayak），将那些理论带入了一个新的层次。现在有这样一个领域被称为拓扑量子计算，相关的文章和研讨会发展迅速。这个领域不断发生着变化，很多人，尤其是实验物理学家，开始介入。

理论物理学家科学生涯中会发生的最令人激动的事情是，那些从幻想或渴望开始的理论，成为其他人努力去构建的项目。没有比这再好的成就了，这是你想得到的最好的礼物。一开始时，你或许只是灵机一动，或者只是草稿纸上的随手几笔。然后有一天，当你走入实验室，眼前是各种各样的管子，里面流动的是液体氦，电流通过复杂的

电路进进出出，而这一切行为都是基于当初你的想法。当这样的事情发生时，简直像魔法一样。

理论物理学最美的部分是揭示现实的种种惊奇之处。过去，我们有很多种方式来看到最美的这部分。在物理学诞生初期，像伽利略和牛顿等人非常重视数据，并且强调他们正试图将观测行为与数学结合起来。他们发展了很多抽象概念，而以今天的标准来看，这些概念是非常实际的，它们总是以那些你可以触摸或者感觉到的形式存在，至少可以通过望远镜看到。这种方法几乎主宰了整个19世纪的物理学。麦克斯韦对电学、磁学和光学的综合，使光的本质得以发现——电磁波，并且预言了其他种类的光的发现，即射电和微波。之后将通过实验得到的所有电学和磁学的性质系统化，并用方程将它们表示出来，发现不一致时，就进行一些修改。这就是物理学的经典方式。

20世纪，一些比较成功的工作看起来与过去不太相同。如果不在意细节的话，是不能对所有细微之处进行评断的。但是类似于相对论，尤其是广义相对论这样的理论，很明显是基于更大的概念上的跳跃的。在发展狭义相对论时，爱因斯坦只是抽取了物理学中两个非常大的规律：如果你以匀速运动，物理学定律是不变的，以及光速是一个通用常数。这并不是基于对很多具体实验事实的观测和总结得到的，只是选取了某些非常关键的事实，并对它们进行了概念上的深度挖掘。广义相对论更是如此：它试图将引力理论同广义相对论融合到一起。这是一个非常理论化的尝试，并不受任何具体实验的驱使，却改变了我们对空间和时间的根本看法，并且对实验结果进行了预测，给我们带来了很多惊喜。

狄拉克方程是一个更加复杂的例子。狄拉克受到了大量理论的影响。他想将现有的描述电子量子力学性质的方程，也就是薛定谔方程，以与广义相对论相互协调。为了达到这个目的，他发明了一系列

新的方程，即狄拉克方程。这些方程看起非常奇怪，并且有很多疑问，但是当它第一次被提出时，毫无疑问是非常美丽的。这些奇怪的方程中每一个部分都需要新的解释、之前不存在的解释。这导致了对反物质的预言以及量子场论的产生。这是另一场有概念驱使的变革。另一方面，让狄拉克和其他人对这个方程抱有信心的原因是，它对氢原子中电子行为的预言是正确的，与精确测量的结果几乎一致。这样的支持使我不得不仔细观察，找到这个真实的证据。所以从最开始就存在经验主义的指导和鼓励。

我们对量子色动力学所做的最基础的工作，和狄拉克方程产生的过程几乎一致。我们通过对理论的考量得到了一些特殊方程，但这些方程看起来是有问题的。存在很多没有被观测到的粒子——夸克和胶子，而且不包括任何已经被观测到的粒子。即便如此，我们依然坚持我们的观点，因为它们可以解释某些测量结果，而事实上我们的坚持最终得到了回报。

总的来说，在物理学已经越来越成熟的20世纪，我们发现，数学对一致性和对称性的考虑对物理学产生了重大影响。我们可以在少量实验的条件下得到更多结论。然而，最终的判别标准依旧需要实验来解释事实。审美学可以带你走到哪一步？你可以将它作为你主要的导向吗，或者，你应该试图去公平对待很多特定的事实吗？不同的人有不同的方式；很多人利用大量事实仅作出少量推断；而有些人只利用某个事实来构建一个理论，而这个理论太完美使它必须正确，然后再用这个理论来填充例子。我试图考虑两种可能，然后看哪种更富有成效。对我来说更有效的方式是，先利用某些特殊或异常的实验结果，这些结果可能与我们对物理学的认知不相符，之后再对方程进行升级，让它可以容纳这些实验结果。

根据我对过去的认识，就算是物理学上最伟大的进步，当你将它们分开时，往往都是基于经验主义，基于对一些现有物理学框架或物理世界的已有认知。当然量子色动力学是这样。当我们提出渐进自由性（asymptotic freedom）来解释夸克相互靠近却不相互作用的行为时，这个理论看起来与量子场论是那么格格不入，当时我们继续向前推进，发现某种特殊的量子场论与夸克的行为是相一致的。这同时也解决了强相互作用力的问题，并且得到很多有效的结果。轴子也同样始于一个小小的异常之处：这个世界上有一个量非常小，而我们的理论并不能解释它为什么这么小。你可以更改你的理论使它变得更加对称，然后你会得到零值，不过还有其他结果。这种新粒子的存在撼动了宇宙学，因为有可能它就是暗物质的组成。我实在是很喜欢这类事情。

弦理论可能是非经验物理学中最极端的例子。事实上，它的历史起源是基于经验观测的，而且是错的观测。弦理论最初被提出是为了解释强相互作用的性质。强子是一个大家庭，弦理论提出的观点是，它们可以被解释为不同状态的弦、不同的自旋和震动方式。这个观点在20世纪60年代后期到70年代初期得到了飞速发展，但是与量子色动力学完全不同，而量子色动力学提供了对强相互作用的正确理论。

虽然观点是错误的，但其中得以发展的数学部分在之后成了弦理论的重要组成，它包含了对广义相对论的描述，并且遵循了量子力学原理。这对20世纪的物理学理论来说是个巨大的挑战：将两种看起来相差极大的理论组合起来，即研究微观世界的最伟大的理论量子力学以及基于宏观时空的广义相对论。这两个理论的本质有很大的不同，而当你试图将它们组合在一起时，你会发现很难将它们完全统一起来。但弦理论似乎可以做到这一点。

对于某些物理学家来说，构建引力的量子理论最大的问题在于，实验只能存在于想法中，因为这些实验包括超高能的粒子，或者黑洞深处，或者大爆炸的最初时刻，而这些都是我们不太了解的部分。所有这些都脱离了实际，脱离了可做实验的范畴。你很难去检测这些基本假设的正确性。而在人们最早的期待中，发生于20世纪80年代中期的第一次弦革命，人们认为如果弦理论方程得以求解，那么它的解是唯一的或者有很少的解，而其中一个解是我们这个世界的一个解。

从这些针对如何创建量子引力理论的高度概念化的思考中，你可能会被“引入”那些我们可以接触到，可以进行实验的部分，并且它们可以描述现实。但是随着时间流逝，人们会发现，越来越多的不同解会出现，并且它们具有各种各样的性质；而之前的期待，那个通过对概念的研究就可以得到描绘实际结果的期待，似乎有些摇摇欲坠了。这就是它今天所处的状态。

我个人对研究基础物理学的方式依旧是有些投机取巧的：观察某些现象，然后思考利用方程本身提供的方式来美化方程的可能性。就像我之前提到的，我当然会推进我很多年前的想法，关于超对称性、轴子，甚至关于量子色动力学的应用，因为时至今日，它们看起来依旧非常有前途。我总会思考新的事物。例如，我思考过某些新现象的可能性，这些现象与大型强子对撞机可能会在将来发现的希格斯玻色子有关。我意识到，我对某些事物的认识很久以来都停留在一个很低的层次上，但现在我理解了它们更深远的含义，就像希格斯玻色子打开了一扇新的窗口，它可以产生的某些现象，标准模型中的其他粒子是不可能重复的。如果注意一下标准模型中的数学，你就会发现其实可能存在隐藏项，它和目前我们发现的其他粒子之间的作用都非常弱，但是和希格斯玻色子却有非常强的相互作用。我们也将打开这样一扇新的窗口。最近我正在试图研究是否可以利用希格斯玻色子和引

力的某种细微的非标准相互作用，将暴胀理论和标准模型分离开来。这看起来也是非常有希望的。

很多我灵机一动的想法最后都被证明是错误的，但是没关系，我觉得非常有意思。

1993年美国国会取消了建立在得克萨斯州华兹堡附近的超导超级对撞机（SSC）项目。这个项目历经多年计划，很多科研人员为其投入了心血，并且已经耗资20亿美元。结果一切都成了一场空。2009年，一个类似的项目，欧洲核子研究中心主导的大型强子对撞机正在日内瓦附近建造。美国也是参与者之一。投入了总预算150亿美元中的5亿美元。但是这个机器在欧洲，并且由欧洲人承建，所以毫无疑问，他们的投入要更大。当然，得到的所有信息都要在合作科学机构中共享。所以除了有形的资产外，我们得到了相同的结果。我们避免了花费更多的钱。但这是一个明智的举措吗？

我不这么认为。就算用最短浅的经济学视角来看，这都不是一个明智的选择。这150亿美元中的大部分都由欧洲人分包，这就直接将经济牵涉其中。更详细地说，这个项目将负责高科技工业的经济部门牵涉其中，高科技包括超导磁铁、低温工程以及非常复杂的土木工程，当然还包括计算机技术。长远来看，这些专业技能将足以抵偿他们的投入。就算这只是单纯的经济合作，美国还是错失了一个国家的荣耀。100年或者200年之后，人们将会忘记美国人，而国家的荣耀将属于外国人，他们将会记住，拓展人类知识边界的事件发生在大型强子对撞机以及欧洲人对其所作出的努力。作为一个国家，美国并没有很多可以展示的辉煌历史，我认为我们又错过了一次。

或许我们可以弥补。目前是对抗老龄化的有利时间点。有很多基础的生物学已然存在。我们知道要完成些什么。老龄化过程本身对公众健康有着非常深远的影响，就算不考虑许多主要疾病，比较严重的

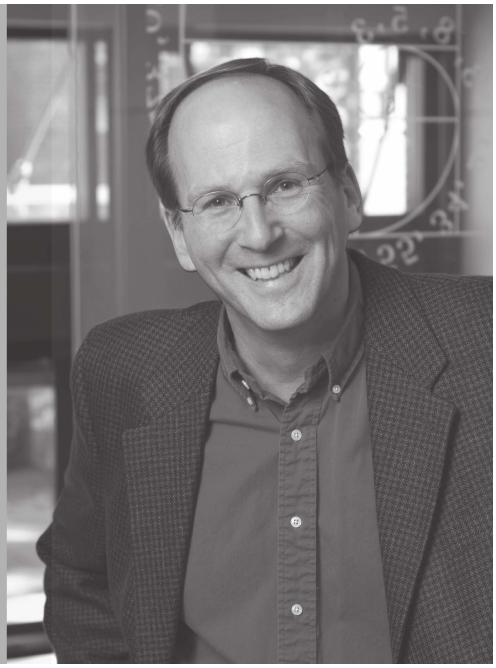
像癌症、心脏病，人类的寿命也只能延长几年。我们需要找到这个过程的根源。

另一个大型项目是在星系中系统地搜寻生命。我们有天文学工具，我们也可以设计工具来搜寻遥远的、与地球相似的行星，研究它们的大气环境，来判断是否有生命存在的可能。投入一个国家的人力、物力，来搜寻与地球类似的、有生命存在可能性的行星，目前来看是可行的。我们需要努力去思考一些可以使我们留名青史的事情。

WE STILL DON'T UNDERSTAND.

我们依然所知甚少。

——《谁会关心萤火虫？》



19

Who Cares About Fireflies?

谁会关心萤火虫?

Steven Strogatz
史蒂芬·斯托加茨
康奈尔大学应用数学系教授；著有《心里有数的人生》《X 的乐趣》

阿兰·爱尔达的导言：

阿兰·爱尔达（Alan Alda），演员、作家、导演；美国公共广播公司（PBS）《头脑训练》*（Brains on Trial）*节目主持人；著有《我自言自语时在想什么》*（Things I Overhead While Talking to Myself）*。

史蒂芬·斯托加茨毕生都在研究一些有人认为不存在、有人认为太显而易见的东西。好像聪明人总是容易在一些微妙的境地，就如同地平线上的雾霭，钻牛角尖。他在那看到点东西，就会跑过去再靠近点看。大自然中众多令人吃惊的自发同步现象，一直萦绕在他的心头。

斯托加茨的研究涵盖了方方面面，从睡眠模式到心率再到亚洲萤火虫的同步脉动。在他2003年的著作《同步》（*Sync*）中，他以一种令人震惊的方式将这些研究和其他很多线索汇聚在了一起。令人吃惊不已的是，竟然有这么多事情必须或必须不能同步发生，我们的生活才能有条不紊地进行下去。有许多事我们都没意识到它是同步的一部分，比如我们每天晚上看到的月亮。

我认识斯托加茨十几年了。我们的认识开始于一次我打给他的电话，当时我都不知道他会不会接我的电话。我在《科学美国人》（*Scientific American*）上读到了他一篇关于耦合振子的文章。我对他关于惠更斯发现钟摆若能感应到彼此就会发生同步的描述着迷不已，我希望他能给我再多讲一点。对于我求知的渴望、幼稚的好奇心，他令人意外地慷慨大方。从那时起，我们就成了朋友。

就像理查德·费曼一样，斯托加茨有一个本事，他不但想将每件复杂的事清楚明白地讲给普通人听，而且知道如何做到这一点。因此，当我们在百老汇排演彼得·帕奈尔（Peter Parnell）的《量子电动力学》（*QED*）时，还找来了斯托加茨给我们做物理学顾问。

请允许我向你们介绍康奈尔大学应用数学系教授、我的好哥们儿：史蒂芬·斯托加茨。

我对周期轮转的兴趣要追溯至高中时代。那时我在上一门新生的标准科学课程，科学I。第一天，老师要求我们测量走廊的长度。我们趴在地上，把尺子贴紧地面，测量走廊的长度。我记得我当时是这么想的，“要是科学就是这样，那实在是太无聊了”，由此产生了科学无聊又没用的想法。

幸运的是，第二节实验课要好一些。迪柯西奥（diCurcio）老师说：“我希望你们能找出钟摆的规律。”他给我们每人发了个玩具摆，摆长是可以伸缩调节长短的。还给每人发了一块秒表，让我们记

录钟摆来回10次所需的时间；然后再把摆长调长一些，重复这个过程。实验的核心在于，观察来回摆10次的时间是如何随着摆长的变化而发生变化的。实验的本意是叫我们画图，并找出两个变量间的关系。当我忠实地将摆10次所需时间和相应摆长作为横纵坐标，将它们画在了图上，画了四五次之后，就有某种趋势显露出来。这些点落在了一条特定的曲线上，这条曲线我在几何课上见过。那正是抛物线，跟喷泉喷出的水的下落轨迹一样。

我记得那时的感觉像是被恐惧包围了。不是高兴，而是惊讶。就好像钟摆懂几何一样。几何课上的抛物线和钟摆的运动有什么关系？就在那张图纸上。那一瞬间我好像醍醐灌顶，第一次懂得了“自然法则”确有其事。我突然懂了其他人说的，“宇宙自有其法则，懂了数学才能看得懂”的意思。那次实验课改变了我的一生。

同一门课之后的一次实验，研究的是一种叫作共振的现象。实验内容是在一根长管子里注入特定高度的水，剩余部分则是空气。然后在开口的那段敲一个音叉。音叉以已知的频率即每秒440次震动。实验则要求提高或降低水柱的高度，直到其产生巨大的轰鸣。当水柱的高度合适时，音叉微弱的声音会被水柱剧烈地放大，这表明发生了共振。其中的原理是，当管道开口端有1/4声波长度时，共振的条件即被满足。由此，知道声波的频率，再测量出空气柱的长度，就可以测出声速了。我那时还不太明白这个实验，但迪柯西奥老师训斥我说：“史蒂芬，这个实验很重要，它可不仅仅是关于声速的。你要知道，就是共振让原子们聚在一起的。”那种让我战栗的感觉又一次降临了。我以为我就是在测测声速、玩玩水柱，但从迪柯西奥老师的观点来看，从这简单的水柱竟然能看到物质的结构！共振竟然能应用到不可见的原子结构，多亏了它，我面前的桌子才能如此坚固。我又一次被大自然的统一性所震惊。这些事实令我吃惊，这些规律是如此超凡，它们能运用在从声波到原子的所有事物上。

大自然的统一性不应被夸大，显然不能说万事万物全都一样，但其背后确实有着千丝万缕的关系。共振涉及挑梁的震动、原子的结构还有声波的传递，同样的数学也以不同的方式一次次发挥作用。

关于迪柯西奥老师，还有一则故事我很喜欢。那时我在读爱因斯坦的传记，迪柯西奥也像对待一名成熟的科学家一样看待我，而那时我才十三四岁。我向他提到，爱因斯坦在高中时就被麦克斯韦方程组所震惊，那些电和磁的法则给他留下了深刻的印象。我说我等不及了，等不到我长大后才能去了解足够多的数学知识了，我现在就想知道并弄懂麦克斯韦方程组。

我的学校是一所寄宿学校，我们常有家庭式的晚餐，当时迪柯西奥老师和我还有其他几个孩子以及他的妻子坐在一张大桌子边，他在给我们分土豆泥。当我说我想要找时间看看麦克斯韦方程组时，他放下土豆泥说：“你想现在就看看吗？”我说：“当然。”他就开始在餐巾纸上写下了那些神秘的符号，嘴里还含糊不清地说：“圈的圈是梯度导数减去倒三角平方……然后由此我们得到波函数……然后现在我们看到了电与磁，就可以解释什么是光。”那一刻，他简直太了不起了！我发现了一个全新的老师。迪柯西奥老师不仅仅是个高中老师，还是一个能把麦克斯韦方程组记在脑子里的人！这让我觉得我能从这个人那里学到无穷无尽的东西。

在那所高中，还有一位约翰逊老师教我们几何学。约翰逊老师毕业于MIT，对数学了解颇多。有一次他突然提到有那么一个三角问题他解不开，尽管那个问题听上去与我正在学的另一个三角几何学问题很相似。问题是，如果一个三角形的两条角平分线等长，那么这个三角形一定是等腰三角形吗？也就是说，两个底角一定相等吗？他说他不知道怎么解这个问题，而且在他20年的教学生涯中从未有人解开这个问题。我还从来没听说过哪个老师说有一个问题他不会解，于是我对

这个问题兴趣大增：感兴趣到体育课上有人扔球给我，我都接不住，因为我正专心致志地想这个角平分线问题。这个问题让我如痴如狂了几个月，我感觉我离正确答案已经近在咫尺，但总是差那么一点点。

那是我第一次领略到做研究的乐趣。我的研究只是为了开心，与成绩无关，甚至我都没跟别人说过这事，我就只是想解开它。直到某一天，我想我解开了。那是一个周日的早上，我给约翰逊老师打电话，问他我是否可以过去证明给他看。他说：“好的，来我家吧，我家的地址是……”我走去了他家，他当时还跟他的孩子一起穿着睡衣。他仔细地查看了我的证明后说道：“你做到了，就是这样！”他笑得不明显，但似乎很高兴。后来他还给校长写了一封特别推荐，以说明我解出了那个难题。

后来，我上了普林斯顿大学。作为一名大一新生，我开始上线性代数课，这门课是专为在中学表现优秀的学生开设的天才少年课程。第一天，一名叫作约翰·马瑟（John Mather）的教授走了进来，那时我们并不知道他是教授还是研究生。他非常害羞，红色的胡子又多又长。他进来得悄无声息，我们几乎没有发现他。然后他就张口说道：“场F的定义是……”就这样。没有自我介绍，没有“欢迎来到普林斯顿大学”，什么都没有。他只是用线性代数的定义做了开场白。那次经历感觉十分糟糕。我生来第一次懂得了为什么人们如此害怕数学。他险些就成功地让我再也不想成为一名数学家了。

而我终究还是成了一名数学家的唯一原因，就是第二节课的老师，伊莱·斯坦（Eli Stein），他是一名非常优秀的老师。他现在还在普林斯顿大学工作。那是一门复数变量课程，很像微积分。我在高中时很喜欢微积分，因此我突然觉得我又可以研究数学了。之前那门线性代数好像是一个筛子，它精挑细选，只有特定的学生才能通过。你的抽象思维能力经受了检验。你能想出纯数学家所需的严格证明

吗？这是纯数学的根基所在。事实也许是，我并非生来就有这些能力。我真正喜欢的一直都是能运用到自然，也就是真实世界的数学。那时我还不知道有一门叫应用数学的学问，我以为那就是物理学。现在这成了我的工作。就是因为我在大二与斯坦老师的愉快经历，才使我最终将数学作为了自己的事业。

经常有人建议我做医生，但我总是很抗拒，因为我知道我想要做的是教数学。等到我大三的时候，尽管那时候要当医生已经很晚了，我父母还是督促我去修一些医学预科课程，比如生物学、化学。我同意了。我当律师的哥哥想方设法说服我，继续抗拒是没道理的。因为我并不是要同意去当医生，学点生物、化学也没什么坏处。我接受了他的说辞，结果之后的一年简直是地狱。因为我选的大一生物学要去实验室，大一化学还要去实验室，还有基于大一化学的有机化学。这对于一个不擅长实验室工作的人来说，简直是苦不堪言。

尽管在主修数学之外还要读医学预科让我觉得负担很重，但我还是挺喜欢生物学和化学的，尤其是DNA的双螺旋结构和DNA的复制原理。我心满意足，甚至还修了一门斯坦利·卡普兰（Stanley Kaplan）医学预科课程，以准备医学院入学考试。

但是等我春假回家，我母亲看着我的脸说：“你看上去有些不对劲，有些事正困扰着你。怎么回事？你在学校过得还好吗？”我说：“挺好的，没事，我学的东西挺好。”但她说：“你看起来可不像挺好。你看着不开心。哪里不对，你怎么了？”我真的不知道。我说：“也许是太累了，我有很多课。”但母亲说：“不，有什么事不对。你明年要上什么课？你可都要大四了。”我说：“这确实让我烦着呢，因为我读医学预科开始得太晚了。我还要学脊椎动物生理学，还有些生物化学以及其他一些医学预科课程。再加上我还有数学系的毕业论文要写，这意味着我的日程安排得满满当当，没法上量子力学课

了。”她说道：“为什么非要上这个课呢？”我说：“我从12岁就开始读爱因斯坦了，我喜欢海森堡、尼尔斯·玻尔还有薛定谔，我终于有机会弄明白他们说的东西了。再也不需要那些类比和比喻了，我能明白薛定谔的工作了。我这辈子都一直在朝着这个方向努力，我已经能够明白海森堡不确定原理的意义了，而我却要去上医学校、解剖尸体。我永远没机会去学那些了。”

母亲接着说：“不如你现在就这么说，‘我想学数学，我想学物理学，我想学量子力学。我不想当医生，我想成为最好的数学老师和学者。’”我瞬间泪如泉涌。心里压着的一块大石头终于落了地。我们一起又哭又笑。那一瞬间坦然面对自己，从此一往无前。我特别感谢我有这样通情达理的父母，让我能够用否定的方式找到我一生的激情所在。有些人碌碌一生也没能找到他们真正想做的事。

在普林斯顿大学，我们要在大四做毕业设计，我打算选择自然中的几何这个方向，尽管我并不清楚地知道具体是怎么回事。我的导师，在肥皂泡的几何学研究方面非常有名的弗雷德·阿尔姆格伦（Fred Almgren）教授建议我研究DNA的几何结构。比如，DNA的结构为什么在解螺旋时不会纠缠在一起？它那么长，我们很自然就会想它很容易缠到一起，而这要真的发生在细胞中，就意味着死亡。为什么不会发生这种情况？经过研究，我对DNA有了深入了解，并就它的几何结构写了一篇毕业论文。我与一名生化工作者联手提出了一种叫作核染色质（chromatin）的新结构。它是DNA和蛋白质的混合物，是双螺旋结构之后的第二级结构。我们知道，双螺旋会在一种叫作核小体（nucleosome）的蛋白质小线圈周围受损，但没人知道核小体自己是怎么排成一根线上的珠子那样的，或者说怎么受损成核小体的。令人高兴的是，我和我的生物化学导师最终在《美国国家科学院院刊》*（Proceedings of the National Academy of Science）*上发表了我们的论文。我现

在致力于数学生物学研究。所以尽管我没做医生，我仍在生物学中使用数学方法来做一些实事，也就是核小体的相关研究。

就从那时起，我决定要做一名应用数学学家，研究数学生物学。我去了英国，靠马歇尔奖学金就读于剑桥大学，但却烦透了那里的传统流程。哈迪（G.H.Hardy）在他的著作《一个数学家的辩白》（*A Mathematician's Apology*）对此有详细描述。剑桥大学的课程从牛顿时代起就是那个样子，我厌烦得不行。有一天我逛进了街上的一家书店，拿起一本题目异于寻常的书：《几何生物学时间》（*The Geometry of Biological Time*）。我说“异于寻常”是因为我曾给我的毕业论文起了个副标题叫作“浅谈几何生物学”。我以为“几何生物学”这词是我造出来的，就是把“几何”与“生物学”并在一起，而现在竟又有别人用了同样的词。这家伙是谁？亚瑟·T.温弗里（Arthur T. Winfree）是谁？

我随手翻了翻，然后觉得他是个傻瓜。他看起来像个怪人。我不确定他是不是认真的，因为他的章节标题还有许多俏皮话，他有的数据来自他母亲多年的月经周期，讲的也都是生物的周期。温弗里去世于2002年11月5日，在那时，他还没什么名气。他是普渡大学的一名教授。我瞥了一眼这本书，又把它放回了书架。在那之后我自己都没意识到，我隔三岔五地就会去翻一翻它，直到最后把它买了回来。也许是因为那时我在英国形单影只，承受着文化上的水土不服；也许是因为它太令我着迷，我开始每天边读边画线，对生物的周期节律如痴如醉。从细胞分裂到心跳，再到大脑中的节律如视差感与睡眠节奏，全都可以用简单的数学描述。这就是温弗里在他书中所呈现的，也是我将同步作为研究方向的起因。

在自然界中，奇妙的同步现象比比皆是。比如，早在16世纪，弗朗西斯·德雷克爵士（Sir Fancis Drake）的时代，第一批西方旅行

者到达东南亚，他们记录下一种奇妙的现象。在沿着河堤的树中，成千上万只萤火虫的尾部会同时亮起又同时熄灭。这些记录被传回西方后，发表在科学期刊上，然而未曾亲眼看到的人们都难以相信这是真的。有科学家说，这是人类的一种知觉错误，我们看到的一些景象其实并不存在，或者只是一些光学错觉。那些没多少智力可言的萤火虫，怎么可能完成如此不可思议的协作活动？

有的理论认为，其中可能有领头萤火虫。但这显然是荒谬的，为什么会有一只特殊的萤火虫？这一理论已被人们抛弃。还有人说可能是大气的原因。比如闪电，一道闪电划过可能会使萤火虫们受到惊吓，因此同时开始闪烁，这使得它们能聚在一起。这种同步显然只发生完全晴朗的夜晚。直到20世纪60年代，来自国家健康协会（National Institutes of Health）的生物学家约翰·巴克（John Buck）和他的同事们才发现，萤火虫是自我组织的。它们每个晚上保持着一致的步调、完美的节奏闪烁数个小时，没有领导者也没有环境的影响，而是通过一种神秘的涌现过程。“涌现”（emergence）这个词我们都很熟悉，但在自然界中，它有着特别的意义。

现在的观点认为，单只萤火虫不但能够发出闪烁荧光，还能够对其他萤火虫的荧光作出回应，它们会调节自己的节奏。为了证明这个观点，20世纪60年代中期，巴克和他的妻子在泰国旅行时，搜集了一大袋子雄性萤火虫带回旅馆，并在漆黑的房间内释放它们。萤火虫们翩翩飞舞，落满了天花板和墙壁，然后，其中两小片区域开始同步闪烁，接着是第三片、第四片……后来的实验室实验表明，通过控制人造光源向着一只萤火虫闪烁发光，可以加快或减慢它的闪烁频率。也就是说，不管开始时情况如何，每一只萤火虫都在释放着信号，影响着其他萤火虫，它们彼此影响，加速或减慢，最终不可避免地进入同步状态。

你可能会问，这有什么大不了的呢？谁会关心萤火虫呢？关心的原因其实有很多。首先，各种技术和医学的应用都依赖于这种自发同步。在你的心脏里，有一万个起搏器细胞激发其他细胞律动，这一万个细胞就好比那数千只萤火虫，每一个细胞都有自己的节奏。就心脏来说，这是一种有节奏的充放电过程，而非像萤火虫那样用光交流，它们用电信号前后彼此进行沟通，但本质是一样的。它们是单独的振子，有着自己的频率，不断重复，同时它们又彼此相互影响。就这样，它们不谋而合地达成同步。

当然，某些时候，同步也不是什么好事。如果同步大规模地发生在你脑子里，就会导致癫痫。

同步的应用还不止这些。激光是我们这个时代最实用的工具之一，它就依赖于光波的同步。原子们统一地脉动，发出相同颜色、相同相位的光，也就是它们的波峰、波谷全部一致。激光里的光与我们头顶上灯泡的光并没有本质上的不同，原子是一样的，区别只在于原子们以不同的方式合作。就好像舞者不变，但编舞却相差甚远。

同步现象在我们身边比比皆是。在伊拉克的卫星导航武器使用的全球定位系统由24颗卫星组成，每一颗卫星上都有一座机载原子钟。这些钟都与位于科罗拉多州博尔德（Boulder）的美国国家标准与技术研究院（NIST）持有的主超级钟精确同步。利用这种精确到十亿分之一秒的完美同步，我们可以用导弹击中一块车牌。

生命也依赖同步。比如，当精子细胞游向卵细胞时，会利用液压涨落统一摆动它们的尾巴。例子我可以一直举下去。奇妙之处就在于，同步现象发生在自然的每一个尺度，从亚原子级到宇宙级别，它似乎无处不在。它甚至可能是灭绝恐龙的元凶。引力同步可能导致了某些小行星脱离了小行星带，最终撞上了我们的星球，导致恐龙和其

他一些生物灭绝。在自然界中，同步是一种普遍现象，然而从理论的角度来看，它又是如此神秘莫测。

我们过去常讨论熵的问题，也就是复杂系统有变得越来越混乱的趋势。人们总是问我：“同步不会违背这个趋势吗？系统自发变得井然有序，这不是违反了自然的法则吗？”熵原理当然不能违背，但它们其实并无冲突。问题的关键在于，熵原理是应用到一类所谓孤立或封闭系统上的，它们没有来自外部环境的能量注入。这与我们所讨论的地球生命不能混为一谈。我们所讨论的系统远非热动力学平衡状态，其中有着许多令人吃惊的自组织现象，同步不过是其中最简单的一个例子罢了。

实际上，熵以及系统的混乱倾向与同步现象背后的物理学定律是一回事。只是我们对远非平衡状态的系统的热动力学了解得还不够，因此难以发现二者间的联系。不过我们就要弄明白了，至少在物理学上，我们正在大量研究自发同步系统。比如，激光的工作原理我们一清二楚，这个过程也不会违背熵原理。至于活物的例子，比如心脏细胞，我们对电脉冲如何前后传播有了大概的想法。但同步还涉及一些我们这个时代难以理解的问题，比如意识。有的神经系统学家认为，意识与大脑其他活动的区别之处就在于，脑细胞以接近于40赫兹的频率互相交流。

我对自发秩序或者自组织研究的兴趣就在于，我真的认为现在科学界的许多重大未解问题都与此有着相通的特征。在结构构造上，它们都涉及数百万的成员，可以是中子，可以是细胞，也可以是经济领域的参与者。它们通过复杂的网络和相互作用彼此交互、相互影响，使得我们会时不时地看到令人吃惊的有组织状态。斯图尔特·考夫曼称之为“免费的秩序”（order for free）。我们都在不同的角度爬着同一座山。考夫曼认为，它对更好地理解进化颇为重要。当他或者

盖尔曼说起复杂适应性系统时，强调的重点似乎是在“适应性”上，这意味着，关键是要对自然选择有更多了解。但是你看，我几乎没有提进化。我觉得他们舍近求远了，还有更好的着手之处，最简单的就是从与进化无关的地方开始研究。

我想要从复杂的纯物理系统开始，研究它们如何只在物理学定律的作用下形成自组织。先把这一点搞清楚，再去增加更多有关进化的内容。我知道进化重要，但将其作为研究起点可就大错特错了。

最近，我对癌症产生了浓厚的兴趣，我想搞清楚癌细胞间的交互网络，或者癌细胞内的化学反应网络是怎么乱了套。有些癌症是因为某一个基因出了问题，但我不相信所有的癌症都是这同一个原因。从尼克松向癌症宣战到现在，已经30多年了，而我们却还未真正了解过它。了解致癌基因是一个好的开始，但并非全部。还是一样，关键在于蛋白质和基因的编舞以及一次次失误，不只是一位舞者，而是它们共同的合作方式。癌症是一种动态的疾病，我们无法通过单纯的生物学简化论思维方式弄清楚它。这需要将简化法给我们的数据与新的复杂系统理论以及超级计算机和数学相结合。而我，想要在这份工作中出份力。

生物学家经常强调计算机所承担的重要角色。计算机确实不可或缺，但好的理论与想法更是少不了。有高级的计算机和丰富的数据还远远不够，你还需要新想法，而我认为这就要指望复杂系统数学了。尽管我多次提到“复杂系统”这个术语，但相关理论还很薄弱。我们真的还不太了解它。我们有大量计算机模拟结果，也展示出了令人震撼的景象，但了解并未增多。有深刻的观点吗？我们了解的情况还很少，这就又回到了同步。我喜欢将同步作为自发秩序的粒子，因为这是我们能用数学理解的少数几个例子之一。如果我们想解决那些难

题，就要去解我们能解的数学问题。所以我们要从最简单的现象开始，同步正是其一。透彻理解这些问题，还需要艰苦卓绝的工作。

还有一种看法是我们不需要去理解的。理解也许是种奢望。也许某些洞见能三四百年经久不衰，就像牛顿那样，但它不是最终目的。最终目的其实只是控制疾病，规避生态风险。如果我们能做到这一点，即使不知道怎么做到的，那也算是不错了。计算机也许懂，只是我们不必去懂。

总的来讲，亚里士多德之后的几百年内，我们都处于蒙昧状态。从开普勒、哥白尼、牛顿开始，我们通过数学来解释问题，那是一个理解学习的伟大时期，某些数学问题得以解开。理解麦克斯韦方程组、热动力学乃至量子理论所需的数学知识，都包括一类我们已经完全知道如何求解的问题：线性问题。就在过去的几十年，我们还对非线性问题束手无策。我们只懂得那些最简单的、只有三四个变量的问题，我们称之为混沌理论。一旦变量像大脑细胞那样增加到几百个、几百万个乃至几十亿个，我们将一无所知。这正是复杂系统要研究的，不过我们还有很长的路要走。我们可以用计算机来拟合它们，但这跟干瞪眼儿差别不大。我们依然所知甚少。

注：《心里有数的人生》（*The Calculus of Friendship*），两位数学狂人的心灵分享，史上最令人潸然泪下的师生故事，温馨、真实的人生故事，用最坦诚与温暖的文字打动每个人，在含着眼泪的数字中发现你自己。该书中文简体字版已由湛庐文化策划，万卷出版公司出版。

THE LAWS OF CONSTRUCTOR THEORY ARE NOT ABOUT THE CONSTRUCTOR; THEY'RE NOT ABOUT HOW YOU DO IT, ONLY WHETHER YOU CAN DO IT.



构造者理论的原理不是关于构造者的；它们在乎的不是你怎么做到，而是你是否可能做到。

——《构造者理论》

20

Constructor Theory

构造者理论

David Deutsch
戴维·多伊奇
量子物理学大师；牛津大学物理学家；计算科学前沿奖（Edge of Computation Science Prize）获得者；著有《无穷的开始》

许久前，我们讨论过一个我关于构造者理论的想法，在那时，这个想法还很新颖。我那时以及现在都认为，构造者理论不仅可以将量子计算理论归结于计算，还可以涵盖所有的物理过程。我推测，这将提供一个描述物理学系统和物理学定律的新模型。它还会有自己的新原理，比现有的最深刻的理论，如量子理论和相对论，都更加直指本质。那时，我对这个想法抱有极大的热情，然而写一本书所需的时间大大超出我的预计，使得我迟迟未能继续研究它。但现在我终于重新拾起，再次着手研究构造者理论。我想说，它比我预期的更有希望，发展速度也比我想象的快。

构造者理论出人意料的成果之一就是，它得到了信息理论的新基础。物理学领域对信息的定义一直是个老大难问题。一方面，信息是

完全抽象的，艾伦·图灵等人创立的计算学初始理论视计算机及其计算的信息为纯抽象的数学客体。时至今日，很多数学家仍未意识到，其实并不存在什么抽象的计算机。只有物理客体才能计算。

另一方面，物理学家一直很清楚，想要在物理学领域完成信息理论的工作，比如统计力学、热力学第二定律等，信息必须是一种物理量。到目前为止，信息是独立于它的载体的。

比如，我现在跟你讲话：信息开始于我大脑中的某种电信号，然后转化为我神经中的信号，接着进入声波，变成麦克风的机械震动，再变成电，等等，最终可能会进入互联网。它在种种遵循不同物理学定律的客体中具现化。为了探明这一过程，就必须找到在这个过程中不变的东西，也就是信息本身而非其他显而易见的物理量，比如能量或者动量。

弄清信息这种基本独立性的方法，是在比运动定律这种我们认为已经接近最基础的物理学定律还要基础的层面上去研究它。构造者理论研究的就是这般基础的物理学定律和物理系统，比一般意义上的物理系统，也就是粒子、波、空间、时间以及运动原理描述的初始状态演化过程等，还要更深一层。找到这种新物理学基础的希望，就是量子计算理论。

我曾认为量子计算理论就是物理学的全部。理由是，一个超级量子计算机可以用任意的精度模拟出任何物理对象。这意味着，一台超级计算机计算出的所有可能运动的轨迹，就对应着所有事物的所有可能运动的集合。这就像是研究超级量子计算机就等同于研究所有的物理对象，它包含所有可能物理对象的所有可能运动。正因如此，我过去曾说，量子计算理论就是物理学的全部。但我后来意识到这样说并不对，因为还有一条沟壑横亘在它们之间。那就是尽管量子计算机能模拟出任何东西也能代表任何事物，只需通过特定的程序就可以研究

任何对象，但量子计算理论无法告诉我们，哪个程序对应哪个物理对象。

这听起似乎无关紧要，但它其实具有基础性意义。因为如果不知道计算机中的抽象是与哪个对象对应，就好像有一个银行账户，然后银行告诉你，“你的余额还是那个数”。除非你知道这个数是多少，否则你实际上还是不了解你账户的情况。物理学也是一样。如果你不指明量子计算理论的哪个程序与你的物理学系统相对应，就无法获知物理学的全貌。

然后我想，我们需要的是一个一般化的量子计算理论，它可以将程序与相应对象联系起来。这就是构造者理论的早期想法。但我又意识到这样还是不行，因为这仍然是在现有的理论模型去刻画构造者理论，因此它不会对解决深层次问题有所帮助。它还是初始状态加运动原理得到最终状态的那一套，输入初始条件加计算机运行得到计算机输出。构造者理论不过是现有物理学理论的不同解读罢了，无法创造新东西。

构造者理论有所建树的关键，所谓的新东西，就是它不是初始状态、运动原理、最终状态那一套模式。它只在乎哪种变化是可能的、哪种是不可能的。运动原理是可能与不可能的间接结果。并且，构造者理论的原理不是关于构造者的；它们在乎的不是你怎么做到，而是你是否可能做到，这与计算论有些类似。计算论的内容不是晶体管和电线，也不是输出与输出设备，而是信息的能否传递。我们有超级计算机，我们知道每个可能的个体对应一个超级计算机程序，但超级计算机可以用很多方式被建造出来。如何建造不重要，重要的是计算的深层次原理。

对于构造者理论来说，重要的是哪些物理变化是可能的，哪些是不可能的。当它们是可能时，你就可以有很多方式去完成；当它们是

不可能时，往往是因为它们不被某些物理学定律允许。这就是为什么卡尔·波普尔说，物理学理论或者说任何科学理论，都是关于什么不能做以及为什么不能做的。

如果有个理论能告诉你什么可以、什么不可以，那它的潜台词就告诉了你全部的物理学定律。这般简单的想法已经是成果喜人，我颇为自信，现有物理学框架下的各种琐碎的困惑和老大难问题都将由此迎刃而解。这还需要花些时日，但我相信我们终将取得预期的成果。我们的工作常被误解为在宣称只有科学理论才有价值。当然不是这样，正如波普尔曾说的，这种曲解很愚蠢。比如波普尔自己的理论就是一个哲学性的理论。显然，他不会说自己的理论无关紧要。

在某些方面，如同量子论、广义相对论以及任何基础物理学理论一样，构造者理论与哲学也有交集。有正确的哲学领导，也就是波普尔的哲学，可以帮助我们避免走入错误的死胡同。波普尔以其对科学与形而上学所划分的标准而闻名：科学理论原则上是可经由实验验证的，而形而上学或者说哲学，则不能。

“可验证”做起来可并不像听起来那么容易。波普尔的细致调查以及他提出的原则让我不禁思考：“要如何去验证构造者理论呢？”构造者由一种描述其他科学理论的语言构成，这谈不上对错，只是方便不方便而已，但它仍是原理。只不过这种原理不是关于物理对象，而是关于其他原理。其他原理必须遵循构造者理论。

这就带来一个问题，你要如何验证一条原理的原理的对错？如果它说原理必须有怎样的性质，你不可能真的四处寻找一条没有那个性质的方法，因为实验永远无法证明那条原理的对错。幸运的是，波普尔解决了这个难题。这种原理的原理的情况，必须间接求解。我想引入一个专有术语，也就是原理的原理应称之为“定律”（principle）。这个词早有人用，但我想让它标准化。

以能量守恒定律为例，它声称所有原理必须遵循能量守恒。也许你感觉不明显，但任何实验都无法得出违反能量守恒的结果，因为如果有人给你展示一件释放能量多于它所吸收能量的物品，你总是可以说：“这是因为存在某种不可见的东西，或者其运动的原理与我们所想不同，或者这个物品的能量公式有所不同。”这样就没有实验能驳倒它。

实际上，在物理学的历史中，中微子正是通过这种方法发现的。β衰变的过程似乎并未遵循能量守恒，于是沃尔夫冈·泡利（Wolfgang Pauli）提出，能量可能是被某种不可见也探测不到的粒子携带出来的。事实证明他是对的，但验证的方法并非做一个β衰变实验，而是去看中微子的理论是否能成功，是否可被独立验证。定律给出的原理的可验证性，为定律本身提拱了可验证性。

关于构造者理论，我认为有一点需要特别指出，那就是，当我说我要将物理学重新表达成什么能做、什么不能做，这听起来就像退步成了操作主义或实证主义。就像是我们不用关心完成事件的主题，即构造者，只需要有输入输出以及它们是否兼容。但构造者理论实际并非如此。

构造者理论关心的是怎么得出结果，只是用不同的语言表示出来。我不太熟悉几十年前流行的控制论观点，其中可能就蕴含着构造者理论的影子，但却在当时被证明无用。对此，我毫不意外。如果真是如此，我们可以当一回事后诸葛亮了。因为，构造者理论的想法只在具备了后量子计算理论的概念框架后才有可能，也就是计算论与科学有所结合，而非仅仅在哲学之后。这就是量子计算理论的贡献。

冯·诺依曼在20世纪40年代的工作也有可能是构造者理论的前身。我不太确定冯·诺依曼当年是否用过“构造者理论”这个词。也许他只是称之为“宇宙构造者”？不过冯·诺依曼关心的问题有所不

同。他研究的是生命如何能在这样的物理学定律下得以存活。那时候DNA的机制还未被发现。

冯·诺依曼对定律的问题很感兴趣。他关心的是，一个自我复制的客体如何在我们已知的物理学定律之下存在。他意识到这其中潜藏着逻辑和代数解答。通过证明生物不可能靠简单的自我复制，他真的解决了生物怎么可能存在这个问题。物理必须在内部有一套代码、处方或者说明书，就像我们现在说的计算机程序，来说明如何构造它。因此自我重复的过程必须分两步发生。这些都是冯·诺依曼在DNA系统被发现之前就得出的结论，但他没有往更深的层次考虑。因为他从未用构造者理论去思考，也没有意识到这些都是物理学的基础问题，而非仅仅是生物学基础。他被物理学的初始条件、运动原理、最终状态这套东西束缚了。构造者必须被包含在系统的描述之内，否则就发现不了转化的原理是怎样的。

当冯·诺依曼发现无法在纸上列出方程来给生命体建造数学模型时，他选择了对物理学定律一次又一次的简化，并最终发明了细胞自动机（cellular automata）这个研究领域。这很有意思，但却偏离了真正的物理学。我想做的是另一个方向，用具有类似计算论的代数原理的物理学定律来将其统一。

选择这个方向有几大理由，我很幸运能处于这个时代。主要的事情要从图灵开始，然后是罗尔夫·兰道尔（Rolf Landauer），他在20世纪60年代独自坚持计算就是物理学的说法……因为在那时，数学家们认为计算论是抽象的而非物理的。罗尔夫则意识到，纯抽象计算机是无意义的，计算论必须得是关于物理对象对信息的处理的。罗尔夫专注于研究物理学定律在计算上强加了哪些限制。不幸的是，这是条弯路。因为我们后来发现，物理与计算最重要也最惊人的关系，正是量子理论允许经典物理学中不可能存在的计算模式存在。一旦建立了

量子计算理论，就得到了完全属于物理学的计算理论。自然而然地，就会想将它一般化，这正是我想做的。这也是方向之一。

冯·诺依曼的动力更多的来自理论生物学而非理论物理学。对量子理论的错误看法也使得他没能意识到，他的理论是关于基础物理学的。他最早将量子理论只作为预测并得出实验结果的工具，却并不认为其中还蕴含着结果的原理。这正是冯·诺依曼从未将他自己的理论视为一般化的量子理论的原因之一，因为他压根儿就没认真考虑过量子理论。他对量子理论的贡献就在于，使你可以在实践中运用这一原理而无须了解它有什么意义。

我的思维方式则有所不同，承自休·埃弗雷特（Hugh Everett）和卡尔·波普尔。他们都坚持科学理论是直指本质的，能够解释为什么观察结果是如此，而不只是预测观测结果。因此，我对量子力学的实用主义阐释并不满意。

从现在的观点来看，我真的太佩服埃弗雷特了。关键在于，正如哲学家们所言，这是一个现实主义理论。也就是说，这个理论意图描述真实发生的事件的本质，而非只是我们的直观体验。一旦你这样去思考量子理论，就很容易想到，量子计算理论的意义所在以及它为何还不足以成为整个物理学的基础。所以，还少什么呢？少的就是构造者理论。

构造者理论所需的是用将物理学的其他部分整合起来的方式表示出来，诸如公式、方程等，因为只有这样它才能与其他科学理论相联系。然后，构造者理论的定律就可以限制其他理论的原理，我将它们称为附属理论。构造者理论即为最深层次的理论，其他所有理论都要附属于它。它对它们加以限制，然后与实验相联系。

除了猜测真实的原理，更关键的是找到办法将其表示出来。我们要做的第一件事就是建立一套构造者理论代数，这种代数有两大功能。首先，将任意其他科学理论用转变能否发生来表示出来。现在流行的物理学框架中的微分方程与其有些近似，但在构造者理论中它将成为一门代数学。然后，用它来表达附属理论不能表示的构造者理论。附属理论是被定义的那一方。

我与我的学生齐亚拉·马利特（Chiara Marletto）正在研究这个代数学。用它来思考，要比用物理学过去几十年的传统方式来思考波折得多。我们试试、想想、改改，找到矛盾、发现没有意义，然后再改换新的形式看看是否有变化。这个过程包含了数学、代数的交错使用。我们努力得出一些结果。

这与量子理论的先驱者们研究他们理论时的样子如出一辙。实际上，作为量子理论的主要公式之一，海森堡发明的矩阵力学就不是基于微分方程范式，而是更依赖代数学。它实际上也可以被看作是构造理论的前身模型之一。我们目前还没能得出一套可行的代数理论，但即使用现在最初步的成果，我们已经有所建树。这主要是齐亚拉的功劳，他几乎是奇迹般地使信息理论纳入物理学领域，从而有了更深层次的基础。

像所有基础理论一样，要预测它们有什么效果是很难的，因为它们将从根本上改变一切。但构造者理论看待物理学的方式，将会为我们的世界观带来新的东西，那就是乐观主义。在我看来，“乐观主义”并不意味着期待事情总会得到好结果。乐观并不是苦难不会发生，而是所有的问题和邪恶都是由知识的匮乏引起的。因此，只要有正确的知识，所有的邪恶都是可解决的。知识可以靠猜想、批评等方法被发现和创造。

尽管这听起来有些鸡汤，知识啊、邪恶啊、作出改变啊，等等，但这与构造者理论在非常基础的层面上相关联。因为这涉及构造者理论中基本的二分法。它将全部科学分为两大类，可能的变化和不可能的变化，没有第三类。如果有第三种可能，那一切都要被推翻。

如果一件事、一次变化，是可能的，那就是因为构造者理论下的某些物理学定律使它成为不可能。相反，如果有某些物理学定律使其不可能发生，那它就是可能的，没有第三种选择。“可能”是什么意思呢？尽管有些事是自发的，但绝大多数情况下，可能的事之所以可能，是因为正确的知识用在了正确的物理对象上。因此就有了之前被物理学定律禁止的和正确知识所允许的二分法，不存在其他可能。这就告诉我们，邪恶是因为知识匮乏。

这与直觉相悖。它与传统智慧相反，与我们本能地看待世界的方式相反，至少传统的文化本能不是如此。有没有第三种可能，某件事即使没有被明确的物理学定律所禁止，但我们还是无法做到？答案是，没有。这是刻在构造者理论骨子里的。这是无法绕过的，我想只要你注意到它在物理学领域的基础地位，就会越来越自然地理解这一点了。它会越来越显而易见，“是有些奇怪，但不然还能怎样？”

这就好像意识到澳大利亚人生活在地球的另一边，就像在我们脚下，这种认知会对我们的常识带来冲击。要理智地明白这一点并不难，但真的想明白是要费些力气的。理智上我们能接受，但感情上，又是另外一回事了。这会使我们的世界观都发生改变。就如同意识到澳大利亚人在我们脚下带给我们的震撼，意识到在正确知识所允许与物理学定律所禁止之间不存在其他可能，也会给我们的认知带来变化。

在人们的印象中，那些成功的科学基础理论似乎都是这么来的：首先，某个人提出一个想法；所有人都认为他疯了，然而最后证明他

是对的。但我觉得这种情况并不常发生。根据我的经验，更常见的是这样：人们不会说，“你疯了，这不可能”；他们会说，“不错，干得漂亮”，然后他们就走开各干各的，很快就忘了这回事。然后，到最后，大家会说，“它可能会这样”“它可能会那样”“它也许值得研究，很可能出成果”，然后他们终于投入更多心思在它上面。

我之前有数项工作都经历了这个过程，我想，构造者理论也不会例外。没有人跟我说我的想法很疯狂、不可能是对的，但我很确定，在现在这个阶段，大多数物理学家会说，“不错，挺有意思，干得漂亮”，然后把它抛之脑后。

除了我，现在没人在研究这个。有几个同事对此稍感兴趣，如果我们能得出些成果，他们可能会更加关注。到现在，也尚无文章发表。我投送了一篇哲学论文，现在也还没被发表出来。等它发表出来，也许会有更多人关注这项工作。人们也许能借此对它有更多了解，在哲学领域，你可以在论文中写出希望的结果或者解释，但物理学领域的论文是要求有结果的。我想，等我们第一批有成果的论文发表后，研究这项工作的人数将会急速增加。当然，其中一些成果可能会被冠以“这不可能”的头衔，成为物理学发展史上一个有趣的脚注。

我必须先发表一篇哲学论文的原因在于，构造者理论要涉及不少哲学基础，把这些都写在物理论文中会太过冗长，对物理学家来说也太无聊。我得先写点东西用来参考，所以我先写哲学论文，然后是构造者理论代数学，用它作为表示旧原理和新构造者理论原理的语言和形式。但现在看来，鉴于出乎意料的好结果，最先完成的构造者理论论文将会是构造者理论下的信息理论。

我们现在讨论的是物理学的基础，所以关键在于这个理论能否自圆其说，是否自我完善，是否能引出新发现。这种基础性理论对于喜

欢基础物理学的人来说很有意思，但其实用性还要在它进一步完善之后才能显现出来。

量子理论仍是个很好的例子。曾经除了研究量子理论基础的少数人，几乎没人真的对它感兴趣。但在它建立几十年后的现在，研究微芯片、信息学、密码学的人等，无一不需要了解量子力学。人类要想理解自己在宇宙中的位置，就一定要了解量子理论是怎么一回事。

比如，量子理论使你不得不思考平行宇宙的问题。这个问题很难有理智的答案。除了意外地与日常生活直接相连的乐观问题，我们现在还无法说明构造者理论对于我们在宇宙中的位置有怎样的解释，这还有待进一步研究。我们要在理论物理学领域把它研究出来。

我对所有基础性的事物几乎都很感兴趣。这不只局限在基础物理学领域，这种事物比比皆是。就构造者理论而言，它要如何发展完全取决于其结果如何，或者更干脆说，要看它是对是错。如果它是错的，我们无法用构造者理论的方式建立一种物理学基础，那就太有意思了！因为这意味着，那些我们需要构造者理论的理由都是错的，那些所谓的将各种场联系起来的统一性也没有真正将它们连起来。那么它们就肯定是有其他什么方式相连，因为世界的本质一定是相连的。

如果构造者理论真的是错的，那很有可能是在被证伪前，我们就发现了它的错误。这在科学理论的研究过程中很常见。在一般人的印象中，理论被证伪要经历这样一个过程：做一个实验，并预测会存在一种粒子，结果它没出现，因此这个理论被证伪。但实际上，绝大多数理论在它们被实践检测之前就已经被证明是错误的了。它们因内部的一致性问题或与已知可信的理论相矛盾，而被认为是错误的。还有一种更常见的原因，那就是它们没有达成当初设计它们时，研究者预期的目的。比如，你设计了一个应该能解释热力学第二定律和物理学定律可逆性问题的理论，然后经过分析你发现它做不到这一点，那么

这个理论就要因为无法完成任务而被舍弃掉。我想，如果构造者理论是错的，那它极有可能就是因为这种原因，也就是它无法得出我所期待的统一性和基础性结果。

然后就是我们从中吸取教训了。错误并不丢人。这不像搞政治，输了选举就输了一切。在科学领域，如果你觉得很有戏的理论最后被证明是错的，你仍然会有所收获。

我研究基础物理学的核心哲学动机之一，就是我对世界的本来面目很感兴趣。我想知道的不仅仅是这个世界看上去的样子，还有那些看不见的东西和过程，那些隐藏在表象之后的本质。因为可见的世界只不过是真相冰山的一角，而这个世界最令人着迷的，就是我们具有发现这种真相的能力。

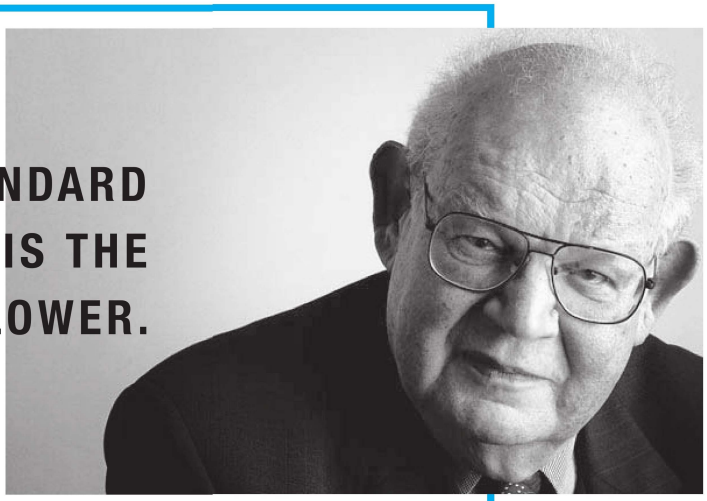
我们能知道恒星的中心是怎样的，尽管我们从未到过那里。我们能知道那些挂在天上的冰冷微小的星星，实际上是直径达数百万公里的白热气体球。它们那小点点的样子让人怎么也想不到，它们实际上会是那样。但我们却能知道。我们知道，我们可见的认知背后潜藏着不可见的真相。

几十年来，这样去看待科学的哲学家已经很少见了，尤为遗憾的是，甚至在科学家中，持这种观点的也很少了。仅仅因为实验检验是科学的一大特色，他们就认为科学只关乎实验，但这是个误区。如果这样想，那科学就只关乎人类了，甚至不是与人类有关的一切，而只是人类的经验。这是唯我主义。它引出了一种严格、客观的世界观，即观察决定一切，内在的逻辑无情并严厉，认为只有人类的经验才是真实的。这正是唯我主义。

我认为，不要将科学视为专为作出预测而生，而要将它视为我们认识世界真相的工具，它能告诉我们这里有什么、为什么会这样。观

察只是起到检验作用。不过，虽然真相远超我们的经验，我们微不足道的观察能力却能验证我们关于真相的理论和知识，这实在是不可思议。这就是科学的奇妙之处，也正是我对科学的期许所在。

THE STANDARD EXAMPLE IS THE CAULIFLOWER.



花椰菜是一个标准示例。

——《粗糙度无处不在》

21

A Theory of Roughness

粗糙度无处不在

Benoit Mandelbrot
贝努瓦·曼德尔布罗特
耶鲁大学数学家；著有《自然的分形几何》

约翰·布罗克曼的导言：

20世纪80年代，贝努瓦·曼德尔布罗特接受我的邀请，在现实俱乐部做了一次演讲。那次演讲成了现实俱乐部那10年间最难拿到门票的一次活动，似乎纽约的每一位艺术家都想要参加。那是一个激动人心的神奇夜晚。我和曼德尔布罗特一直保持着联系，过不了几年就会一起吃个饭，我对他要说的话总是充满兴趣。

但这并不容易。他的想法虽然复杂但还算容易理解，然而他的法国口音却让理解变得更困难。2010年，曼德尔布罗特去世了，这对所有关心他的人来说，无疑是一个重大打击。他毕生都致力于对自然世界的科学观察。对一些读者来说，在一本关于宇宙的书里，

这段话似乎不太切题，但这是对曼德尔布罗特以及他不知疲倦的再创造精神的致敬，也是我们理解这个宇宙要有的精神。

曼德尔布罗特最为人所知的，是作为分形几何的奠基人。分形几何对数学、多种科学以及艺术都产生了深刻影响。在这里，他将用粗糙度理论作出新的突破。他说：“有一个笑话是说，锤子总能找到要钉的钉子，我觉得这是非常恰当的说法。我造的锤子，是第一个对所有粗糙度都有效的工具，没有人可以否认，在所有地方都多少有一些粗糙度。”

有句话说，优秀的工作需要正确的人在正确的时间、用正确的地方去完成。然而在我的生活中，大部分我想研究的东西，基本上没有人感兴趣。所以我大部分时间都是一个圈外人，从一个领域转向另一个领域，再转回去，这都取决于环境。现在我快80岁了，在写回忆录。当我回顾过去的时候，我既怀念但也开心地意识到，在很多情况下，我比我所在的时代超前了10年、20年、40年甚至50年。直到前几年，我的博士研究课题还不怎么流行，但现在可是相当热门。

我并没有创造一个全新研究领域的野心，但也希望有一群固定的人，与我有相似的兴趣，这样就可以打破不断向那些日益完善的领域看齐的趋势。然而，在这个基本问题上，我失败了，而且非常失败。但往往事与愿违。我年轻时，当我还是加州理工学院的一名学生时，麦克斯·德尔布吕克（Max Delbrück）创建了分子生物学，所以我知道创建一个新领域意味着什么。但我的工作并不能创建出任何类似的东西。原因之一是我的个性，我并不想要什么权力，也不会东奔西跑。第二个原因是环境因素，我当时在一家工业实验室，因为我太适合学术环境。另外，在原本非常独立的活动之间建立紧密的有机联系，可能也超过了任何一个人的个人能力。

作为遗产，这个问题现在对我来说很重要。让我说得详细一些。当我快70岁时，以前的一个博士后在库拉索岛（Curaçao）组织了一次聚会。那次聚会棒极了，数学、物理学、工程学、经济学等领域的朋友都有参加。库拉索岛的地理位置非常远，所以并不是所有人都能去，但各个领域都有人与会。1982年之后，类似的聚会又组织了几次。然而，我对库拉索岛那次聚会的喜爱可能受到了潜意识的影响，因为我强烈地感觉到，这样的聚会将会是最后一次。从某种程度上来说，我这些年的努力是成功的，比如，分形学让很多数学家学到了不少关于物理学、生物学和经济学的知识。不过，大部人觉得他们已经学到了足够他们余生使用的知识。他们还是数学家，虽然通过思考我提出的问题，他们有所改变，但很大程度上，他们走的依旧是自己的老路。

现在，很多在库拉索岛得到统一的东西又一次变得非常独立。例外也有，我一会儿会讲到。然而，当我快80岁时，根本没人想过要举办像库拉索岛聚会那样的会议，取而代之的是七八个在不同地点举办的专门会议。最新的和最鼓舞人心的会议都限制在分形学非常具体的应用中，讨论的问题包括塑料、混凝土、互联网等这样的东西。

很多年来，我一直听到这样的评论，说分形学可以制造漂亮的图案，但并没有什么用。我被激怒了，因为重要的应用总是过一段时间才被发现。而对于分形学来说，我们并不需要等待太长时间。在纯科学领域，流行总是来了又走。影响基础的、大预算的工业需要更长时间，但也更有希望持续更长时间。

我们回来解释一下分形学是如何影响纯数学的。我将在瑞典皇家科学院的米塔格-累夫勒研究所（Mittag-Leffler Institute）待几周。仅仅25年之前，我还没什么理由去那儿，除非是去参观那儿的恢

宏的图书馆。但是，回到现在，我的工作已经激发了这个机构进行三个独立的项目。

第一个项目是20世纪80年代建立的，当时曼德尔布罗特集合是年度热点问题。可能并不是所有人都同意，这个集合的发现可以使眼睛重获光明，可以检查数不清的图片，以及在此基础上证实了一些数学家很感兴趣的观察和推测。我的第一个推测在6个月内被解开，第二个用了5年，第三个用了10年。尽管有一些工作得了两次菲尔兹奖（Field Medals），但是基本猜想仍是猜想。现在这个猜想有个简称，叫作MLC，意为曼德布罗特集合是局部关联的。这些猜想可能已被纯思维实验所研究，不需借助图案，这种想法很让人难以接受。

接下来受我启发的米塔格-累夫勒年是6年前，与我关于布朗运动（Brownian motion）的“4/3”推测相关。它的发现明显刻有我的研究方式和行事作风，因此需要再拿出来说一次。

科学家在几个世纪以前就知道了布朗运动，诺伯特·维纳（Norbert Wiener）提供的数学模型也是概率论的核心支柱之一。早前，科学家已经作出了关于自然界布朗运动和维纳模型的图像。但是这个领域的发展也像很多其他数据领域一样，丢失了和真实世界的所有联系。

我的态度完全不一样。我一直认为，“纯粹”的数学就如同希腊神话里的英雄安泰俄斯（Antaeus）。这位大地之子必须触碰到地面，来重新建立与他母亲的联系，否则他的力量就会消失。为了压制他，大力神赫拉克勒斯（Hercules）把他举起，让他双脚离开了地面。让我们说回数学。脱离所有朴素、现实的输入，可能在很长一段时间内是安全的，但不会永远如此。具体来说，对布朗运动的数学研究，需要与现实建立新的联系。

为了寻找这样的联系，我让我的程序员编写了一个大型的运动模型，准备以此开展工作。我并不打算完成任何已有的想法，而只是积极地“钓”新东西。很长一段时间里，并没有新东西出现。后来我有了一个想法，它更偏重于美学而非科学。我被这样一件事实所困扰，那就是，当我们从第一个时刻到第二个时刻观测布朗运动时，它的两个端点是分离的，而中间的部分遵循不同的规则。也就是说，这个整体是非均匀的，呈现出内部对称性的缺失、美学的缺失。

这就触发了哲学上的偏见，即当你探寻一些不明的特征时，你不希望无关的复杂性产生干扰。为了实现均匀性，我决定把运动的终点定为其开始的那个点。这样形成的运动轨迹咬着自己的尾巴，成了一个很有特点的新形状，我称之为布朗集群（Brownian Cluster）。接下来，同样的纯美学考虑引导了进一步的工作。持续地想把无关复杂性排除的愿望，促使我把那些无法达到的点从无穷远处组合起来，并且不穿过布朗集群。把它们用黑色表示，可以再一次创造出相当新的东西，类似一个小岛。很快，很明显的是，其边界需要进一步研究。同样，我之前关于地球上真实岛屿的海岸线的经验很快就派上了用场，让我怀疑布朗运动的界线等于4/3的分形维数（fractal dimension）。分形维数是一个曾用于隐藏的数学奥秘的概念。但在过去的几十年里，我把它逐渐变为了一个用来形容粗糙度的内在定性描述。

经验测量结果是1.3336，在此基础上，我在1982年出版的《自然的分形几何》（*The Fractal Geometry of Nature*）一书中猜测，准确的值是4/3。有数学家朋友责备我，如果我能在出版之前告诉他们，他们便能很快提供一个非常严谨的证明来证实我的猜测。他们太过乐观了，事实证明，这样的证明非常困难。一位同事后来得出来了精确到小数点后15位的4/3的近似值，但这个证明花了18年，通过来自不同领域的三位科学家的共同努力才得以实现。在2000年，这是非常轰动的一件大事。这个困难的证明不仅在数学领域催生了关于其本身的非

常活跃的子领域，而且也通过一些看起来没有联系的猜测，影响了其他子领域。《科学》杂志上的一篇文章，在结果的主要部分评论说，“这是近20年来概率论领域最激动人心的事情”，这让我非常高兴。不可思议的事情开始发生了，米塔格-累夫勒研究所花了一整年时间来讨论接下来做什么。

今天，我们都知道了这一事实，布朗运动的边界可能称为一个“自然的”概念。但就在昨天还没有人提出这样的概念。即使通过单纯的思考，可以想到这个概念，又怎么会有人想到4/3这个维数呢？想要把这个概念带到生活中，数学中的安泰俄斯必须触碰他的大地母亲，哪怕一小会也好。

在数学社群中，MLC和4/3猜测有很深远的影响。就如法国国家科学研院（CNRS）所说：“数学以两个互补的方式运行。一个是‘视觉的’，定理的含义直接通过几何图形就可以被感知；另一个则是‘书面的’，它依靠语言，依靠代数，需要时间。赫尔曼·外尔（Hermann Weyl）写道，‘几何的天使和代数的恶魔分享了舞台，昭示着两者的困难。’”我20岁离开了法国数学界，就是因其对图形的排斥，在我看来，已经找不到更好的描述了。当这些话出自法国国家科学研究院之口时，我还活着，这种感觉简直太棒了。但是不要忘了，在赫尔曼·外尔的年代（1885—1955）和我已人到中年的时间之间，氛围是完全不同的。

说回集群维度。我当时在IBM工作，在那儿，我的朋友们从布朗运动拓展到另外的集群。他们从严格的渗流集群（percolation cluster）开始工作，这是一个非常有名的数学结构，在统计物理学中有很多人感兴趣。这次一个内在的复杂因素是，其边界可以用两种不同的方式定义，一种结果是4/3，另一种结果是7/4。两个值最初都是通过数字得到的，但现在已经经过了理论证实，而且不是经过没有其他目的

的单纯论证，而是通过一个在其他方面很有用的方式。这一工作还在持续，目前还不严谨的大规模几何形状，在纯数学领域变得很有吸引力，而其证明虽很困难但很有趣。

瑞典皇家科学院米塔格-累夫勒研究所第三次受我工作所启发的会议将在今年举行。它关心的基本问题是我已经提到过的一个主题：互联网的数学。

有件事你可能经历过，那就是电子邮件的丢失。众多完全一样的信息是不好，但发送者这样做是为了安全，因为在工程学上，显然所有的东西都是有限的。信息的集合、分散、分布是很复杂的。尽管计算机内存已经不再昂贵，但缓冲区是有限的。当发生了大新闻时，每个人都在给其他人发送信息，缓冲区就满了。如果发生了这样的事，那些信息会怎么样？它们会消失，就这样随流而去。

最开始，专家们认为他们可以用一个20世纪20年代关于电话网络的旧理论来解释。但是随着互联网的膨胀，他们发现这个理论不再适用。接下来，他们尝试了我在20世纪60年代中期的一个发明，事实说明那也不合适。后来他们尝试了多重分形（multifractals），这是我在20世纪60年代后期到70年代建立的一个数学结构。多重分形是一个由于数学家因为数学的乐趣而被提出的概念，但事实上，它最初产生于我关于暴乱的研究，我也很快把它用于经济方面。为了检验新的互联网装备，人们需要检验它在多重分形变异下的表现。就我的理解来看，这可是一桩大买卖。相同的技术怎么会适用于互联网、天气和股票市场？为什么我在未经特意尝试的情况下，就接触了这么多不同事物的不同方面？

我的生活最近发生了一次重要转折，我意识到，我长时间以来在脚注里写的东西应该得到重视。尽管我自己并没有意识到这一点，但我一直致力于理解粗糙度理论。想想颜色、音高、厚度和热度。这些

都是物理学的分支。化学充满了酸、糖和醇类。所有这些概念都来源于感知。粗糙度和其他这些原始的感知同样重要，但没有人这样研究过。

1982年，一个冶金学者找到了我。他认为，分形维数可能为金属断裂中的粗糙度情况以及类似的事情进行长期测量。实验结果确实如此，我们在1984年为《自然》写了一篇论文。这为我们吸引了很多关注，并且实际上建立了一个关于粗糙度测量的工作领域。

这份描述内容多变，因为我并没有很早就定型，而我又非常长寿，直到今天也还在不停地学习。在众多考虑之下，我认为我的工作由一个单一的总体目标所引导：找到一个对粗糙度的严格谨慎的分析方法。终于，这个主题给我的生活带来了强有力的凝聚作用。早前，从1952年我的博士论文开始，这样的凝聚作用还非常脆弱。它曾基于的是所谓的幂函数关系。

不知是好还是不好，我的熟人们各有各的机缘，都没有什么相似的故事可讲。我认识的所有人都一直有意识地在先前建立或正在建立的领域工作。迈克斯·德尔布吕克就是一个典型的例子，他以前是物理学家，后来成了分子生物学的奠基人。他一直认为这是生物学的外延领域。与此相对，我的命运是，我做的事情直到事实发生了才能完全明白，此时已是我生命的后期了。

为了领会分形的本质，我们需要引用伽利略一句经典箴言：“哲学是用数学写就的，它的文字是三角形、圆形等几何图案，没有这些，人就会在黑暗的迷宫中游荡。”注意，圆形、椭圆形和抛物线都是非常平滑的形状，三角形则有一些不规则点。伽利略说这些形状在科学中是必需的，这当然没什么错。但事实上它们还不够，“仅仅是”因为这个世界上的大部分事物都有无尽的粗糙度和复杂性。复杂

性的无边之海中有“两座小岛”，它们很简单，其中一座是欧几里得，另一座则是粗糙度存在于所有尺度的情况，它相对简单。

花椰菜是一个标准示例。你一眼就可以看到它由许多小花组成。当将其切下仔细看其他部分时，你会发现小花就像一个小的花椰菜。撕掉小花的其他部分，仅仅留下“小花的一个小花”，它是一个花椰菜形状。花椰菜的例子说明了，一个物体可以由很多部分组成，每一个小部分都和原来的整体很相似，只不过小一些。很多植物都是这样。云是由一小朵一小朵像云一样的小云组成的。当你离近看一朵云的时候，是看不到平滑的东西的，只有更小的不规则东西。

平滑的形状在自然界中是非常罕见的，而它们在科研院所这样的象牙塔以及工业中很重要，也是我年轻时喜爱的对象。花椰菜代表了第二类的极致简约，即一类放大/缩小或靠近/远离时，看起来基本相同的形状。

在我的研究之前，这些形状没有什么用处，因此也不需要特别的词汇去形容它们。但我的研究产生了这样的需求，而我选择了“分形”（fractals）这个词。我年轻时学习过拉丁文，我在试图表示破碎的石头、不规则且破碎的东西等这类概念。拉丁语是一门非常具体的语言，我从我儿子的拉丁文字典查到，在拉丁文里，形容“被打碎、变得不规则的石头”的词是“fractus”。这个形容词让我选择了“fractal”这个词，现在它已经出现在了每一本英文字典和百科全书里了。它指代那些从近处或远处看都一样的形状。

所有非平滑的东西都是分形吗？分形足以解决科学的所有问题吗？并不是这样。我强烈主张的是，当一个事实存在的物体是非平滑的，接下来要尝试的数学模型就是分形或多重分形。复杂的现象不必一定是分形，但一个现象“甚至都不是分形”却是一个坏消息。因为迄今为止，还没有人在超越分形的领域，作出过像我那样的识别和创

造新技术的努力。粗糙度无处不在，尽管分形并不适用于所有东西，它也是无处不在的。而经常发生的是，同样的技术适用于在几何结构以外的其他考虑下，独立的地方。

让我们还以股市和天气为例吧。拿它们做比较，谈论华尔街的风暴，这是老生常谈了。有一段时间，股市基本平稳，几乎没什么事情发生。但经常性地，它会遇到一些风暴或飓风。这些都是人们随便用的词，但也可能把它们当作随意的比喻。然而事实证明，我发明的研究扰动（比如天气）的技术，也适用于股市。定性的性状，比如价格的整体表现以及很多定量的性状，可以以非常小的代价，即分形或多重分形的假设来得到。

这并不意味着天气和金融市场有相同的原因，它们当然没有。当天气发生变化，飓风来袭，没有人会怀疑是不是物理学定律发生了变化。类似地，我也不相信，股市陷入可怕的旋涡是因为它的内在规律发生了变化。它还是有着相同机制、相同参与者的同一个股市。

粗糙度这个想法带来的一个积极影响是，它驱散了人们对分形几何应用如此广泛的可能性的惊讶、愤怒与不安。

近一段时间都不会缺少问题的事实让人心安。因为一些背景原因，我工作了很多年的物理学分支，最近变得不那么活跃了。很多问题已经被解决了，另外一些则太难了，以至于没人知道该怎么处理它们。这意味着，如今我比15年前要少做很多物理学方面的工作。而比较来说，分形工具还有很多可做的工作。有一个笑话是说，锤子总能找到要钉的钉子，我觉得这是非常恰当的说法。我造的锤子，是第一个对所有粗糙度都有效的工具，没有人可以否认，在所有地方都多少有一些粗糙度。

我以前没有、现在也没有任何关于粗糙度的总体的理论，因为我更喜欢自下而上的工作方式，而不是相反。但问题就在这儿。再说一次，我并没有非常努力地尝试开创一个领域。但现在，在事实发生很久之后，我很享受这样巨大的统一，并且在最近我所有的出版物中都强调这一点。

挑战极限的目标带来了另外一个令人惊叹的发展，这本来可以说成是最近发生的事，但其实并不是。我的《自然的分形几何》一书中提到了葛饰北斋（Hokusai）的木版画《神奈川冲浪里》*（Great Wave）*，这幅以富士山为背景的著名画作，同时也提到了其他一些在艺术和工程学领域不那么具有识别度的分形例子。最初时，我把它们当作是娱乐，而非必需。但随着大量读者让我意识到的一些奇怪的事情，我改变了想法。他们让我观察四周，让我注意到了远古时代艺术作品中的分形。现在我在收集这样的作品。说第一个“创造”了什么东西的声明，暗示着无比的傲慢。有些人喜欢这样的傲慢，有些人不喜欢。现在，我已经超越了傲慢，因为我声明，分形一直都存在，但其真实形态未被人认知，一直等着我去发掘。

宇宙。这是人类所能想象的最宏大的结构。或者说，这是人类所能表达的最宏大的叙事。

我前不久参加了一次活动，带领20个人在西北的戈壁滩上露营观星。大家躺在星空下，我为他们讲述夏夜的星空和银河。拥有不同身份的这20个人，走到这片荒漠中，在风沙走石下忍饥挨饿，嘴唇干裂，当然不是为了研究宇宙的大尺度结构。但每个人都忍不住会看向星空。

天文学的传播和其他科学的传播相比，有一个更为突出的困难。我发现，绝大部分人，甚至可以说几乎是每一个人，都无法接受一件事：这个宇宙和他自己，可能没有什么关系。

然而，人就生活在宇宙中，两者间怎么能没有关系呢？

放弃对宇宙与人之间关系的想象，会是巨大的失落。我能理解这样的心情，这也是天文学不讨人喜欢的一个地方，或者说，是绝大多数天文学家、理论物理学家和宇宙学家不讨人喜欢的地方。作为科学

家，既要坚持科学理性（有八分证据说八分话，有六分证据只能说六分话），又必须恰当地讲述自己的理论。这种讲述往往不同于学术研究本身具有规范的逻辑论证体系，而是需要做一系列转化：把新鲜的食材转化为可口的菜肴，同时又不破坏食材本身的营养和水分。

本书中的大师们，毫无疑问都是烹调菜肴的高手。他们并没有致力于让大家读而不懂，以借此彰显自己的权威和专业；他们也没有过分渲染所谓的情怀，强加宇宙对于人的情感；他们恰到好处地用生活、用口语、用比喻、用经验“打开脑洞”。他们打开的，是宇宙学的脑洞，也是未来的脑洞。

联系，真的是普遍的吗？现今的课堂上和教科书里的那些理论，学生在考完试之后，还必须相信它们吗？还有什么蛛丝马迹是众多精英还未曾洞察到的吗？缺失了拼图的一块，是否可能导致我们对最终图景的猜测大错特错呢？再进一步说，真的有一个最终的图景吗？

本书的翻译得到了北京师范大学天文系研究生于斌、郭越凡同学的协助。于斌同学在攻读博士，致力于理解恒星演化晚期释放的尘埃的分布结构；郭越凡同学精益求精地改善着引力波探测器的地下实验室。他们未来很有可能成为如同书中作者们一样的大师。但这不是最重要的，最重要的是，针对未来宇宙的未来理论，十有八九，今天已经出现在某个年轻学生的草稿本上了！

本书不是在回答问题，而是在提出问题，甚至是在挑衅其他“大牛”已经回答过的问题。这是多么美妙的事啊！

未来，属于终身学习者

我这辈子遇到的聪明人（来自各行各业的聪明人）没有不每天阅读的——没有，一个都没有。巴菲特读书之多，我读书之多，可能会让你感到吃惊。孩子们都笑话我。他们觉得我是一本长了两条腿的书。

——查理·芒格

互联网改变了信息连接的方式；指数型技术在迅速颠覆着现有的商业世界；人工智能已经开始抢占人类的工作岗位……

未来，到底需要什么样的人才？

改变命运唯一的策略是你要变成终身学习者。未来世界将不再需要单一的技能型人才，而是需要具备完善的知识结构、极强逻辑思考力和高感知力的复合型人才。优秀的人往往通过阅读建立足够强大的抽象思维能力，获得异于众人的思考和整合能力。未来，将属于终身学习者！而阅读必定和终身学习形影不离。

很多人读书，追求的是干货，寻求的是立刻行之有效的解决方案。其实这是一种留在舒适区的阅读方法。在这个充满不确定性的年代，答案不会简单地出现在书里，因为生活根本就没有标准确切的答案，你也不能期望过去的经验能解决未来的问题。

湛庐阅读APP：与最聪明的人共同进化

有人常常把成本支出的焦点放在书价上，把读完一本书当做阅读的终结。其实不然。

时间是读者付出的最大阅读成本
怎么读是读者面临的最大阅读障碍
“读书破万卷”不仅仅在“万”，更重要的是在“破”！

现在，我们构建了全新的“湛庐阅读”APP。它将成为你“破万卷”的新居所。在这里：

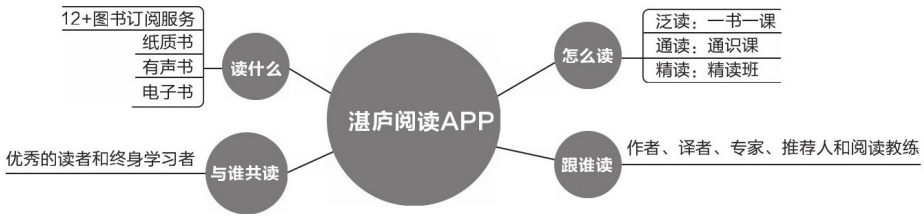
- 不用考虑读什么，你可以便捷找到纸书、有声书和各种声音产品；
- 你可以学会怎么读，你将发现集泛读、通读、精读于一体的阅读解决方案；
- 你会与作者、译者、专家、推荐人和阅读教练相遇，他们是优质思想的发源地；
- 你会与优秀的读者和终身学习者为伍，他们对阅读和学习有着持久的热情和源源不绝的内驱力。

从单一到复合，从知道到精通，从理解到创造，湛庐希望建立一个“与最聪明的人共同进化”的社区，成为人类先进思想交汇的聚集地，共同迎接未来。

与此同时，我们希望能够重新定义你的学习场景，让你随时随地收获有内容、有价值的思想，通过阅读实现终身学习。这是我们的使命和价值。

湛庐阅读APP玩转指南

湛庐阅读APP结构图：



三步玩转湛庐阅读APP：



APP获取方式：

安卓用户前往各大应用市场、苹果用户前往APP Store
直接下载“湛庐阅读”APP，与最聪明的人共同进化！

使用APP扫一扫功能，
遇见书里书外更大的世界！



快速了解本书内容，
湛庐千册图书一键购买！

大咖优质课、
献声朗读全本一键了解，
为你读书、讲书、拆书！

你想知道的彩蛋
和本书更多知识、资讯，
尽在延伸阅读！

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

延伸阅读

《叩响天堂之门》

◎ 理论物理学大师丽莎·兰道尔“宇宙三部曲”——一本书读懂宇宙求索的漫漫历程。

◎ 宇宙如何起源？为什么我们要耗资巨大，建造史上最大型的科学仪器——大型强子对撞机？宇宙万物的真相又如何向我们徐徐展开？



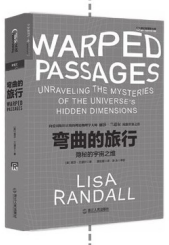
使用“湛庐阅读”APP，“扫一扫”获取本书更多精彩内容

ISBN 978-7-213-07659-6

《弯曲的旅行》

◎ 理论物理学大师丽莎·兰道尔“宇宙三部曲”——一本书读懂神秘的额外维度。

◎ 我们了解宇宙吗？宇宙有哪些奥秘？宇宙隐藏着与我们想象中完全不同的维度吗？我们将怎样证实这些维度的存在？



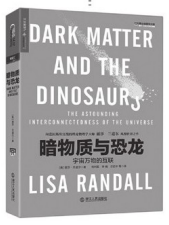
使用“湛庐阅读”APP，“扫一扫”获取本书更多精彩内容

ISBN 978-7-213-07565-0

《暗物质与恐龙》

◎ 理论物理学大师丽莎·兰道尔“宇宙三部曲”——一本书读懂暗物质以及恐龙灭绝背后的秘密。

◎ 暗物质是什么？它是如何让昔日的地球霸主毁灭的？宇宙万物又是如何在看似无关的情况下联系在一起，从而改变了世界的发展的？



使用“湛庐阅读”APP，“扫一扫”获取本书更多精彩内容

ISBN 978-7-213-07726-5

湛庐文化 Cheers Publishing
a mindstyle business 与思想有关

延伸阅读

《星际穿越》

◎ 天体物理学巨擘，引力波项目创始人之一，同名电影科学顾问基普·索恩巨著，媲美霍金《时间简史》。

◎ 国家天文台 8 位天体物理学科学家权威翻译。

◎ 国家图书馆“第十一届文津奖”获奖图书。



使用“湛庐阅读”APP，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容
ISBN 978-7-213-06685-6

《时间重生》

◎ 新时代的爱因斯坦，加拿大圆周理论物理研究所创始人之一，圈量子引力论创始人李·斯莫林颠覆世界之作。

◎ 我们现在如何理解时间，决定了我们如何思考未来。种种美妙的意外，皆源于时间的惊涛骇浪！

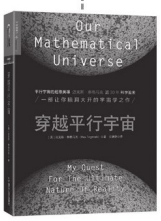


使用“湛庐阅读”APP，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容
ISBN 978-7-213-07852-1

《穿越平行宇宙》

◎ MIT 物理系终身教授，平行宇宙理论世界级研究权威——迈克斯·泰格马克近 30 年科学追索，一部让你脑洞大开的宇宙学之作！

◎ 一场关于现代宇宙学的盛大巡礼。关于平行宇宙的所有脑洞，这一本就够了！



使用“湛庐阅读”APP，
“扫一扫”获取本书更多精彩内容
ISBN 978-7-213-07980-1

ISBN 978-7-213-08378-5



湛庐FM，不喧哗，自有声。
每日一更，把世界说给你听。

[1]这一发现事后被证明是个误会，原初引力波目前尚未被发现。——译者注

[2]2016年2月11日，美国国家科学基金会（NSF）召集了来自加州理工学院、MIT以及LIGO科学合作组织的科学家，在华盛顿特区国家媒体中心宣布：人类首次直接探测到了引力波。由于本书英文版的出版时间为2014年，所以多位作者在文中都说尚未观测到引力波。后文不再一一说明。——编者注

[3]鲁布·戈德堡（Rube Gold-berg），美国犹太人漫画家。鲁布·戈德堡机械是一种设计精密而复杂的机械，以迂回曲折的方法完成一些其实非常简单的工作，比如倒一杯茶。鲁布·戈德堡机械因戈德堡在其漫画中创作了这种机械而得名。——译者注

[4]原文为：“Nevah, nevah, nevah, nevah give up”，此处为模仿丘吉尔的口音，所以此处故意译作了别字。——译者注

[5]此处保留了萨斯坎德在原论文中的文献引用符号。——编者注

[6]此处保留了萨斯坎德在原论文中的注释符号。——编者注

[7]此处保留了斯莫林在原回信中的文献引用及注释说明符号。——编者注

[8]基普·索恩（Kip Thorne）天体物理学巨擘，引力波项目创始人之一。推荐阅读其媲美霍金《时间简史》的宇宙学著作《星际穿越》。该书由国家天文台多位天体物理学科学家权威翻译，并获得了国家图书馆第十一届文津图书奖。该书中文简体字版已由湛庐文化策划，浙江人民出版社出版。——编者注

[9]克雷格·文特尔，被誉为“人造生命之父”，基因测序领域的“科学狂人”。推荐阅读其重磅力作《生命的未来》，这是一本详细论述生命科学的基本原理的杰出著作，全景展示了分子生物学的历史沿革和未来发展方向。该书中文简体字版已由湛庐文化策划，浙江人民出版社出版。——编者注

[10]马文·明斯基，人工智能领域的先驱之一，人工智能领域首位图灵奖获得者，当之无愧的人工智能之父。推荐阅读其代表作《情感机器》（湛庐文化“机器人与人工智能”书系之一），该书首次披露了创建情感机器的6大维度，深度思考了人类思维与人工智能的未来。该书中文简体字版已由湛庐文化策划，浙江人民出版社出版。——编者注

[11]在经过两年的停机维护和升级后，大型强子对撞机在2015年4月初重新启动，正式开始第二阶段的运行。——编者注

[12]2013年3月，欧洲核子研究中心表示，已经探测到了希格斯玻色子。——编者注