

The Demon in the Machine

关于「生命是什么？」
的全新解答

信息、 生命与 物理学

How hidden webs
of information are solving the
mystery of life

[英] 保罗·戴维斯 / 著
(Paul Davies)

王培 / 译

中信出版集团

信息、 生命与 物理学

The Demon
in the Machine

关于「生命是什么？」的全新解答

How hidden webs
of information are solving the
mystery of life

[英] 保罗·戴维斯 / 著
(Paul Davies)

王培 / 译

中信出版集团

人们一直很好奇……想要更清楚地知道，同样的物质何以能在物理和化学上呈现出有序、可复制、相对简单的属性；而一旦被拉入生物体的轨道，它又何以能用最令人惊讶的方式组织自身。一个人越是仔细观察生物体中这些物质的表现，就越是会对它们的行为印象深刻。哪怕是最微不足道的活细胞，也是一个不可思议的迷箱，里面装满了精巧的、处于变化中的分子……

——马克斯·德尔布吕克，《康涅狄格艺术与科学学院学报》
(*Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences*)，
38卷，第173—190页（1949年12月）

前言

已经有很多书探讨过生命能做什么了，但本书想要探讨生命是什么。是什么创造了生物？是什么使得生物能够做出如此令人惊讶的事情，而这些事情是非生物做不了的？生物与非生物的区别来自哪里？哪怕一个低级的细菌也能完成如此美妙、如此神奇的事情，却没有任何一位工程师能够制造出与生物相媲美的东西。这些问题让我十分着迷。生命看上去就像一种魔法，它的秘密隐藏在令人费解的复杂性之中。过去几十年来，生物学取得的巨大进展只不过强化了这种神秘感。是什么让生物产生了神秘的魅力，既非凡又独特，完全不同于其他物理系统？所有这些独特性最早来自哪里？

我们可以提出很多类似的问题，它们也是非常重要的问题。在我的职业生涯中，我常常痴迷于这些问题。我不是生物学家，而是一名物理学家和宇宙学家，所以，处理这些重要问题时我将避开大多数技术细节，主要关注基本原理。这就是我将在本书中做的事情。我会专注于真正重要的难题和概念，以试图回答那个非常重要的问题：生命是什么？我绝不是第一个提出这一问题的物理学家。距离伟大的量子物理学家埃尔温·薛定谔发表著名的系列演讲《生命是什么？》已经过去了三代人的时间，我将以此作为出发点。在这些演讲中，薛定谔提出了一个达尔文回避的问题。然而，我认为我们现在正处于回答这个问题的临界点上，相关的答案将会引领一个全新的科学时代。

如果不引入全新的基本概念，物理学与生物学之间的巨大鸿沟——原子和分子领域与生物体领域之间的鸿沟——就将无法弥合。生物体有其目标和使命，这是几十亿年来演化的产物，而原子和分子只盲目遵从物理规律。但是，生物体必定是以某种方式从原子和分子中产生的。尽管科学界已经广泛接受“我们需要将生命重构为一种物理现象”这一观点，但事实证明，科学家还是常常低估了全面理解生命起源和生命本质的难度。

试图寻找非生命与生命之间存在的“缺失的连接”，并在单一理论框架下将两者连接起来的研究，已经产生了一个全新的交叉科学领域，它融合了生物学、物理学、计算机科学和数学。该领域不仅旨在对生命做出终极解释，还希望开启新的应用场景，为纳米技术带来变革，并引导医学研究取得巨大进步。这一变革背后的统一概念就是信息。它不是指日常意义上的信息，而是一种类似于能量的抽象概念，能让物质形成生命。从字面上理解，

信息流模式可以表现出它们自己的生命特征，比如，在细胞间穿梭翻涌，在大脑中飞旋，在生态系统和社会中交互并呈现出它们自己的系统动力学机制。正是在这种丰富又复杂的信息流动过程中，行为主体的概念产生了，这一概念与意识、自由意志和其他令人困惑的难题有关。生物系统正是通过将信息整合成有序模式的方式，在分子领域的混沌中形成了生命的独特秩序。

科学家才刚开始将信息的力量理解为一种“因”，它能真正让世界变得不同。最近，结合了信息、能量、热和功的自然规律已经被应用于生物体，从DNA（脱氧核糖核酸）层面到分子机制，再到神经科学和社会组织，甚至延伸到行星尺度。从信息理论的视角看，生命产生的画面非常不同于传统的生物学解释，后者着重强调了解剖学和生理学方面的变化。

很多人帮助我整合了本书的内容。我在书中提出的很多观点都源自我的同事、美国亚利桑那州立大学科学基本概念超越中心副主任萨拉·沃克（Sara Walker）。在过去5年多的时间里，她对我的思想产生了巨大影响。萨拉与我一样，对围绕信息概念构建物理学和生物学的大统一理论抱有极大热忱。“生命是物理学的下一个重大前沿领域！”她宣称。我也与我们研究团队中的亚利桑那州立大学学生和博士后进行了讨论，并受益良多。此外，我还要特别感谢阿莉莎·亚当斯（Alyssa Adams）、金贤珠（Hyunju Kim）和科尔·马蒂斯（Cole Matthis）。在我那些杰出的亚利桑那州立大学的同事中，雅典娜·阿克提皮斯（Athena Aktipis）、阿里尔·安巴尔（Ariel Anbar）、曼弗雷德·劳比奇勒（Manfred Laubichler）、斯图尔特·林赛（Stuart Lindsay）、迈克尔·林奇（Michael Lynch）、卡洛·梅利（Carlo Maley）、蒂莫西·纽曼（Timothea Newman，现就职于英国邓迪大学）和特德·帕夫利克（Ted Pavlic）为我提供了特别有用的帮助。此外，我十分感谢这些年来与我交流过的如下学者：美国密歇根州立大学的克里斯托夫·阿达米（Christoph Adami）、巴西里约热内卢联邦大学的格雷戈里·蔡廷（Gregory Chaitin）、美国加利福尼亚大学戴维斯分校的詹姆斯·克拉奇菲尔德（James Crutchfield）、英国牛津大学的安德鲁·布里格斯（Andrew Briggs）、美国纽约大学的戴维·查尔默斯（David Chalmers）、英国格拉斯哥大学的李·克罗宁（Lee Cronin）、美国麻省理工学院的马克斯·泰格马克（Max Tegmark）、美国应用分子演化基金会的史蒂文·本纳（Steven Benner）、英国布里斯托大学的迈克尔·贝里（Michael Berry）、南非开普敦大学的乔治·埃利斯（George Ellis）、日本东京地球生命科学研究所和美国普林斯顿高等研究院的皮特·胡特（Piet Hut）、美国系统生物学研究所的斯图尔特·考夫曼（Stuart Kaufman）、澳大利亚国

立大学的查尔斯·莱恩威弗（Charles Lineweaver，他开玩笑说不同意我说的和我写的几乎所有东西），还有美国国家航空航天局（NASA）埃姆斯研究中心的克里斯托弗·麦凯（Christopher McKay）。

在澳大利亚，阿德莱德大学的德里克·阿博特（Derek Abbott）为我阐明了生物物理学的几个方面；悉尼加文医学研究所主任、富有远见的约翰·马蒂克（John Mattick）告诉我，遗传学和微生物学领域的很多问题都还没有定论。悉尼大学的保罗·格里菲思（Paul Griffiths）为我提供了关于演化和表观遗传学的本质的深刻洞见，同时悉尼大学的米哈伊尔·普罗科片科（Mikhail Prokopenko）和约瑟夫·利齐耶（Joseph Lizier）帮我形成了对网络理论的思考，并提供了一些批判性反馈。英国萨里大学的约翰乔伊·麦克法登（Johnjoe McFadden）和吉姆·艾尔-哈利利（Jim Al-Khalili）、美国加利福尼亚大学伯克利分校的比吉塔·惠利（Birgitta Whaley）和科普作家菲利普·鲍尔（Philip Ball）为本书第5章提供了有价值的建议。美国韦恩州立大学的彼得·霍夫曼（Peter Hofmann）善意地澄清了关于棘轮的某些细节问题。美国威斯康星大学麦迪逊分校的朱利奥·托诺尼（Giulio Tononi）及其同事拉丽莎·阿尔巴塔基斯（Larissa Albantakis）和埃里克·赫尔（Erik Hoel，现在哥伦比亚大学工作），耐心地帮我梳理了我对集成信息理论的混乱想法。美国圣菲研究所也为我提供了启发，戴维·克拉考尔（David Krakauer）和戴维·沃尔珀特（David Wolpert）的博学令我钦佩。美国塔夫茨大学的迈克尔·莱文（Michael Levin）是一位非常棒的合作伙伴，也是我认识的最具开拓精神的生物学家之一。我还与计算机工程师、商业咨询师佩里·马歇尔（Perry Marshall）进行了热烈讨论，受益匪浅。

我对癌症研究的初步涉猎让我接触到一大批优秀又聪明的专家，他们帮助我理解了癌症和一般意义上的生命是怎么回事。在亚利桑那州立大学，我与金伯莉·伯西（Kimberly Bussey）和路易斯·西斯内罗斯（Luis Cisneros）就癌症相关项目展开紧密合作，并得到了加拿大西安大略大学的马克·文森特（Mark Vincent）和美国普林斯顿大学的罗伯特·奥斯汀（Robert Austin）的重要帮助。通过与位于墨尔本的彼得·麦卡勒姆癌症中心的戴维·古德（David Goode）和安娜·特里格斯（Anna Trigos）以及芝加哥大学的詹姆斯·夏皮罗（James Shapiro）交流，我对肿瘤遗传学的认知有了极大的进步。我还受到明娜·比塞尔（Mina Bissell）、布伦登·考文垂（Brendon Coventry）和西娅·特尔斯蒂（Thea Tlsty）的著作的影响。当然，其他很多人的著作也影响了我，在此无法一一列举。我还要感谢美国国家癌症研究所慷慨地给予了我为期5年的授权，让我能够获得大量癌症研究

报告；感谢NantWorks公司对我研究的持续支持。美国国家癌症研究所前副主任、现在我在亚利桑那州立大学的同事安娜·巴克（Anna Barker）极富远见，是她鼓励我进入癌症研究领域。

我还要感谢企鹅出版集团——我忠实的出版商，尤其要感谢汤姆·佩恩（Tom Penn）、克洛艾·柯伦斯（Chloe Currens）和萨拉·戴（Sarah Day），他们出色地编辑了本书英文版。

最后，我要感谢保利娜·戴维斯（Pauline Davies），她完整、仔细地阅读了本书三个版本的初稿，每次都会做出修改，并附上大量注释。过去一年中，我们每天都会在一起探讨本书的诸多细节。在她的帮助之下，本书内容有了很大的提升。没有她对我的写作计划的持续支持，没有她坚持不懈的“哄骗”，没有她敏锐的智识，本书的写作绝不会圆满完成。

保罗·戴维斯

2017年12月于悉尼和凤凰城

第1章

生命是什么？

1943年2月，物理学家埃尔温·薛定谔在都柏林圣三一学院发表了题为《生命是什么？》的系列演讲。薛定谔蜚声全球，是获得过诺贝尔物理学奖的名人，也是量子力学这一有史以来最成功的科学理论的缔造者。在20世纪20年代该理论最初形成的几年时间内，量子力学已经成功地解释了原子的结构、原子核的属性、放射性、亚原子粒子的行为、化学键、固体的热力学性质和电性质，以及恒星的稳定性。

薛定谔对量子力学的贡献始于他在1926年提出的一个新公式，该公式至今仍以他的名字命名，它描述了电子和其他亚原子粒子是如何运动和互相作用的。接下来的大约10年是物理学的黄金时代，几乎在每一个前沿领域，物理学都取得了重大进展——从反物质和宇宙膨胀的发现到预测中微子和黑洞的存在——这在很大程度上要归功于量子力学解释原子和亚原子世界的力量。但随着1939年第二次世界大战爆发，这一黄金时代戛然而止。很多科学家离开了纳粹统治下的欧洲，去往英国或美国，为盟军出力。薛定谔也加入了流亡队伍，在1938年纳粹占领奥地利后，他离开了自己的家乡。他决定在中立国爱尔兰安家。爱尔兰总统埃蒙·德·瓦莱拉也是一位物理学家，并于1940年在都柏林创建了一所新的高等研究院。在瓦莱拉的亲自邀请下，薛定谔带着他的妻子和女佣来到爱尔兰，并在那里待了16年。

在20世纪40年代，生物学的发展远远落后于物理学。关于生命基本过程的细节仍是一个巨大的谜题，而且生命的性质似乎违背了物理学的一个基本定律——热力学第二定律。根据该定律，宇宙万物普遍倾向于衰败和无序。在都柏林的演讲中，薛定谔提出了这样一个问题：“发生在生物体空间边界内的时空事件，如何用物理学和化学来解释？”换句话说，生物体令人困惑的属性最终能否被还原为原子物理学或者其他事物呢？薛定谔提出的这个问题非常重要，因为生命要从无序中产生有序，并符合热力学第二定律，就必定存在分子实体。该实体能够以某种方式为形成生物体而编码指令，同时其本身要足够复杂，以嵌入大量信息；此外，它还要足够稳定，以对抗热力学的降解效应。现在我们知道，这种分子实体就是DNA。

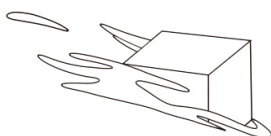
Erwin Schrödinger, *What is Life?* (Cambridge University Press, 1944), p. 23.

随着薛定谔提出这些极为敏锐的洞见，以及他的系列演讲在第二年被结集出版，分子生物学领域迎来爆发式发展。紧随其后的是，科学家阐明了DNA的结构，破解了遗传密码，并将演化论（亦称进化论）与遗传学整合起来。分子生物学取得

了如此迅猛、如此广泛的成功，以至于大多数科学家都采纳了一种强还原论：生物体那些令人惊讶的性质最终似乎的确可以单靠原子和分子物理学来解释，而无须借助任何全新的理论。但薛定谔的态度并不那么乐观，他写道：“……尽管就目前所知，生物体还没有摆脱‘物理规律’，但它有可能涉及我们迄今尚未发现的‘其他物理规律’……”^①在这个问题上，不只是他一个人这样认为。尼尔斯·玻尔和沃纳·海森堡等量子力学的其他缔造者也觉得，解释生物体的性质可能需要新的物理学来发挥作用。

强还原论至今仍流行于生物学领域。传统观念坚信，已知的物理学足以解释生命现象，尽管大多数细节问题还未完全搞清楚。我不同意这种看法。与薛定谔一样，我认为生物体清楚表明了更深层次的新物理学原理的存在，并且我们正处在揭示和利用这些原理的临界点上。今日与过往有何不同，为什么我们花了好几十年的时间才发现了生命的真正秘密？答案在于，这种新物理学并不涉及额外的力，比如“生命力”，而是发现了更微妙的东西，它能让物质与信息、整体与部分、简单性与复杂性交织在一起。

这种东西就是本书要探讨的核心话题。



迷箱1

有魔力的生命

当被问到“生命是什么”这个问题时，我们常会想到生命的诸多属性。生物体会繁殖；会通过演化探索无尽的新奇事物；会沿着无法预测的轨迹徜徉在可能的空间中，发明全新的系统和结构；会使用精密的算法制定生存策略；会从混沌中创造秩序；会对抗退化和衰变的宇宙潮汐；会呈现清晰的目标，并利用各种能量去实现这些目标；会形成令人难以想象的复杂网络，既合作又竞争……要想回答薛定谔的问题，我们必须欣然接受生命的所有属性，将各个科学领域的知识点整合成一个统一的理论。

将逻辑和数学的基础、自我指涉的悖论、计算理论、热机科学、纳米技术领域激增的研究成果、远离平衡态热力学的新兴领域和神秘的量子物理学整合起来，这绝对是一种智力探险。所有这些主题的统一特征就是信息，信息既是一个常见又实用的概念，也是一个抽象的数学概念，它建立在生物学和物理学的基础之上。

Charles Darwin, *On the Origin of Species* (John Murray; 2nd edn, 1860), p. 490.

查尔斯·达尔文写过一段著名的文字：“凝视树木交错的河岸，许多种类的植物覆盖其上，群鸟鸣于灌木丛中，各种昆虫飞来飞去，蚯蚓在潮湿的泥土里爬过，表明这些构造精巧的生命形式彼此不同，却又以复杂的方式相互依存，它们都是由在我们周围发生作用的法则创造出来的。”^②然而，达尔文没有想到的是，串联起这种显而易见的物质复杂性（生命的“硬件”）的东西，竟然是更令人惊叹的信息复杂性（生命的“软件”）。后者对我们而言是隐性的，却为生物体的适应和创新提供了帮助。正是在信息领域，我们邂逅了生命真正的创造力。如今，科学家正在将硬件叙事和软件叙事融合成一种新的生命理论，该理论适用面甚广，涵盖从天体生物学到医学的诸多领域。

再见，生命力

从古至今，人们一直认为生物体拥有奇怪的能力，比如，自主运动、改变环境和繁衍生息。哲学家亚里士多德试图用一个概念来捕捉生物体的这种难以解释的奇特性，即我们熟知的“teleology”（目的论），它来自希腊语中意为“目标”或“目的”的 *telos* 一词。亚里士多德观察到，生物的行为似乎都有目的性，它们会根据某个预先安排的计划或方案展开行动。它们的行动将被指向或引至一种最终状态，无论是捕食、筑巢，还是通过性行为实现繁殖。

在科学时代早期，人们坚持认为，生命是由某类神奇的物质构成的，或者至少是由添加了某种额外成分的常见物质构成的。这种观点被称为“活力论”。但这种神奇的物质或额外成分究竟是什么，一直是个未解之谜。人们猜测的东西包括空气（生物体呼吸的东西）、热、电，以及类似灵魂的神秘之物。无论它是什么，19世纪的人们都普遍相信，存在着一种特殊的“生命力”或超凡的能量，它可以使物质有生命。

随着科学技术的进步，比如超级显微镜投入使用，生物学家发现了越来越多令人惊讶的现象，它们似乎需要用“生命力”来解释。其中一个重要的谜题关乎胚胎发育。一个小到肉眼无法看到的受精卵细胞竟然能发育成一个婴儿，有谁不为此感到惊叹？是什么引导胚胎形成了复杂的组织？它何以能如此稳定地发育，并成为如此精妙的杰作？德国胚胎学家汉斯·杜里舒在1885年做的一系列实验让他感到尤其惊讶。他试图破坏海胆的胚胎（海胆是生物学家喜爱的一种实验对象），结果发现它们居然以某种方式复原了，而且能正常发育。他发现，甚至有可能把发育到四细胞期的细胞团分解成一个个单独的细胞，而每个细胞仍能发育成一只完整的海胆。类似的实验结果让杜里舒产生了一种看法，即胚胎细胞拥有某种“事先想法”，这种想法能让它们按照自己的意图长成最终的形状，并且聪明地修复实验者对它们的

破坏。这就好像有一只无形的手在干预它们的成长和发育，如果有必要，这只手就会进行“中期修正”。在杜里舒看来，这些事实构成了某种“生命力”存在的明确证据，他称之为“*entelechy*”（生机），该词在希腊语中的意思是“完整、完美的最终形式”。他的看法类似于亚里士多德的目的论。

活力论还有另外一个问题：它与19世纪流行的唯灵论非常接近，唯灵论讲述的关于外质和“以太体”的故事极其怪诞。

但问题在于，“生命力”究竟是什么东西？一种力想要真正发挥作用，就必须像所有其他力一样能让物体运动。乍看起来，生物似乎的确能自我驱动，拥有某种内在的动力源。然而，任何一种力想要发挥作用，就必定会消耗能量。所以，如果“生命力”是真实存在的东西，我们就应该可以探测到能量的转化。物理学家赫尔曼·冯·亥姆霍兹在19世纪40年代认真研究过这一问题。在一系列实验中，他用电脉冲刺激从青蛙身上取下的肌肉，引起肌肉抽搐，并仔细测量了这一过程中温度的细微变化。亥姆霍兹得出的结论是，存储在肌肉中的化学能受到电脉冲的激发后，转化为以抽搐形式体现出来的机械能，然后机械能转化为热能。在整个过程中，能量是守恒的，没有任何证据表明其需要额外的生命力。然而，又过了几十年，活力论才彻底被人们抛弃。

不过，即便不存在“生命力”，我们也很难动摇人们的刻板印象：关于生命，存在着某种特殊的东西。但问题在于，那种东西是什么？

学生时代的我读完薛定谔的《生命是什么》一书后，便为这一难题深深着迷。从某个层面讲，答案非常简单：生物体会繁衍，进行新陈代谢，对刺激做出响应，等等。然而，仅列举生命的属性并不等于解释了生命是什么，而后者才是薛定谔探索的目标。一方面，我受到薛定谔著作的极大启发；另一方面，我失望地发现他的解释并不完善。在我看来，生命必定涉及比原子和分子物理学更多的东西。尽管薛定谔认为，可能会有某种新的物理学在其中发挥作用，但他并没有说它是哪种物理学。分子生物学和生物物理学随后取得的进展也几乎没有提供新线索。但就在最近，答案的轮廓已浮现出来，它来自一个全新的方向。

生命涌现的惊喜

把普通金属变成黄金这件事可以由恒星完成，也可以由那些懂得恒星如何发光的聪明人完成，除此之外宇宙中别无他法。

David Deutsch, *The Beginning of Infinity: Explanations that Transform the World* (Penguin, 2011), p. 1.

——戴维·多伊奇

要想知道薛定谔提出的“生命是什么”这个问题的答案，意味着我们需要舍弃生物学家滔滔不绝地历数的关于生命属性的传统清单，并开始以一种全新的方式思考生命的现状。你可以问自己这样一个问题：“如果没有生命，这个世界会有何不同？”我们所在的星球在一定程度上是由生物塑造的，这是一个常识，比如大气中氧气的产生、矿产的形成和人类科技的全球性影响等。很多非生物过程也会重塑地球，比如火山喷发、小行星撞击和冰川作用等。关键的区别在于，生命过程不可能以其他方式实现。什么能以精确的定位围绕地球飞行半圈？是北极燕鸥。什么能以90%的效率将太阳光中的能量转化为电能？是树叶。什么能构建复杂的地下隧道网络？是白蚁。

S. I. Walker, ‘The descent of math’, in: A. Aguirre, B. Foster and Z. Merali (eds.), *Trick of Truth: The Mysterious Connection between Physics and Mathematics* (Springer, 2016).

当然，人类技术——生物体制造的产物——也能做这些事情，甚至可以做得更多。自太阳系形成以来的45亿多年间，地球从小行星和彗星撞击中积累了大量物质，这一过程的专业术语叫作“吸积”。纵观地球的整个历史，来自数百千米以外的各种大小物体穿过大气微粒，如雨水般落到我们的星球上。大多数人都知道，那颗导致恐龙灭绝的彗星在6500万年前撞击了今天墨西哥所在的地区，但那只是其中一例。亿万年的撞击意味着，今天的地球质量要比过去稍重。然而，自1958年以来，逆向吸积现象已经发生。^⑨在没有出现任何地质灾害的情况下，大量物体开始逆向运动——从地球逃逸到太空，有些去了月球和其他行星，有些则永远留在太空中，但多数还是围绕地球运转。如果纯粹基于力学定律和行星演化规律，那么这样的现象是不可能出现的。然而，人类的火箭技术轻而易举地解释了这种现象。

再举一个例子。当太阳系形成时，其原始化学物质中的一小部分包含了元素钷。钷的同位素生命周期很长，半衰期最长可达8100万年，所以几乎所有原始的钷如今都已衰变。但在1940年，作为核物理实验的产物，钷重新出现在地球上。据估算，如今地球上大约有1000吨钷。没有生命，我们就完全无法解释为什么钷会在地球上突然重现。一颗拥有45亿多年历史的毫无生气的行星，不可能通过非生物过程成为一颗拥有钷的行星。

生命不仅适时地影响了这些变化，而且凭借其多样性和适应力，侵入新的生态位，有时还能以非凡的方式创造精巧的生存机制。在南非姆波尼格金矿区地下3千米的地方，存在着大量奇特的细菌群落。它们独立于地球生物圈的其他部分，聚集在只有用显微镜才能看到的灼热岩石孔隙中（这些岩石含有金元素）。那里没有可帮助它们维持生存的光线，也没有有机原料供它们食用。令人惊讶的是，这些微生物在危险环境中的生存之源竟然是放射性。通常，核辐射会对生命造成致死性伤害，但来自岩石的核辐射通过将水分解成氧和氢，为这些地下生命提供了足够的能

量。这种被称为金矿菌 (*Desulforudis audaxviator*) 的细菌已经演化出了利用辐射产生的化学副产品的机制：岩石上密布着滚烫的水，能够溶解二氧化碳，溶解后的二氧化碳又与氢发生化学反应，形成生物质。

距离此地8000千米处是智利阿塔卡马沙漠干燥的核心地带，强烈的日光炙烤着这片独特的景观。肉眼所及之处，只能看到沙和岩石，没有任何生命迹象。没有鸟、昆虫或植物来装饰这片土地，没有任何生物在尘土中爬行，没有任何绿地表明这里存在着哪怕是简单的藻类。所有已知的生命都需要液态水，但阿塔卡马地区几乎从不下雨，这使它成为地球表面最干燥和最无生气的地方。

阿塔卡马沙漠的核心地带类似于火星表面，所以NASA在那里建了一个野外探测站，用于检验火星土壤的相关理论。对于地外生命，科学家的研究才刚开始。他们喜欢说自己正在寻找尸体，而不是生命，但他们的发现令人惊讶。在露出地面的沙漠岩石中间散布着一些形状怪异、砂质外壳的岩柱，它们约有一米高，既有浑圆的部分，也有凸起的部分，好像萨尔瓦多·达利设计的奇怪雕塑。这些小丘实际上是由盐构成的，盐是远古湖水长期蒸发的残余物。事实上，岩柱内部也全是盐，那里有活的微生物。它们克服各种不利条件，竭力维持着生存。这些全然不同的怪异生物被称为拟甲色球藻 (*Chroococcidiopsis*)，它们的能量来源不是核辐射，而是寻常的光合作用，因为沙漠中的强烈阳光能够穿透它们半透明的居所。但问题仍然存在：它们是从哪里获取水的？阿塔卡马沙漠的核心地带距离冰冷的太平洋有100千米远，中间还隔着一座山脉。在适当的条件下，晚上温度骤降时缕缕海雾飘过山脉。潮湿的空气将水分子注入盐基质。但这些水分子不会形成液滴，相反，盐会因受潮而变黏。生活在气候潮湿地带的人习惯了瓶子里的盐因受潮凝结而难以取出，对这种现象再熟悉不过了。盐吸收水蒸气的过程被称为潮解，它可以为这些微生物提供足够的水分，但只在短时间内，因为一旦到了早上，随着太阳升起，盐柱又将被烤干。

金矿菌和拟甲色球藻是两个极端的例子，表明生物体拥有非凡的能力，可以在极其恶劣的环境中生存。我们还知道，一些其他微生物也能够适应极度寒冷或高温的环境，或者适应高盐分和金属污染的环境，或者适应足以烧伤人类皮肤的强酸环境。这些生活在极端环境中的适应力极强的生物群体（我们可以把它们统称为“嗜极生物”）的发现，颠覆了我们长期持有的观念，即生命只能在非常有限的温度、压力和酸性等条件下生存。但是，生命具有如此强大的能力，以至于可以创造新的物理学和化学反应路径，可以开发一系列看似不太可能的能量来源。这些都表明，一旦生命产生，它就有潜能从其原始生境向外扩展蔓延，并触发意料之外的转变。在遥远的未来，人类或他们的机器子孙也许会重塑整个太阳系，甚至银河系。宇宙中别处的其他生命形式也许已经在做类似的事情，或者最终有可能做成这些事情。既然生命已经在宇宙中出现，它就有潜能带来宇宙意义上的显著变化。

计量生命的恼人难题

科学领域有一句名言：如果某个东西真实存在，我们就应该能够测量它（甚至有可能对它征税）。但我们能计量生命，或者测量“活着的程度”吗？这似乎是一个抽象的问题，但它近年来显露出一定的直观性。1997年，美国和欧洲的航天机构携手将卡西尼号探测器发射到土星及其卫星上。科学家最感兴趣的是“土卫六”，它是土星最大的卫星。克里斯蒂安·惠更斯于1655年发现了土卫六，之后天文学家一直对它好奇不已，这不仅是因为它的大小，还因为它被云层覆盖。在卡西尼项目实施之前，云层下面是什么，一直是个未解之谜。卡西尼号探测器伸出一根被贴切地称为“惠更斯”的小探针，它穿过土卫六的云层，安全到达这颗卫星的表面。

“惠更斯”的探索显示出土卫六上有海洋和沙滩的景观，但这里的海洋是由液态乙烷和甲烷构成的，岩石则是由水冰构成的。土卫六上非常寒冷，平均温度为零下180摄氏度。

天体生物学家也对卡西尼号的任务抱有热切的兴趣。现在我们已经知道，土卫六的大气是一层厚厚的石化烟雾，它的云层充满了有机分子。然而，由于极度寒冷，就像我们知道的那样，该星体上不可能有生命存在。有一些猜测认为，某种奇异的生命形式可能会用液态甲烷代替水，但大多数天体生物学家并不认为这种做法可行。然而，即便土卫六上没有任何生命，它仍然与生命之谜密切相关。实际上，它构成了一个天然的化学实验室，已经在45亿多年间稳定地“烹制”出复杂的有机分子。说得再生动一些的话，土卫六就像一项失败的大型生物实验，它让我们直击“生命是什么”这一问题的核心。从化学意义上讲，如果土卫六在通往生命的盘绕长路上已经走了一段，却未能像地球那样抵达终点——产生生命，那么土卫六距离标志着“生命始于这里”的终点还有多远呢？我们可以认为现在的土卫六已经在某种程度上相当接近终点了吗？我们真的可以发现隐藏在它那朦胧云层下面的“近乎生命”的东西吗？

说得更明确一些，我们有可能建造某种生命计量仪，从土卫六的充满有机分子的大气中取样，并给出一个数值吗？想象一下，科学团队在未来完成了一项研究任务后宣称，“在超过45亿年的时间里，土卫六成功走完了通往生命之路的87.3%”，或者“土卫六只完成了从有机构成要素到简单活细胞这段漫长旅程的4%”。

这些说法听起来太荒谬了。但这是为什么呢？

Richard Dawkins, *Climbing Mount Improbable* (Norton, 1996).

当然，我们根本没有生命计量仪。更重要的是，我们完全不清楚这种计量仪的运作原理是什么。它到底能测量什么呢？理查德·道金斯引入了一个有趣的比喻来

阐述生物演化过程，他称之为“不可能的山峰”。^②复杂生命的出现不可能一蹴而就，它必须从非常简单的微生物开始，经过漫长的自然选择才能逐渐演化为复杂生命。在道金斯的比喻中，今天的复杂生命形式（比如人类）的祖先几十亿年来一直在攀登越来越高的山峰（这意味着在演化过程中生命形式变得越来越复杂）。非常有道理！但生命产生的第一步，或者从非生命到生命的转变，是怎么发生的呢？从简单化学物质的混合到最初的活细胞形成，中间的路径是什么，也要攀登化学意义上的“不可能的山峰”？似乎必然如此。要从简单分子的随机混合物转变成一种功能完备的生物，显然不可能通过化学层面上惊人的一跃来实现，必定要经过一段漫长的旅程，而且有各种中间步骤。没人知道那些步骤是什么（也许不包括后文中将要提到的最初步骤，参见第6章）。事实上，我们甚至无法回答一个更加基本的问题：从非生命到生命，从无生命的物质到生物，是一段漫长、渐进、不间断的进阶之路，还是一系列不连贯的重大变化，就像物理学所说的相变（比如，从水变成蒸汽）那样？没人知道答案。然而，无论是哪种情况，生命产生之前的“不可能的山峰”这个比喻是有用的，随着山峰越来越高，化学复杂性也越来越大。让我们回到被送至土卫六的假想生命计量仪，它如果存在，可能会被视为一种复杂性测高仪，测量土卫六的大气已经攀爬到了产生生命这座“不可能的山峰”的哪个高度。

这是一个简化的例子：不同器官的死亡速率是不一样的，而老鼠体内的细菌甚至有可能永远活着。

显然，如果只关注化学复杂性，我们在解释“生命是什么”的问题时就会错失某些东西。一只刚死的老鼠与一只活老鼠的化学复杂性是一样的，但我们不会认为前者活着的程度是99.9%。显而易见，它就是死了。^③我们又该如何看待那些正在冬眠而没有真正死去的微生物呢？比如，当遇到恶劣环境时，细菌芽孢会处于蛰伏状态，直到它遇到更好的环境并再次活跃起来；被称为缓步动物（俗称“熊虫”）的八足微型动物，会在极低的液氮温度下进入休眠状态，在温度升高后又“活过来”。当然，即便是这些适应能力很强的生物，也有生存力的极限。生命计量仪能告诉我们什么时候细菌芽孢或缓步动物将越过生命的临界点，再也不会醒来吗？

这不只是一个哲学难题。土星还有另一颗冰卫星，近年来得到诸多关注。这颗被称为“土卫二”的卫星会被其岩质核心内部的潮汐力加热，这种潮汐力是它围绕土星运行产生的。所以，尽管土卫二距离太阳非常遥远，表面又覆盖着冰层，但它的冰壳之下有海洋。不过，它的冰壳并不是完整无缺的。卡西尼号探测器发现，土卫二的冰壳上存在巨大裂隙，它一直在通过裂隙向太空喷射物质。这些物质都是有机分子，它们是否暗示了在寒冷的冰壳下面有生命存在呢？我们如何才能知道这一问题的答案？

NASA正在规划一项任务，计划在21世纪二三十年代飞到土卫二上空，主要目的就是寻找生物活动的痕迹。但他们面临着一个急迫的问题：应该用哪些仪器来完成

探测工作，它们应该寻找什么呢？我们能为这次旅程设计出一种生命计量仪吗？尽管不可能用它精确测量“活着的程度”，但至少能够区分“远非生命”、“近乎活着”、“活着”和“曾经活着但现在已经死了”？甚至，我们要开始思考：在上述状态下，“生命是什么”这一问题有意义吗？

计量生命的难题还涉及一个更广泛的问题。人们一直对研究太阳系外行星的大气层的前景兴奋不已，试图通过了解足够多的细节，揭示太阳系外的生命迹象。但有说服力的确凿证据是什么样的？有些天体生物学家认为，大气中的氧泄露了真相，暗示光合作用是一个必备条件；其他人则认为，甲烷或者氧与甲烷的混合物才是必备条件。事实上，科学家尚未达成共识，因为非生物机制也能产生所有的常见气体。

1976年，事先定义生命的弊端给人们上了有益的一课，当时NASA的两个探测器海盗1号和海盗2号在火星着陆。这是美国航天局第一次也是迄今为止最后一次试图在另一颗行星上开展真正的生物实验，而不只是研究生命产生的条件是否存在。海盗号开展的实验中有一项被命名为“标记释放”，是由目前在亚利桑那州立大学任兼职教授的工程师吉尔伯特·莱文设计的。该实验的做法是，把培养基倒在火星的泥土上，观察培养基是否会被火星上的任何微生物消耗，并被转化成二氧化碳废气。培养基中的碳元素是经过放射性标记的，只要培养基释放出二氧化碳，就能被探测到。科学家确实探测到了二氧化碳。此外，当培养基被加热时，化学反应停止了，就好像火星上的微生物被热量杀死了。两个海盗号探测器在不同的地点重复该实验，均获得了相同的结果。直到今天，吉尔伯特仍然宣称他在火星上探测到了生命，并认为历史终将证明他是正确的。相反，NASA的官方说法是，海盗号探测器没有发现生命，“标记释放”实验的结果是由不寻常的土壤条件造成的。这很可能是NASA不想再重复这项实验的原因。

格拉斯哥大学的李·克罗宁已经提出了一种测量化学复杂性的方法，该方法建立在产生某种特定大分子所需的一系列步骤的基础之上。

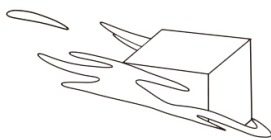
Eric Smith and Harold Morowitz, *The Origin and Nature of Life on Earth* (Cambridge University Press, 2016).

NASA和参与这项任务的科学家之间的尖锐分歧表明，如果只依靠化学标准，那么事实上，我们将很难判断另一个世界是否存在生命。我们都知道，设计海盗号探测器的初衷是寻找生命的化学踪迹。如果我们确信地球生命是唯一可能的生命形式，我们就有可能设计出用于探测足够复杂的有机分子的设备，而这些分子只能通过已知的生物过程产生。比如，如果该设备发现了核糖体（一种制造蛋白质的分子机器），生物学家就会确信，实验样本要么现在是活的，要么在不远的过去活过。但是，我们又该如何看待已知生命使用的更简单分子呢，比如氨基酸？情况不太令人满意：一些陨石中就含有氨基酸，而它们是在太空中形成的，并不需要经历生物

过程。最近，科学家在距离我们400光年之遥的一颗恒星附近的气体云中发现了乙醇醛这种糖分子，但它本身离生命的显著特征还差得非常远，因为简单的化学反应就能产生这类分子。所以，我们有可能概括出化学复杂性的范围，但从氨基酸和糖到核糖体和蛋白质，这条分子链上的哪个环节才是生命产生的决定性因素？甚至，我们是否有可能纯粹依据化学指纹图谱来确定生命的存在？^②很多科学家喜欢把生命视为一个过程，而不是一种事物，也许这样的过程只在行星尺度上有意义。^③（参见第6章的迷箱12。）

古老分子的故事

有些类型的生命已经在地球上存在了大约40亿年，在此期间，地球经历了小行星和彗星撞击、大规模火山喷发、全球冰川作用和太阳温度不可逆转的上升。然而，形式多样的生命仍欣欣向荣。贯穿地球生命故事的共同主线（在这里，我们可以从字面意义上理解“主线”一词）是一种名叫DNA的长分子，它最早是由瑞士化学家弗里德里希·米歇尔于1869年发现的。“molecule”（分子）一词来自拉丁语 *moles*，在18世纪的法国流行起来，意为“极小的物质”。然而，DNA并不小。你体内的每个细胞都含有约两米长的DNA，它在分子中属于“巨无霸”，其著名的双螺旋结构上铭刻着生命的指令。这一基本配方适用于所有已知生命：人类与黑猩猩共享98%的基因，与小鼠共享85%的基因，与鸡共享60%的基因，与很多微生物有超过50%的基因相同。



迷箱2

生命的基本机制

地球上所有生命的信息基础都是通用的遗传密码。用字母表示的特定序列是形成某种特定蛋白质所需的信息，被存储在DNA的片段中。这些字母包括A、C、G、T，分别表示腺嘌呤、胞嘧啶、鸟嘌呤和胸腺嘧啶分子。它们被统称为碱基，能以任意组合的方式沿着DNA分子排列。不同的组合为不同的蛋白质编码。蛋白质由被称为氨基酸的其他类型的分子形成，一种典型的蛋白质包含数百个氨基酸，这些氨基酸首尾连接形成长链。氨基酸的种类有很多，但据目前所知，生命只使用了有限的20种（有时是21种）。蛋白质的化学属性取决于氨基酸的精确排序。碱基只有4种，而氨基酸有20种，所以DNA不可能用单一碱基编码每一个氨基酸；相反，它会同时用三个碱基编码一个氨基酸。因此，用4个碱基字母能产生64种三元组合，也称密码子（比如，ACT、GCA等）。这64种可能的组合远多于20种氨基酸，所以还存

在冗余：很多氨基酸对应着两个或更多不同的密码子。少许密码子还被用作“标点符号”，比如“句号”（意味着“停止”）。

信使RNA（mRNA）经由DNA的一条链为模板转录而来，携带着相应的遗传信息，是一类指导下一步蛋白质合成过程的单链RNA分子。——译者注

转移RNA（tRNA）是一类具有携带并转运氨基酸功能的小分子核糖核酸。——译者注

要想读懂形成某种特定蛋白质的指令，细胞首先要将来自DNA的相关密码子序列转录成一类被称为信使RNA^①（RNA即核糖核酸）的相关分子。核糖体是合成蛋白质的“分子机器”，可以从信使RNA中读出密码子的序列，并通过化学连接的方式将一个个氨基酸连在一起，从而一步步合成蛋白质。每个密码子必须准确地对应氨基酸，才能让系统正常运转。这一过程还需要转移RNA^②的参与。这些RNA短链分子有20种变体，每种变体只能识别某种特定的密码子并与其绑定。重要的是，必须由合适的氨基酸与转移RNA绑定，才能与编码该氨基酸的密码子匹配，这些氨基酸等待着被运去制造不断增长的氨基酸长链。当核糖体结束合成工作时，氨基酸长链就会形成功能蛋白质分子。要想让这一过程顺利进行，20种氨基酸中必须有一种合适的氨基酸能依附在相应的转移RNA变体上。这一步骤是由一种叫作“氨酰tRNA合成酶”的特定蛋白质辅助完成的。这种蛋白质的名字并不重要。重要的是，这种蛋白质的形状对转移RNA和相应的氨基酸而言都是特定的，因此它可以将正确的氨基酸依附在相应的转移RNA变体上。由于有20种不同的氨基酸，因此也必定有20种不同的氨酰tRNA合成酶。需要注意的是，氨酰tRNA合成酶是信息链中关键的连接点。生物信息被存储在一类分子（DNA）中，但它要服务于完全不同类型的分子（蛋白质）。这两类分子“说”的是完全不同的“语言”！但氨酰tRNA合成酶可以说两种语言：它们既能识别密码子，又能识别20种氨基酸。这些起连接作用的分子对通用的遗传机制而言绝对是非常重要的，所有已知生命都要用到这种遗传机制。因此，该机制必定十分古老，而且一直运转良好。所有生命都取决于它！实验表明，该机制的确极其可靠，只有1/3000的概率会出错（就像翻译出错那样）。我们很难不被这种精妙的机制深深吸引，在几十亿年中它一直稳定而良好地运转，这是多么令人震撼啊！

当信息被从DNA转录至RNA时，碱基T会被稍有不同的碱基U取代，后者代表尿嘧啶。

术语说明：当科学家提到生物体的“密码”时，通常会造成很大的误解。他们真正所指的其实是被编码的基因数据。你的基因数据肯定不同于我的，但我们有同样的基因编码机制。

所有已知生命都在按照一个通用剧本表演，这一事实表明，生命有着共同的起源。地球上最古老的生命痕迹至少可以追溯到35亿年前，从那时起DNA的某些部分

在很大程度上保持不变。同样没有发生变化的是生命的语言。DNA指令是用密码写成的，A、C、G、T这4个字母代表4种碱基，它们组合在一起，搭建了这种古老分子的结构。^⑪在我们破解了碱基序列的密码后，人们发现其中详述了生物过程中耐用的“老黄牛”——蛋白质的合成方法。人类的DNA编码了约两万种蛋白质。尽管不同的生物拥有不同的蛋白质，但所有生物都有相同的编码和解码机制（迷箱2介绍了细节）。蛋白质是由氨基酸链构成的。一个典型的蛋白质分子包含数百条氨基酸链，它们被折叠成一种复杂的三维形状，这是该蛋白质的功能形式。生命以各种组合的形式使用20种（有时是21种）氨基酸。尽管A、C、G、T这4种碱基能以多种方式排序，为20种氨基酸编码，但所有已知生命都使用了相同的排序方式（参见表1），表明这是一种非常古老的方式，而且地球生命都深深烙上了这一特征的印记，包括几十亿年前的共同祖先。^⑫

尽管DNA非常古老，但也有其他实体留存至今，比如晶体。在澳大利亚和加拿大发现的锆石，其存在时间超过40亿年，它们在俯冲事件中得以幸存并进入地壳。DNA与晶体的核心差异在于，生物体与其所在环境之间的关系是不平衡的。事实上，生命常常极度远离平衡态。为了维系生存，生物必须从环境中获取能量（比如阳光或食物中的能量），还要输出一些东西（比如氧或二氧化碳）。因此，生物与其周围的环境一直在持续地交换能量和物质，而晶体内部是惰性的。当一个生物死去时，它的所有活动都会停止，并随着生物体的腐朽而逐渐进入平衡态。

对流元胞（convection cell）：又称“对流环”。指地幔物质在深处热边界被加热后体积膨胀，由于浮力而上升，到达上面的冷边界后遇冷密度增大而下沉，回到热边界，由此形成的运动环圈。——编者注

当然，有些非生命系统也远离平衡态，但同样留存至今。我最喜欢的一个例子就是木星表面的“大红斑”，它是一种气体涡旋。自人们用望远镜观测到木星以来，它就一直存在，也没有显示出消退的迹象（见图1）。我们还知道很多其他的化学或物理学系统，它们也有类似的自主存在。其中一个例子就是对流元胞^⑬。当对流元胞中的流体（比如液态水）被从下方加热时，它就会以一种系统模式涨落。此外，还有一些化学反应能产生螺旋形状或者有节奏的脉动（见图2）。像这样的系统呈现出有组织的复杂性的自发样态，化学家伊利亚·普里高津称这些系统为耗散结构。他在20世纪70年代大力倡导对耗散结构进行研究，并认为化学耗散结构代表了通往生命的漫漫长路上的驿站，它既远离平衡态，又支持物质和能量的持续交换。至今，仍有很多科学家相信这一点。

▼表1 通用基因代码

	T		C		A		G	
T	TTT	Phe	TCT	Ser	TAT	Tyr	TGT	Cys
	TTC		TCC		TAC		TGC	
	TTA	Leu	TCA		TAA	STOP	TGA	STOP
	TTG		TCG		TAG		TGG	Trp
C	CTT	Leu	CCT	Pro	CAT	His	CGT	Arg
	CTC		CCC		CAC		CGC	
	CTA		CCA		CCA	Gln	CGA	
	CTG		CCG		CAG		CGG	
A	ATT	Ile	ACT	Thr	AAT	Asn	AGT	Ser
	ATC		ACC		AAC		AGC	
	ATA		ACA		AAA	Lys	AGA	Arg
	ATG	Met	ACG		AAG		AGG	
G	GTT	Val	GCT	Ala	GAT	Asp	GGT	Gly
	GTC		GCC		GAC		GGC	
	GTA		GCA		GAA	Glu	GGA	
	GTG		GCG		GAG		GGG	

▲注：此表显示，所有已知生命都采用相同的编码方式。由碱基三联体（密码子）编码的氨基酸被列举在密码子的右侧，以缩写字母表示（比如，Phe代表苯丙氨酸；就我想在本书中表达的思想而言，所有这些氨基酸分子的名称并不重要）。这里要提到一个历史上的逸闻：“存在某种形式的基因密码”这一说法最早是由天

文学家乔治·伽莫夫在1953年写给克里克和沃森的信中提出来的。伽莫夫以其在宇宙大爆炸理论中的开创性贡献闻名于世。



▲图1 木星表面的大红斑

图片来源：MPI *Stringer*Getty Images。



▲图2 一种化学耗散结构

当一种特定的化学混合物被迫远离平衡态时，它就能自发演化出如图所示的稳定形式。化学家伊利亚·普里高津坚称，这类系统代表了通往生命的漫漫长路上最初的几步。

图片来源：Prof. Arthur Winfree/Science Photo Library/Getty Images。

在生物体中，大多数化学活性都与蛋白质有关。新陈代谢（能量和物质通过生物体流动）对一切生命活动来说都是必不可少的，而由蛋白质完成的新陈代谢工作占据了最大的份额。如果生命始于由能量驱动的精巧化学循环（正如普里高津相信

的那样），蛋白质必定很早就已经在生命这出伟大的戏剧中登场了。但如果仅靠自己，大量的蛋白质就会毫无用处。至关重要的生物体组织工作需要大量的编排和设计，也就是说，需要某种形式的指挥与控制结构。这一工作是由核酸（包括DNA和RNA）完成的。正如我们知道的那样，生命涉及核酸和蛋白质这两类截然不同的分子之间的大量交互和协调。很多科学家已经发现，生命的难题在于其因果难辨的本质，就好像“先有鸡，还是先有蛋”，两者缺一不可。没有众多的蛋白质围着DNA分子转，DNA分子就无法发挥作用。简言之，两者的工作职责如下：核酸负责存储关于“生命计划”的细节，蛋白质负责完成让生物体正常运转的枯燥工作。两者都必不可少，所以，生命的定义必须把这一点纳入考虑范围。我们不仅需要考虑建立了模式的复杂而有序的化学结构，还需要考虑接受指挥和控制的化学反应。总之，生命就是化学加上信息。

生命=物质+信息

如果没有信息，生物学就将失去意义。

Bernd-Olaf Küppers, ‘The nucleation of semantic information in prebiotic matter’, in: E. Domingo and P. Schuster (eds.), Quasispecies: From Theory to Experimental Systems. Current Topics in Microbiology and Immunology, vol. 392, 23 - 42. See also Carlo Rovelli, ‘Meaning and intentionality = information + evolution’, in: A. Aguirre, B. Foster and Z. Merali (eds.), Wandering Towards a Goal: How Can Mindless Mathematical Laws Give Rise to Aims and Intention? (Springer, 2018), pp. 17 - 27.

——贝恩德 - 奥拉夫·屈佩尔斯 

我们现在正处于一个关键时刻。

将生命与非生命区分开来的东西就是信息。

这话说起来容易，但需要进一步剖析。我们先从简单的事情讲起：生物会繁殖，并通过繁殖将它们的信息传递给后代。从这个方面看，繁殖与生产不同。狗繁殖会生出更多的狗，猫繁殖会生出更多的猫，人类繁殖会生出更多的人……基本的身体蓝图从一代传递至下一代。但是，繁殖与单纯的物种延续之间存在细微的差别。比如，人类的婴孩会从他们的父母或祖父母那里遗传某些具体的特征：红头发、蓝眼睛、雀斑、长腿……关于遗传，最好的阐释如下：此前世代的相关信息被传递给下一代，而这些信息是构建一个与老一代相似的新生物体所必需的。这种信

息被编码在生物的基因中，然后作为繁殖过程的一部分被复制。因此，生物繁殖的本质就是可遗传信息的复制。

1纳米是1米的10亿分之一。纳米技术就是指在分子尺度设计结构。

当薛定谔在1943年发表演讲时，大多数科学家还不知道遗传信息是如何复制和传递的。没人真正知道这类信息被存储在哪里，也没人知道它是如何复制的。当时距离发现DNA在遗传方面的作用还有10年时间。薛定谔的伟大洞见在于，确认了信息的存储、处理和传递必定发生在活细胞内纳米尺度的分子层面上。^②而且，我们需要使用薛定谔的智慧结晶——量子力学——来解释信息存储的稳定性。尽管薛定谔当时并不清楚遗传物质是什么，但他推断它涉及一种具有特定结构的分子，并把这种分子称为非周期性晶体。这真是极具洞察力的见解。晶体具有稳定性。我们熟悉的晶体都是周期性的，比如钻石或盐，它们构造简单，原子排列规整。另一方面，具有晶体层面上的稳定性并可被随意构建的分子，则可以编码和存储大量的信息。这正是DNA的特征，它是一种非周期性晶体。10年之后，克里克和沃森发现了DNA的结构，他们都承认，在阐明难以捉摸的遗传物质的形式和功能方面，薛定谔的著作给了他们必不可少的帮助。

Eric Smith, ‘Chemical Carnot cycles, Landauer’s principle and the thermodynamics of natural selection’, Talk/Lecture, Bariloche Complex Systems Summer School (2008).

今天，生命的信息基础已经渗透到各个科学领域。生物学家说，基因（DNA中明确的碱基序列）包含了“编码指令”，这些指令可被转录和翻译。当基因被复制时，信息会先被拷贝，然后被校对；如果有必要，错误也会被纠正。在组织尺度上，负责发送信号的分子会在相邻细胞间传递信息，其他分子则随血液循环在器官间传送信号。即便是单个细胞也能收集和处理它所在环境的信息，并做出相应的响应。当然，生物体最杰出的信息处理系统是大脑，它经常被人们比作数字计算机（但不太有说服力）。在生物个体层面之上，还存在着社会结构和生态系统。蚂蚁和蜜蜂之类的社会性昆虫通过传递信息来协调群体活动，比如觅食和选择筑巢地点等。鸟儿会聚集成群，鱼儿也一样，这些都说明信息交换是它们的协作行为的核心。灵长类动物会自行集聚成群，并通过许多精妙的沟通方式来维系复杂的社会规范。人类社会已经创建了像互联网这样的全球性信息处理系统，因此，许多科学家现在选择用信息属性来定义生命，也就不足为奇了。生物物理学家埃里克·史密斯用如下方式表达了这一观点：“就一个化学系统而言，能量在其中的流动和存储与信息的流动和存储有关。”^③

现在，我们已经到达了生物学和物理学、生命和非生命这样迥然不同的领域的交叉地带。尽管薛定谔正确地指出了分子结构和信息存储之间存在着联系，但他提

出的非周期性晶体的观点引发了概念上的巨大分歧。分子是一种物理结构，而信息是一种抽象概念，从根本上说源于人类沟通的世界。如何消弭这一巨大分歧？如何将抽象的信息与分子物理学联系起来？答案似乎隐约出现在150年前工业革命的酝酿期，它来自一个与生物学关联较少的话题，而更多地与机械工程领域的具体细节有关。

第2章

走近麦克斯韦妖

生命机器有没有可能是麦克斯韦妖，可以在混沌中建立秩序……？

Peter Hoffman, *Life's Ratchet* (Basic Books, 2012), p. 136.

——彼得·霍夫曼 

1867年12月，苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦给他的朋友彼得·格思里·泰特写了一封信。尽管只是一种猜想，但这封信的内容还是引发了轰动，甚至在150多年后仍有着广泛影响。麦克斯韦想象存在这样一种东西，“它有着极敏锐的能力，可用于追踪每个分子的运动轨迹”。简单论证之后，麦克斯韦断定这种微型实体“能做我们做不到的事情”，很快人们就戏谑地称它为“麦克斯韦妖”。从表面上看，麦克斯韦妖拥有魔法，可将混沌变得有序，并且最早暗示了在抽象的信息世界与分子组成的物理世界之间存在联系。

需要强调的是，麦克斯韦是一位智识巨匠，其地位能比肩牛顿和爱因斯坦。19世纪50年代，他统一了电磁场理论，并预测了无线电波的存在。他也是彩色摄影技术的先驱，还解释了土星环的存在。与我们探讨的内容更为相关的是，他对热理论做出了重大贡献，计算出在给定的温度条件下，热能是如何在做无序运动的无数个气体分子间耗散的。

麦克斯韦妖是一个悖论，也是一个谜题，挑战了宇宙的秩序和法则。它打开了装着秩序与混沌、生长与衰败、意义与目的之本质等谜题的潘多拉魔盒。尽管麦克斯韦是一位物理学家，但事实证明麦克斯韦妖概念得到最有效应用的领域不是物理学，而是生物学。我们现在知道，麦克斯韦妖的“魔法”有助于解释生命的魔力，但人类要在麦克斯韦提出这一猜想后很久才会应用这种“魔法”。就其初衷而言，麦克斯韦妖并非为了回答“生命是什么”这一问题而提出，而是为了回答一个简单得多也实用得多的问题：热是什么？

分子的魔法

麦克斯韦给泰特写信时，正值工业革命的高潮期。与几千年前新石器时代的农业革命不同，工业革命并不是由试错法推动的。蒸汽机和柴油机等机器是由科学家和工程师精心设计出来的，他们都很熟悉17世纪由牛顿最早阐明的力学原理。牛顿发现了运动定律，将作用于物体的力与物体的运动性质联系起来，并用一个简单的

数学公式对它们进行了概括。到了19世纪，人们普遍运用牛顿定律来设计隧道和桥梁，或者预测活塞和轮子的运动，以及它们会传递多大的牵引力和需要多少能量。

到了19世纪中叶，物理学已成为一门成熟的科学。新兴工业面临的杂乱工程问题为物理学家提供了有吸引力的挑战。跟现在一样，工业发展的核心要素是能源。煤炭是最方便的能量来源，可为重型机械提供动力。蒸汽机是将煤炭的化学能转变为机械牵引力的首选方式。在能量、热、功和废物之间做出权衡和优化，不只是一项学术活动。要想获取巨额利润，就得依赖效率的适度提升。

在这里我没有考虑物质的质能，因为多数情况下质能都是惰性的；我也没有考虑太空中神秘的暗能量。它们的充足程度远胜热能。

尽管当时人们已经很好地理解了力学定律，但热的性质仍令人困惑。工程师知道，热是一种能量，可以被转化为其他形式，比如动能，这也是蒸汽机车背后的原理。但是，利用热来做有效功，要比不同形式的能量之间的简单转化涉及的东西多得多。如果我们可以不受限制地利用所有热能，那么世界将成为一个完全不同的地方，因为在宇宙中热是一种极为充足的能量来源。^⑩比如，如果热能可以被无限利用，宇宙飞船就能完全靠宇宙大爆炸的余辉来驱动。或者，在地球上，我们可以仅依靠水来为所有工业提供电能，因为一瓶水中有足够的热能，可以为我的客厅提供一个小时的照明。想象一下，不用燃料而用海洋的热能驱动船舶，将会是怎样的场景。

遗憾的是，我们做不到。讨厌的物理学家早在19世纪60年代就发现，能转化为有效机械功的热量是十分有限的。这种约束来自一个事实：能做功的是热流，而不是热能本身。想要利用热能，某个地方必须存在温度差。举个简单的例子：如果一桶热水被放在一桶冷水附近，一台同时连接着这两桶水的热机就会利用温度梯度，执行转动飞轮或举起重物之类的物理任务。热机会从热水中吸收热能，然后将其传递给冷水，并在这一过程中提取一些有用的能量。但随着热能从热水桶转移到冷水桶，热水会变冷，而冷水会变热，直到两者的温度差减小，热机停止运行。哪种情况下热能的转化效率最高呢？答案取决于水的温度。如果一桶水的温度（借助某种外部设备）维持在沸点（100摄氏度），而另一桶水的温度维持在冰点（0摄氏度），那么事实上热能的最高转化效率只能达到27%，并且是在没有任何热泄漏到环境中的前提下。宇宙中没有哪个工程师可以实现更高的热能转化效率，这是基本的自然规律。

热力学第一定律是能量守恒定律，而热能也是能量的一种形式。

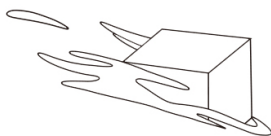
一旦物理学家发现了这一点，热力学就诞生了。你不可能把所有热能都用来做功，这一定律被称为热力学第二定律。^⑪该定律解释了我们熟悉的事实，即热从高

温处流向低温处（比如从水蒸气到冰），而不会从低温处流向高温处。话虽如此，如果某种能量被消耗了，热也可以从低温处流向高温处。反向运行一台热机，即通过消耗能量将热从低温处转移到高温处，就是电冰箱的工作原理。电冰箱是工业革命期间获利不菲的技术发明之一，因为它可以将肉制品冷冻起来并运送到千里之外的地方。

为了理解麦克斯韦妖是如何工作的，让我们想象有一个硬纸盒，里面装有气体，其中一侧的气体温度比另一侧高。在微观层面，热能等同于动能（分子不停运动产生的能量）。系统的温度越高，分子的运动就越快。平均而言，相比温度低的一侧，在盒内温度高的一侧气体分子运动得更快。当快速运动的分子与慢速运动的分子碰撞时，平均而言（再次强调），前者会将自己的动能传递给温度低的气体分子，使其温度升高。过一会儿，系统就会达到热平衡，整体温度处于初始温度的最大值和最小值之间。热力学第二定律不允许出现反向过程：气体自发重新安排分子，让速度快的分子聚集在盒子的一侧，而让速度慢的分子聚集在盒子的另一侧。如果这种情况出现，我们就会认为它是一个奇迹。

伟大的英国天文学家亚瑟·爱丁顿爵士曾经写道：“我认为，熵总会增加，这一定律在自然规律中居于最高地位。如果有人指出，你钟爱的宇宙理论与麦克斯韦方程（电磁场方程）不一致，那么麦克斯韦方程有可能是错的。如果观测结果不支持你钟爱的宇宙理论，那么有可能是做实验的人犯了错，因为有时确实会出现这种情况。但如果你钟爱的理论违背了热力学第二定律，那么我不会给你任何希望；因为根本不存在其他可能性，它只会在最深的耻辱中崩溃。”——亚瑟·爱丁顿，《物理世界的本质》

通过上述的气体盒子案例，我们很容易理解热力学第二定律。它适用于所有物理系统，事实上也适用于整个宇宙，正是热力学第二定律为宇宙印刻了时间之矢（参见迷箱3）。就其一般形式而言，我们最好利用熵这个物理量来理解热力学第二定律。在本书中，我将反复提及熵的各种概念，但我们现在只需把它看作衡量一个系统的无序状态的指标。比如，热体现了熵，因为它描述了分子的杂乱无章的运动；当热产生时，熵就会增加。如果一个系统的熵看起来在降低，只需查看更大的图景，就会发现系统之外某处的熵在增加。比如，冰箱内的熵在降低，但热从冰箱后面散发出去，增加了厨房的熵。此外，我们必须为冰箱耗电买单。电的生产过程本身也会产生热，并使发电站的熵增加。在宇宙尺度上，热力学第二定律意味着，宇宙之熵绝不会减少。



迷箱3

熵和时间之矢

想象你正在观看一部日常生活题材的电影。现在倒着播放它，人们会大笑不止，因为他们看到的场景太荒谬了。为了描述无处不在的时间之矢，物理学家诉诸“熵”的概念。这一术语有很多用途和定义，有可能导致理解上的混淆。为方便起见，我们在这里最好把它理解成对一个系统内的无序程度的量度，而该系统是由很多要素构成的。以日常生活为例，想象打开一副崭新的扑克牌，它通常会按照花色和数字顺序排好。现在重新洗牌，这副牌就会变得不那么有序。我们可以用熵量化洗牌的过程，方法是统计由许多要素构成的系统会以多少种方式呈现出无序状态。对一副扑克牌而言，如果按照数字大小排序，就只存在一种排列方式（A, 2, 3... J, Q, K）；但如果是无序状态，就存在很多种排列方式。这一简单的事实意味着，随机洗牌非常有可能增加无序性（熵），因为无序的排列方式的种数要比有序的排列方式多得多。不过，需要注意的是，这只是一种统计学意义上的说法。实际上，完全可能存在这样一种情况，即洗完一副排序混乱的牌后发现，它们恰好是按照数字从小到大的顺序排列的。同样的情况也可能发生在前文提到的气体盒子里。分子随机地四处乱撞，因此存在一定的可能性（当然，这种可能性极小）：速度快的分子会聚集在盒子的一侧，而速度慢的分子聚集在盒子的另一侧。所以，准确的说法应该是，在一个封闭系统内，熵（或无序的程度）很有可能增加或保持不变，但并非绝对如此。气体的最大熵（由数量最多的无法区分的排列方式构成的宏观态）对应着热力学平衡，此时封闭系统内气体的温度和密度达到均匀状态。

到了19世纪中叶，热、功和熵的基本原理，以及热力学定律都已构建好。于是，人们确信热终于得到了理解，它的属性能很好地与物理学的其他部分衔接。不过，随后“魔鬼”（麦克斯韦妖）就出现了。在一个简单的猜想中，麦克斯韦通过破坏热力学第二定律的根基，颠覆了人们的这种新认知。

下面概述一下麦克斯韦写给泰特的那封信的主要内容。前文说过，气体分子四处乱撞，温度越高的气体分子运动速度越快，但并非所有分子都以同样的速度运动。在温度恒定的气体中，能量是随机而非均匀分布的，这意味着有些分子的运动速度比其他分子更快。麦克斯韦精确计算出能量是如何在分子间分配的：多大比例的分子的速度只有平均运动速度的一半，多大比例的分子速度达到了两倍，等等。当意识到即便处于热平衡状态，气体分子的速度也各不相同（能量分配亦然）时，麦克斯韦突然产生了一个奇特的想法。他假设有可能存在这样一种情况：通过运用某种精巧的设备，将做快速运动的分子和做慢速运动的分子分隔开，而且不需要消耗任何能量。这一过程事实上会创造出温度差（做快速运动的分子聚集在盒子的一侧，而做慢速运动的分子聚集在盒子的另一侧），这样一来，一台热机就能利用该温度差做功了。借助这种方法，人们有可能将温度均匀的气体的某些热能转化为

功，而不需要与外部环境发生能量交换，这与热力学第二定律相悖。实际上，它颠倒了时间之矢，为永动机的发明开辟了道路。

麦克斯韦假定小妖和小门都是可以完美运转的设备，不会产生摩擦力，也不需要能量。诚然，这肯定是一种理想状态，但没有一个已知原理能阻止我们任意接近这种完美状态。记住，摩擦力是一种宏观属性，可使有序的运动转变为无序的运动——热。比如，一个球在地板上滚动，在这一过程中球的能量会消散在几万亿个微粒中。但在一切都微小的分子尺度上，不存在摩擦力。稍后，我会描述一些实用的“魔法”。

到目前为止，这个想法如此令人震惊。但在把阐述自然规律的相关书籍扔进垃圾桶之前，我们必须面对一个非常显而易见的问题，即如何才能真正做到把运动速度快的分子和运动速度慢的分子分隔开。麦克斯韦在信中概述了他是如何在头脑中实现这一目标的。他的基本想法是，用一块刚性挡板将气体盒子分隔成两部分，挡板上有一个非常小的洞（见图3）。在一大群撞击挡板的分子中，有一小部分刚好来到小洞处。这些分子会穿过小洞，进入盒子的另一个部分；如果洞足够小，那么一次只能允许一个分子通过。任其发展下去的话，盒子两边的气体你来我往，最终会实现均衡，盒内温度也会保持稳定。但现在想象一下，那个小洞可能会被一扇可开关的小门挡住；此外，假设有一个小人——一个小妖——站在小洞附近，它能够操控小门的开关。如果这个妖足够小，它就可以只允许做慢速运动的分子沿某个方向通过洞口，而只允许做快速运动的分子沿相反的方向通过洞口。经过长时间的持续分类过程，小妖就能提高挡板某一侧的温度，同时降低另一侧的温度，从而在未消耗任何能量的情况下创造出温度差，^⑩即没有付出任何代价就让分子的混沌状态变得有序。

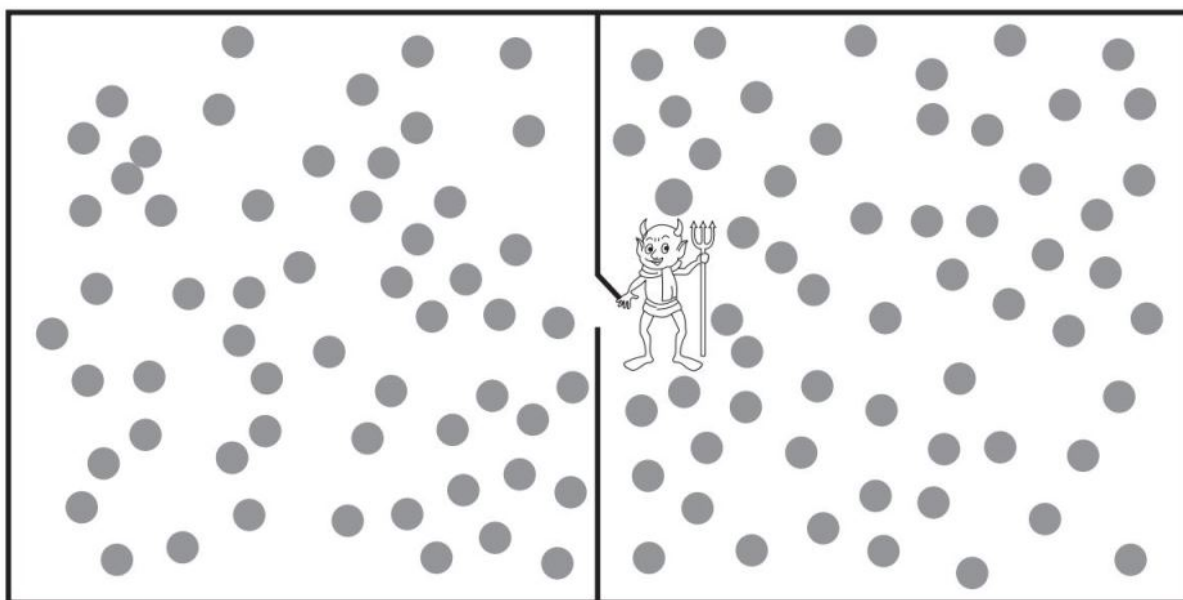


图3 麦克斯韦妖的工作

气体盒子被一块挡板分成两个小室，挡板上有一个小洞，分子可以一个接一个地通过。小洞被一扇小门挡住。一个小妖能观察到分子的随机运动，并通过操控小门，让做快速运动的分子从左边的小室移动到右边的小室，让做慢速运动的分子从右边的小室移动到左边的小室。过一会儿，右边小室分子的平均运动速度就会显著快于左边小室，这意味着两个小室间的温度差已经形成，热机可以利用该温度差做有用功了。就这样，小妖将无规则的分子运动转变为受控的机械运动，在混沌中创造了秩序，并为永动机的发明开辟了道路。

对麦克斯韦及其同时代的人来说，“有操控能力的小妖”这个想法违背了自然规律（熵永远不会减少），所以它看起来似乎荒谬至极。显然，麦克斯韦的论证漏掉了某个东西，是什么呢？难道是现实世界中不存在小妖吗？这无关紧要，因为麦克斯韦的论证不过是一种思想实验，即能指向某些重要科学原理的想象中的情景。思想实验本身不一定要有实际意义，它在物理学领域有着悠久的历史，常会增进人们的理解，最终导向实用的装置。不管怎么说，麦克斯韦并不需要一个真正的小妖来操控小门，只需一种分子尺度的设备就能执行这项分类任务。在他给泰特写信的那个年代，麦克斯韦的想法简直是异想天开，他可能根本不知道，类似小妖的实体真实存在。事实上，这些实体就在他自己的身体里！直到一个世纪以后，人们才意识到分子“小妖”与生命之间存在着联系。

同时，除了需要应对“把你所谓的小妖展示给我看”这类反驳，麦克斯韦的论证似乎并不存在其他严重的错误。多年来，它就像物理学核心领域的一个令人尴尬的真理，以及多数科学家选择忽视的一个丑陋的悖论。我们现在可以有后见之明地指出，这一悖论的解决办法显而易见。为了有效分隔开运动速度快的分子与运动速度慢的分子，麦克斯韦妖必须收集关于分子速度和方向的信息。事实证明，将信息引入物理学为今天的科学革命打开了一扇门。

计量信息

在进入大图景之前，我们需要深入探讨一下信息的概念。我们经常在日常生活中和各种场景下使用这个词，从公交车时刻表到军事情报，不一而足。现在，有数百万人为信息技术公司工作。正在成长中的生物信息学领域吸引了数十亿美元的投资。美国经济在很大程度上以信息产业为基础，信息技术如今已成为我们日常生活中举足轻重的部分，我们通常称之为IT产业。但这些随意的叙述并没有回答关于信息的深层次的概念问题。首先，究竟什么是信息？你无法看到、摸到或闻到它，但它影响着每个人：毕竟，信息产业是加利福尼亚的经济支柱！

正如我所说，信息的概念最早源于人类的话语范畴，比如，我会通知学生考试结果（一种信息），或者我想找一家最近的餐馆，你给我提供了相应的信息。在这种意义上，信息是一个纯粹的抽象概念，就像爱国主义、政治私利或爱等概念一样。另一方面，信息在这个世界上显然扮演着物质的角色，尤其是在生物体中。如果存储在生物体DNA中的信息发生了变化，就有可能产生变异的后代，并改变演化进程。信息对这个世界产生着巨大的影响。我们也许可以说，它具有“因果力”。科学面临的挑战在于，如何将抽象的信息与具体的物质世界联系起来。

为了在这些深奥的问题上取得进展，我们首先有必要在原始的、未经修饰的意义上为信息下一个精确的定义。就我写作本书所用的电脑而言，它的C盘可以存储237吉字节（GB）的信息，而且能以3吉赫（GHz）的速率处理信息。如果我想拥有更大的存储空间和更快的处理速度，我就必须为此支付更多的金钱。我们常会看到或听到这些数字，但吉字节和吉赫到底是什么？（提醒注意：本书只有这一章节会涉及一些初等数学知识。）

Claude Shannon, *The Mathematical Theory of Communication* (University of Illinois Press, 1949).

信息的量化是从工程师克劳德·香农在20世纪40年代中期热诚地开展的相关工作开始的。香农是一个不擅长社交的怪人。他在美国的贝尔实验室工作，主要关注如何将编码信息准确传递出去。当该研究项目启动时，第二次世界大战正在进行中：如果你只能听到嘶嘶的广播声或噼噼啪啪的电话信号，你要用什么方法才能让语言以尽可能正确的方式传递出去呢？香农开始研究应该如何编码，才能让信息错漏的风险最小化。这一项目在1949年结出了硕果，香农出版了《通信的数学原理》一书。^①该书的问世非常低调，但历史可以判定，它是科学史上的一个关键性事件，可以径直触达薛定谔提出的“生命是什么”这个问题的核心。

香农一开始就对信息做出了数学上的严格定义，他选择的定义引出了不确定度的概念。简单来说就是，当你获取信息时，你正在学习你之前不知道的东西，因此你对那个东西的不确定度降低了。想象抛一枚质地均匀的硬币，它落地后正面朝上和反面朝上的概率各为50%。在它落地之前，你未看到结果，也就不能确定结果是什么。当你看到结果时，不确定度随之降低（在这个例子中，不确定度降至0）。类似这样的二元选择是最简单的情况，并且与计算直接相关，因为计算机就是用二进制编码的方式处理信息的，只包含1和0两个元素。这些符号的物理实现只需要一种双态系统，比如开关，它要么处于打开状态，要么处于关闭状态。人们采用了香农的方法，让二进制数字（简称为bit，即比特）成为量化信息的标准方式。顺带说一句，1字节等于8比特。信息处理速度通常用吉赫表示，即千兆赫兹，代表每秒有10亿比特翻转。当你看到抛硬币的结果时，两种概率相等的状态就合并为一种确定的状态，你因此获得了1比特的信息。

如果同时抛两枚硬币，会怎样呢？当你查看结果时，肯定会获得2比特的信息。然而，需要注意的是，如果同时抛两枚硬币，就会存在4种可能的状态：正面 - 正面、正面 - 反面、反面 - 正面、反面 - 反面。如果同时抛三枚硬币，就会存在8种可能的状态，并获得3比特的信息；如果同时抛4枚硬币，就会存在16种可能的状态，并获得4比特的信息；如果同时抛5枚硬币，就会有32种可能的状态……以此类推。要注意这些数字是怎么得到的： $4 = 2^2$ ， $8 = 2^3$ ， $16 = 2^4$ ， $32 = 2^5$ ……可能状态的数量是2的 n 次方（ n 为同时抛掷的硬币枚数）。反过来，如果你想知道通过观察抛硬币的结果能获得多少比特的信息，公式就要转化为以2为底的对数，即 $2 = \log_2 4$ ， $3 = \log_2 8$ ， $4 = \log_2 16$ ， $5 = \log_2 32$ ……那些熟悉对数公式的读者会发现，该公式可以使比特相加。比如，2比特+3比特= 5比特，因为 $\log_2 4 + \log_2 8 = \log_2 32$ 。事实上，同时抛5枚硬币确实有32种概率相等的可能状态。

字母q的音标和发音中本就包含“u”，所以从理论上讲，q后面再加一个u是不必要的。——译者注

现在，假设这些可能状态的发生概率不等，比如，我们抛掷的是不公平硬币。在这种情况下，通过查看结果所获得的信息就会减少。如果结果是完全可预测的（只有一种可能性），通过查看结果就不可能获得额外信息——你将得到0比特。在现实世界的大多数通信中，不同信息的出现概率确实是不均匀的。比如，英文字母a出现的概率就比字母x要大得多，这就解释了为什么桌面拼字游戏会对不同的字母赋予不同的权重。再举一个例子，在英语中，字母q的后面总是跟着字母u，这让u的使用变得冗余，¹¹所以我们无须浪费资源，把u放在编码信息中。

$$-\frac{2}{3}\log_2 \frac{2}{3} - \frac{1}{3}\log_2 \frac{1}{3} = 0.92 \quad -\frac{7}{8}\log_2 \frac{7}{8} - \frac{1}{8}\log_2 \frac{1}{8} = 0.54$$

香农用加权平均的方法，对非均匀概率分布的情形进行了信息量化。为了说明他是如何做到的，我举一个非常简单的例子。假设你抛一枚不公平硬币，正面朝上的次数平均为反面朝上的两倍，也就是说，出现正面朝上的概率是2/3，而出现反面朝上的概率是1/3（概率加总一定等于1）。根据香农的方法，对应正面或反面的比特数只能通过它们的相对概率经加权计算得出。因此，查看抛掷这种特殊的不公平硬币的结果，我们可获得平均比特数为比特的信息，略少于均匀概率情况下获得的1比特信息。这是讲得通的：如果你知道正面朝上的概率是反面朝上的两倍，那么其结果的不确定度肯定比抛公平硬币时小，所以通过观察结果消除的不确定度也更少。举一个更极端的例子，假设正面朝上的概率是反面朝上的7倍，那么每抛一次硬币所获得的平均比特数只有。如果要表达我们从某个问题的答案中获得的信息量多少，可以用这样一种方式，即该答案带给我们的平均惊讶程度。如果一枚硬币正面朝上的概率很大，那么其抛掷结果通常不会让我们感到太惊讶。^[1]

稍加思考我们就会发现，香农的分析方法可以直接应用于生物学。通过使用通用遗传密码，信息被存储在DNA中。基因的信息经由信使RNA传输到核糖体，在那里被解码并指导氨基酸序列合成蛋白质。然而，信使RNA的信息通道本就嘈杂，很容易出错。因此，在逻辑上，生命的说明书就等同于香农对经由嘈杂的通信信道传输的编码信息所做的分析。

它当然令人惊讶。我写作本章节的时候正坐在悉尼附近的海滩上，当我写到令人惊讶的生命现象时，一条流浪狗悄无声息地从我的电脑键盘上走过，电脑屏幕上随即出现了“V tvtgvtvfaal”字样。读者可以自行解读这条狗留下的信息。

DNA拥有存储数据的属性，它给人留下的印象如此深刻，以至于科学家纷纷采用一种时尚的做法，将诗歌、书籍甚至电影加载到微生物的DNA里（但不会杀死微生物）。克雷格·文特尔引领了这一潮流，他在自己的创作成果上加了“水印”，包括将物理学家理查德·费曼的名言嵌入他在实验室里再造的一种微生物的定制基因组。最近，哈佛大学的一群生物学家为埃德沃德·迈布里奇在1878年拍摄的关于飞驰的骏马的著名影片（展示了马的4条腿同时离地的画面）编辑了一个数码版本，并将其嵌入一群活性大肠埃希菌的基因组（见塞思·L. 希普曼等在《自然》期刊发表的论文：CRISPR - Cas encoding of a digital movie into the genomes of a population of living bacteria, *Nature*, 2017, 547:345 - 349）。这些做法不是以娱乐为目的的小打小闹，它们为一种技术提供了形象化的展示，该技术可能为将数据记录设备植入细胞以记录生命的核心过程铺平了道路。

这些令人惊讶的因素能够告诉我们一个生物体包含多少信息吗？是的，生命是一种极其令人惊讶的现象，^②所以我们可能会预期生命包含很多香农所定义的信息。事实的确如此。你身体中的每个细胞都包含大约10亿个DNA碱基，它们可用生物学“字母表”上的4个字母表示，并排列组合成不同的序列。它们可能的组合数量是4的10亿次方，也就是说该数字的尾部有6亿个零。我们可以把这一数字与宇宙中的原子数量做比较，后者的数字尾部只有80个零。如果将香农的公式应用于计算DNA长链包含的信息，就需要用到对数，其结果是20亿比特，比美国国会图书馆所有藏书包含的信息还多。所有这些信息都被压缩在只有火柴头大小的万亿分之一的DNA分子中，而且DNA分子包含的信息只是细胞中所有信息的一部分。所有这些数据都表明，信息对生命来说有多么重要。^③

香农发现，他以比特为单位量化信息的数学公式在去掉负号之后，等同于物理学家为计算熵而建立的公式。这意味着在某种意义上，信息是熵的对立面。如果你把熵看作一种无知状态，对于信息与熵之间的这种关系就没什么可惊讶的了。让我解释一下。我在前文中说过，熵是如何衡量无序或随机状态的（参见迷箱3）。无序是大量事物聚集在一起表现出来的集体属性，所以说单一分子处于无序或随机状态是没有意义的。熵和热能之类的热力学量是由大量粒子（比如四处乱撞的气体分子）及其平均运动状态定义的，而不需要考虑单个粒子的具体细节（这种平均状态

有时也被称为粗粒度视图)。因此,气体的温度与气体分子运动的平均能量有关。关键在于,无论何时,只要取平均,有些信息就会丢失,也就是说,我们接受一定程度的无知。伦敦人的平均身高这个信息不会告诉我们某个特定的伦敦人的身高。同样,气体的温度也不会告诉我们某个特定分子的运动速度。简言之,信息关乎你知道什么,而熵关乎你不知道什么。

正如我解释的那样,如果你抛一枚公平硬币并查看结果,你将恰好获得1比特信息。那么,这是否意味着每枚硬币刚好包含1比特信息?好吧,既是也不是。

“一枚硬币包含1比特信息”这个答案假设,可能存在的状态有两种(正面朝上或反面朝上)。这是我们思考抛硬币问题的常见方式,但不是唯一标准;答案与你选择的观察和测量方式的性质有关。比如,一枚硬币正面印有的头像就包含很多信息(反面亦如此)。如果你是一个钱币收藏爱好者,而且事先并不知道这枚硬币是哪个国家的或哪一年发行的,那么你对相关信息(“硬币正面的头像是谁?”)的无知程度就远大于1比特,也许是1000比特。在抛完硬币并看到结果是正面朝上之后,你获得了远大于1比特的信息量(哦,是发行于1927年的印有乔治五世头像的英国硬币)。所以,“一枚硬币包含多少比特的信息?”这个问题显然没有确定的答案。

为了把这一观点推向极致,让我回到抛硬币的例子。硬币的每个原子都有其空间位置,如果你能测量出每个原子的位置,那么你获得的信息量将是一个天文数字。如果我们忽略量子力学,像电子这样没有大小的粒子(它只是一个点)就会反映无穷多的信息,因为它需要三个无穷长的数字作为坐标,来确定它在三维空间的准确位置。如果一个粒子就含有无穷多的信息,那么宇宙的总信息量一定是无穷大的。

DNA的情况与此类似。一个基因组存储了多少信息?在上文中,我给出了一个典型的答案(比美国国会图书馆的全部藏书包含的信息还要多)。不过,这个答案隐含着这样的假设:如果我们没有掌握关于碱基序列的其他知识,那么在DNA的4个碱基字母(A、T、C、G)中,每一个字母出现在DNA分子的给定位置的概率都是 $1/4$ 。所以,测量一个真实的碱基会产生2比特信息($\log_2 4 = 2$)。然而,认为这4个字母出现的概率一样,这个假设有可能是错的。比如,有些生物的基因组中G和C出现的概率大于A和T。如果你正在研究这类生物,那么你会改变关于不确定度的计算方法:如果你猜G而不是A,你答对的可能性就会更大。结论是,探索DNA序列所能获得的信息量取决于你知道什么,或者更准确地说,取决于你不知道什么。然后,你就会知道熵有多大了。^⑨

Christoph Adami, ‘What is information?’, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, A 374: 20150230 (2016).

结果是，人们不能以任何绝对的方式说，在这个或那个物理系统中究竟包含了多少信息。^⑩然而，我们完全可以说，采用某种测量方式能够获得多少信息。正如前文阐述的那样，信息可使被测量系统的无知程度或不确定度降低。即使我们不清楚整体的无知程度，也可以确切地知道不确定度降低了多少。

所知甚少是一件危险的事

如果信息能让世界变得不同，那么我们应该如何看待信息呢？它是遵循自身的规律，还是只服从于支配它所在的物理体系的规律？换句话说，信息能否以某种方式超越物理规律（即使它并未真正屈从）？又或者用专业术语讲，它只是一种附带现象，依赖于物质而存在？信息本身真能做功，还是说它只是物质因果活动的示踪剂？信息流能与物质流或能量流脱钩吗？

与薛定谔和其他很多人一样，西拉德最终离开了当时纳粹统治下的欧洲，去到英国，后来又去了美国。这对盟军来说真是一件幸事，因为他参与了早期的核裂变实验。而且，西拉德预见到德国可能会制造原子弹，于是他说服爱因斯坦于1939年共同给罗斯福总统写了一封信，敦促美国研发出自己的核武器。

Leo Szilárd, ‘On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings’, *Zeitschrift für Physik*, 53, 840 – 56 (1929).

因为热涨落是随机的，所以分子通常会比平均速度移动得更慢或更快。但我们可以想象有一组同样的、装有单个分子的盒子凑在一起，一旦盒子中的分子与外部热源之间建立了平衡，这些分子的运动速率的分布就会精确地反映气体分子在同一温度下的平均运动速度。

为了解决这些问题，我们首先要找到信息和物理规律之间的联系。这种联系的第一条线索出现在麦克斯韦妖身上，但它直到20世纪20年代才得以完善。那时，居住在柏林的匈牙利裔犹太人利奥·西拉德决定更新麦克斯韦的思想实验，使其变得更易于分析。^⑪在一篇题为《论通过智慧生物的干预降低热力学系统中的熵》^⑫的论文中，西拉德通过考虑盒子中只包含单个分子的情况，简化了麦克斯韦的装置（见图4）。盒子的端壁与稳定的外部热源保持接触，并因此发生抖动。当困在盒子里的那个分子撞击抖动的端壁时，能量就会发生交换：如果分子移动得很慢，它就很有可能因受到端壁的撞击而加速。如果外部热源的温度升高，端壁就会抖动得更厉害，被弹离端壁的分子的平均运动速度也会加快。^⑬与麦克斯韦一样，西拉德在他的思想实验中设置了一个小妖和一块挡板（当然，这是高度理想化的情景），但他摒弃了小洞和小门。相反，西拉德的小妖可以毫不费力地在盒子的中间处插入或取出挡板，也可以让挡板从两侧的端壁进出（需要有插槽），因此挡板可以在盒子内自由地来回移动（没有摩擦力）。整个装置被称为“西拉德引擎”。

刚开始，小妖需要先确认分子位于盒子的哪一侧。然后它在盒子的中间插入了可移动的挡板，将盒子分成两部分。接下来是关键性的一步：当分子撞击挡板时，挡板会对分子施加一个微弱的推力。挡板可以自由移动，所以它在受到分子撞击时会略微退后，并因此获得能量；相反，分子则会因此失去能量。尽管以人类的标准看，这些小分子的撞击力度是很小的，但从理论上说它们提供的能量可被用于做有用功，比如抬升砝码。为了做到这一点，砝码必须被绑在挡板上，还要位于分子所在的那一侧；否则，砝码就会掉落而不是被抬升起来（见图4c）。因为小妖知道分子在哪里，所以它也知道该把砝码绑在哪一侧（原则上，绑缚砝码消耗的能量可忽略不计）。于是，有了少量知识，即位置信息，小妖就能成功地将一些随机的热能转化为直接的有用功。小妖可以一直等到挡板被移动到盒子的端壁处，在那里它就可以将砝码从挡板上解下来并绑在端壁上，再从端壁的插槽中把挡板拿出盒子（原则上，所有这些步骤都不耗费能量）。当分子再次撞击抖动的盒子端壁时，它就能重新获得因抬升砝码而耗费的能量。整个循环可以重复进行。^[2]结果是，能量再次从热库稳定地转移到砝码上，热能以100%的效率被转化成机械功，于是热力学第二定律的整个基础受到了巨大的威胁。

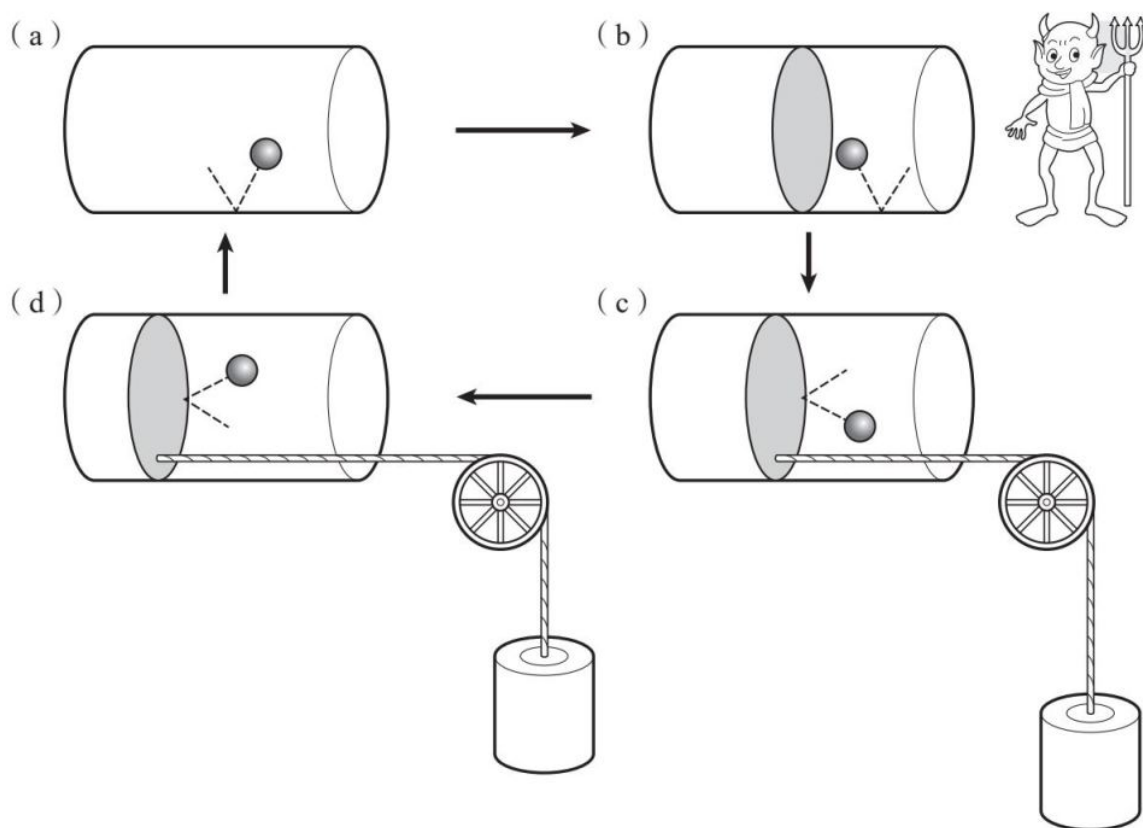


图4 西拉德引擎

盒子中只有一个气体分子，该分子要么在盒中左侧，要么在盒中右侧。（a）刚开始，分子的位置是未知的。（b）小妖在盒子的中间处插入挡板，然后观察分子在哪一侧。（c）记住这一信息后，小妖将一个砝码绑在合适的那一侧（如图所示，如果分子在右侧，小妖就会把砝码绑在挡板的右侧）。（d）分子的运动速度很快（原因在于它具有热能），它撞击挡板，使挡板稍微向左移动，砝码因而被抬升。通过这种方式，小妖运用分子的位置信息，将随机的热能转化为有用功。

图片来源：修改自Koji Maruyama, Franco Nori and Vlatko Vedral, The physics of Maxwell's demon and information, arXiv:0707.3400v2 (2008) 的图1。

如果这就是全部的故事，那么西拉德引擎将会成为发明家的梦想之物。不必说，这并不是全部的故事。人们肯定会问，小妖怎么会有如此非凡的能力？刚开始，它是如何知道分子的位置的？它能看到分子吗？如果能，它是怎么看到的？假设小妖向盒子里发射了光，照亮了分子，盒子中就会不可避免地出现某种不可逆转的光能，并最终转化为热。粗略的计算表明，信息获取过程会抵消小妖可操控的任何优势。试图违背热力学第二定律的做法需要付出熵的代价，由此可见西拉德得出的结论足够合理，他认为这个代价就是测量的成本。

终极笔记本电脑

如果计算机科学这个截然不同的科学分支没有出现，麦克斯韦妖的问题就可以盖棺论定了。尽管小妖确实需要获取分子的位置信息，但这只是第一步。信息还必须在小妖的微型脑中进行处理，使小妖能够做出关于如何操控小门的正确决定。

当西拉德发明他的“引擎”之时，信息技术和计算机还要再过20多年才会出现。但在20世纪50年代，我们今天熟悉的通用数字计算机（比如，我写作本书使用的电脑）有了突飞猛进的发展。推动这一潮流的领军企业是IBM（美国国际商业机器公司），它在纽约州北部设立了一个研发机构，聘用了一些数学和计算机方面的顶尖人才，负责找出“计算的规律”。计算机科学家和工程师渴望发现相关领域的基本原理，以便明确我们能够计算什么和如何进行有效的计算。在这一过程中，计算机科学家回溯了19世纪物理学家发现热机的基本规律时的类似步骤。但这一次，相关研究有了令人叹为观止的改进。由于计算机本身是物理设备，因此主要问题在于，如何将计算规律与物理学规律匹配起来——尤其是热力学规律，毕竟物理规律支配着计算机硬件的运行方式。是时候让麦克斯韦妖在这个领域复活了。

一个广泛讨论的例子就是比特币挖矿机，据估计，其耗费的动力超过丹麦整个国家的动力消耗。

迎接这一艰巨挑战的先驱是在德国出生的物理学家罗尔夫·兰道尔，他也离开了纳粹德国，去到美国定居。兰道尔对计算过程的基本物理限制问题非常感兴趣。这是一个我们都不陌生的问题，只要你把笔记本电脑放在膝盖上使用，它就会很快变热。使用计算机的主要财务负担源于其废热散发问题，比如安装风扇和冷却系统，更不用说为此付出的电费了。仅在美国，计算机废热每年漏损的GDP（国内生产总值）就多达300亿美元，而且在继续增加。^⑩

为什么计算机会发热呢？原因有很多，但其中一个原因恰好体现了“计算”这个术语的核心含义。以一个简单的算术问题为例，比如长除法，除了用计算机，我们也可以用铅笔和纸来做计算。刚开始你有两个数字（分子和分母），通过一些计算步骤，最终你会得出一个数字（答案）。如果你只对答案感兴趣——用计算机术语来说就是“输出”，那么你可以忽略输入的数字和所有中间步骤。然而，去掉中间步骤会导致计算在逻辑上变得不可逆，你不可能仅根据答案就知道问题是什么（比如，12可能是 6×2 或 4×3 或 $7 + 5$ 的结果）。电子计算机也是一样：它们获得输入数据，处理数据，输出答案，并且会不可逆地删除存储信息（通常只在需要释放存储空间时）。

- 21

以物理方式消除二进制数字信息与将计算机内存恢复到某种参考态（比如全部清空），两者之间存在着重大差异，后者是要恢复到白板状态，而这正是兰道尔的研究领域。

The term ‘ultimate laptop’ was coined by Seth Lloyd in an analysis of the most efficient possible computer in the universe. See https://www.edge.org/conversation/seth_lloyd-how-fast-how-small-and-how-powerful.

There remain some subtleties in this matter. It has been argued that there may be ways to circumvent Landauer’s limit in special situations. See O. J. E. Maroney, ‘Generalizing Landauer’s principle’, *Physical Review*, E 79, 031105 (2009). In some cases, logical irreversibility does not go hand in hand with thermodynamic irreversibility.

删除信息的行为会产生热。我们从长除法这个例子中很容易看到这一点：用橡皮擦掉铅笔字会涉及大量摩擦，这意味着热和熵。即便是最精巧的芯片，在删除二进制数字信息时也会产生热。^⑪要是有人能设计出一台既可以处理信息又不会产生任何热量的计算机，会怎么样呢？这种计算机的运行不需要任何成本，它就是终极笔记本电脑！^⑫任何实现这一壮举的公司都将立即称霸整个计算机产业，难怪IBM会对此感兴趣。不幸的是，兰道尔给这一梦想泼了冷水，他认为计算机处理的信息

涉及逻辑上不可逆的操作（就像前文中提到的算术示例那样），当需要为下一次计算重置系统时，就存在着不可避免的散热问题。他计算了删除1比特信息的最小熵值，这个结果如今被称为“兰道尔极限”。我可以告诉好奇的读者，在室温条件下，删除1比特信息会产生 3×10^{-26} 焦耳的热量，大约是烧开一壶水所需热能的 $1/10^{26}$ 。虽然这个数值不大，但它确立了一个重要的原则。通过阐述逻辑操作与产生热量之间的关系，兰道尔发现了物理学和信息之间深层次的联系。这种联系不是像西拉德引擎那样的抽象联系，而是在今天的计算机产业中得到理解的非常具体的（与金钱有关的）联系。 ⑤

Rolf Landauer, ‘Irreversibility and heat generation in the computing process’, IBM Journal of Research and Development, 5 (3): 183 - 91;doi: 10.1147/rd.53.0183 (1961).

从兰道尔开始，信息不再是一个模糊的神秘量，而是与物质紧密联系在一起。为了总结这一思想上的转变，兰道尔创造了当下非常有名的格言：“信息就是物质的！” ⑥他的意思是，所有信息都与物体紧密相关：它不可能自由飘浮在以太中。比如，你电脑中的信息是以某种模式存储在硬盘中的。那些特定的实例（真实的基底）似乎并不重要，这是导致信息的概念让人难以把握的原因。你可以将硬盘中的内容复制到闪存盘中，或者通过蓝牙转发，或者沿着光纤以激光脉冲的方式传送，甚至将它传到太空。只要操作得当，信息在从一种物理系统转移到另一种物理系统的过程中将会保持不变。基底的独立性似乎赋予信息以生命，让它成为一种自主的存在。

在这个方面，信息共享了能量的某些属性。与信息类似，能量也可以从一个物理系统传递至另一个物理系统，并在恰当的条件下保存完好。那么，我们是否可以说能量也是一种自主的存在呢？思考牛顿力学中的一个简单问题：两个台球相撞。假设一个白球在台球杆的推动下，精准地撞上了一个静止的红球。碰撞发生后，红球朝着袋口方向快速移动。我们可以说是能量造成了红球的移动吗？的确，白球需要有动能才能推动红球，在碰撞时一些能量被传递给红球。所以，从这种意义上讲，能量（严格来说，是能量的转移）的确是红球运动的原因。然而，物理学家通常不会以这种方式探讨该问题。他们只会说，白球撞到了红球，引发了红球的运动。但因为动能在台球上被实体化，所以球移动到哪里，能量就会传递到哪里。因此，将红球的移动归因于能量并没有错，只不过有些不切实际。我们完全可以在不提及能量的情况下，对台球相撞的问题做出详尽、准确的解释。

信息的情况和能量相似吗？如果所有的因果力都与物质有关，而物质中又包含了实体化的信息，那么尽管把信息视为一种因，讨论起来更方便，但这会与能量的情况一样不切实际。所以，信息是真实存在的东西，抑或只是解释复杂过程的一种便利方式？在这个问题上人们还未达成共识，但我会继续坚持自己的看法：是的，

信息就是一种独立的存在，具有因果力。我之所以抱持这种观点，部分原因在于一些研究成果。我将在下一章中介绍这些研究，它们追踪了网络中信息范式的转变，该转变似乎遵从某种超越了真实物理硬件的普遍规律，而与此同时，信息又在这些物理硬件中被实体化。

读取麦克斯韦妖的思想

他的方法是高度理想化的，在这里我们可以不必关注它。

如果兰道尔极限确实是一种基本规律，它必然也适用于麦克斯韦妖头脑中的信息。然而，兰道尔没有亲自探究这个问题。20年后，IBM的另一位科学家查尔斯·本内特研究了这个问题。当时的主流观点仍然是，小妖不可能违背热力学第二定律，因为不管它的古怪动作拥有何种熵减的优势，都会被它因辨识分子位置而造成熵增的劣势抵消掉。但通过对这一问题的深入思考，本内特怀疑这个公认的看法存在缺陷。他找到了一种方法，可以在不产生任何熵的情况下探测分子状态。^⑩本内特认为，如果热力学第二定律成立，那么一定存在某种因素能补偿熵的代价。乍看起来，答案显而易见，那就是计算（输出一个答案所需的合并运算）的不可逆性。如果直接得出计算结果，那么一定会产生热。但就在这里，本内特发现了一个漏洞。他指出，所有计算实际上都是可逆的。道理很简单：在用铅笔和纸做计算的例子中我提到，要想做长除法的逆运算，只需要保留输入数据和所有的中间计算步骤的相关记录即可。你很容易就能从答案开始倒推出问题是什么，因为你需要的一切都写在纸上。在电子计算机中，逆运算也有可能实现：把特别设计的逻辑门连接在一起形成电路，所有信息都能以这种方式保留在这一系统中的某个位置上。有了这样的设置，我们就不需要删除任何信息，自然不会产生热，熵也不会增加了。不过，我要强调的是，今天的计算机要实现理论上可行的逆运算，还有很长的路要走。但我们在这里探讨的是深层次的原则问题，我们没有理由认为理论极限永远无法突破。

现在，回到我们关心的小妖问题。如果它能以可忽略不计的熵代价获得关于分子的信息，在它的微型脑中以可逆的方式处理信息，并且毫不费力地操控小门，那么通过不断重复该过程，小妖就能创造出一台永动机。

Charles Bennett and Rolf Landauer, ‘The fundamental physics limits of computation’, Scientific American, vol. 253, issue 1, 48–56 (July 1985).

这是什么意思呢？根据本内特的说法，这种小妖理论上是存在的，只不过“不断重复”这个限定条件使得它无法存在于现实世界。^⑪我们来了解一下：小妖必须先处理获得的信息，才能准确地操控装置。原则上，这一处理过程是可逆的，而且

不会产生热，但前提条件是小妖把所有的中间计算步骤都存储在它的记忆中。很好！但如果小妖重复这一过程，它的大脑中就会存储越来越多的信息。随着时间的推移，小妖的“内存”中会不可避免地塞满信息。因此，只要有足够的存储空间，所有的计算步骤就都是可逆的。如果一个“内存”有限的小妖想以真正的无时间限制的方式操控小门，它就需要在每个循环结束后清除大脑中的记忆，使其回到初始状态，再进入新一轮循环。事实上，这一步正是小妖的致命弱点。本内特由此证明，清除信息的行为产生的熵增恰好抵消了小妖获取信息的行为带来的熵减，而正是后者违背了热力学第二定律。

Alexander Boyd and James Crutchfield, ‘Maxwell demon dynamics:deterministic chaos, the Szilárd map, and the intelligence of thermo dynamic systems’, Physical Review Letters, 116, 190601 (2016).

不过，麦克斯韦妖的问题引发了持续的分歧和争议。比如，如果有人能无限地供应小妖，会怎么样？这是否意味着当一个小妖的大脑被塞满信息时，另一个小妖可以代替前者？此外，另一种更普遍的分析结果认为，我们可以制造一种小妖，使它在观察分子时的熵减和清除信息时的熵增之和绝不比兰道尔极限小。在这个系统中，熵的负担可在观察和清除之间以任何组合方式进行分配。^⑤类似的开放式问题还有很多。

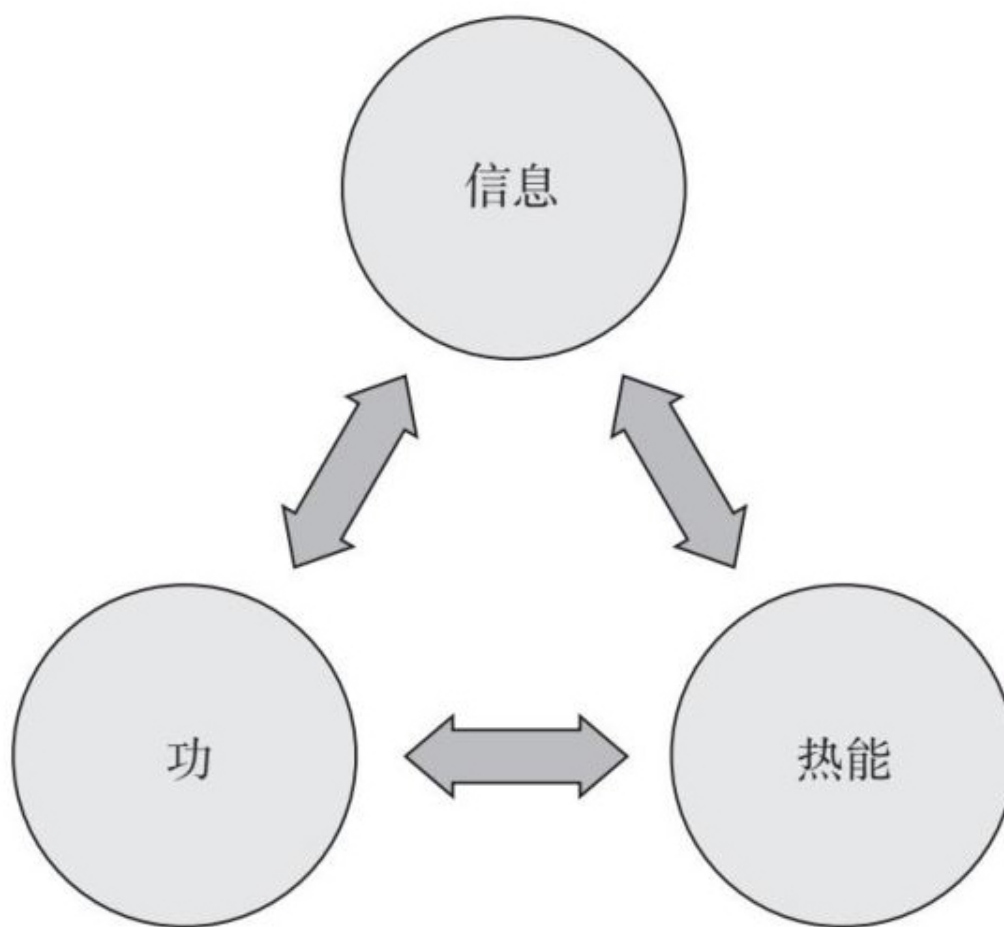


图5 信息、热能和功三者间的平衡

麦克斯韦和西拉德的小妖通过处理信息将热能转化为功。信息引擎通过将信息转变为热能，或者将熵倒入空的信息存储器来做功。常见的引擎使用热能来做功，因此会破坏信息（增加熵）。

信息引擎

Z. Lu, D. Mandal and C. Jarzynski, ‘Engineering Maxwell’ s demon’ ,Physics Today, vol. 67, no. 8, 60 – 61 (2014).

按照我前文中的描述，我们仍不太清楚小妖作为一个智能体，是如何操作装置的。诚然，它不一定是有感知力甚至智商很高的家伙，但它一定有可能取代无头脑但功能相同的小机器人。最近，马里兰大学的克里斯托弗·贾津斯基和他的两位同事就梦想着研发这样一种智能小妖，他们称之为信息引擎。它的工作职责是：“从单一的热库中系统性地回收能量，然后用这些能量克服重力抬升质量，同时将信息写入存储器。”^[10] 尽管这个想法几乎不可能变成实际的装置，但他们设想的引擎还

是为我们提供了一个精巧的思想实验，可用于评估热能、信息和功三者之间的关系，并帮助我们找到它们之间的相对平衡状态。

贾津斯基及其同事设想的奇特装置就像小孩子的玩具（见图6），小妖本身只是一个可以在水平面上转动的圆环。竖直杆平行于圆环的轴线，附着在竖直杆上的是些桨板，桨板与竖直杆相互垂直。向外伸出的桨板与竖直杆之间形成不同的夹角，就像可随风摆动的悬挂饰物，可以无摩擦地绕杆旋转。具体的夹角为多大并不重要，重要的是它们位于三根共平面的竖直杆的近端还是远端。在远端，它们表示“0”；在近端，它们表示“1”。这些桨板充当了小妖的存储器，它们只是一串数字，比如01001010111010…。整个小智能装置都浸没在热浴中，因此桨板可随机转动，这是热涨落的结果。然而，桨板在转动过程中不能将数字“0”翻转为“1”，或者将“1”翻转为“0”，因为另外两根竖直杆挡住了桨板。所有位于圆环上方的桨板最初都设定为“0”，也就是说它们都被固定在远端，属于“空白的输入存储器”（小妖的大脑记忆被清除了）。中间的竖直杆和附着在它上面的桨板现在开始以稳定的速度垂直下降，使得圆环上方的桨板逐个穿过圆环，来到圆环下方。截至目前，我们似乎还无法看出会发生什么激动人心的事情。但有一个很重要的特点：两侧竖直杆中的一根在与圆环同平面的位置处有一个缺口，所以每块在下降过程中穿过圆环的桨板都会暂时获得自由地绕杆转动360度的能力。结果，每块下降中的表示“0”的桨板都有机会变成“1”。

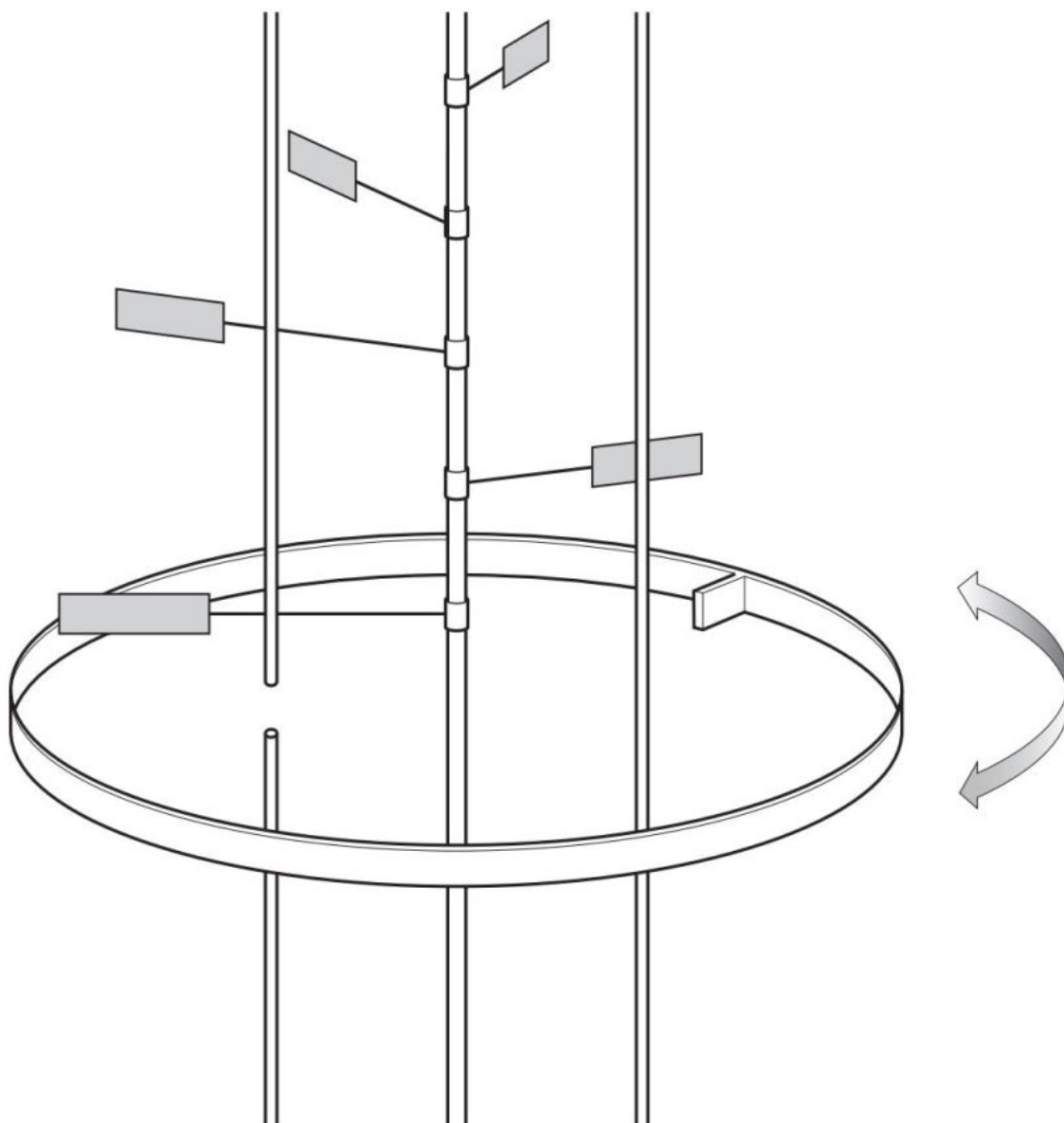


图6 信息引擎

在麦克斯韦妖思想实验的这一变体中，中间的竖直杆持续下降穿过圆环。中间的竖直杆两旁各有一根固定的竖直杆，并与中间的竖直杆共平面。其中一根竖直杆在与圆环同平面的位置处有一个缺口。一些相同的桨板附着在中间的竖直杆上，可水平地自由转动；它们的位置分别用“0”或“1”表示，具体数字取决于它们位于图中三根竖直杆的近端还是远端。如图所示，它们的初始状态都用“0”表示。水平的圆环就是一个简单的小妖，能在水平面上自由旋转。它的内侧还有一个突出的桨叶，当转动的桨板撞到该桨叶时，会使圆环要么顺时针旋转，要么逆时针旋转。

整个小装置处于热浴中，因此所有构件都会经历随机的热涨落。由于左边的竖直杆上有个缺口，圆环逆时针旋转的概率要比顺时针旋转的概率大（从上往下看）。因此，该装置能将随机的热运动转化为定向的旋转，其产生的能量可用于举起重物。但经过这一过程，这些桨板的最终状态（它们位于圆环之下的位形，未在图中显示出来）变成了“0”和“1”的随机组合。这样一来，该装置就做到了将热能转化为功，并将信息写入存储器。

<https://www.youtube.com/watch?v=00TyIShzR6o>

现在我们要开始探讨最关键的部分了。要想让存储器对小妖有用，下降的桨板需要以某种方式与小妖互动（记住，在这个例子中，小妖是圆环），否则小妖就无法获取信息。设计者提出的互动方式非常简单。圆环内侧固定了一个突出的桨叶，如果一块缓慢下降的桨板在圆环所在的平面上转动，就会撞上突出的桨叶，从而使圆环与桨板朝着同一方向转动。当然，圆环可被推着进行顺时针或逆时针转动，但由于存在非对称性缺口，它逆时针旋转的概率会比顺时针旋转大（从上往下看）。结果就是，随机的热运动被转化为单一方向的转动。这种渐进式的转动可被用来以一种我们现在都很熟悉的方式做有用功。比如，圆环可被机械地耦合到一个滑轮上，它的逆时针运动可以抬升重物，而它的顺时针运动则会让重物下降。平均而言，重物会上升（如果这些描述听起来过于复杂，以致很难理解，你可以看一段生动形象的视频^②）。

比如，在莫尔斯码中“0”可以用圆点表示，“1”可以用破折号表示。

Lu, Mandal and Jarzynski, ‘Engineering Maxwell’s demon’.

那么，热力学第二定律又在其中发挥了什么作用呢？我们似乎再次从混沌中获得了秩序，将随机的热运动转变为定向运动，并将热能转化为功。要遵守热力学第二定律，熵必定会在某处产生，那个地方就是存储器。当下降至圆环下方时，有些桨板的位置状态从“0”变为“1”，有些则仍然是“0”。这些记录都被保存在圆环下方的位置，在那里两旁的固定竖直杆阻止了桨板从“0”到“1”的变动。结果，贾津斯基的装置把一种简单和有序变成了一种复杂、无序的（实际上是随机的）输出状态，比如100010111010010…。由于一长串的“0”不包含任何信息，而“1”和“0”组成的序列包含丰富的信息，^③因此小妖成功地把热能转化为功（抬升重物），并把信息汇集在存储器中。设备对输入信息流的存储能力越强，小妖就能克服重力抬升更重的物体。该装置的设计者评论道：“一升普通空气比半个一美分硬币还轻，但它包含了足够的热能，可将7千克重的保龄球抬离地面超过三米。通过将无序的分子碰撞运动转化为定向运动，这个智能小妖就能收获丰富的能量，因而它是一种非常有用的装置。”^④情况的确如此。不过，跟麦克斯韦和西拉德的小妖一样，在没有清理存储器和删除信息的情况下（这些都会不可避免地引起熵增），贾津斯基的小妖是不可能重复工作的。

Lu, Mandal and Jarzynski, ‘Engineering Maxwell’ s demon’ .

事实上，贾津斯基的引擎可以反向运转，删除信息。如果输入状态不全是“0”，而是“1”和“0”的混合（代表信息），重物就会下降，物体的重力势能便可被用于删除信息。在这种情况下，输出比输入含有更多“0”。该装置的设计者解释说：“如果小妖一开始是一块白板，它就能抬升任何物体；但如果输入的信息流饱和（充满了随机数字），小妖就无法做功了……因此，当小妖发挥引擎的作用时，空白或部分空白的存储器就扮演了可被消耗的热力学资源的角色。”^⑤这令人惊讶。如果删除信息的过程增加了熵，那么获得一个空白存储器相当于为引擎注入了燃料。原则上，这里所说的“白板”可以指任何东西，比如，一块磁性计算机存储芯片，或者纸带上一长串的“0”。根据贾津斯基的说法， 3×10^{20} 个“0”可以把一个苹果抬升1米！

Douglas Adams, *The Hitchhiker’ s Guide to the Galaxy* (Del Ray, 1995).

处于缺省状态的事物（一个空白存储器）可以成为一种物理资源，这一概念令人回想起科幻小说《银河系搭车客指南》中的“不可能性引擎”。^⑥尽管它看似怪异，但它必然与查尔斯·贝内特的分析相反。毫无疑问，读到这里，你会非常困惑。一串“0”真的可以让引擎运转吗？信息本身能作为一种燃料，就像石油那样吗？这只是一系列智力游戏，还是与真实世界相关联？

麦克斯韦妖的实际制造与商业化

Katharine Sanderson, ‘A demon of a device’ , *Nature*, 31 January 2007;doi: 10.1038/news070129-10.

当物理学家理查德·费曼去世时，他在黑板上留下了著名的警句：“不能为我所建者，无法被我理解。”（克雷格·文特尔把这句话印刻在他的人工生物的DNA上。）今天，科学家正在制造麦克斯韦妖和信息引擎，并阐明它们的运作原理。在有序和混沌之间的永恒缠斗中，信息的地位最终会被实践证实。

在麦克斯韦提出相关概念的140年后，一个真实的麦克斯韦妖在他出生的城市被制造出来。2007年，戴维·利及其在爱丁堡大学的合作者在《自然》期刊上发表了一篇论文，介绍了其中的细节。^⑦一个多世纪以来，竟然真有人制造麦克斯韦妖，这似乎是一件不可思议的事情，但随着技术的进步，尤其是纳米技术，“应用麦克斯韦妖”领域终于诞生了。^⑧

Viviana Serreli et al., ‘A molecular information ratchet’ , *Nature*, vol. 445, 523 – 7 (2007).

利的团队制造了一个包含分子环的小型信息引擎，该分子环可以在两端安有挡块的杆（就像一个哑铃）上来回滑动。在杆的中间是另一个分子，它有两种构象，一种能阻挡分子环，另一种则允许分子环通过。因此，该分子起到了门的作用，与麦克斯韦最初提出的可开关小门的概念类似。这扇门可由激光控制。该系统与保持有限温度的环境接触，因此，分子环会因为常见的热骚动而沿着杆随机地来回摇摆。实验刚开始时，研究人员把作为门的分子设定为关闭状态，只让分子环在一半杆上移动。研究人员能够追踪到分子环的滑稽行为和门的细节，并检验该系统是否真能打破热力学平衡，就像麦克斯韦妖那样。他们确认，“能够操控门的小妖掌握的信息”可以起到燃料的作用。不过，它删除信息的过程又会增加熵，这一点“符合本内特为麦克斯韦妖悖论提供的解决方法”。

Quoted in Stephen Battersby, ‘Summon a “demon” to turn information into energy’, New Scientist Daily News, 15 November 2010. More recently, a Korean research group managed to convert information into work with an astonishing 98.5 per cent efficiency. See Lisa Zyga, ‘Information engine operates with nearly perfect efficiency’, Phys.Org.com, 19 January 2018.

很快，其他研究人员纷纷效仿爱丁堡大学的这个实验，开展了相关研究。2010年，一群日本科学家操控了一粒微小的聚苯乙烯珠的热骚动，并宣布：“我们已经证实，信息的确可被转化为势能，麦克斯韦妖的基本原理是正确的。”^⑪这些科学家报告说，他们能将信息转变为能量，转化效率为28%。他们设想了一种未来的纳米引擎，它只靠“信息燃料”就可以运行。

J. V. Koski et al., ‘On-chip Maxwell’s demon as an information powered refrigerator’, Physical Review Letters, 115, 260602 (2015).

第三个实验是由芬兰阿尔托大学的研究团队直接在纳米尺度上实施的，他们把一个电子关在一个边长只有百万分之几米的微型盒子里，盒内保持有限低温状态。电子一开始可以自由移动到两个位置中的某一个，就像在西拉德引擎的盒子中那样。灵敏的静电计可以探测出电子的位置。然后，把这一位置信息输入设备，并提高该设备的电压（一种可逆操作，不会消耗净能量），使电子被困在原地，这相当于小妖插入了挡板。接下来，能量就可以慢慢地从电子的热运动中被提取出来，并用于做功。最后，电压回到初始值，完成整个循环。芬兰团队把这个实验重复了2944遍，平均效率达到了一台完美的西拉德引擎所能达到的热力学极限的75%。更重要的是，该实验涉及的是自主的麦克斯韦妖，“只有信息在系统与小妖之间直接进行交流，没有热”。^⑫研究人员没有干预该过程，事实上，他们甚至不知道电子在每一次实验中的位置，测量和反馈控制活动完全是自动和独立的，并没有外部实体参与。

巴西科技信息研究所做了一个关于信息与热流之间的平衡实验，并将该实验作为量子信息计划的一部分。据报道，通过使用纠缠的量子粒子，热可以从较冷的系统流向较热的系统（电冰箱就是这样）。我将在第5章解释这个问题。

经过进一步改良，芬兰团队将两个这样的设备连接起来，把其中一个当作系统，把另一个当作小妖。然后，他们通过监控系统的冷却情况和小妖的升温情况，来测量小妖提取的热能。他们宣称，这一纳米技术的壮举创造了世界上第一台“以信息驱动的电冰箱”。考虑到技术进步的空间，这类设备有可能在21世纪20年代中期变成可用产品。^⑤我们期待这些实验会对纳米技术的商业化产生巨大影响，而不只是推动厨房电器的创新。

生命的引擎：细胞中的麦克斯韦妖

信息就是生命的货币。

Christoph Adami, as quoted in ‘The Information Theory of Life’, by Kevin Hartnett, Quanta (19 November, 2015).

——克里斯托夫·阿达米^⑥

看到实用麦克斯韦妖的诞生，麦克斯韦肯定会因此感到高兴，但他几乎不可能猜到信息和能量之间的相互作用已经被生物体利用了几十亿年。事实上，活细胞包含了大量非常有效和精密的纳米机器。纳米机器大多由蛋白质构成，其构件包括“发动机”“泵”“管子”“剪刀”“转子”“杠杆”“绳索”，都是工程师熟悉的用具。

Kazuhiko Kinosita, Ryohei Yasuda and Hiroyuki Noji, ‘F1ATPase: a highly efficient rotary ATP machine’, Essays in Biochemistry, vol. 35, 3–18 (2000).

这里举一个令人吃惊的例子：有一种涡轮是由一根轴连接两个转子构成的，它在活细胞中的功能就是运输和存储能量。当质子（细胞中总有很多质子在四处“闲逛”）沿某个方向越过轴时，转子就会转动。如果转子反向转动，它就会朝反方向泵出质子。日本的一个研究团队做了一个巧妙的实验。出于研究的需要，他们将一个转子取出来，并将其固定于玻璃表面。他们将一根分子丝附着在轴的末端，并用荧光染料对其进行标记，当激光照射在分子丝上时，研究人员可以透过光学显微镜看到它。他们发现，每当一个质子经过，转子就会以离散跳跃的方式转动120度。

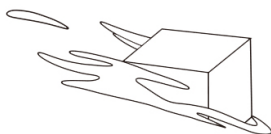
^⑤

<https://www.youtube.com/watch?v=yuuk4Pr2i8>.

另一种引发广泛关注的微型生物机器是被称为驱动蛋白的货物运输分子。它携带着重要的货物，沿着细胞中纵横交错的微管行进。为了避免被由热骚动引发的水分子的不停撞击冲走，它在运输过程中必须小心翼翼，每一步都如履薄冰，因为水分子充斥着所有活细胞，其移动速度是喷气式客机的两倍。驱动蛋白的一只脚锚定在微管上，另一只脚从后往前迈，落在第一只脚的前面，就这样，两只脚交替往前走。锚定点位于脚和微管之间的结合力尤其有利的位置上：相邻锚定点的间距是8纳米，所以每一步的长度是16纳米。我们很难想象，有几十亿个这种奇迹般的驱动蛋白分子一直在身体里四处移动。YouTube视频网站上有一段动画，演示了驱动蛋白是如何运输它的货物的。^④（想了解更多技术细节的读者可参阅迷箱4。）

这就是所谓的整流过程。

显而易见，这里有一个问题：到底是什么让这些无意识的分子机器表现出目的明确的行为？如果它只是抬起一只脚，热骚动就会随机地来回推动它。它是如何顽强地顶着水分子的猛烈撞击前进的？答案就在于，驱动蛋白的行为方式好像一种棘轮（记住，在前进的过程中，总有一只脚锚定在微管上）。分子棘轮是麦克斯韦妖的一个绝佳案例，它主要利用信息将随机的热能转化为定向运动。^⑤但为了避免违反热力学第二定律，驱动蛋白必须发掘一个能量来源。



迷箱4

驱动蛋白是如何在细胞中前行的

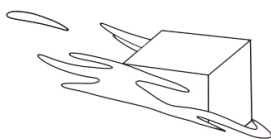
See account in, for example, Peter Hoffman Life's Ratchet (Basic Books, 2012), pp. 159 – 62.

当ATP（腺苷三磷酸）这种生命的神奇燃料释放出它的能量时，它会被转化为一种叫作ADP（腺苷二磷酸）的相关分子。ADP也可以被转化为ATP，所以ATP可以被循环利用，而不是失去能量后就被舍弃。ATP和ADP对驱动蛋白的移动而言至关重要。驱动蛋白每只脚的“脚后跟”上都有一个很小的插座，正好可以让ADP分子紧紧地插入并绑定在插座上。当插座被占据时，驱动蛋白腿部的形状就会稍有改变，促使这只脚与微管分离，并可以自由地移动。当迈出去的那只脚落到下一个锚定点上时，它就会从插座上释放ADP，从而再次与微管结合。在这一过程中，另一只脚（最初位于迈出去的那只脚前方）最好牢牢锚定在微管上，因为如果两只脚同时获得自由，驱动蛋白分子就会逐渐远离正确的行进路线，它运载的货物也会丢失。只

要另一只脚（现在位于后方）的ADP插座是空着的，它就会一直处于锚定状态。但它的插座会一直空着吗？驱动蛋白的脚后跟上能与ADP绑定的插座也适用于ATP。如果一个随机经过的ATP分子偶然发现位于后方的那只脚的插座刚好空着，那么它会占据那个位置。于是，会发生三件事。首先，驱动蛋白分子会变形、重新定向，以至于阻止任何路过的ATP去占据位于前方的那只脚的空插座。其次，ATP中储存着化学能。在插座中，ATP会经历化学转化，即从ATP变为ADP，从而将它的能量释放到驱动蛋白这台微型机器中。再次，这一过程会驱动这台微型机器，但ATP转变成ADP意味着现在后脚的插座中有了ADP分子，这使得后脚从微管上分离，开始向前迈进，因此这一循环可以反复进行。

请允许我在这里稍稍离题来解释一下能量学，因为在广泛意义上这很重要。生物选择的燃料是ATP分子，它就像一个微型电池组，上面有很多孔洞。它还有一个有用的特征，那就是持续存储能量，直到有需要的时候，嘭的一声能量就被释放出去了。生物非常喜欢将ATP用作燃料，来维系其体内大量纳米机器的运转（比如前文中提到的转子）。据估算，有些生物一天内就会燃尽相当于其体重的ATP。

生命过程要使用很多棘轮。驱动蛋白就是其中一例，它只会往前走，而不会来回移动。看看棘轮物理学是如何受到热涨落影响的，我们就能从中得出清晰的结论。想让棘轮运转，要么有能源驱动它们往某个方向移动，要么有信息处理系统（麦克斯韦妖）进行主动干预。如果没有燃料，也没有麦克斯韦妖，棘轮就不会前进。棘轮在运转过程中总会产生熵：在前一种情况下，熵是在驱动能转化为热的过程中产生的；在后一种情况下，熵是在处理信息和清空存储器的过程中产生的。天下没有免费的午餐，但通过不断向前走，而不是简单地依靠“喷气背包”载着货物飞越分子障碍，驱动蛋白的“午餐账单金额”会大幅减少。



迷箱5

费曼的棘轮

For Feynman's own account, see Lecture 46 of his Caltech series:
<http://www.feynmanlectures.caltech.edu>.

我们可以尝试用理查德·费曼制作的一种纯粹的无源装置来取代麦克斯韦妖。费曼想到了机械发条装置使用的一种棘轮（不需要用手进行逆时针方向的转动，见图7）。它需要使用齿轮，该齿轮上有弹簧载荷棘爪，可阻止齿轮逆向滑动。对该装置的运行而言，至关重要的一点是轮齿的非对称性：一侧陡峭，一侧浅平。这种

非对称性决定了齿轮转动的方向，因为棘爪更容易上滑到浅平的边缘而非陡峭的边缘。费曼想知道，如果棘轮浸没在保持均温状态的热浴中，随机的热涨落是否有可能偶尔让齿轮往前转（在图7中是顺时针方向）而非往后转。如果是这样，把一条绳索系到棘轮上，棘轮就可以利用热能做有用功并抬升重物了。但是，情况并非如此。这一论证的瑕疵出现在弹簧载荷棘爪上。就算处于热力学平衡状态，棘爪也会因为热涨落而摇摆，有时这会导致棘轮错误地往后转。费曼计算了棘轮向前转和向后转的相对概率，他认为平均来说两者的概率是相等的。

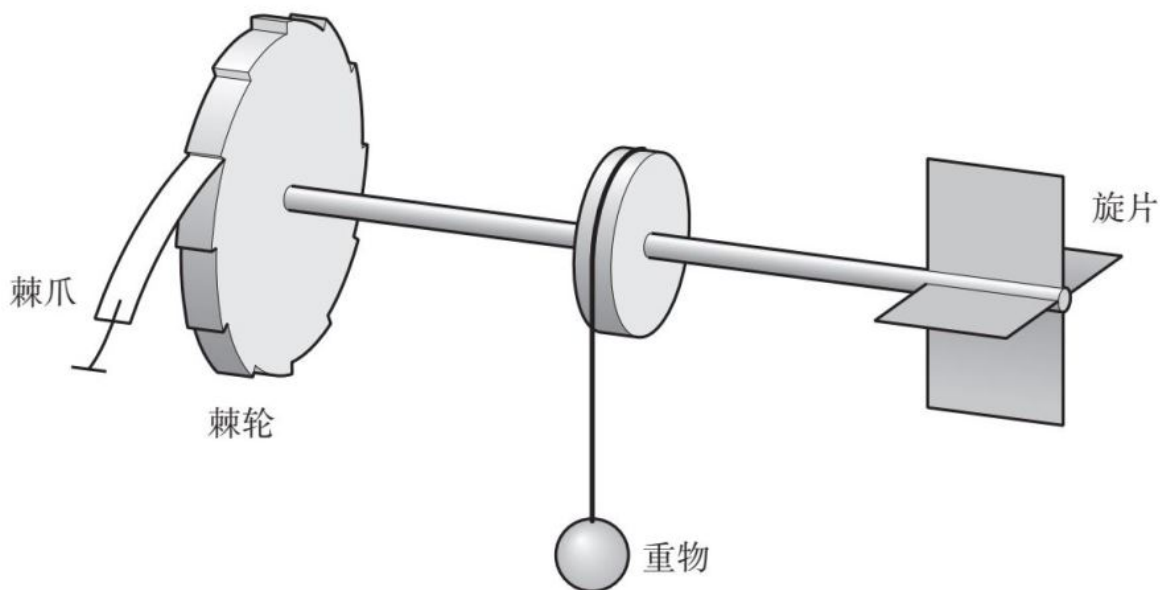


图7 费曼的棘轮

在这个思想实验中，气体分子撞击旋片，导致轴随机地顺时针或逆时针转动。如果轴顺时针转动，棘轮就会允许轴转动，从而抬升重物。但如果轴逆时针转动，棘爪就会阻止它。这样一来，该装置似乎在违背热力学第二定律的情况下将气体的热能转化为功了。

现在再举一个有吸引力的例子。细胞中还存在另一种可以“行走”的分子，叫作动力蛋白。就像生命设计师的疯狂之举一样，动力蛋白在驱动蛋白行走的微管上反向而行。驱动蛋白和动力蛋白免不了相遇，偶尔还会发生冲突，因此它们需要借助某种灵活机动的策略来解决这个问题。微管上甚至有很多静止的“路障”，这两种蛋白质分子需要侧步闪避，其他分子则会以“跳舞”的方式躲避。生物已经非常聪明地解决了所有这些问题：通过利用麦克斯韦妖般的棘轮，驱动蛋白在利用ATP燃料方面能达到60%的非凡效率（典型的汽车引擎的能量利用效率只能达到大约20%）。

像所有的物理过程那样，就连修正过程本身也会偶尔出错。比如，就人类而言，经过校对和编辑的RNA转录仍会在大约每一亿个字母中就出现一个错误。

生命机制的核心在于DNA和RNA，大自然会利用这些微小的机器来实现高热力学效率也就不足为奇了。一个例子是RNA聚合酶，这是一种微型分子马达，它的工作是沿着DNA链爬行，并将其中的数字信息一个字母一个字母地复制（转录）到RNA上。RNA链在这一过程中会逐渐增长，每一步都会增加相匹配的字母。结果，这一机制与几乎不消耗能量的麦克斯韦妖的理论极限非常接近。我们知道，基因复制不会百分之百准确，因为在转录过程中偶尔会出现错误（这是一件好事：记住，错误是达尔文式演化的驱动力）。然而，大多数错误都可以得到修正。生命已经设计出了如此聪明和高效的方式来读取RNA的输出信息，并修正愚蠢的错误。^⑩尽管大自然很想把一切都设计得很准确，但还是有一个根本的理由致使对RNA错误的修正不可能做到完美：转录出错的方式有很多种，而正确的方式只有一种。结果，错误的修正是不可逆的，因为你不能根据被修正的序列倒推出错误的序列（这是又一个无法从答案倒推出问题的例子）。从逻辑上讲，修正错误的过程就是把很多不同的输入状态整合成单一的输出状态，正如我们从兰道尔的工作中了解的那样，该过程总会付出熵的代价。

Anita Goel, R..Dean Astumian and Dudley Herschbach, ‘Tuning and switching a DNA polymerase motor with mechanical tension’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 100, no. 17, 9699 – 704 (2003).

当细胞分裂、DNA被复制时，另一种像麦克斯韦妖一样的分子马达会立刻采取行动。这种分子马达就是DNA聚合酶，它的工作是将信息从一条DNA长链复制到另一条链（用于形成子代DNA分子），子代DNA分子也是由它在爬行过程中逐个字母构建的。这种分子马达通常每秒可以爬过大约100个碱基对，就像RNA聚合酶一样，它的运行接近热力学上的完美状态。事实上，有可能通过对DNA进行简单的张力调整，让这一机制反向运行。在实验室中，这可以由被称为光镊的设备完成。随着张力增加，聚合酶会爬得更慢，直到张力达到40 pN（pN在这里代表“皮牛顿”，即一牛顿的万亿分之一，牛顿是以伟大的科学家牛顿的名字命名的力的标准单位），聚合酶的爬行就会完全停止。张力更大时，这种微型分子马达会逆向运行，一个字母一个字母地消除它之前所做的工作。^⑪

Jeremy England, ‘Statistical physics of self-replication’, *Journal of Chemical Physics*, vol. 139, 121923, 1 – 8 (2013).

你可能很想知道，考虑到一个细菌细胞的复杂性，杰里米·英格兰究竟怎样计算它增殖时产生的熵。他之所以能做到这一点，是因为在物理过程中产生的熵和这一过程与反向过程的处理速率之比之间，存在着根本的联系。比如，合成RNA链的反向过程就是在类似的环境中破坏RNA链。这是如何发生的？在水中，RNA会在大约

4天内自发分解，而合成RNA只需要1个小时。根据这一比率，理论上的增殖最小熵就可以计算出来了。在考虑了所有相关因素后，英格兰得出了上述估计值。

当然，复制DNA只是细胞不断分裂的增殖过程的一小部分。有一个有趣的工程学问题：整个细胞增殖过程会耗费多少能量或增加多少熵？麻省理工学院的杰里米·英格兰用细菌分析了这一问题，^②因为细菌保持着快速增殖的世界纪录（20分钟搞定）。考虑到我对热和熵做出的解释，新的问题出现了：细菌是否会因此变热？是的，它们会变热，但可能不会像你想的那样，经过推、拉和分子重排而变得很热。根据英格兰的说法，大肠埃希菌产生的热最多只能达到热力学设定的理论最小值的6倍，所以，它们在细胞层面的效率几乎与它们在纳米机器层面的效率相当。^③

我们如何解释生命这令人惊讶的热力学效率呢？生物体充斥着信息，从DNA一直到社会组织皆如此，而且都会引起熵增。毫不奇怪的是，演化已经改良了生命的信息管理机制，让其以超高效率运转。生物体需要不断完善存储和处理信息的艺术，否则废热会很轻易地把它们煮熟。

尽管从表面看，生命的纳米机器遵守着与宏观机器相同的物理学规律，但它们的运行环境大不相同。一个典型的哺乳动物细胞可能包含100亿个蛋白质分子，它们之间的距离平均只有几纳米。水分子贡献了细胞的大部分质量，每个纳米机器都会受到高速运动的水分子的持续冲击。这种情况类似于吵闹的夜总会，既拥挤又嘈杂。除非被锚定，否则这些微型纳米机器就会被撞击得到处都是。这种混乱似乎会给细胞机器的平稳运行带来麻烦，但它也有积极的一面。毕竟，如果细胞内部被冻僵，任何事情都不会发生。不过，不间断的热干扰也有其消极的一面：生命必须耗费大量的精力来修复损伤，并重建被分解的结构。

- 21

理解热噪声的一种方式是从分子的平均动能角度来看。像蛋白质这样的大分子的移动速度比水分子慢，但由于蛋白质分子的质量比水分子大得多（一个典型的蛋白质分子的质量是水分子的10000倍），因此它们能携带同等数量的能量。于是，在任何给定的温度条件下，都存在着一个自然的能量单位。这是一个典型的分子拥有的能量，在室温下大约是 3×10^{-21} 焦耳。当驱动蛋白之类的重要分子结构发生形变，以及重整和解构分子时，也需要同样多的能量。因此，生命的很多机制都徘徊在热破坏的边缘。这看似又是一个问题，但实际上它非常重要。生命是一个过程，持续的分子噪声造成的干扰为重排和（演化）新质创造了条件。这种干扰也使得能量更容易从一种形式转化为另一种形式。比如，有些生物体中的纳米机器将电能转化为动能，其他生物体的纳米机器则将机械能转化为化学能。

Rob Phillips and Stephen Quake, ‘The biological frontier of physics’, *Physics Today*, vol. 59, 38 - 43 (May 2006).

你可能想知道，为什么如此多的重要过程可以在这么艰难和极端的条件下，在不可见的纳米尺度上发生。前文中提到的能量尺度的一致性给出了一个现成的答案。对我们已知的生命而言，液态水扮演了关键角色，它为生物的生存划定了温度范围。结果表明，只有在纳米尺度上，处于这一温度范围的热能才能与“生物机器”的化学能和机械能相比，从而驱动一系列广泛的转换。^②

超越比特

我们现在知道，生物体中充满了像不安分的麦克斯韦妖那样的微型机器，使生命得以延续。它们以超高效的机敏方式操控信息，像变魔术一样从混沌中获得秩序，灵巧地规避了扫兴的热力学第二定律。我描述的生物信息引擎及其技术对应体，都涉及简单的反馈 - 控制循环。尽管真实的分子很复杂，但它们的运行逻辑很简单：想想驱动蛋白，它们可以不知疲倦地在“分子采掘面”上连续作业。

作为整体，细胞是一张巨大的信息管理网络。比如，我们可以想想DNA上的编码信息。除信使RNA的转录步骤之外，合成蛋白质也是一件相当复杂的事。其他蛋白质必须将正确的氨基酸连接到转移RNA链上，然后转移RNA将氨基酸带到核糖体适时地进行合成。即使氨基酸链已经形成，它也仍然可以被其他蛋白质以多种不同的方式修饰，我们将在第4章对此做详细探讨。它还必须折叠成恰当的三维结构，在折叠过程中需要得到更多能保护柔性分子的蛋白质的帮助。所有这些精妙的步骤都是在细胞的热骚动中完成的。

就其本身而言，基因中的信息是静态的，不过一旦信息被读取——基因表达为蛋白质产物，所有的行为就会跟着发生。DNA的输出结果与其他信息流结合在一起，沿细胞内各种复杂的路径移动，并与一批额外的信息流合作，从而产生一种逻辑连贯的共同秩序。通过一个包含多个可辨认阶段的循环，并在细胞分裂阶段达到高潮，细胞将所有信息和进程整合为一个单元。如果我们将这一分析延伸至多细胞生物，就会涉及胚胎发育中令人震惊的组织工作，然后我们会更惊讶地发现，仅把信息看作像能量那样乏味又笼统的量，根本不足以解释生命现象。

尽管香农给出的信息定义很重要，但这正是它无法完整地解释生物信息的地方。它的缺陷体现在以下两个重要方面：

“垃圾”DNA（Junk DNA）是科学界对非编码DNA序列的称谓，但近年来的科学发现表明，它们似乎并不是毫无用处的，而是起着重要的调控作用。详见《隐形的遗传密码》，中信出版·鹦鹉螺2023年4月出版。——编者注

第一，遗传信息与环境相关。香农痛苦地指出，他的工作只能处理比特信息的传送，这种信息是以最经济的方式定义的，而且与编码在其中的消息的意义无关。无论是一段为合成蛋白质而编码指令的DNA序列，还是任意的“垃圾”DNA，两者的香农信息量都是一样的，但其生物功能性的结果迥然不同：一种蛋白质能完成一项重要的任务，而“垃圾”DNA毫无用处。^[1]这种区别有点儿像莎士比亚的作品与一堆随机字母之间的区别。遗传信息要想获得功能性，其分子环境就必须是全局语境，它应该既能识别指令，也能做出恰当的响应。

Andreas Wagner, ‘From bit to it: how a complex metabolic network transforms information into living matter’, BMC Systems Biology; doi: 10.1186/1752-0509-1-33 (2007).

This includes Bayesian inference. See David Spivak and Matt Thomson, ‘Environmental statistics and optimal regulation’, PLoS Computational Biology, vol. 10, no. 10 e 1003978 (2014).

第二，生物是预测机器。在生物体层面上，信息是从不可预测、波动不定的环境中收集的，受到内部控制并做出最佳响应。这样的例子包括：细菌游向食物来源，蚂蚁利用其周围环境的信息选择新巢穴。这一过程必须有效运转，否则结果就是致命的。正如安德烈亚斯·瓦格纳所说，“生物是死是活，取决于它们从其所在环境中获取的信息”。^[2]一台良好的预测机器意味着拥有从经验中学习的能力，从而能更好地预测未来，并采取明智的行动。然而，为了更高效，一个预测系统必须学会选择值得存储的信息，因为记住所有事情是不必要的浪费。这需要形成关于世界的内在表征——一种虚拟现实——将复杂的统计评估囊括其中。^[3]就连细菌似乎也是数学奇才。

概括一下这些高级功能，我们可能会说，生物信息不只是后天习得的，还是经过加工的。香农的信息论可以用比特量化一个细胞或一个生物体中的信息，但如果生命这场游戏的名字叫作“信息处理”，我们就需要超越比特，并诉诸算法理论。

生物体不仅是信息包，还是计算机。想要完全理解生命，就必须弄清楚它的算法机制。这要求我们来一段晦涩却引人入胜的逻辑、数学和计算的短途旅行。

[1] 一般公式为 $n = -\log_2 p$ ， n 是比特数， p 是每种状态的概率（必定介于0到1之间，因此需要使用负号）。

- 21

[2] 运用香农的公式，我可以更准确地描述小妖的行为。在西拉德引擎中，分子位于挡板左侧和右侧的概率是一样的。通过观察分子的位置，小妖将不确定度从

各占50%的概率降至0，于是（根据香农的公式），它能获得1比特信息。当这一信息被用于抬升一个砝码时，从热库中获取的能量大小取决于温度（ T ）。我们很容易算出分子撞击挡板产生的力；温度越高，力越大。通过计算，我们很快就会发现，从西拉德引擎中获得的功的理论最大值是 $kT \ln 2$ 。其中， k （玻尔兹曼常数）被用于以焦耳等能量单位表达结果。在室温条件下，1比特信息可以做 3×10^{-21} 焦耳的功。

第3章

生命的逻辑

生物学领域的创新与数学领域的创新并没有太大差别。

‘What is life?: an interview with Gregory Chaitin’, Admin: <http://www.philosophytogo.org/wordpress/?p=1868> (18 December 2010).

——格雷戈里·蔡廷

生命的故事的确是由两种紧密交织的叙事构成的。一种叙事关注的是复杂的化学，即一种丰富而精密的反应网络；另一种叙事则关乎信息，不仅包括被动存储在基因中的信息，还包括穿行于生物体和弥漫于生物质间，最终形成独特秩序的信息。因此，生命是不断变化的化学和信息模式的综合体。这两种模式不是独立的，而是结合成一个合作与协调的系统。该系统会对信息进行重排，就像编排一场精彩的芭蕾舞表演。生物信息不仅是充斥于细胞内容物中的“比特汤”，使后者具有活力（这相当于一种活力论）；信息模式还会以程序控制计算机运行的方式，来控制和组织化学活性。因此，在复杂的化学反应中埋藏着逻辑运行之网。生物信息就是生命的软件。我们可以把生命那些令人惊讶的能力正确地归因于逻辑和计算的基础。

公理就是不证自明的命题，比如，“如果 $x = y$ ，那么 $y = x$ ”，也就是说，如果农场中绵羊的数量与山羊的数量相等，那么山羊的数量与绵羊的数量也相等。

计算历史上的一个关键性事件，就是杰出的德国数学家大卫·希尔伯特于1928年在意大利博洛尼亚的国际会议上发表的演讲。希尔伯特利用这个机会概述了他最喜欢的、尚未得到解答的数学问题。其中最深奥的问题关乎数学学科自身的内在一致性。从根本上讲，数学只不过是定义和公理的详尽阐述，以及根据这些定义和公理进行的逻辑演绎。我们将它们视为理所当然。但我们能够绝对确信，从这个简朴的基础出发进行的全部推理不会自相矛盾吗？或者说，这个问题根本没有答案？你可能想知道，谁会在意它呢？只要能解决实际问题，数学是否具有一致性又有什么关系呢？在1928年，对于希尔伯特提出的那些问题，只有少数逻辑学家和纯粹数学家感兴趣，但情况很快就发生了戏剧性的变化。

希尔伯特看到的问题是，如果数学的一致性能以无懈可击的方式得到证明，我们就有可能通过无须动脑的程序或者算法，检验任一给定数学命题的真伪。你不需要理解任何数学知识就能运行算法，它可以由一群未受过教育的员工（领取薪酬的

计算器)或一部在规定时间内持续工作的机器完成。这种万无一失的计算机有可能存在吗?希尔伯特也不知道答案,他还为这一难题取了一个高雅的名字,叫作“判定问题”,但通常也被称为“停机问题”。这一术语被用来解决一个基本问题:有些计算是否有可能一直进行下去,永不停机?这种假想的机器可能会始终处于计算状态,但永远给不出答案。希尔伯特并不关心要花多长时间计算才能得到答案,他只关心机器在有限的时间内能否完成计算过程,然后输出两种答案中的一种:真或假。人们似乎理所当然地认为最终总会有答案,怎么可能不是这样呢?

希尔伯特的演讲于1929年出版,同一年关于西拉德引擎的论文也发表了。这两种截然不同的思想实验(一种是不会停机的计算引擎,另一种是会制造永动机的热力学引擎)事实上是密切相关的。然而,当时没有人意识到这一点。他们也完全不知道,在生物学的神奇迷箱深处,谜底被一层又一层令人困惑的复杂性遮盖,但正是数学领域不间断的探索,逐渐揭开了生命的神秘面纱。

超越无限

判定问题的起源可以追溯到希尔伯特更早些时候对这一问题的研究。1900年,他在巴黎大学举办的国际数学家大会上发布了相关研究成果。

数学领域经常会涌现突如其来的惊喜。在希尔伯特发表演讲的那个时代,数学的逻辑基础面临的麻烦就已经在酝酿之中了。^⑤证明数学一致性的尝试早已有之,但1901年哲学家伯特兰·罗素让数学家备感震惊。罗素提出了一个著名的悖论,它在所有的形式推理系统中都存在。这个悖论的本质很容易描述。考虑如下命题,我们称之为命题A:

A: 本命题是假命题。

假设我们现在问:A是真命题还是假命题?如果A为真,这个命题本身就断定了A是假的;但如果A为假,那么它又是真命题。通过这种自相矛盾的指涉方式,A似乎既是真命题也是假命题,或者它既不是真命题也不是假命题。我们可能会说它无法判定。由于数学建立在逻辑的基础之上,在罗素提出这一悖论后,数学的整个基础开始动摇。罗素的自我指涉悖论就像埋下了一颗定时炸弹,注定会对现代世界产生最深远的影响。

在奥地利,有一位性情古怪又不擅长社交的逻辑学家,名叫库尔特·哥德尔,他的研究让自我指涉悖论的重要性充分显现出来。1931年,哥德尔发表了一篇论文,表明不存在任何能证明所有真算术命题的一致性公理系统。他的证明建立在自我指涉关系这一腐蚀性存在的基础之上,这意味着在一个公理系统内总有无法被证

明为真的真算术命题。一般而言，任何有限的公理系统都无法用于证明其本身的一致性，比如，算术法则本身不能被用于证明算术总能产生一致性的结果。

哥德尔打破了人类古老的梦想，即严密的逻辑推理总能产生颠扑不破的真理。他的结论无疑代表了人类水平最高的智力成果。关于物理世界或理性世界，所有其他发现都能告诉我们一些以前不知道的东西。而哥德尔定理告诉我们，数学世界蕴藏着无穷无尽的新奇事物，即便存在一个拥有无穷智慧的神，他也不可能知道每一件事。这是一个开放性的终极命题。

Alan Turing, ‘On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem’, Proceedings of the London Mathematical Society, ser. 2, vol. 42 (1937). See also <http://www.turingarchive.org/browse.php/b/12>.

由于哥德尔定理建构在高深的形式逻辑领域中，它与物理世界的联系并不明显，更不用说生物世界了。但仅仅5年之后，剑桥大学的数学家阿兰·图灵就在哥德尔的结论和希尔伯特的判定问题之间建立了联系。图灵发表了一篇题为《论数字计算在判定问题中的应用》^[12]的论文，事实证明这是一个里程碑事件的开始。

Alan Turing, ‘On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem’, Proceedings of the London Mathematical Society, ser. 2, vol. 42 (1937). See also <http://www.turingarchive.org/browse.php/b/12>.

在图灵之前一个世纪，查尔斯·巴贝奇也提出了同样的基本概念，但他没有试图为通用算法提出一种形式证明。

图灵最广为人知的成就是，他在英国南部的布莱切利公园秘密破译了第二次世界大战中德军使用的恩尼格玛密码。他的努力挽救了无数同盟国军队将士的生命，并使战争至少提前数月（乃至数年）结束。但历史可以证明，他在1936年发表的论文比他的战时工作更加重要。为了解决希尔伯特提出的无心智计算问题，图灵设想了一种很像打字机的计算机。它的头部能扫描移动的纸带并在上面打字。纸带的长度是无限的，并被分成一个个方格，以便将符号（比如“1”“0”）打印在其中。随着纸带水平地穿过机器，每个方格都会到达计算机头部，此时机器要么删除符号，要么写下符号，要么什么都不做，然后让纸带逐个方格地向左或向右移动，并一遍又一遍地重复这个过程，直到机器停机，给出答案。图灵证明，当且仅当这样一台机器能在数量有限（但有可能数量极大）的步骤之内输出结果时，一个数字才是可计算的。这里的关键想法是通用计算机：“一台能被用于计算任何可计算序列的机器。”^[13]这就是关于现代计算机的最初构想，而如今我们将它的存在视为理所当然。^[14]

从纯粹数学的角度讲，图灵的纸带输入证明法不是也绝不可能是解决判定问题（停机问题）的算法。说得更简单一点儿，对于一般的数学命题，我们不可能事先知道图灵机是否会停机，以及它输出的答案是真是假。因此，总是存在完全不可判定的数学命题。尽管人们可以提出一个可判定的命题（比如，11是一个素数）并证明它的真假，但没人能够证明某个命题是不可判定的。

尽管图灵构想的计算机输出的结果让数学家目瞪口呆，但它的实际应用很快就变得急迫起来。随着战争爆发，图灵接受了任务，要将他的抽象构想变成一种工作装置。1940年，他设计了世界上第一台可编程的电子计算机。这台被命名为“巨人”的计算机是由汤米·弗劳尔斯在伦敦多利士山邮局的电话交换台制造的，并被安放在位于布莱切利公园的绝密级密码破译机构中。“巨人”于1943年正式运行，10年后IBM建造了它的第一台商用计算机。“巨人”的唯一目标就是帮助英国破译密码，所以它是在极其严密和安全的保护措施下制造和运行的。出于政治原因，笼罩着布莱切利公园的秘密氛围一直持续到战争结束，这也是弗劳尔斯和图灵通常不被视为计算机的最早建造者的部分原因。后来，随着计算机在美国的商业化，布莱切利公园在计算机领域开展的战时秘密工作也迅速为世人所知。

尽管图灵的研究工作主要是在数学领域，但也对生物学领域产生了深远影响。生物体的特殊逻辑结构反映了逻辑公理本身。定义生命的自复制属性直接来自充满悖论的命题演算和自我指涉领域，该领域巩固了计算的概念，反过来又为我们现在所熟知的模拟和虚拟现实之类的属性开辟了道路。生命有能力构建外部世界及其自身的内在表征（作为一个主体，操控其所在的环境并利用能量），这反映了逻辑法则是生命的基础。正是因为生命的逻辑，生物才可以探索无边无际的宇宙中的新奇之处，用达尔文那令人印象深刻的话来说，就是创造出“各类美妙的物种”。

考虑到不可判定性已被奉为数学的坚实基础，它也是一个基于数学法则的宇宙的基本属性之一。不可判定性确保数学宇宙总有无穷的创新潜能。生命的一个标志性特征就是它无限的丰富性，即无穷的多样性和复杂性。如果生命代表了某种真正重要的非凡之物，那么拥有无约束的可能性对生命而言肯定是非常关键的品质。20世纪有许多伟大的科学家发现了图灵的构想和生物学之间的联系，而可用于强化这种联系的因素是从纯粹的计算过程向物理构造过程的转化。

自复制机器

John von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata* (University of Illinois Press, 1966).

从英国横渡大西洋来到美国，在那里匈牙利裔流亡科学家约翰·冯·诺依曼和图灵一样，一门心思要设计一种军用电子计算机，他的研究与“曼哈顿计划”（制

造原子弹)有关。他有着与图灵一样的基本想法:设计一种通用的可编程机器,它可以计算任何可计算的东西。但冯·诺依曼对生物学也很感兴趣。这促使他提出了“通用构造器”的想法,该想法的全部相关细节都记录在他的著作《自复制自动机理论》^①中,该书直到他去世后才得以出版。

通用构造器的概念很容易理解。想象有一种可编程机器,它可以从一堆材料中选择构件,并组装成一件功能性产品。今天我们对机器人装配线所做的工作已经非常熟悉,但冯·诺依曼的想法更加野心勃勃。机器人系统不是通用构造器,比如,一条汽车装配线是不能制造冰箱的。为了成为真正的通用构造器,它必须能根据所供应的构件,制造出原则上可构造的任何东西。就这样,哥德尔定理、图灵机和生物学交织在一起。一台通用构造器也必须能建造出自身的复制品。记住,正是自我指涉悖论引导图灵提出了通用计算机的想法。因此,自复制机器的想法会面临同样棘手的逻辑问题。显然,生物体似乎是一种真正的自复制机器。因此,我们可以通过思考通用计算机(图灵机)和通用构造器(冯·诺依曼机)的概念,获得关于生命的逻辑结构的洞见。

冯·诺依曼强调的一个重点在于,通用构造器只能复制自身是不够的,它还要能复制如何制造通用构造器的指令,并将这些指令插入刚完成的复制品,否则它的“后代”就不具备复制能力。今天,我们把机器人的指令视为被编入计算机的不可见程序,该计算机负责驱动机器人。但为了更好地理解自复制机器的逻辑,我们最好把这些指令视为印在穿孔带上的东西,它能驱动老式自动钢琴(接近图灵机中的纸带概念)。想象一下,穿孔带被送入通用构造器,并告诉构造器如何制造这种或那种物体,因此,机器可以不加思索地执行印在穿孔带上的指令。在许多种可能的纸带中,每一种都布满了具有战略意义的定位孔,其中一种纸带上的打孔模式包含了建造通用构造器自身的指令。这种纸带会在穿过机器时发出突突声,并复制出另一台通用构造器。然而,正如前文所说,光有这些还不够;母代通用构造器现在必须制造指令纸带的副本。出于这一目的,纸带现在不仅要被视为一组指令,还要被视为需要复制的另一种物体。用现代语言讲,纸带必须经历从软件(指令)到硬件(带有某种打孔模式的材料)的状态转变。冯·诺依曼设想了一种“监控单元”来影响这种转变,即根据环境要求在硬件与软件之间切换。最后,这条指令纸带副本要被插入新制造的通用构造器,完成整个循环。冯·诺依曼的重要洞见在于,我们必须以两种截然不同的方式看待纸带上的信息:第一种方式是把它视为主动的指令,指示通用构造器制造某物;第二种方式是把它视为被动的数据,只能跟着纸带一起被复制。

通常,情况会更复杂一些,因为读取和复制是同时发生的,有时还在同一区域发生,所以会有发生“交通事故”的风险。为了让潜在的混乱最小化,基因组会把它们组织起来,以避免RNA聚合酶和DNA聚合酶背道而驰。用冯·诺依曼的话说,这

意味着当系统需要同时发挥硬件和软件的作用时，生命必须确保纸带只沿一个方向移动。

George F..R. Ellis, Denis Noble and Timothy O' Connor, 'Top-down causation: an integrating theme within and across the sciences?', Royal Society Interface Focus (2012).

如我们所知，生命反映了信息的双重角色。DNA既是物理对象，又是生命的指令系统，具体扮演哪种角色要取决于环境。当一个细胞开启生命之旅时，如果它需要这种或那种蛋白质发挥某种功能，制造相关蛋白质的指令就会从DNA中被读取出来，由核糖体来合成蛋白质。在这种模式下，DNA扮演了软件的角色。但当细胞复制和分裂时，情况则完全不同。特殊的酶会现身并不加思索地复制DNA（包括任何累积的缺陷），因此在分裂完成后，每个细胞都会拥有一份可用的副本。^⑩所以，一个活细胞的逻辑结构反映了冯·诺依曼的自复制机器的逻辑结构。然而，未解之谜仍在于，监控单元的生物学等效物究竟是什么，它决定了指令何时需要转换成被动的数据。在细胞中，没有明显的成分或者特殊的细胞器能充当“战略规划者”，告诉细胞每时每刻应该让DNA扮演哪种角色（软件或硬件）。做出进行复制的决策取决于细胞及其所在环境中的诸多因素，而非单一因素。它提供了一个涉及自上而下的因果关系的表观遗传控制范例，^⑪稍后我将详细探讨这一主题。

冯·诺依曼认识到，生物学领域的复制迥然不同于简单的复制。毕竟，晶体也是通过复制生长的。生物具有演化能力，这使它的复制非同凡响。如果复制过程出错了，错误也可复制，该复制过程就是可演化的。当然，可遗传的错误是达尔文式演化的驱动力。如果冯·诺依曼机要被用作生物学模型，它就必须包含自复制和演化性这两种关键特征。

冯·诺依曼机的构想已渗入科幻小说的世界，并招致诸多谣言。试想有一位疯狂的科学家成功地组装了这样一台设备，并将它安放到现实环境中。只要有原材料供应，它就会一直复制下去，直到原材料被耗尽。如果将该机器发射到太空中，它就会破坏银河系和其他星系。当然，活细胞的确是一种冯·诺依曼机，并且我们知道，如果不对某种捕食者的数量加以限制，它就会毁灭生态系统。然而，地球上的生物受到生命的复杂网络的全面监控和制约，这样才有大量相互依存但类型不同的生物同时存在，所以不受约束的繁殖造成的破坏是有限的。但如果存在某种可独立自复制的星际捕食者，那就另当别论了。

生命游戏

尽管冯·诺依曼并未试图制造一种现实中的自复制机器，但他的确设计了一种巧妙的数学模型，并抓住了其中的本质。该模型被称为“元胞自动机”，它是研究信息和生命之间关系的常用工具。元胞自动机的一个知名案例被恰如其分地称为

“生命游戏”，它是由数学家约翰·康威发明的，可在计算机屏幕上玩。我要强调的是，生命游戏与真正的生命相距甚远，元胞自动机中的“胞”与活细胞没有任何关系，只是一种术语上的巧合。（将其类比为监狱中的一个囚室更为贴切。）研究元胞自动机的原因在于，尽管它与生物几乎没有关系，但它抓住了生命逻辑中的深层次问题。生命游戏可能很简单，但它表现出某些令人惊叹且影响深远的特征。难怪它如此迷人：人们喜欢玩这种游戏，甚至为它谱曲；数学家喜欢探索它的神秘特征；生物学家则希望从中找到关于生命最基本的组织结构的线索。

我们来简单介绍一下生命游戏的玩法。有一组方格，就像棋盘或者电脑屏幕上的像素。每个方格要么是黑色的，要么是白色的。黑色的方格表示“生”，而白色的方格表示“死”。一开始，你可以根据自己的喜好，任意选择某种生和死的方格模式玩这个游戏。为了让游戏进行下去，必须有一些规则来改变这种模式。每个方格都有8个相邻的方格，那么在一台简单的元胞自动机中，一个给定方格的状态（生或死）就取决于它的8个相邻方格的状态。以下是康威制定的游戏规则：

1. 任何相邻活细胞的数量少于两个的活细胞都会死掉，就好像种群密度过低会导致的后果那样。
2. 任何有两个或三个相邻活细胞的活细胞都可以活到下一代产生。
3. 任何有三个以上相邻活细胞的活细胞都会死掉，就像种群密度过高会导致的后果那样。
4. 任何刚好有三个相邻活细胞的死细胞都会变成活细胞，就像繁殖的结果一样。

这一点引出了关于生命性质的深层次问题。每个人都认同生命是复杂的，但其背后的原因究竟在于生命是复杂过程的产物，还是说它是连续的简单过程的结果，就像生命游戏所展示的那样？我很感谢萨拉·沃克着重指出了复杂过程和复杂状态之间的区别。

这些规则将被同时应用于一组方格中的每一个，因此方格模式一般会发生变化，这就是“更新”。反复应用这些规则，每一步都会形成“一代”，创造出变化的模式，令人深深着迷。然而，这个游戏的真正价值不是供艺术或娱乐之用，而是充当研究图形中的复杂性和信息流的工具。有时电脑屏幕上的模式似乎显示出其本身是有生命的：在屏幕上连贯地移动，或者因相互碰撞而在混乱中创造出新的图形。一个知名案例就是“滑翔机”，5个聚在一起的黑色方格以翻滚的方式在屏幕上爬过（见图8）。令人惊讶的是，这种引人注目的复杂性是在简单规则的重复应用中产生的。 

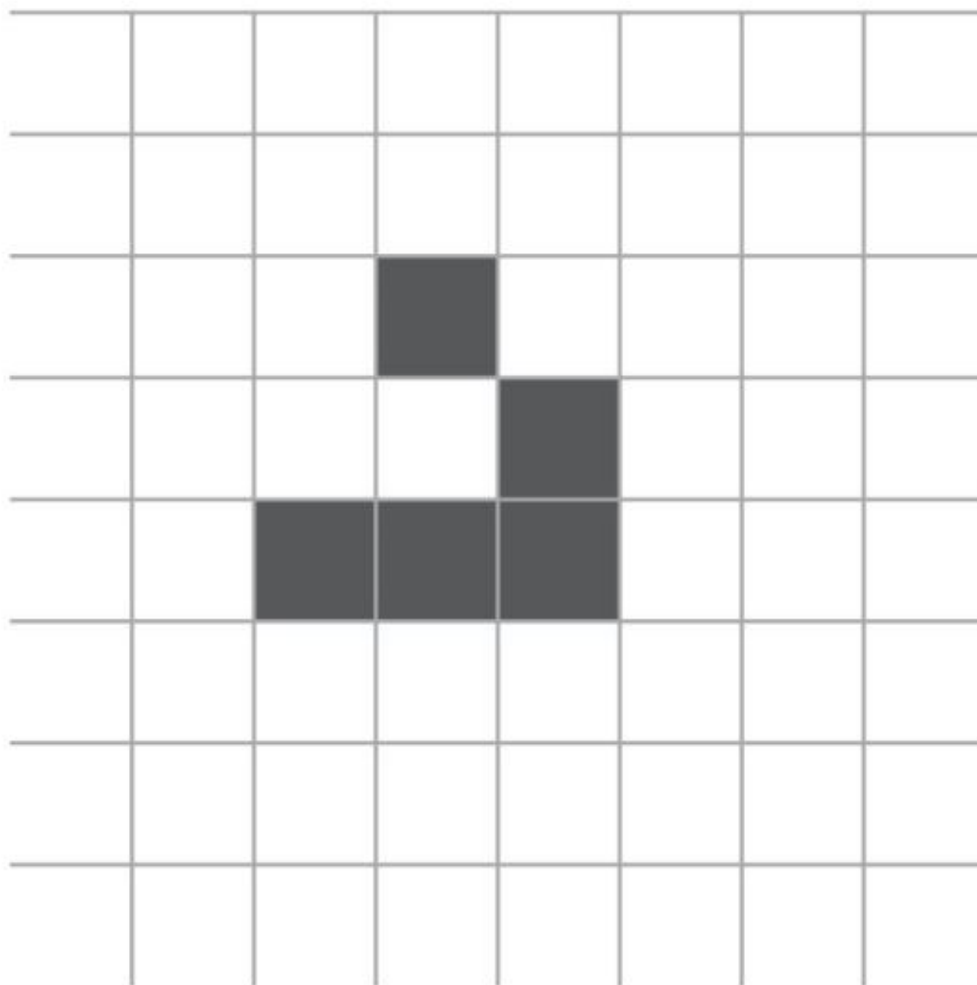


图8 生命游戏

这是由5个黑色方格组成的形状，当根据康威制定的游戏规则一步步演化时，“滑翔机”会沿着屏幕移动，但其内部结构不会发生变化。它会继续移动，直到与其他黑色方格相撞。

John L..Casti, ‘Chaos, G.del and truth’ , in: J..L. Casti and A. Karl-qvist. (eds.), Beyond Belief: Randomness, Prediction and Explanation in Science (CRC Press, 1991); M..Prokopenko et al., ‘Self-referential basis of undecidable dynamics: from the liar paradox and the halt-ing.problem to the edge of chaos’ , arXiv:1711.02456 (2017). Note that if the system is a finite state machine it will obviously generate only finite novelty. An infinite array would not have this restriction.

考虑到初始模式是随机的，游戏中会出现好几种情况。各种模式有可能会演化和变换一段时间，但最终全部消失，只留下一块空白的屏幕。或者，这些方格会保

持静态的形状，又或者每隔几代就会组成同样的图形。更有趣的是，它们也许会持续演化下去，产生无穷尽的新奇结构，就像真正的生命那样。我们怎么可能事先知道，始于哪种模式的生命游戏会产生无穷的多样性呢？一般而言，没人知道。模式不是随意的东西，它们要遵循自身更高层次的规则。人们已经证明，模式本身可在其行为中执行基本的逻辑运算。它们是计算机中的计算机！于是，虽然这些模式的计算速度较慢，但它们可以代表图灵机或通用计算机。因为具备这种属性，图灵的不可判定性分析可被直接应用于生命游戏。由此得出结论：人们无法以任何系统化的方式事先决定某种给定的初始模式能否给出答案，或者能否永远运行下去。^④

计算机屏幕上的模式能不受其基底的约束，创造出它们自己的、有点儿像电影《黑客帝国》般的世界，而与此同时，它们的每一次移动又严格遵守逻辑规则，这至今仍让我觉得神秘。但这就是哥德尔不完全性定理的力量所在：逻辑的约束与创新的不可预测性是兼容的。不过，生命游戏的确引发了一些关于因果关系的严肃问题。我们真的可以将屏幕上的形状视为能“引发”事件的事物吗，比如，因撞击而产生的杂乱无章的碎片？毕竟，这些形状不是物理对象，而是信息模式；发生在形状身上的每件事都可以用较低级别的计算机程序去解释。然而，系统内在的基本不可判定性意味着秩序有涌现的空间。显然，较高级别的信息“交战规则”可以在形状层面上构建起来。类似这样的事情必定会在生命（和意识）中发生，因果叙事也可应用于独立于物质基底的信息模式。

J..T..Lizier and M..Prokopenko, ‘Differentiating information transfer and causal effect’, *European Physical Journal B*, vol. 73, no. 4, 605 – 15 (2010); doi: 10.1140/epjb/e2010-00034- 5.

关于不存在因果关系的相关性，没有任何神秘之处。我可以举一个简单的例子。假设我给我在伦敦的朋友艾丽斯发了一封电子邮件，内容是一个秘密银行账户的密码，她立即收到了邮件。过了一会儿，我又将同样的信息发给了身在纽约的鲍勃，他也立即收到了邮件。监控该银行账户的间谍软件可能会得出错误的结论，认为是艾丽斯将密码给了鲍勃，也就是说，认为从伦敦传到纽约的密码信息在艾丽斯和鲍勃之间形成了因果关系。但实际上，艾丽斯收到的信息和鲍勃收到的信息只具有相关性，因为它们都是由共同的第三方（我）发出的，而非一个导致了另一个。混淆相关性与因果关系是人们很容易犯的错误。

尽管人们很容易将生命游戏中的形状视为遵从特定规则的某类独立存在的事物，但仍然有一个深层次的问题：在哪种意义上，我们可以说两种形状的碰撞导致了另一种形状的产生？悉尼大学的约瑟夫·利齐耶和米哈伊尔·普罗科片科试图通过对元胞自动机（包括生命游戏）的仔细分析，梳理出纯粹的相关性和物理因果关系之间的区别。^⑤他们把在系统中流动的信息比作注入河流的染料，并在“下游”搜寻染料的踪迹。染料的去向受到注入地点发生之事的因果力影响。换种说法，这就好比如果A对B有因果作用，摇动A也会引起B的摇动。但是，利齐耶和普罗科片科

也认识到了“预测性信息传递”的存在：仅对A有所了解就能帮助你更好地预测B接下来会做什么，尽管A和B之间没有直接的物理联系。^⑫人们可能会说，A和B的行为通过信息模式产生了相关性，该模式拥有自己的相互作用方式。结论是，信息模式的确能形成因果单位，并将这些单位结合起来，创造出一个涌现活性、可自我解释的世界。尽管这一说法似乎有悖传统，但我们在日常生活中一直做出类似的假设。比如，众所周知，随着年龄的增长，人们倾向于在口味和观念方面变得更保守。尽管我们很难说这是一种自然规律，但它是一种普遍的人性特征。我们都会把“人性”视为真实存在的事物或属性，尽管我们知道人类的想法和行为最终是由遵从物理规律的大脑驱动的。

有很多方式可以概括元胞自动机的特征。比如，康威生命游戏的规则是局域的，只涉及邻近的方格；而非局域规则（一个方格的状态更新取决于与它相隔一个或两个方格的方格状态）也被轻而易举地囊括进来了。此外，一并被纳入的还有非同步更新的规则，即不同的方格状态以不同的步数进行更新。另一种概括方式是，允许方格采取两种以上的状态，而不只是简单的“生”或“死”。记住，冯·诺依曼的主要动机是构建一台兼具自复制和演化性特征的元胞自动机。康威的生命游戏已被证明是可演化的，但它也能做到自复制吗？是的，它能。2010年5月18日，生命游戏的狂热爱好者安德鲁·J·韦德宣布他找到了一种被称为“双子座”的模式，可以在3400万代之后进行自复制。2013年11月23日，生命游戏的另一个爱好者戴夫·格林宣布第一台能完全复制自身的复制器诞生了，其中包括冯·诺依曼详细说明的重要的指令纸带类似物。这些技术成果看似枯燥乏味，但它们对理解自复制属性反映了生命游戏逻辑中的极其特殊的方面而言至关重要。如果随意设定元胞自动机的游戏规则，那么无论移动多少步它都不会进行自复制。

冯·诺依曼的构想及其引发的所有尝试，都向我提出了一个重要但至今仍未得到解答的科学问题。要想同时获得非凡的自复制和演化性特征，所需的最低级别的复杂性是什么？如果复杂性的门槛非常低，我们可能就会认为生命很容易出现，并能在宇宙中广泛分布。而如果门槛很高，地球上的生命可能就是一个例外，是一系列极不可能事件的离奇产物。当然，由冯·诺依曼最早提出的元胞自动机相当复杂，每一个方格都被分配了29种可能状态中的一种。生命游戏则简单得多，但它需要大量的计算资源，并且表现出令人畏惧的复杂性。然而，这些只是已实现的成果，这一领域的研究至今仍然很活跃。不过，目前还没人知道冯·诺依曼的元胞自动机模型所需的最低复杂性究竟是什么，而我们对由分子构成的物理通用构造器所需的最低复杂性更是知之甚少。

最近，我的同事阿莉莎·亚当斯和萨拉·沃克将一种新颖的变化引入了元胞自动机理论。与生命游戏中使用的那组二维方格不同，亚当斯和沃克用的是一排一维方格。和以前一样，这些方格要么是黑色的，要么是白色的。你可以从任意模式的黑色方格开始，游戏规则是每次移动一步（如图9所示）。在该图中，时间轴的方向

向是朝下的：每条水平线都代表某个时刻元胞自动机移动至此的状态，它是根据游戏规则将上面一排方格往下移的结果。连续应用规则就会产生模式。数学家斯蒂芬·沃尔弗拉姆对一维元胞自动机做了详尽的研究：如果只考虑最邻近的方格，那么一共存在256种可能的更新规则。正如生命游戏中那样，有些模式很无趣，比如，它们始终处于一种状态，或者在几种状态之间循环往复。但沃尔弗拉姆发现，有少数规则可以产生极大的复杂性。图10显示了其中一个例子，它运用了沃尔弗拉姆的“30号规则”，以一个单一的黑色方格作为初始条件。我们可以将图9（它使用了“90号规则”）中的模式与图10（它使用了“30号规则”）中的复杂结构做一番比较。

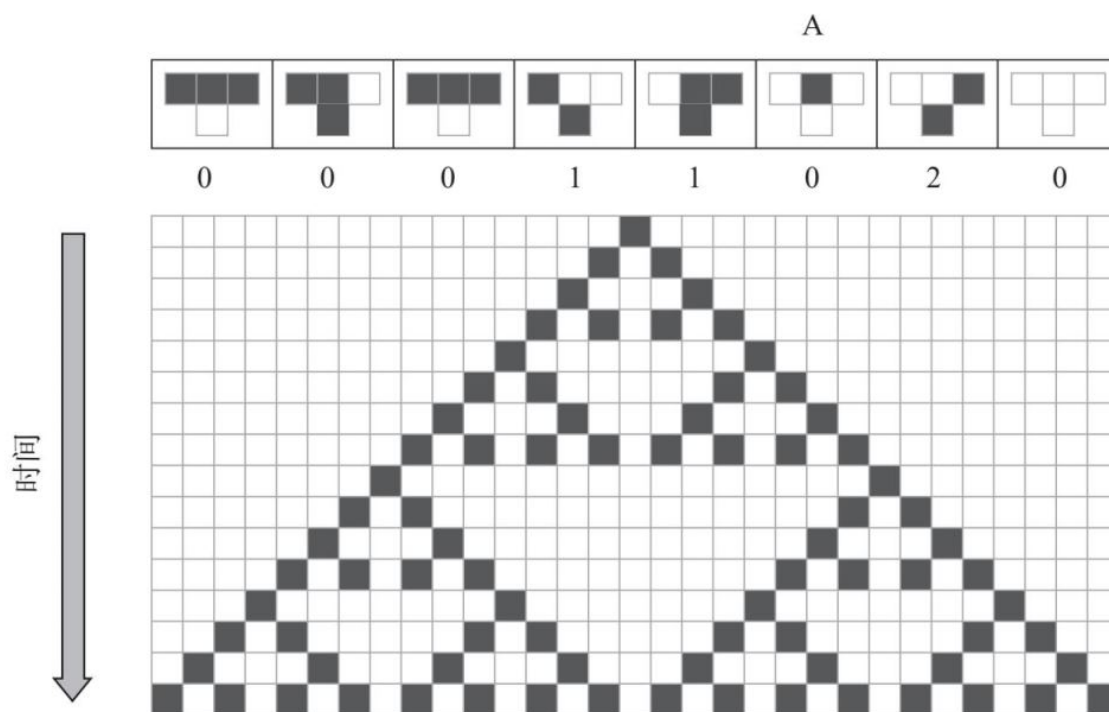


图9 采用沃尔弗拉姆的“90号规则”的一维（初等）元胞自动机

顶部的长盒A展示了规则结构。该元胞自动机的第一行中间只有一个黑色方格，下面各行的模式是将游戏规则重复应用于每个方格产生的。比如，在第一步（第一行），只有一个黑色方格对应盒A中的布局（其相邻两侧的方格都是白色的），所以它下一行的对应位置就是一个白色方格。

Alyssa Adams et al., ‘Formal definitions of unbounded evolution and innovation reveal universal mechanisms for open-ended evolution in dynamical systems’, Scientific Reports (Nature), vol. 7, 997–1012 (2017).

亚当斯和沃克想要找到一种方式，使元胞自动机能反映环境变化，从而更加真实地描述生物体。所以，她们将两台元胞自动机连接在一起（在算法层面上）：一台元胞自动机代表生物体，另一台代表环境。然后，她们引入了完全不同于传统元胞自动机的模型，允许规则随着“生物体”的变化而更新。在决定每一步应该采用256种规则中的哪一种时，她们把“生物体”元胞自动机中的方格与邻近的方格状态代码三联体（000，010，110等）绑定在一起，并将每个三联体的相对频率与“环境”元胞自动机的相同模式进行比较（如果你觉得这一过程晦涩难懂、过于专业，请不要担心，细节并不重要，你只需理解其总体思路，即引入非局域规则可能是产生形式新颖的复杂性的有力方法）。所以，这种安排方式可以使规则随着“生物体”本身的状态（使它能自我指涉）和“环境”的状态（使它成为一种开放系统）的变化而改变。亚当斯和沃克在计算机上运行了几千种情形，来寻找有趣的模式。她们想找到兼具开放性（不会很快循环回复至初始状态）和创新性的演化行为。在她们的语境中，创新意味着可观察到的状态序列绝不会出现在只运用256种可能的固定规则中的任意一种的元胞自动机中，即使将每一种可能出现的初始状态都考虑在内也是如此。结果表明，这样的演化行为是罕见的，但有一些清楚的例子。这些例子会耗费大量的计算时间，但她们的研究成果足以让人们相信，即便是在这种简单的模型中，状态依赖型动力机制也能为复杂性和多样性的产生提供新颖的路径。^④她们的工作很好地阐释了仅处理信息是不够的，要想完全理解生物丰富性，信息处理规则本身也必须演化。我将在结语部分再次探讨这一重要主题。

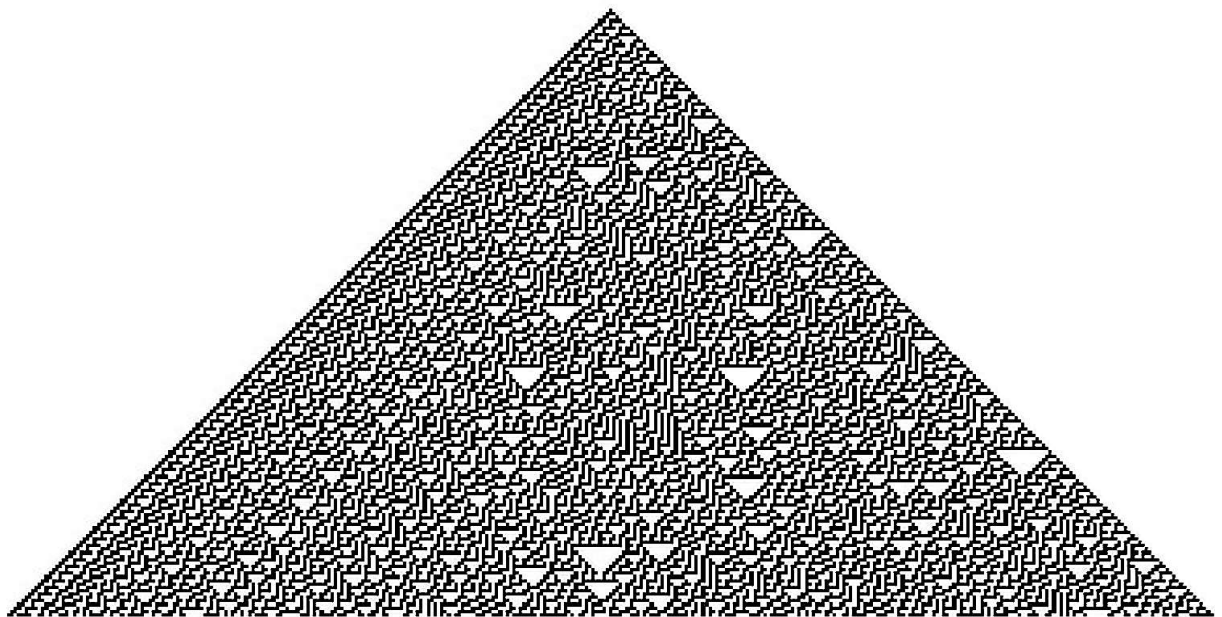


图10 采用“30号规则”的元胞自动机，展现了复杂性的演化过程

图片来源：阿莉莎·亚当斯。

生物学家能修理收音机吗？

无论生命所需的最低复杂性可能是什么，毫无疑问，即使是最简单的已知生命形式也复杂得惊人。的确，生命的复杂性如此令人惊讶，以至于人们打算放弃用物理学语言理解生命。一位物理学家也许能对氢原子甚至水分子做出正确的解释，难道他也能用同一套语言描述一个细菌吗？

Richard Dawkins, *The Selfish Gene* (Oxford University Press, 1976).

向前回溯一两代人，那时的形势看起来非常光明。随着DNA结构的阐明和通用遗传密码的破解，生物学领域被狂热的还原论者主导。当时有一种倾向认为，大多数生物学问题都能在基因层面找到答案。这一观点在理查德·道金斯提出的“自私的基因”概念中得到了有说服力的阐述。^②毫无疑问，将还原论应用于生物学的做法取得了一些显著的成就，比如将特定的基因缺陷与泰-萨克斯病等遗传病联系起来。但很快人们就发现，一般来说，在一个基因或一组基因与生物层面的生物学特征之间并不存在简单的联系。只有当系统被当作一个整体加以考虑——包括整张相互作用的基因网络，再加上很多涉及环境的非遗传（表观遗传）因素时，很多生物学特征才会表现出来。当我们谈到社会性动物时，比如蚂蚁、蜜蜂和人类等，要对它们进行完整的解释，就需要考虑整个群体的集体组织方式。随着这些事实被人们充分理解，生物学再次表现出令人绝望的复杂性。

但也许我们还有一线希望。还原论的反面就是涌现——新的性质和原则可能会在更高的复杂性级别上涌现，而这些性质和原理本身相对简单，不需要借助低级别的现象来理解。涌现似乎有点儿神秘感，但事实上它一直在科学中发挥着作用。一位工程师可以充分理解钢梁的性质，而无须考虑金属的复杂晶体结构；一名物理学家可以在对水分子间的作用力一无所知的情况下，研究对流元胞的模式。所以，“简化源于涌现”在生物学领域也适用吗？

Y. Lazebnik, ‘Can a biologist fix a radio? Or, what I learned while studying apoptosis’, *Biochemistry* (Moscow), vol. 69, no. 12, 1403–6 (2004).

面对这个非常问题，俄罗斯生物学家尤里·拉泽布尼克写了一篇题为《生物学家能修理收音机吗？》的幽默论文。^③与收音机一样，细胞生来就能探测外部信号，并据此做出恰当的响应。举一个例子：EGF（表皮生长因子）分子可能会出现在组织中，并与一个特定细胞表面的受体分子结合在一起。受体跨过细胞膜，与细胞内部的其他分子相互交流。EGF结合事件在细胞内部激发了信号级联，导致基因表达和蛋白质合成过程发生变化，并在这种情况下引起细胞增殖。拉泽布尼克指

出，他妻子的老式晶体管收音机也是一种信号转换器（将无线电波转换为声音），它拥有数百个元件，复杂性大致相当于细胞中的信号转导机制。

拉泽布尼克妻子的收音机坏了，需要修理。拉泽布尼克想知道，一位支持还原论的生物学家会如何处理这个问题呢？好吧，他会先拿到大量类似的收音机，仔细检查每一台，留意它们之间的差别，并根据颜色、形状、大小等对元件进行分类。然后，生物学家会试着移除一个或两个元件，或者让它们交换位置，看看会发生什么。基于所获得的研究结果，数百篇论文得以发表，而其中有些结果令人困惑或自相矛盾。有些研究成果会获奖，并获得专利权。有些元件会被判定为关键元件，有些则不那么重要。移除关键元件会导致收音机完全停止工作，而移除其他元件只会以复杂的方式影响音质。一台典型的晶体管收音机有很多元件，它们以各种模式连接在一起，所以收音机会被视为一种非常复杂的东西；再考虑到它涉及诸多变量，它甚至有可能被断定为超出了科学家的理解能力范围。因此，大家都认同，科学家需要更多的预算才能对收音机进行深入研究。

模块（module）：在生物化学与分子生物学领域，“module”也常译为“模块”，指基因或蛋白质序列中可以组合和变换的标准单元。——编者注

在接下来的深入研究中，一种有效的办法就是使用功能强大的显微镜，在晶体管、电容器及其他元件中，径直到原子层面去寻找线索。大量的研究也许会花上几十年的时间，而且耗资不菲。当然，这一切都是无用功。然而，拉泽布尼克描绘的这出“收音机讽刺剧”正是现代生物学研究的惯常做法。他想表达的主要观点是，电子工程师（甚至是训练有素的技术员）在修理坏掉的收音机方面不会有什么问题。理由很简单，那就是他们都精通电子电路系统的原理。换句话说，只要理解收音机的工作原理和如何将各个元件连接起来实现明确的功能，就能直截了当地修好坏掉的收音机。再微调一下，音乐就会又一次响起。拉泽布尼克悲叹道，生物学还没有达到这样的理解水平，甚至很少有生物学家以类似的方式思考生命。这种思考方式是指，活细胞包含拥有某些逻辑功能的模块^②，从化学角度讲，这些模块连接在一起，形成具有反馈、前馈、扩增、转导和其他控制功能的网络，从而实现整体功能。关键在于，在大多数情况下，人们不必知道那些模块内部发生了什么，就能理解作为整体的系统会发生什么。

Paul Nurse, ‘Life, logic and information’, Nature, vol. 254, 424 – 6 (2008).

所幸，时代正在变化，生命的概念正在以一种非常类似电子学和计算领域的方式重建。诺贝尔奖获得者、生物学家保罗·纳斯于2008年在《自然》期刊上以这种方式发表了面向未来的系统生物学的愿景宣言，并很快成为英国皇家学会的主席。在一篇题为《生命、逻辑和信息》的文章^③中，纳斯预言生物学的新时代即将到

来。通过一步步论证，纳斯在文中指出，科学家将会找到电子电路板的生物等效物，可将分子和生化过程纳入其中：

聚焦信息流有助于我们更好地理解细胞和生物体是如何运行的……我们需要描述生物体中发生的分子间相互作用和生化变化，然后把这些描述“翻译”成逻辑电路，揭示信息是如何被管理的……为了实现这一目标，我们必须完成两个阶段的工作：一是描述负责管理细胞中信息的逻辑电路并对其编目；二是简化对细胞生化过程的分析，以便将其与逻辑电路联系起来……一个有用的类比就是电子电路图。这种电路图用符号定义所用电子元件的性质和功能，还描述了各个元件之间的逻辑关系，让人们可以清楚地了解信息是如何在电路中流动的。类似的概念化过程需要用到逻辑模块，它们构成了管理细胞中信息的“电路”。

哲学家和科学家一直在为一个问题争论不休：是否所有的生物学现象“原则上”都能被还原为原子的活动？但双方有一个共识：实际上，在更高层面上寻求解释是更有意义的做法。在电子学领域，设计者可以用标准元件（晶体管、电容器、变压器、导线等）设计和组装出一台优良的设备，而不需要了解发生在每个元件内原子层面上的精确过程。你不必知道每个元件是如何运转的，只需要知道它能做什么。当电子电路以某种方式（比如信号转导、整流或放大，抑或作为计算机的一个元件）处理信息时，这种实用的方法就会变得特别有效，因为它完全可以用信息流和软件来解释，而无须对硬件或模块本身做出解释，更不用在分子层面上进行解释。沿着这一思路，纳斯敦促人们基于更高级别单位的信息属性，尽可能地在细胞内部和细胞之间寻找对信息处理过程的解释。

当我们观察生物时，我们看到的是它们的物质实体。如果探索其身体内部，我们就会看到器官、细胞、亚细胞器、染色体，甚至还会（用精密的仪器）看到分子本身。但我们看不到信息：看不到大脑回路中信息流的旋涡模式，看不到细胞中如麦克斯韦妖般的信息引擎，也看不到躁动的信号分子之舞引发的有组织的级联反应，更看不到DNA中被紧密压缩的信息。我们看到的是物质，而非信息。我们了解的只是生命故事的一半。如果我们能通过“信息之眼”看世界，作为生命的一大特征，混乱而闪烁的信息模式就会显得独特又奇异。我能想象未来的人工智能更擅长处理信息，经过训练的它们将依据人类头脑中的信息结构而非面孔来识别人们的身份。每个人可能都会有他们自己的身份识别模式，这有点儿像伪科学所谓的“气质”。重要的是，生物体中的信息模式不是随机的；非但如此，演化使其具有最优适合度，就像解剖学和生理学的情况那样。

当然，人类不可能直接感知信息，只能感知它所在的物质结构、它在其中流动的网络，以及将它连接起来的化学回路。但是，这些都不会削弱信息的重要性。想象一下，如果我们试图通过研究计算机内部的电子元件来理解计算机是如何运行的，那么我们只能在显微镜下观察芯片，仔细研究布线图和电源。但我们仍然不知

道微软视窗操作系统是如何发挥它的魔力的。要想完全理解出现在你电脑屏幕上的东西，你就必须向软件工程师咨询。软件工程师为计算机编写了代码，使其具备了功能性；代码将信息组织起来，使其在电路中四处流动。同样，想要全面地解释生命，我们需要同时理解生命的硬件和软件，也就是它的分子结构和信息结构。

生物电路和生命乐章

绘制生物电路图是一个尚不成熟的领域，它属于系统生物学的一部分。物理学家对电子电路的元件已有充分的理解，对生物电路元件却一知半解。很多生物电路（化学回路）是由基因控制的，这些基因通过化学途径连接在一起，产生诸如反馈、前馈之类的特征（与工程学很像，但细节要混乱得多）。为方便理解，我们聚焦于生命的一种非常基本的属性：调节蛋白质的合成过程。生物体会聪明地监控其所在环境，并做出恰当的响应。就连细菌也能探测到周围环境的变化，处理相应的信息，并执行必要的指令去改变自身状态，从而更好地适应环境。在大多数情况下，改变状态会增加或抑制某些蛋白质的产生。制造出数量适当的某种特定蛋白质是一件需要审慎调节的事，这样才能达到微妙的平衡。数量太多的话会对生物体有毒性，数量太少的话则会导致饥饿。在某个特定时刻，细胞如何调节某种特定蛋白质所需的数量呢？答案就在于被称为转录因子的一组分子（它们本身也是蛋白质），它们具有独特的形状，能够识别DNA的特定片段并附着在这些片段上。正因为如此，它们可以提高或降低邻近基因的表达速率。

我们有必要准确理解它们是如何做到这一点的。在前文中我介绍了一种被称为RNA聚合酶的分子，它的工作就是沿着DNA链爬行和读取DNA序列，并在这一过程中转录出配对的RNA分子。但RNA聚合酶不能随心所欲地执行这项任务，它要等待信号（比如，“细胞需要我的蛋白质，现在就转录我吧！”）的出现。在接近基因起点的地方，有一段DNA序列会发出“开始”信号，它被称为启动子，因为它启动了转录程序。RNA会被启动子吸引过去并与之绑定，启动转录过程。但只有当启动子处于“开始”模式时，RNA才会绑定到启动子上。就在这里，转录因子开始起调节作用。通过绑定到启动子上，一种特定的转录因子就会阻塞启动子，让RNA的绑定动作失败。显而易见，在这一过程中，转录因子扮演了阻遏物的角色。如果细胞不需要蛋白质，这样做就不会有问题。但如果环境变了，受阻基因需要得到表达，那么会发生什么呢？显然，阻遏物必须以某种方式被驱逐。那么，这一步骤是如何完成的呢？

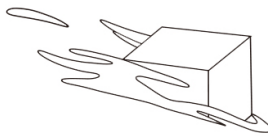
这里有一个很好的例子。很早以前，大肠埃希菌（俗称大肠杆菌）这种常见细菌的调节机制就被发现了。葡萄糖是大肠埃希菌最喜欢的食物，但如果葡萄糖供应短缺，这种多功能的微生物就会用另一种叫作乳糖的糖来应付度日。为了完成这一转换，大肠埃希菌需要三种特殊蛋白质，要求三个相邻基因得到表达。让这些基因一直保持活跃来作为应急计划，会造成浪费，所以大肠埃希菌通过一个化学回路调

节所需基因的开关功能。当葡萄糖供应充足时，作为阻遏物的转录因子会绑定在DNA的启动子片段上，靠近那三个基因，阻止RNA聚合酶吸附到启动子上，从而抑制三个基因转录过程的启动，也就是使三个基因处于关闭状态。当大肠埃希菌得不到葡萄糖但可以得到乳糖时，一种乳糖的副产品就会绑定在阻遏物分子上，使其无法发挥作用，这为RNA聚合酶绑定在DNA上并启动转录过程创造了条件。于是，三个关键基因得以表达，乳糖的代谢过程开始。当葡萄糖再次变得充足时，另一种开关机制会再次关闭乳糖代谢的相关基因。

Uri Alon, *An Introduction to Systems Biology: Design Principles of Biological Circuits* (Chapman and Hall, 2006).

Some people express puzzlement that a system as complicated as a human being could be the product of a mere 20,000 genes. Is there enough information in 20,000 genes? No, there isn't. But given that a gene can be in one of two states, there are in theory 220,000 (about 106,000) possible combinations of gene expression, which is vastly greater than all the bits of information in the universe (a paltry 10123), let alone in a human being. Viewed this way, there is now an overabundance of available bits to go round.

总之，大肠埃希菌有大约300个转录因子，可用于调节其4000种蛋白质的产生。我已经描述了阻遏物的功能，但其他化学反应允许其他转录因子扮演激活物的角色。在有些情况下，同样的转录因子可以激活很多基因，或者在激活某些基因的同时抑制其他基因。这些不同的选择可以实现多种多样的功能。^⑤（与细菌相比，人类大约有1400个转录因子，用于调节我们的20000个基因。^⑥）



迷箱6

细胞如何做计算？

* * * * *

转录因子通过组合它们的行为，创造出各种逻辑功能，这些功能与电子学和计算领域的逻辑功能相似。以逻辑运算指令“AND”（与）的功能为例。只有当开关X和Y同时接收到信号时，开关Z才会打开。为了做到这一点，化学信号将转录因子X翻转成它的主动形态X；从化学上讲，X被打开了。由于处于激活状态，X可以绑定

到基因Y的启动子上，使Y被生产出来。现在，如果有另一个（不同的）信号，将Y也转换为它的主动形态Y，细胞就会同时拥有可用的X和Y。如果还有第三个基因Z，它（通过演化！）被设计成只有当X和Y都存在并绑定到启动子上时才能打开，这种安排方式就可以充当“AND”逻辑门。其他安排方式可以执行“OR”（或）逻辑操作：当X或Y被转化为其主动形态并绑定到Z的启动子上时，Z就会被激活。当这种化学过程产生的序列被串在一起时，它们就能形成化学回路，执行非常复杂的信号级联和信息处理任务。由于转录因子本身就是由受到其他转录因子调节的其他基因产生的蛋白质，整个集聚过程就形成了与大型电子电路十分类似的信息处理和控制网络，而且拥有反馈和前馈功能。这些回路能够促进、控制和调节细胞中的信息模式。

Alon, An Introduction to Systems Biology.

Alon, An Introduction to Systems Biology.

考虑到分子组分和化学回路存在海量的可能组合，你也许会想象，细胞中的信息流就像一座信息嘈杂且令人费解的疯人院。但出人意料的是，信息流比你想象的有序得多。在广泛的信息网络中，有很多反复出现的主题或信息模体，显示出某些生物功能的高效用。一个例子是前馈循环，我在前文中关于大肠埃希菌代谢的例子中对它的基本概念做过介绍。如果再把“AND”或“OR”逻辑门的功能考虑进来

（参见迷箱6），就有13种可能的基因调节组合，而其中只有一种属于网络模体，那就是前馈循环。^⑥虽然基因突变很容易将化学网络中的链路移除，但某些网络模体仍能生存得很好，这一事实表明强大的选择压力在演化过程中发挥了作用。也就是说，必定存在着某种原因，使这些反复出现的模体对生命的维系而言不可或缺。一种解释是稳健性。工程学领域的经验表明，当环境发生改变时，只由少量组件构成的模块结构更容易适应变化。另一种解释是通用性。只要有一个大小适度的工具箱，里面装着屡试不爽的安全可靠的零件，人们就能运用简单的设计原则，以分层的方式构建出大量的结构（乐高积木爱好者和优秀的电子工程师都深谙这一点）。

⑥

尽管我只聚焦于转录因子，但在细胞功能方面还涉及很多其他复杂的网络。比如，新陈代谢网络能控制细胞的能量流动，信号转导网络涉及蛋白质之间的相互作用，以及复杂动物的神经网络。这些不同的网络并非完全独立，而是彼此耦合，形成嵌套和联锁的信息流。转录因子还有很多额外的机制可用于调节细胞过程，要么调节单个细胞，要么调节一群细胞，包括直接作用于信使RNA，或者以诸多不同的方式修饰其他蛋白质。如此多的化学调节途径的存在，使得它们能够通过高保真地响应外部变化，微调它们的行为，演奏出“生命乐章”，就像调试得当的晶体管收音机可以完美地播放贝多芬钢琴曲那样。

在更复杂的生物体中，基因控制过程也更加复杂。拥有细胞核的真核细胞将它们的大多数DNA打包成一些染色体（人类有23对）。在染色体中，DNA处于紧密压缩状态，包裹在蛋白质纺锤体上，并被进一步折叠和挤压到非常致密的程度。这种压缩形式的物质被称为染色质。染色质在细胞核中如何分布取决于很多因素，比如，该细胞在细胞周期中处于什么阶段。在细胞周期的多数时间里，染色质都处于紧密黏附的状态，以防基因被读取（转录）。如果细胞需要被某个基因或一组基因编码的蛋白质，染色质的结构就必定会发生变化，使得读取机制能够接近必需的DNA片段。染色质的重构是在线程网络或微管的控制下完成的，因此，整个基因组要么沉默，要么被物理方法激活；或者说，要么让基因处于“隐藏”状态（更准确地说，是处于打包状态），要么让染色体区域中高度压缩的染色质解码，开启转录过程。在这类过程中，都有麦克斯韦妖的身影。在这种情况下，细胞核中的麦克斯韦妖是名副其实的幕后操纵者，它会打开（而不是封闭）精巧包装的包裹——里面装有携带相关信息的基因。重要的是，癌细胞通常表现出明显不同的染色质结构，这意味着该结构是一种变异的基因表达。我将在下一章中阐述这个问题。

Benjamin H. Weinberg et al., ‘Large-scale design of robust genetic circuits with multiple inputs and outputs for mammalian cells’, *Nature Biotechnology*, vol. 35, 453 – 62 (2017).

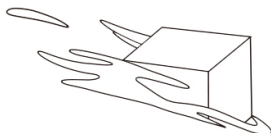
Hideki Kobayashi et al., ‘Programmable cells: interfacing natural and engineered gene networks’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 8414 – 19; doi: 10.1073/pnas.0402940101 (2017).

There has been significant interest in encouraging education and out-reach as well: the International Genetically Engineered Machines Competition allows undergraduate and high-school students to design their own synthetic biological circuits.

这种方法不可避免地有其负面后果，生物黑客可能会出于控制或种族灭绝的理由利用它。

随着科学家破解细胞“电路图”，很多实用的可能性就此产生，比如“重新布线”。生物工程师忙着设计、改变、构建和再利用生物的“电路图”，以执行特定的生物学任务，从产生新的疗法到新颖的生物技术，甚至是运行算法。之前，这种合成生物学研究大多局限于细菌，但最近的新技术已经使得这类研究延伸至哺乳动物的细胞。一种通过DNA切除进行布尔逻辑运算的技术（BLADE），已经被波士顿大学和苏黎世联邦理工学院研发出来了。^⑩研究人员可以构建相当复杂的逻辑电路来发布指令，并且预见到可以用它们来控制基因表达。其中很多电路似乎是全新的，也就是说，从未出现在现存生物中。波士顿大学的小林秀树研究团队认为，对已知生物进行重新布线的前景令人振奋：“我们的工作朝着研发‘即插即用’的基因电路迈出了一步，这种基因电路可用于创造有可编程行为的细胞。”^⑪现在，合成电

路是系统生物学中迅猛发展的研究领域，每年都会有更多详述新颖电路的文献得到发表。^⑩用这种新的电子学方法研究生命，具有光明的医学发展前景。我们可以由此知道，疾病（比如癌症）关乎何处的信息管理缺陷——功能失调的模块或损坏的电路连接等，然后运用化学手段修补细胞，而不是通过摧毁细胞来治愈疾病。^⑪



迷箱7

数字医生时代的到来

想象一下，未来的医生（多半是人工智能）能通过某些令人惊讶的技术实时检测基因表达，凝视着细胞中舞动、闪烁的模式，就像从远处眺望城市的灯光，并据此诊断出病人患上了何种疾病。这就是数字医生，它是一位医疗软件工程师，处理的是信息而非生物组织。我设想未来医生会告诉我，在我身体的这个或那个闪烁的基因簇中有癌症的早期征兆；或者一个遗传基因缺陷产生了一个异常明亮的斑块，表明肝脏中的某种蛋白质超表达了；或者不太活跃的斑点可能表明，有些细胞没能获得充足的氧、雌激素或钙。对信息流和信息簇的研究，将会为我们提供一种比今天使用的各种化学测试有效得多的诊断工具。对疾病的治疗将致力于建立健康、平衡的信息模式，也许是通过介入甚至是再造某些有缺陷的模块，就像从前的电子工程师会通过更换晶体管或电阻器来修好一台收音机那样。数字医生可能不会试图替换任何“硬件”（模块），而是决定重写某些代码，并以某种方式将其上传到病人体内，在细胞层面恢复正常的功能，这相当于细胞重启。

这些似乎是科幻小说中的情节，但生物信息学与计算机技术是平行发展的学科，尽管前者比后者晚了好几十年。随着对DNA三联体密码和转录机制的阐明，生命的“机器代码”在20世纪五六十年代被破解了。现在，我们需要理解生命的更高级的计算机语言，这是接下来必不可少的步骤。今天的软件工程师不会通过输入海量的“1”和“0”来设计一种新的电脑游戏，而会代之以像Python这样的计算机高级编程语言。类似地，当一个细胞调节其膜电位时，它会增加泵出的质子数量，而用基因密码子描述的“机器代码”并不容易看懂。细胞作为一个在高得多的层面上运作的单位，管理着它的物理和信息状态，并有效利用了复杂的控制机制。这些调节过程并不是随意的，而是遵从其自身规律，就像软件工程师使用的高级计算机语言。而且，正如软件工程师能用高级代码重新编程一样，生物工程师也能为生命系统重新设计更精密的特征。

基因网络理论

生物电路有可能产生指数级数量的形式和功能，但对科学而言，幸运的是，有一些简单有效的基本原则。在前文中我描述了康威的生命游戏，其中有一些简单的规则反复执行后，就能产生惊人的复杂性。回想一下，该游戏视方格或像素为简单的开或关（“生”或“死”），其更新规则是由最邻近方格的状态决定的。网络理论是一个十分恰当的类比。比如，电网络包含诸多用电线连接的开关。开关可以开启或关闭，根据由相邻开关发出并沿着电线传来的信号，就能用简单的规则决定一个指定开关应该开启还是关闭。整张电网络很容易在计算机上建模，可被设置一个特定的初始状态，然后一步步更新，就像元胞自动机那样。接下来的活动模式既取决于布线图（网络拓扑结构），也取决于初始状态。总的来说，网络理论的发展非常像一种数学实践：开关被称为“节点”，导线被称为“连接边”。从非常简单的网络规则出发，丰富又复杂的活动可能会随之而来。

网络理论已被广泛应用于经济学、社会学、城市规划、工程学领域，以及所有科学分支领域——从磁性材料到大脑。在这里，我只考虑应用于调节基因表达方面（它们应该开启还是关闭）的网络理论。与元胞自动机类似，网络可能会表现出各种行为，而我想集中精力研究的那种行为是系统何时能进入循环周期。循环周期对电子学而言是一个熟悉的概念，比如，我的厨房里有一台最先进的新洗碗机，是我自己组装的，它里面有一块电子电路板（实际上只是一块芯片）来控制循环周期。它有8种不同的循环周期，如果出现故障，某个装置就会让循环停止。在这方面，洗碗机不是特例，你身体中的细胞也有相似的电路来控制它们的循环周期。

生物钟问题是另外一个有趣的故事。正如我已经提到的那样，全力以赴的细菌只需要20分钟就能完成整个周期；但生活在零摄氏度以下环境中的耐寒细菌，即嗜冷微生物，则可能要耗费几百年才能完成一个周期。

什么是细胞周期呢？想象一个新生细菌，也就是说，母代细菌已经分裂为两个细菌，子细胞刚踏上它的独立生命之旅。小细菌忙着完成细菌必须做的那些事情，在许多情况下就是四处闲逛。但它的生物钟正在嘀嗒作响，它感到自己需要增殖了。细菌内部发生的变化随着DNA的复制和整个细胞的分裂达到高潮。现在，一个周期完成了。 

2001年诺贝尔生理学或医学奖由保罗·纳斯、利兰·哈特韦尔和蒂姆·亨特三位科学家共同获得。——编者注

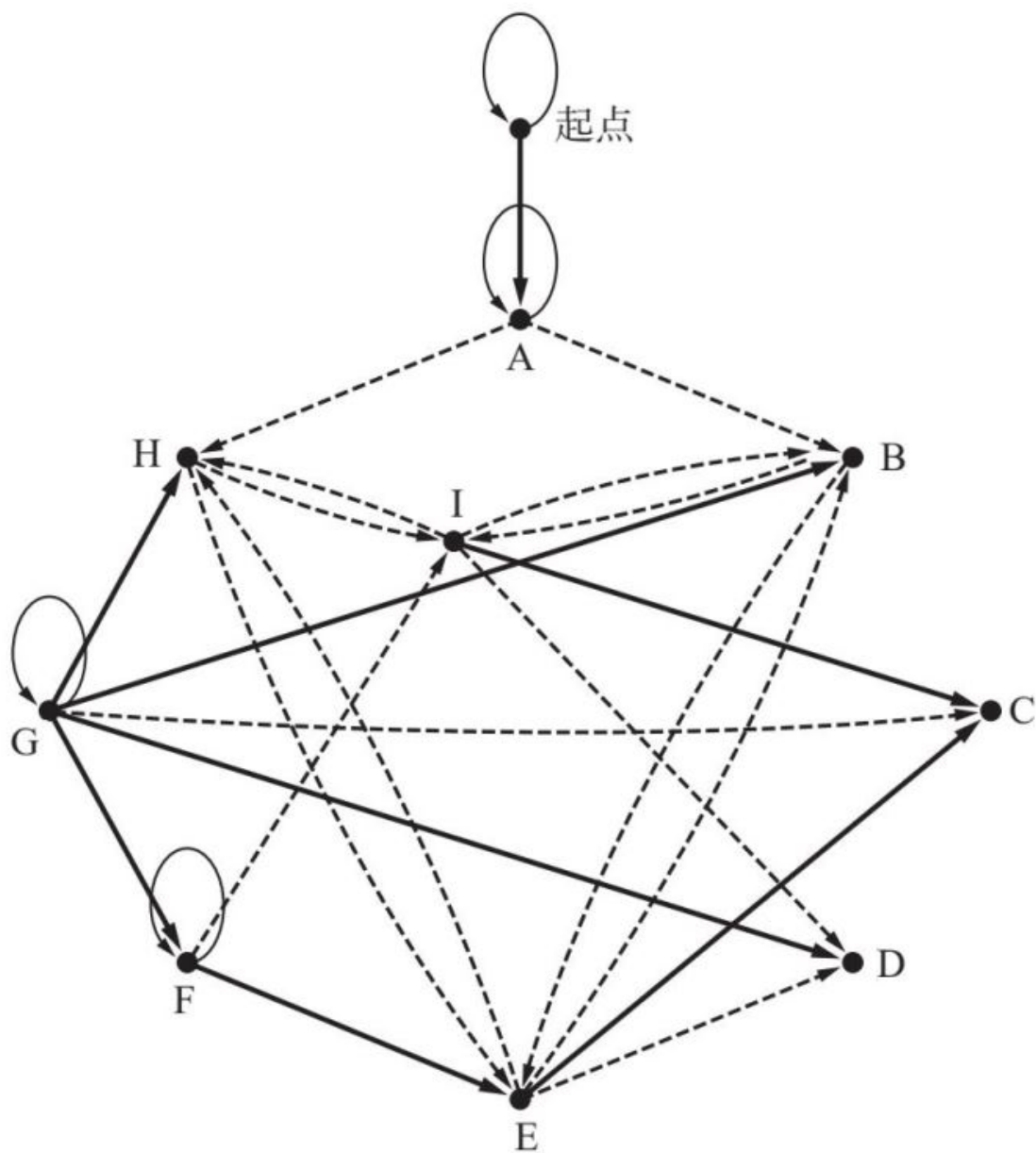
Maria I. Davidich and Stefan Bornholdt, ‘Boolean network model predicts cell cycle sequence of fission yeast’, PLoS ONE, 27 February 2008: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001672>.

正如你预期的那样，在复杂的真核生物体内，细胞周期更加复杂。一个好的折中方案是酵母菌，它与人类一样是真核生物，但它是单细胞生物。酵母菌的细胞周

期得到了大量关注：保罗·纳斯和我在亚利桑那州立大学的同事利兰·哈特韦尔凭借在该领域的研究共同获得了诺贝尔奖^①，德国不来梅大学的玛丽亚·达维迪奇和斯特凡·玻恩霍尔特已经弄清楚了酵母菌细胞周期的控制电路。^②事实上，酵母菌的种类很多。我在这里只讨论一种——粟酒裂殖酵母菌，它是一种裂殖酵母菌。相关网络见图11，节点（图中的黑圆点）表示基因（或者严格地说是基因编码的蛋白质），连接边代表连接基因的化学途径（与电子学中的导线类似），实线箭头表示一个基因激活了另一个基因，虚线箭头表示一个基因抑制了另一个基因（类似于生命游戏中相邻方格可能会决定目标方格的“生”或“死”）。需要注意的是，有些基因还有环形缺损箭头，这表示自我抑制。每个基因都会为即将出现的所有实线（“激活！”）或虚线（“抑制！”）箭头投出自己的一票。根据某种特定的投票规则，票数的总和将决定基因开关是开、是关，还是保持不变。

像这样的简单网络被称为布尔网络，以乔治·布尔的名字命名。布尔在19世纪引入了逻辑代数的运算规则，它们非常适用于香农的信息计量，以及基于二进制（“0”和“1”）选择的阐释。

该基因网络的职责是让细胞一步一步地经历循环周期，如果中途出了差错，循环就会停止；在一个循环周期完成后，系统就会回到初始状态。就其本质功能而言，该网络也许可被简单地视为一系列相互连接的开关，这可以用计算机建模。控制裂殖酵母菌细胞周期的基因调节网络研究起来很容易，因为涉及的基因可被近似地视为全开或全关，不存在模棱两可的状态。这让问题变简单了，因为从数学上讲，我们可以用1代表“开”，用0代表“关”，然后用0和1生成一张规则表，去描述当网络以某种特定状态作为起点并完成整个循环周期时会发生什么。^③



▲图11 控制酵母菌细胞周期的基因网络

节点代表可以由相关基因表达（“1”）或不表达（“0”）的蛋白质。实线箭头表示起点处蛋白质的表达增强了远端节点代表的蛋白质的表达，虚线箭头则表示起点处蛋白质的表达抑制了远端节点代表的蛋白质的表达。

▼表2 控制酵母菌细胞周期的基因网络分步状态

时间 步骤	起点	A	B	C	D	E	F	G	H	I	细胞 阶段
1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	起点
2	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	G ₁
3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	G ₁ /S
4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	G ₂
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	G ₂
6	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	G ₂ /M
7	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	G ₂ /M
8	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	M
9	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	M
10	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	G ₁

▲注：表头字母表示图11中的节点，“0”表示节点处于关闭状态，“1”表示节点处于开启状态。

根据图11中的基因标记方法，我们发现表2中网络的初始状态是：A为关，B为开，C为关，D为开，E为关，F为关，G为关，H为开，I为关。用二进制数字表示的话就是：010100010。当被标记为“起点”的节点做出翻转时（代表来自外部的化学指令，比如“好，开始吧，加油”），演出就开始了。然后，只要一步接一步地运行该网络的电脑模型，并将输出结果与现实进行比对即可。表2展示了每一步的网络状态。“0”和“1”的中间状态对应于可识别的物理状态，即细胞在循环周期中经历的物理状态。它们被最右一列字母标记，这些字母代表了生物学术语（比如，M代表有丝分裂期）。10步之后，网络回到初始状态，等待新的“起点”信号来启动下一个周期。

你可以为图11制作一个视频，就能够看到当处于开启状态时节点闪亮、当处于关闭状态时节点熄灭的过程。上述10个步骤可以形成一种赏心悦目的闪烁模式，就像非正常状态下的萤火虫。这种模式也许还可以被谱成乐曲——生命乐章！我们可

以将这一美妙的图景放大，想象人类就是闪烁的基因灯组成的耀眼星座，形成了无数的旋涡模式。如果把这些模式谱成曲，绝对会非常嘈杂刺耳。人类的基因星空远比控制所有不同类型的细胞周期的基因要浩瀚。人类有两万个基因，都在各行其是。有些“灯”可能大多数时候都处于关闭状态，有些大多数时候都处于开启状态，还有一些则会以各种节奏开开关关。

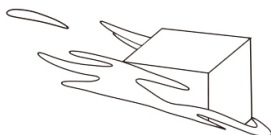
细胞中表达的基因形象地分为“管家基因”和“奢侈基因”。前者在所有细胞中表达，是维持细胞基本生命活动所必需的；而后者只在特定组织细胞中表达。

——编者注

在这里我想说的是，这些变动的信息模式不是随机的；它们描绘了网络和生物体的有组织的活动。问题在于，从使用数学和计算机模型描述闪烁模式的特征，追踪信息流，探查信息存储在哪里及存储多长时间，确认“管家基因”和“奢侈基因”^⑧的研究过程中，我们能学到些什么？简言之，要构建起能抓住生物本质的信息叙事，包括生物的管理结构、指挥控制机制和潜在的故障点。

Hyunju Kim, Paul Davies and Sara Imari Walker, ‘New scaling relation for information transfer in biological networks’, *Journal of the Royal Society Interface* 12 (113), 20150944 (2015); doi: 10.1098/rsif.2015.0944.

我们的研究可以从酵母菌开始：在粟酒裂殖酵母菌细胞周期网络中，只有10个节点和27条连接边。即便如此，对酵母菌的研究也需要运用大量的算力来分析。首先要做的事情就是确认这些模式不是随机的。更确切地说，如果你只是用同样数量的节点和连接边随机构建了一张网络，那么该网络的“灯光”闪烁模式是否会与大自然产生的酵母菌网络有所不同？为了回答这个问题，我在亚利桑那州立大学的同事金炯华和萨拉·沃克进行了详尽的计算机研究，追踪了信息在酵母菌网络中的流动情况。^⑨这听起来很容易，但其实不然。你不可能用眼睛去追踪，所以必须下一个关于信息传输的准确数学定义（见迷箱8）。他们的分析结果是，酵母菌网络中高度系统性的信息流绝不是随机的。演化似乎雕琢了网络结构，这在一定程度上是为了提升它的信息处理品质。



迷箱8

追踪基因网络中的信息流

人们可能会问，对于一个给定的网络节点，比如A，知道它的历史是否有助于预测它下一步会做什么？也就是说，如果你看到了节点A的前三个步骤，并注意到它“开”或“关”的状态，那么这三个步骤的历史能提升你猜对它下一步是开还是关的概率吗？如果能，我们就可以说某些信息被存储在节点A中。接下来，人们可以查看另一个节点，比如B，并且提问：除了知道A的历史，知道B的当前状态能提升猜对A下一步会做什么的概率吗？如果答案是肯定的，这就意味着有些信息已经从B传递到A了。运用“传递熵”的定义，我的同事根据信息的传递量，对酵母菌细胞周期网络中的所有节点进行排序，然后将这一排序与超过1000种随机网络的信息传递量的平均值进行比较。他们发现其中存在着很大的差异，简言之，酵母菌基因网络传递的信息明显比随机网络更多。为了进一步确定导致这种差异的原因，研究人员瞄准了4个似乎能发号施令的节点（图11中的B、C、D和H）。这4个基因扮演着特殊角色，因而被命名为“控制内核”。控制内核就像网络中其余部分的舞蹈指挥，所以，如果其他节点中的一个出了差错（在本应关闭的时候却开启了，反之亦然），控制内核就会予以纠正。它基本上控制着整个网络，完成预定任务；用生物学术语来讲，就是它要确保细胞分裂在一切都有条不紊的情况下进行。控制内核似乎是生物网络的一般特征。因此，尽管行为十分复杂，但网络的动态通常可以通过观察相对小的节点子集来理解。

如果我让你误以为生物体中的信息流只限于基因调节网络，那就是我的过错了。遗憾的是，其他一些网络更加复杂，以至于我们很难为它们建模，尤其是无法用“1”和“0”（分别代表开启和关闭）这样简单的方法建模。此外，就需要更精细化调节的功能（比如新陈代谢）而言，网络构件的数量会急剧增加。不过，我们仍能得出一般性结论：生物体通过信息的模式化和处理方式，从随机的复杂性中脱颖而出；尽管很复杂，但用“软件”来解释生命仍然比用支撑生命的基本分子体系来解释要简单得多，就像我们解释电子电路那样。

网络理论确证了信息“有其自己的生命”的观点。在酵母菌网络中，我的同事发现，在通过信息传递而相互关联的节点对中，有40%其实并没有建立物理连接；它们之间没有直接的化学相互作用。相反，约有35%的节点对彼此间并不传递信息，即便它们通过“化学导线”（连接边）建立了因果关系也是如此。系统中的信息模式可能看似沿着那些“化学导线”流动，但其实不然。出于某些原因，“没有因果关系的相关性”似乎在生物体中表现得比在随机网络中更普遍。

Richard Feynman and Ralph Leighton, Surely You're Joking, Mr. Feynman! (Norton, 1985). See also <https://www.youtube.com/watch?v=nmEoL5C7ths>.

在《别闹了，费曼先生！》一书中，^②擅长讲故事、自称为淘气鬼的物理学家理查德·费曼，讲述了他小时候因为修好了出故障的收音机而小有名气的故事（是

的，又是修理收音机）。有一次，他先是盯着坏了的收音机看了看，然后在屋子里走来走去，为此人们怀疑他根本修不好收音机。但他毕竟是聪明的费曼，他很快就找出了问题，轻轻松松地把收音机修好了。“他通过思考修好了收音机！”收音机的主人惊呼道。事实上，你通常不可能只看看电子电路的布局就判断出问题所在。收音机的性能既取决于它的电路拓扑，也取决于组成它的元件的物理特性。如果电阻器太大或电容器太小，信息流就不可能实现最优化，输出结果就会失真。这一点适用于所有网络，包括生物网络、生态网络、社会网络和技术网络。看起来相似的网络可能会表现出非常不同的信息流模式，因为它们的元件（节点）可能具有不同的性质。在酵母菌细胞周期的例子中，酵母菌采用的是简单的开关规则（并产生了令人惊讶的结果），但还有很多不同的备选数学关系可供使用，它们将会产生不同的信息流模式。最重要的一点是，在信息模式的动力机制和生物电路拓扑之间不存在显而易见的关系。因此，出于诸多实用目的，人们把信息模式视为“有利之事”，并忽略支持生命的基本网络，这样做有好处。只有出现差错时，才有必要担心真正的“布线”问题。

Uzi Harush and Baruch Barzel, ‘Dynamic patterns of information flow in complex networks’, Nature Communications (2017); doi: 10.1038/s41467-017-01916-3.

以色列的两位数学家乌兹·哈鲁什和巴鲁赫·巴泽尔，最近对各种网络中广泛使用的信息流计算机模型做了系统性研究。他们试图确认主要的信息高速公路，努力追踪每个节点和途径对信息流做出的贡献。为了做到这一点，他们试图干预系统，比如，“冻结”节点，看看信息流会发生怎样的变化，然后评估这一变化是否会让某个特定的下游节点的信号强度变得不同。他们得出了一些令人惊讶的结论：在有些网络中，信息主要通过枢纽（枢纽是诸多链路汇集的地方，比如互联网的服务器）流动；而在其他网络中，信息避开枢纽，倾向于在网络的边缘流动。尽管结果呈现出多样性，但这两位数学家还是认为，“信息流模式受到通用规律的支配，这些规律又与系统的微观动力学机制直接相关”。^⑤这一结论直击如下问题的核心：什么时候人们才可以合情合理地将信息模式视为独立存在的事物？在我看来，如果信息模式本身遵从某些规则或规律，它们就可以被视为独立存在的实体。

群体智慧

懒惰人哪，你去察看蚂蚁的动作，就可得智慧。

——《圣经·箴言》（第6章第6节）

网络理论在社会性昆虫领域的应用结出了累累硕果，社会性昆虫展现出复杂的、有组织的行为，就源于邻近个体间对简单规则的反复运用。我曾去过马来西亚

的一个海滩，坐在一把固定于结实木桩上的稻草伞下一边喝啤酒一边吃薯片的情景，让我至今记忆犹新。一片薯片掉到地上，我没有把它捡起来。不一会儿，我发现一群小蚂蚁蜂拥着这片薯片，对它非常感兴趣。很快它们就开始搬运薯片，先是水平地穿过沙滩，然后垂直地爬上木桩。这可真是一次不畏艰难的集体努力——薯片大而蚂蚁小。（我以前从不知道蚂蚁喜欢薯片。）但是，它们成功地完成了这项任务。蚂蚁们有组织地围拢在薯片边缘，雌蚁（工蚁都是雌性的）在上面拉，其他蚂蚁则在下面推。它们要去往何处呢？我注意到，在木桩顶部有一个垂直的狭槽，有几只蚂蚁正在那里“站岗”，这一定是它们的巢穴。但所有的推动和拉动肯定都是徒劳的，一是因为薯片太大，根本无法放进狭槽里；二是因为蚂蚁必须使薯片（接近于平直）转动两个直角才能将其插入狭槽。而且，在行动之前，蚂蚁需要制订出让薯片垂直于木桩的计划。几分钟后我惊讶地看到，蚂蚁们的策略成功了：薯片被完整地拖入了狭槽。薯片还躺在沙滩上时，这些小型的、脑袋像大头针一样的生物就以某种方式评估了它的维度和平整度，并找到了通过旋转将薯片搬入狭槽的方法。而且，它们一次就搞定了！

蚂蚁的另一种常见沟通策略是间接通信，也就是通过在环境中存储和感知信息素进行沟通。

类似的故事有很多。昆虫学家喜欢为蚂蚁设置挑战和难题，试图用一些小把戏难倒它们。找到食物和舒适的巢穴似乎是蚂蚁最关心的问题（毫无疑问，这些也是昆虫学家关心的问题），为此它们要花大量时间觅食，看似毫无目的地四处乱转，以及寻找更好的地方筑巢。在亚利桑那州立大学有一个由斯蒂芬·普拉特领导的大型社会性昆虫研究团队，我每次参观他们的蚂蚁实验室都能获得愉悦的体验。既然同一种类的大多数蚂蚁看起来都是一样的，聪明的研究人员就给蚂蚁涂上彩色圆点，以便追踪它们，了解它们都做了什么。蚂蚁似乎对此并不在意。尽管初看起来这些行色匆匆的昆虫似乎在做随机运动，但在大多数情况下并非如此。它们基于离巢穴最近的原则识别路线，并用身上的化学物质做标记。作为实验的一部分，如果它们的行动策略受到昆虫学家的干扰，比如移走食物来源，蚂蚁就会下意识地采取备用计划并重新评估局部地形。蚂蚁行为的最特别之处在于，它们会相互沟通。当一只蚂蚁遇到另一只时，它们会有一个小小的仪式，以便将某些位置信息传递给对方。^④通过这种方式，一只单独行动的蚂蚁收集到的数据很快就能散播给蚁群中的许多蚂蚁，从而为集体决策奠定基础。

在那个蚂蚁搬动薯片的例子中，显而易见的是，没有任何一只蚂蚁能提前拿出解决方案，蚂蚁群中也没有“带头大哥”。决策是它们集体做出的，但它们是怎样做到的？如果我在下班回家的路上碰到一个朋友，他问我“今天过得如何”，那么他很有可能不得不听我无趣地瞎扯5分钟（不过，这可能也会传递一些信息）。除非蚂蚁的“说话”速度很快，否则它们短暂的相遇就只能传递一些诸如“如果，那

么”之类的逻辑命题。然而，如果将整个蚁群中蚂蚁们相遇时传递的信息整合起来，集体的信息处理能力就会不断增强。

蚂蚁并不是唯一有能力做出群体决策的动物，有人甚至把这种能力称为群体智能。鸟群和鱼群也会采取一致行动，它们的俯冲和急转弯就像齐心协力之举。关于这种现象的最佳猜测是，某些简单的规则被反复运用了很多次，就累积产生了某种相当复杂的事物。亚利桑那州立大学的蚂蚁研究团队正在探索“分布式计算”的概念，并将信息理论应用于切胸蚁（*Temnothorax rugatulus*）。这种蚂蚁能以数量相当少的工蚁（少于300只）形成蚁群，这使研究人员更容易追踪它们。他们的研究目标是追踪信息如何在蚁群中流动，以及在蚂蚁筑巢期间信息如何被存储和传播。这些研究都是在实验室中的受控条件下进行的。研究人员为蚂蚁提供了各种新巢穴（老巢穴被破坏了，以促使它们搬家），并借此研究蚂蚁的集体决策是如何做出的。当蚂蚁集体行动时，其中少数知道路的蚂蚁会回到巢中，并引领其他蚂蚁走上这条路，这可以称为“前后跑”。这一行动过程很缓慢，因为小蚂蚁一路跌跌撞撞，它们得持续触碰引领者以确保不会被落下（蚂蚁看不见太远的地方）。当有足够多的蚂蚁学会做标记时，“前后跑”模式就会被舍弃，代之以“捎带”模式，从而加快行动速度。

我的这些同事专注于做一件事：将“前后跑”颠倒过来，即让一只知道路的蚂蚁引领另一只蚂蚁从新巢回到老巢。为什么要做这项研究呢？因为这似乎与负反馈和删除信息的动力机制有关，然而这个问题仍未得到解决。为了做好这项研究，实验人员设计了一种由塑料制成的仿真蚂蚁，里面有一个磁体。这只仿真蚂蚁由隐藏在木板下的小型机器人驱动，在木板上移动。有了这种可操控的人造蚂蚁，我的那些同事就可以自行创造“前后跑”模式，用于测试各种理论。整个过程被录成了视频，留作之后的定量分析之用。（你可以想象这项研究多么有趣！）

标度律（scaling law）：也称规模法则，是一种数学关系，用于描述某个量如何随规模变化而增加或减少。举个例子：在太阳系中，有很多比行星数量多得多的 小天体，比如小行星和卫星。

社会性昆虫代表了生命组织过程中一个令人着迷的中间阶段，它们的信息处理方式尤其有趣。但地球上巨大的复杂生命网络由各个层面上的个体和群体之间的信息交换交织而成，从细菌到人类社会，就连病毒也可被视为广泛分布在地球上的移动信息包。把整个生态系统看作信息流动和存储的网络，会引出一些重要的问题。比如，随着复杂性层次的上升，从基因调节网络到深海火山口生态系统再到热带雨林，信息流的特征会遵从任何标度律^②吗？地球生命作为一个整体，很有可能具有某些明确的信息特征或模体。如果地球生命并无特别之处，我们就可以预期其他世界的生命也会遵从同样的标度律，并展示出同样的性质，这对我们在太阳系外行星上搜寻明确的生物标志物有很大帮助。

形态发生的奥秘

在生命的所有惊人能力中，最令人震撼的就是形态发生。信息以某种方式被印刻在一维的DNA结构中，并被压缩进只有一颗豌豆的10亿分之一大小的空间里，然后在三维空间中形成极为精确和复杂的结构，直到发育为一个完全成形的婴儿。这一切是如何变成可能的呢？

在第1章中，我提到了19世纪的胚胎学家汉斯·杜里舒，他相信有某种生命力在胚胎发育过程中发挥着作用。后来，这种相当模糊的活力论被“形态发生场”这个更精确的概念取代了。到了19世纪末，物理学家通过使用“场”的概念获得巨大的成功，迈克尔·法拉第是最早这样做的科学家。大家最耳熟能详的例子是电：位于空间中某点的电荷创造了电场，并延伸到它周围的三维区域。磁场也很常见。因此，生物学家试图用类似的方式为形态发生过程建模，就没什么好奇怪的了。麻烦在于，没人能就一个显而易见的问题给出令人信服的答案：形态发生场是什么场？它显然不是电场或磁场，也肯定不是引力场或核力场。因此，它必定是一种“化学场”（我所说的“化学场”是指，某类化学物质在生物体中以不同的浓度扩散开来），但对形态发生素这种化学物质的确认，很长时间以来都是一个难题。

有些细胞（比如多能干细胞）只会部分分化，还有潜力变成各种不同类型的细胞。

科学家花了几十年的时间才取得了显著进步。20世纪后半叶，生物学家开始从遗传角度研究形态发生过程。他们大致讲述了一个这样的故事：当胚胎从受精卵开始发育时，最初的单个细胞（合子）就几乎把所有的基因开关都打开了。随着它不断分裂，各种基因沉默下来——不同细胞中的沉默基因不同。结果，由于那些难以解释的形态发生素能明显控制基因的开关，这在一定程度上导致最初完全相同的细胞团分化为不同的细胞类型。等到胚胎完全成形时，这种分化过程已经创造出胚胎所需的各种不同类型的细胞。^①

你身体中的所有细胞都有相同的DNA，然而，皮肤细胞不同于肝细胞，肝细胞也不同于脑细胞。DNA中的信息被称为基因型，而真实的物理细胞被称为表型。所以，一种基因型可以产生很多种不同的表型。这自然很好，但肝细胞是如何聚集到肝脏之中，脑细胞又是如何聚集到大脑之中的呢？这是否相当于分子层面上的“物以类聚”？我们已知的大部分相关知识都来自对果蝇的研究。有些形态发生素负责在指定位置使未分化细胞分化成不同的组织类型，比如眼睛、肠道、神经系统等。这在不同位置的细胞分化与其他形态发生素的释放之间建立起反馈回路。被称为生长因子的物质（我在本章中提及过的EGF就是其中的一种）加速了那个区域的细胞增殖，并通过这种差异化生长改变局部的几何结构。做出这种笼统的解释很容易，但要将其转变成详尽的科学解释就没那么容易了，这在很大程度上是因为它取决于

化学网络和信息管理网络之间的耦合，这两种因果关系网络交织在一起，并随时间的推移发生变化。此外，在对形态发生做出解释的过程中，有越来越多的证据显示，化学梯度和物理作用力（比如电场力和机械力）也做出了贡献。我将在下一章详细探讨这个重要问题。

有意思的是，阿兰·图灵也对形态发生问题感兴趣，并且提出了一些方程，用于描述化学物质如何通过组织扩散，形成各种物质的浓度梯度，正是这种反应过程产生了三维模式。尽管图灵的研究方向是正确的，但进展仍然很缓慢。即便是那些已被确认的形态发生素，相应的谜题也未解开。要确证某种备选化学物质确是一种特定的形态发生素，方法之一就是克隆产生这种化学物质的细胞，将它们置于另一个位置（这些细胞由此被称为“异位细胞”），并观察它们是否会在错误的地方发挥同样的功能。通常，它们都会这样做。科学家已经通过这种方式培育出长有多余翅膀的果蝇和长有多余脚趾的脊椎动物。不过，即便把直接影响浸没在其中的细胞增殖的所有物质都列出来，也只是故事的一小部分。很多在胚胎组织中扩散的化学物质不会直接影响细胞，但会作为信使来调节其他化学物质的作用。破解其中的细节是一个巨大的挑战。

一个更复杂的问题是，基因很少单独起作用。正如我解释的那样，基因形成了各种网络，由其中一个基因表达的蛋白质可以抑制或增强其他基因的表达。已故的埃里克·戴维森和他在加州理工学院的同事，试图搞清楚由50多个基因构成的网络的（化学意义上的）“电路图”，该网络调节着海胆的早期发育阶段（一个世纪前，正是这种低等动物吸引了杜里舒的注意力）。然后，加州理工学院的研究团队在计算机上建模，设定与胚胎发育初期对应的条件，并一步步地对该网络的动力机制进行模拟，两个相邻步骤的间隔时间为半小时。在每一步，他们会将计算机模型模拟出的电路状态与观察到的海胆发育阶段进行对比。见证奇迹的时刻来了！计算机模拟结果与实际发育过程完全吻合（经基因表达谱技术测量后确认）。不过，戴维森团队并未止步于此。他们对电路做了微调，并观察胚胎会发生什么。比如，他们敲除了网络中一个名叫“delta”的基因，结果造成所有非骨骼中胚层组织的缺失——一种严重的异常。相应地，在他们修改了网络的计算机模型之后，模拟结果与实验观察完全吻合。在一项更极端的实验中，他们向受精卵中注入了信使RNA链，以抑制一种叫作“Pmar1”的关键酶的产生。结果令人吃惊：整个胚胎被转化为骨骼细胞团。同时，基于被修改的电路图，计算机模型再次描绘了同样的巨变过程。

Nurse, ‘Life, logic and information’.

我举的各种例子证明了“电子学思维”的力量和作用范围：追踪生物体中的信息流，以及将信息流与重要的结构特征联系在一起。在生物学领域，信息概念最强大的方面之一在于，相同的一般性理念通常可应用于所有尺度。纳斯在其颇具前瞻

性的论文中写道：“支配信息管理的原则和规则会在不同层面上呈现出相似性，即便它们的元素完全不同……因此，对更高级的系统进行研究，有助于我们理解较为简单的细胞，反之亦然。”

到目前为止，我已经思考了如下层面的信息模式和信息流：DNA（分子层面），酵母菌的细胞周期（细胞层面），多细胞生物的形态发育，生物群体和社会性组织。但当薛定谔提出他的“非周期性晶体”概念时，他关注的是遗传信息，以及这种信息如何可靠地从一代传递到下一代。诚然，信息会以复杂的模式在生物体和生态系统中传播，但它也会垂流流动，一代代向下传递，为自然选择和演化变化奠定基础。于是，达尔文学说和信息论在此处交汇，生命的魔盒涌现出巨大的惊喜。

第4章

达尔文学说2.0

若无演化之光，生物学将毫无意义。

Theodosius Dobzhansky, ‘Nothing in biology makes sense except in the light of evolution’, American Biology Teacher, 35 (3): 125 - 9 (March 1973).

——特奥多修斯·杜布赞斯基^⑤

For a detailed popular account of how evolution selects for demonic information-processing efficiency see The Touchstone of Life by Werner Loewenstein (Oxford University Press, 1999), Ch. 6.

“自然界充斥着红牙利爪。”阿尔弗雷德·丁尼生在达尔文时代初期写下了这些引发联想的文字。可以理解，那个年代的科学家和诗人习惯于强调自然选择的野蛮残暴，并把它看作生物体适应性方面的军备竞赛。为了生存，鲨鱼长出了刀锋般尖利的牙齿，乌龟长出了坚硬的防御性外壳。人们很容易理解，在无情的生存斗争中，为何演化会选择更大的翅膀、更长的腿、更敏锐的视力，等等。但身体这种生命的“硬件”只讲了故事的一半，与身体同样重要（事实上更重要）的是不断变化的信息模式和指挥控制系统，它们构成了生命的“软件”。演化既发生在生物“硬件”上，也发生在生物“软件”上，但我们不容易注意到后者，因为信息是看不见的。我们也没注意到微小的麦克斯韦妖正在分流和处理这些信息，而它们近似热力学的完美状态，正是几十亿年来演化修正的结果。^⑥

在这里，我们可以用计算机产业做类比。30年前，个人计算机既笨重又难以携带。后来，鼠标、彩色屏幕和小型电池等技术创新让计算机变得更高效、更便携，其销量因此飙升。于是，在资本家眼中，自然选择引发了计算机数量的快速增长。然而，在硬件创新的同时，计算机软件方面的创新给人留下的印象更深刻。比如，Photoshop（一种图像处理软件）或PowerPoint（微软公司的演示文稿软件）的早期版本与现在的可用版本相比，完全不值一提。最重要的是，现在的计算机已经大幅提升运算速度，成本则大幅下降。而且，软件的改进为IT产业的迅速发展做出了不亚于硬件的贡献。

在达尔文理论发表的一个世纪之后，关于生命的信息叙事才被纳入演化叙事的范畴。如今，生物信息学领域已经是一个庞大且不断拓展的产业，积累了惊人的数

据量，并取得了丰硕的研究成果。在科学家的跨国合作下，2003年第一份完整的人类基因组序列发布了，它被誉为普通生物学尤其是医学领域中改变游戏规则的事物。尽管这一里程碑性质的成就不容轻视，但人们很快就意识到，只知道完整的基因组序列细节还不足以“解释生命”。

当达尔文的演化论与20世纪中期的遗传学及分子生物学结合在一起，形成所谓的现代综合论时，生命的故事似乎变得简单了，实则具有迷惑性。DNA是一种物理对象，在复制过程中必定会产生随机性错误，这为遗传变异提供了机制，自然选择也会借机发挥作用。将所有基因和基因编码的蛋白质功能罗列出来，并不算大功告成，我们还需要了解更多的细节。

大约20年前，这种过分简单化的演化论观点开始消亡。生命从一份罗列出各类蛋白质的清单到一幅功能性三维解剖结构图，走过了一条漫漫长路。如果没有“装配指令”，基因组计划提供的蛋白质“元件表”就毫无用处。即便在今天，由于不具备未卜先知的能力，也没有人能依据基因组序列预测出真实的生物会是什么样子，更不用说基因组序列中的随机变化会如何改变表型了。

只有当基因得到表达（开启）时，它们才会产生影响；也正是在基因控制和管理领域，生物信息学的故事真正地展开了。这一新兴学科被称为表观遗传学，它比孤立的遗传学更丰富也更微妙。越来越多的表观遗传因子被发现，它们驱动着生物信息模式和信息流的构建。如今，达尔文学说的修正和延伸已经开始，我把它称为“达尔文学说2.0”，它开启了一个关注生物信息力量的全新视角，并引领了演化论的重大修正。

带电的怪物

遗传的含义远比基因丰富。

Eva Jablonka, *Evolution in Four Dimensions* (MIT Press, 2005), p. 1.

——埃娃·亚布隆卡 

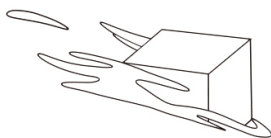
https://www.theregister.co.uk/2017/06/14/flatworm_sent_to_space_returns_2_headed/.

J. Morokuma et al., ‘Planarian regeneration in space: persistent anatomical, behavioral and bacteriological changes induced by space travel’, *Regeneration*, vol. 4, 85 - 102 (2017);
<https://doi.org/10.1002/reg2.79>.

“它来自太空！双头扁虫让科学家震惊不已！”^①2017年6月，英国的一家网络刊物如此宣称。这篇文章的主题是出现在国际空间站的怪物，它们不可避免地令科学家感到困惑。这种怪物并未入侵空间站，只是作为科学实验的一部分出现。科学家想知道，如果在将扁虫这种低等生物送入空间站之前切掉它们的脑袋和尾巴，它们能否在空间站里继续存活下去。结果表明它们在那里生活得很好，每15只被切掉脑袋的扁虫中就有一只会长出两个脑袋。^②

太空扁虫只是呈爆发式发展的表观遗传学领域的一个戏剧性的例子。我们来粗略地定义一下表观遗传学，它研究的是决定生物形态并且超越基因范畴的所有因素（参见迷箱9）。这些双头扁虫的基因与它们的同代表亲相同，但它们看上去像另一个物种。事实上，双头扁虫会繁殖出更多的双头后代，难怪科学家对此迷惑不解。领导这项研究的首席科学家是塔夫茨大学的迈克尔·莱文，他恰巧也是我在亚利桑那州立大学的研究团队的合作伙伴。

为了弄清楚太空扁虫问题，我们先回想一下上一章讲述的胚胎发育过程（形态发生），它为我们提供了关于信息如何控制和塑造生物形态的直观例子，尽管其中有很多真实的运行机制至今仍是未解之谜。我解释了用于构建和操控生命的信息在很大程度上取决于系统开启或关闭基因的能力，以及系统在遗传指令被转录之后修饰蛋白质的能力。不过，对于通过化学途径（涉及甲基、组蛋白尾和微RNA等分子，参见迷箱9）进行的信息流调节，以及这种基因开关库与大量变化的化学模式的耦合，我们仍然所知甚少。于是，表观遗传学开启了充满组合和可能性的浩瀚宇宙。我在前文中提过，被称为形态发生素的特殊分子的扩散，在逐渐明朗的控制生物发育的动力机制方面起着重要作用。过去几年我们了解到，另一种物理机制在形态发生过程中可能起到了更重要的作用，这种被称为电转导的机制处理的是由电场效应引起的生物形态变化问题。



迷箱9

超越基因

在生物的生命周期中，基因会根据需要被开启或被关闭。有很多方式可以使基因沉默，其中一种常用的方法就是甲基化。在这个过程中，甲基这种小分子基团附着到基因中的碱基C上，以物理方式阻断基因读取机制。另一种方法是RNA干扰，用到的是一个仅有20多个碱基长度的微小RNA片段，植物学家在试图培育更漂亮的花时偶然间发现了它。在这种机制的作用下，基因信息会被正常地从DNA中读取出

来，但RNA干扰过程掳走了信使RNA——就在信使RNA忙于把读取出来的数据运送到核糖体处时，并将其砍成两半，就这样（有些残忍地）丢弃了信息。复杂生物的基因可能会因为被极其致密的染色质区域埋藏而“窒息”。

除了基因开关，其他几个变量也会发挥作用。得到表达的基因会产生一种蛋白质，该蛋白质随后就会以某种方式被修饰。比如，组蛋白会聚集成像小溜溜球一样的结构——核小体，而DNA会缠绕在核小体周围。人类的一条染色体可能包含数十万个核小体。这种“小溜溜球”不仅是结构元件，还在基因调节过程中发挥作用。各种小分子会附着在组蛋白上形成尾部；已有证据表明，这些分子标签本身就是一种密码。另外，DNA链上核小体之间的间距既不是规则的，也不是随机的，这种定位模式本身似乎就包含着重要信息。所有这些变量都非常复杂，具体细节尚未完全被理解，但蛋白质在被制造出来之后经历的修饰，在细胞的信息管理系统中显然是重要的调节元件。让情况变得更复杂的是，一个基因并不一定是DNA的一个连续片段，它可能是由好几个片段构成的。结果，信使RNA的读取工作不得不分段进行，之后再将这些组分正确地拼接起来。在有些情况下，拼接操作不止一次，这意味着一段DNA可同时为好几种蛋白质编码；蛋白质的表达取决于拼接操作的具体细节，而拼接本身又是由其他基因和蛋白质管控的，以此类推。

生物多样性的最大来源也许与这样一个事实有关：至少在像动植物这样的复杂生物体中，绝大部分DNA并不包含能够为蛋白质编码的基因。DNA为什么会有这种“黑暗地带”，目前我们还不清楚。长期以来，很多非编码DNA片段都被科学家视为垃圾，因为它们不具备有用的生物学功能。但科学家逐渐发现了证据，表明很多这类“垃圾”在制造其他类型分子的过程中扮演了重要角色，比如，像RNA短链这样能够调节各种细胞功能的分子。从细胞开始，生物体的组件变得越来越复杂。对所有这些不位于真实基因中的因素的探索，是表观遗传学研究领域的一部分内容。从目前的情况看，就生物形态和功能而言，表观遗传学至少与遗传学一样重要。

在科幻小说《弗兰肯斯坦》中，电的确是一种生命力，但现实情况与该小说的作者玛丽·雪莱的想象不同。大多数细胞都带有少量电荷，它们会将细胞内带正电荷的离子（主要是质子和钠离子）泵出，使它们穿过细胞膜来到细胞外，从而在细胞内创造出净负电荷。细胞膜内外的典型电位差为40~80毫伏。尽管这个电位差看似不高，但细胞膜太薄了，以至于这么小的电压梯度就能产生一个巨大的局域电场——比雷暴期间邻近地球表面的局域电场更强，而且我们有可能对它进行测量。通过使用压敏荧光染料，研究人员可以绘制出电场图样。

尽管电很关键，但这里所说的形态发生场不像通常意义上的电场那样遍及整个发育中的组织。它是一种让带电细胞极化的场。“极化”在这里特指细胞膜内外的电位差。如果不同的细胞在不同位置上的电压降不同，我们就可以说，存在着一种

遍及整个发育中组织的极化电场。物理学家将会意识到，极化场是一种标量场，而电场是一种矢量场。

在塔夫茨大学所做的一系列精彩的实验中，迈克尔·莱文（领导太空扁虫研究的科学家）已经证明，在生物体的发育过程中，电模式在生物体最终形态的形成方面发挥着重要作用。身体大面积区域的电压变化，发挥着“预置模式”的作用。这是一种不可见的几何支架，能够驱动下游的基因表达，从而影响发育路径。通过操控选定的细胞之间的电位差，莱文可以干扰发育过程，并创造出各种怪物，比如，拥有多余的腿和眼睛的青蛙，在尾巴的位置长出了头的扁虫，等等。^②

科学家用爪蟾属的蝌蚪做了一系列实验。就正常的爪蟾胚胎而言，在其头部和躯干的中央区域有一些细胞开始产生黑色素之后，它们就会发育出一种特有的色素沉着模式。莱文给蝌蚪们注射了依维菌素，这是一种常用的抗寄生虫药，可以通过改变细胞及其环境之间的离子流，让细胞去极化。改变“教员细胞”的电性质会产生巨大的影响，导致色素细胞失控，并像癌细胞一样扩散到胚胎的远端区域。一只完全正常的蝌蚪可能仅仅因为电干扰就长出转移性黑色素瘤，而不需要任何致癌物或突变。肿瘤可能仅由表观遗传触发，这一事实与流行观点相冲突，后者认为癌症是遗传损伤的结果。我将在后文中探讨这一问题。

所有这些已经足够不同寻常了，但还有一件更令人惊奇的事。塔夫茨大学的达尼·亚当斯设计了另一个实验，把一台显微镜与一部延时照相机组装在一起，录制下爪蟾胚胎发育过程中电模式变化的视频。结果令人叹为观止。视频的开头是一列增强的极化波，散布于整个胚胎，并持续了大约15分钟。然后，超极化和去极化的各种斑块或斑点开始出现，并随着胚胎的结构重组而被包裹住。超极化的区域勾勒出未来的嘴、鼻子、耳朵、眼睛和咽。通过改变这些区域的电模式，并追踪接下来的基因表达和外观模式的变化，研究人员得出的结论是，电模式预示了随后在发育过程中将会出现的结构，在爪蟾将会形成什么样的外观方面表现得尤其明显。电预置模式似乎可以指导形态发生过程，以某种方式存储关于最终的三维形态的信息，并与胚胎的远端区域建立联系，进而决定其生长尺度和形貌。

胚胎发育是生物形态发生的一个极端例子，另一个例子是再生。如果有些动物出于某种原因而失去了身体的某些部位，这些部位是可以重新长出来的，比如尾巴乃至四肢。当然，这里也有关于电的故事。莱文选择的实验动物是一种被称为真涡虫的扁虫（与太空扁虫属于同一物种）。这些微型动物的一端长着一个头，上面有眼睛和脑；另一端长着一尾巴。真涡虫是教师们偏爱的实验动物，因为即便被切成两半，它们也不会死；情况恰恰相反。对此，莱文写道：

Michael Levin, ‘The wisdom of the body: future techniques and approaches to morphogenetic fields in regenerative medicine, develop

mental biology and cancer’ , Regenerative Medicine, 6 (6), 667 – 73 (2011).

后半部分的伤口处长出了一个新头，而前半部分的伤口处则长出了一条尾巴。这两种完全不同的结构都是由细胞形成的，它们在扁虫被切断之前一直共享着局部环境中的各个方面的信息。于是，我们尚知之甚少的远程信号能让伤口处的细胞知道它们身处什么位置，伤口朝着哪个方向，以及片段中的哪些其他结构仍然存在，不需要被替换。

莱文发现，在整个被切下的片段中存在着独特的电模式，就像伤口周围通常存在的电模式一样。莱文使用的庚醇和辛醇两种药物听起来好像火箭燃料，但它们的实际作用是干扰细胞彼此间用电沟通的能力，从而对控制伤口周围的组织决定其身份的生物电路的活性做出调整。通过这种方式，他能使真涡虫头被切掉的地方长出另一个头，而不是长出尾巴，由此创造出双头无尾的真涡虫（见图12）。类似地，他也可以培育出双尾无头的真涡虫（他甚至能培育出有4个头或4条尾巴的真涡虫）。如果实验人员切掉双头真涡虫的那个多余的头，最令人惊讶的情况就会发生。你可能会认为真涡虫不会再长出两个头了，但结果是，如果真涡虫再次被砍成两段，就会产生两条新的双头真涡虫！这是表观遗传发挥作用的一个极端例子（参见迷箱10）。关键在于，所有这些怪物虫子都有相同的DNA序列，但其表型截然不同。火星人肯定会基于它们的形态，把它们看作完全不同的物种。然而，从某种意义上讲，生物体的物理性质（在这个例子中就是电子电路的稳态）把改变了的形态信息从一代传递至下一代。

这带来了两个重要问题：形态信息存储在这些生物的什么地方，又是如何进行代际传递的？显然，形态信息不在基因之中，因为双头和单头真涡虫的基因是相同的。仅靠DNA并不能直接编码形态（解剖学意义上的布局），也不能编码遭到破坏时用于修复形态的规则。组织如何知道要持续重建某个部位，比如真涡虫的头，以及在该部位的重建工作完成后停下来呢？标准还原论的解释是，生物的再生能力应归功于一组可遗传的基因指令，类似于“如果你被切成了两段并失去了本来的尾巴，那就长出一条新尾巴”。但考虑到双头真涡虫与正常的真涡虫拥有相同的基因，刚被切成两段的双头真涡虫如何告诉它的残躯“再长出一个头”，而不是按照常规的做法“再长出一条尾巴”呢？究竟是什么样的表观遗传器在被短暂的生物电修复改变后，仍能保留在一代又一代的“怪物”中，甚至在莱文移除“火箭燃料”后仍然如此？

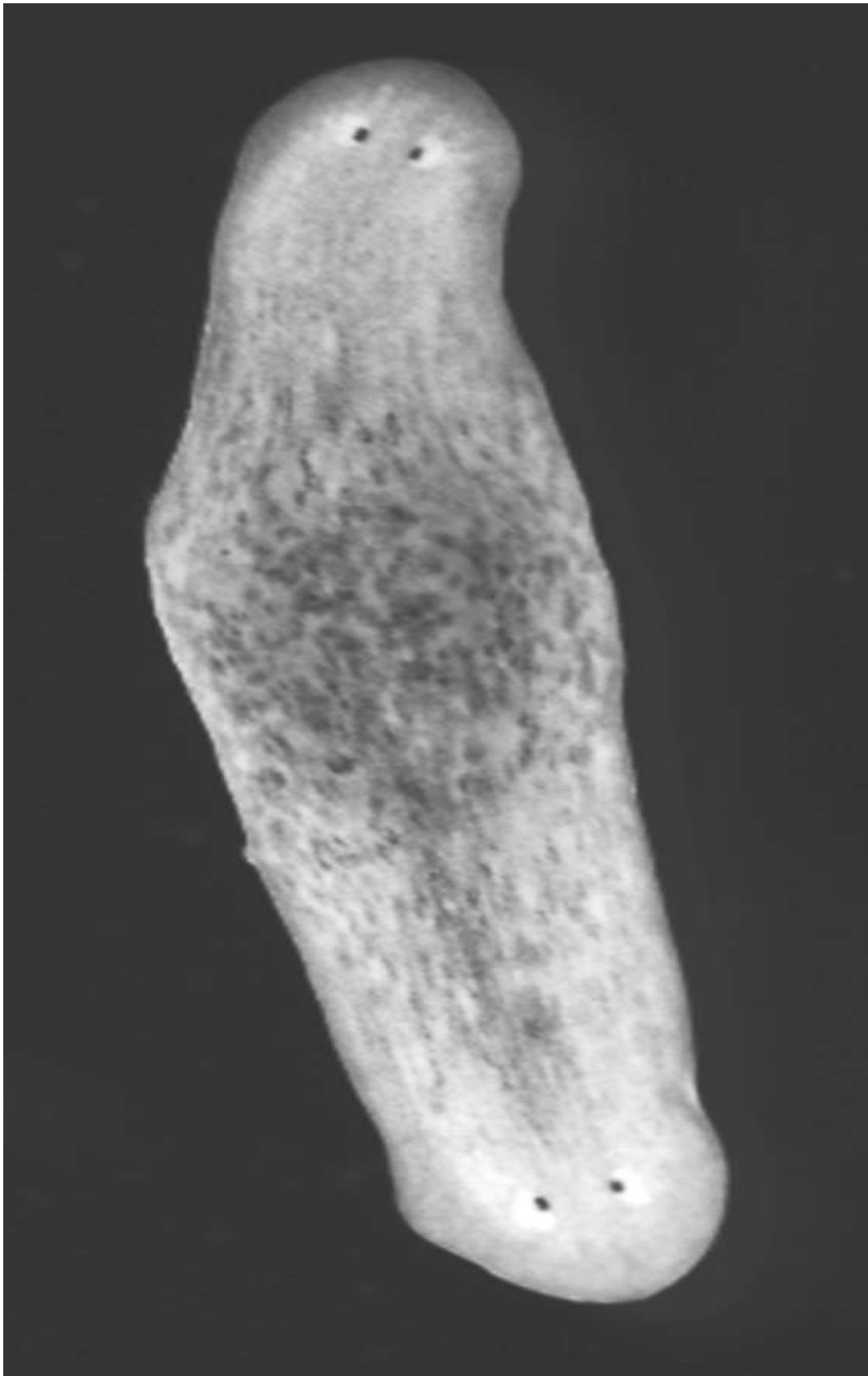


图12 塔夫茨大学的迈克尔·莱文运用电极化操作创造出的双头真涡虫。在被切断之后，它会变成两条双头真涡虫，后者就好像另一个物种，尽管双头真涡虫与单头真涡虫有相同的DNA

图片来源：塔夫茨大学艾伦发现中心，莱文实验室，法伦·杜兰特。

这里最大的问题不是弄清楚哪些蛋白质位于哪些地方，而是厘清作为一个整体的生物系统如何在比单个细胞大得多的尺度上，处理关于大小、形状和拓扑结构的信息。我们需要以一种自上而下的视角，聚焦于信息流和大而复杂的结构之形态的编码机制。然而，到目前为止，这种机制或者说传递构建和修复指令的信号的性质，仍是未解之谜。解决方法之一是，想象有某种散布于生物体内的“信息场”，在莱文及其同事向其施加干扰后，仍能以某种方式为即将再生的“怪物”预置大尺度性质的细节，包括三维形态。目前对这种信息场的工作机制的解释都还只是猜测。莱文认为，有一种预先存在的“目标形态”，它指导着各种形态调节信号；化学、电和机械过程则结合起来，以步调一致的方式存储、解释和执行这种目标形态。

Michael Levin, ‘The wisdom of the body: future techniques and approaches to morphogenetic fields in regenerative medicine, developmental biology and cancer’, *Regenerative Medicine*, 6 (6), 667 - 73 (2011).

目标形态是一种稳定的模式，系统在受到干扰之后，将发育或再生为该模式。尽管我们还不清楚它的运作机制，但每当重建出恰当大小的结构，再生过程就会停止，这表明局部的生长与主体的大小及比例是协调的。 ②

理解生物学领域中复杂形态的形成过程有着巨大的医学应用价值，从出生缺陷到癌症。如果这些形态至少在一定程度上受到电模式的调节，或者的确受到任何我们能够学会重写（目的是让细胞按照“规范”来构建）的编码过程的影响，就存在着修正和控制病理的可能。再生医学的圣杯就是整个器官再生的能力。事实上，人类的肝脏在接受外科切除术后仍能再生为正常大小的肝脏。还是那个问题：新生肝脏是如何知道正常肝脏的大小和形状的呢？如果类似的再生可延伸至神经、颅面组织乃至四肢，那么再生医学的应用价值将大得惊人。但要实现这些目标，我们必须更好地理解生物系统，把它视为有凝聚力的计算实体，能存储和处理关于其形态及环境的信息。最重要的是，我们需要探索信息模式（电、化学和遗传模式）是如何相互作用和转化为特定表型的。

Recent experiments have demonstrated that a whole range of genes may be activated according to the shape of the cells’ surroundings. This was demonstrated by incarcerating human stem cells in tiny cylinders,

cubes, triangles, and so on. See Min Bao et al., ‘3D microniches reveal the importance of cell size and shape’, *Nature Communications*, vol. 18, 1962 (2017).

电转导只是物理作用力影响基因表达的一个例子。作用于细胞整体的机械压力或剪切应力，有时会使细胞的物理性质或行为发生变化。一个众所周知的例子是“接触抑制”。如果培养皿中的细胞受到良好的对待，并能获得营养素，它们就会愉快地进行分裂。但如果细胞“患有幽闭恐惧症”，比如，集落增殖到塞满培养皿边缘，过于拥挤时细胞分裂就会停止。癌细胞会关闭接触抑制机制。当癌细胞离开原发性肿瘤并扩散至全身时，癌细胞在形态和刚度方面也会经历剧变。另一个例子是，当一个干细胞被放置在坚硬的表面上时，它表达的基因会与在软组织中时表达的基因不同，从而影响它分化出的细胞类型，这对胚胎发生来说显然是一个非常重要的现象。在癌症研究领域，有一个流行的警句：“细胞接触到什么决定了细胞能做什么。”这类现象背后的机制被称为机械力转导，它是指一个外部的机械信号（一种总的物理作用力）会被转导为基因表达的改变，以此作为对信号的响应。^⑪

S. Sarker et al., ‘Discovery of spaceflight-regulated virulence mechanisms in salmonella and other microbial pathogens’, *Gravitational and Space Biology*, 23 (2), 75–8 (August 2010).

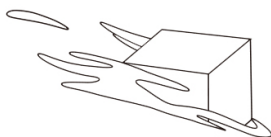
J. Barrila et al., ‘Spaceflight modulates gene expression in astronauts’, *Microgravity*, vol. 2, 16039 (2016).

在零引力条件下，双头太空扁虫提供了一个关于机械力转导的引人注目的示例。另一个太空奇迹来自我的同事谢里尔·尼克森做的实验。她与NASA合作研究当微生物进入地球轨道时的基因表达改变。就连低等生物沙门菌也能以某种方式感觉到它正在太空中飘浮，并相应地改变其基因表达。^⑫这一发现对航天员的健康产生了显著的影响，因为在地球上受到控制的恶心虫子可能会在太空中导致航天员生病。与此相关的事实是，人类体内通常携带着大约一万亿个微生物，其中有很多都在肠道中，它们被称为微生物组，对人类健康发挥着重要作用。如果微生物组因长期处于零引力或低引力状态而引发基因表达改变，就可能会成为航天员进行长期空间飞行的严重障碍。^⑬

还没有证据证实幼鹿会遗传这种变化。

让我再介绍两个更有趣的发现。众所周知，蝾螈有再生四肢的能力。事实证明，如果它的一条腿上有癌症病灶，在患癌部分被切除后，新长出来的腿就是健康的。显然，在残肢中以某种方式被编码的肢体形态信息，可被重编程后用于健康肢体的再生。这与传统观点相反，传统观点认为快速的细胞增殖——肢体再生的特征——是一种致癌风险（癌症有时也被形容为“永远无法愈合的伤口”）。事实上，

很多研究已经显示，胚胎有能力驯服来势汹汹的癌细胞。另一个怪现象与鹿角有关，它们每年都会掉落和再生。对有些种类的鹿来说，如果你在它们的角上切一个凹口，下一年再生的鹿角会在凹口位置长出一个异位分支（分叉）。^①我们很想知道，“凹口信息”存储在鹿身体的哪个地方？显然不在鹿角中，因为它们掉落了。是在头部吗？鹿头怎么知道在距它半米远的鹿角上有一个凹口呢？头皮中的细胞又是如何存储鹿角分叉的结构图的，以至于可以注意到凹口的确切位置？太奇怪了！在生命的神奇迷箱中，表观遗传是最令人困惑的谜题之一。



迷箱10

表观遗传

就像著名寓言故事《三盲鼠》里的农场主妻子那样，德国演化生物学家奥古斯特·魏斯曼切除了很多代老鼠的尾巴，但他从未成功养殖出一只无尾老鼠。这对拉马克的演化论是一记沉重的打击，因为拉马克认为后天获得的性状也具有遗传性。然而，近年来关于表观遗传学的大量研究正在描绘一幅更微妙的图景。在生物体内，当细胞分裂时，它的类型会得以保留。比如，如果一个肝细胞开始自我复制，那么它会产生两个肝细胞，而不是一个肝细胞和一个皮肤细胞。所以，决定基因表达（“你应该是一个肝细胞”）的表观遗传标记（比如甲基化模式）会被传递给子细胞。但是，表观遗传变化会从一个生物体传递给其下一代吗，比如，从母亲传递给儿子？这是一个截然不同的问题，如果它发生了，就会动摇达尔文演化论的根基。就这些表观遗传变化而言，应该不存在任何机制可以使其影响到生物的种系（精子和卵子），进而影响到生物的后代。然而，很长时间以来，生物学家一直在寻找表观遗传变化代际传递的证据。一头公驴与一匹母马交配，会生出一头没有生殖能力的骡子；如果一头母驴与一匹公马交配，则会生出一头驴骡。虽然骡子和驴骡的基因相同，但两者的外形大不相同。它们之间存在表观遗传上的差异，因此必定携带了取决于其父母性别的表观遗传决定子。其他例子表明，来自父母的基因都被打上了表观遗传分子标记，这些标记设法进入生殖细胞，并在生殖过程中留存下来。此外，植物学家知道很多类似的例子：植物一生中积累的表观遗传变化会被传给下一代，以及之后的后代。有些研究甚至已经发现，人类身上也有类似的情况。其中一个例子是在第二次世界大战期间濒于饥荒的荷兰家庭，他们因为不在盟军的前进路线上而未能获得食物补给。幸存者的孩子出生时的体重低于平均水平，并且终其一生体重都低于平均水平。更令人惊讶的是，他们孩子的个头似乎也偏小。

那么，表观基因组到底位于何处呢？基因是物理对象，在细胞中有明确的位置：一个特定基因就位于DNA的一个确定位置上。你可以用显微镜看到基因。然而，当谈到表观遗传时，就不存在物理意义上的表观基因组了，细胞中也没有与之对应的定义清晰、有特定位置的物理对象。表观遗传信息的处理和控制过程遍及整个细胞，也许还超出了细胞范畴。它是全局的，而非局部的，这种情况就像我在上一章中提到的冯·诺依曼的“监控单元”对细胞的模拟。

与拉马克学说“调情”

机会偏爱有准备的基因组。

Lynn Caporale, ‘Chance favors the prepared genome’, *Annals of the New York Academy of Sciences*, 870, 1–21 (18 May 1999).

——林恩·卡波拉尔 

在《物种起源》出版前的几十年里，有一位法国生物学家提出了一种与达尔文完全不同的演化论，他就是让-巴蒂斯特·拉马克。拉马克演化论的核心思想是，生物体在有生之年获得的性状可以遗传给其后代。因此，如果一只动物为了生存而以这种或那种方式做出努力（尝试跑得更快，够得更高，等等），它的后代就会通过遗传拥有改良的性状（跑得更快，个子更高，等等）。如果这种理论是正确的，那么它将为生物体朝着更好的方向快速且有目的地改变提供一种机制。我的母亲常说，她做家务时要是有两双手就好了。想象一下，如果事情真如她所愿，她的孩子生下来就会有4只手！与拉马克演化论相反，达尔文的理论声称，由基因突变带来的变化是盲目的，它们与生物体自身的需求或环境没有关系。如果某种罕见的突变带来了生存优势，这纯粹是运气使然。达尔文认为，演化过程中不存在定向的进步，也不存在改良的系统性内在机制。

如果大自然能设计和制造出恰当的突变来帮助生物生存，就像拉马克设想的那样，那么演化过程当然可以变得更快也更有效。然而，很早以前，生物学家就摒弃了这种非常类似于“上帝之手”的观念，他们更偏向于只诉诸随机因素来解释变异。这种方法持续了几十年。然而，如今质疑声已经出现了。莱文的怪物真涡虫显然是获得性状遗传的绝佳例子，该性状是通过在实验室中切断虫子的身体获得的。还有很多其他已知的例子，那么，是时候抛弃达尔文学说，转而拥抱拉马克学说了吗？

Andreas Wagner, *Arrival of the Fittest* (Current, 2014).

Krishnendu Chatterjee et al., ‘The time scale of evolutionary innovation’, *PLoS Computational Biology* (2014);

<https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003818>.

没人能否认，自然选择鼓励适者生存。生物体显示出变异，而自然选择了适者。但是，总存在一些琐碎的烦扰。自然只能处理已有的变异体，那么有一个根本性的问题：这些变异体是怎么产生的？适者生存也许成立，那么荷兰植物学家雨果·德弗里斯在一个世纪前提出的说法“适者到来”也成立吗？在生物学领域，非凡的创新产生了深远的影响：光合作用，脊椎动物的骨架，鸟类的飞行，昆虫传粉，神经信号的传递，不一而足。生命如何为生存问题提供了如此之多的精巧解决方案，对这一问题的研究至今仍很活跃。^⑨如果某事物运转良好，那么随机变化有可能让它变得更糟，而不是更好。在30亿~40亿年间，这些如此复杂而有序的器官或机制——眼睛、大脑、光合作用等——难道仅仅是通过随机变异和自然选择产生的吗？^⑩

Cited by Susan Rosenberg in: Emily Singer, ‘Does evolution evolve under pressure?’, *Quanta* (17 January 2014);
<https://www.wired.com/2014/01/evolution-evolves-under-pressure/>.

T. Dobzhansky, ‘The genetic basis of evolution’, *Scientific American*, 182, 32 - 41 (1950).

近年来，很多科学家已经对此提出了质疑。“简单的概率模型并不足以产生我们今天看到的令人难以置信的多样性。”^⑪与薛定谔同时代的量子物理学家沃尔夫冈·泡利这样写道。就连那些最杰出的生物学家也表达了他们的怀疑。特奥多修斯·杜布赞斯基写道：“对现代演化论最严谨的异议是，既然突变是偶然、不定向的，我们就很难理解突变和选择何以形成如此美妙的对称器官，比如人类的眼睛。”^⑫如果拉马克学说仍然有效，那么很多这类问题将迎刃而解。

J. Cairns, J. Overbaugh and S. Miller, ‘The origin of mutants’, *Nature*, 335, 142 - 5 (1988).

J. Cairns, J. Overbaugh and S. Miller, ‘The origin of mutants’, *Nature*, 335, 142 - 5 (1988).

1988年，一个哈佛大学的生物学家团队宣称，他们发现了“适者到来”的明确例证。由约翰·凯恩斯领导的研究团队大胆断言：“细胞可能有一种机制，用于选择让哪些突变发生。”^⑬细胞可以做选择吗？他们的论文发表在《自然》期刊上，再加上他们来自一个高度权威的实验室，因此这一断言引起了恐慌。为了理解他们的实验，我们可以回顾一下第3章讲述的例子：大肠埃希菌偏爱利用葡萄糖，但如果没有葡萄糖，它们也可以做出转换，去利用不太“合口味”的乳糖。凯恩斯团队研究了大肠埃希菌的突变菌株，这些细菌不能代谢乳糖，但研究人员只给它们提供乳糖这一种食物。他们观察到，有些饿坏了的大肠埃希菌会自发突变为乳糖利用

型。就其本身而言，这一现象与正统的达尔文学说并不冲突，只要上述突变是侥幸产生的就可以。但哈佛大学团队经过研究后得出了这样的结论：大肠埃希菌的突变成功率高得出奇，远超原始概率。研究人员想知道“单个细胞的基因组能否从经验中获益”，^⑤就像拉马克认为的那样。他们暗示答案可能是肯定的，并且正在研究朝着有用目标定向突变的例子。

为了回应公众的骚动，凯恩斯做了一些追踪实验，并回溯了断言中引起哗然的那些方面。但魔鬼已经从瓶子里出来了，他的团队和其他团队随后又做了一系列实验，很多大肠埃希菌因此遭受了葡萄糖剥夺。当尘埃落定时，人们终于明白突变不是随机产生的，研究人员得出的结论是正确的。细菌拥有突变热点，也就是比普通基因的突变速度快几十万倍的特异基因。如果细菌产生多样性是一件有利的事，突变就很容易发生。比如，当这类细菌侵入哺乳动物体内，并与宿主的免疫系统作战时，就会发生这种突变。细菌具有可辨识的表面特征，就像士兵的制服那样。宿主的免疫系统可以根据细菌的外表面细节识别出病原体。能够不断更换“制服”的细菌显然具有生存优势，所以这样的“制服基因”具有高度易变性，这在达尔文学说的拥趸看来是很有道理的。在这种环境条件下，细菌可以演化出某些“应急基因”，它们比其他基因更易发生突变，这意味着突变发生在这些基因的可能性更大。即便如此，基因突变仍然是一件碰运气的事。没有证据表明细菌如凯恩斯最初暗示的那样，“选择”了特异性突变。

Barbara Wright, ‘A biochemical mechanism for nonrandom mutations and evolution’, *Journal of Bacteriology*, vol. 182, no. 11, 2993 - 3001 (2000)

更引人注目的例子涉及这样一类细菌：它们能够选择性地提升合适基因的突变率，从而摆脱困境。蒙大拿大学的芭芭拉·赖特观察过有基因缺陷的可怜的大肠埃希菌的突变体，它们不能合成某种特殊的氨基酸。^⑥我们通常会从食物中获取氨基酸，但如果我们处于饥饿状态，我们的细胞就会自行生产氨基酸。细菌也一样。赖特想知道的是，一个饥饿的、有氨基酸基因缺陷的细菌会如何响应。细菌收到了“现在就需要氨基酸！”的信号，但有缺陷的基因产出的也是有缺陷的氨基酸。细胞能通过某种方式感受到这一危险，并加快特异基因的突变速度。大多数突变都会使情况变得更糟，但在饥饿的菌群中，其中的一员很幸运地发生了合适的突变，修复了基因缺陷，最终拯救了菌落，这种情况发生的可能性很大。这相当于细菌拥有了另一双手。这种有偏突变也被称为适应性突变，因为它使生物体能更好地适应环境。

Susan M. Rosenberg et al., ‘Stress-induced mutation via DNA breaks in *Escherichia coli*: a molecular mechanism with implications for evolution and medicine’, *Bioessays*, vol. 34, no. 10, 885 - 92 (2012).

现就职于美国得克萨斯州休斯敦的贝勒医学院的苏珊·罗森伯格，一直是适应性突变研究领域的先锋。罗森伯格及其同事也想搞清楚，饥饿的细菌如何用这种不可思议的突变方式改变它们的“饮食习惯”，进而延长了生命线。他们把关注点放在DNA双链断裂处的修复上，这是一项永不停息的例行工作，以保持细胞正常运转。有各种方法可用于修复断裂的DNA双链，其中一些效果显著，其他则效果一般。罗森伯格发现，饥饿的细菌能将高保真度的修复过程变得草率凌乱。这导致DNA双链中的一条断裂，有6万个甚至更多的碱基因此离开DNA长链，并构成了一座自我破坏的孤岛。然后，罗森伯格确认了组织和控制这一过程的基因。结果表明，这些基因非常古老。显然，故意搞糟DNA修复工作是一种可追溯至生物史极早期的基本生存机制。通过这种方式产生成群的突变体，菌群就能提升至少有一个子细胞碰巧找到正确解决方案的概率。其余的事就交给自然选择了。实际上，压力重重的细菌可以通过赶紧产生基因组多样性来谋划它们的高速演化。

罗森伯格的实验是否暗示了跟凯恩斯一样的结论，即狡猾的细菌不靠侥幸就能产生“适当”的突变？“适者到来”是不是高效的先见之明？这不是简单的是或否的问题。不过，细胞确实不会在狂暴的突变行动中采取杂乱无章的方式，也就是说突变不会均匀地分布在整个基因组中。罗森伯格确信，存在着某些受到偏爱的突变热点，它们更有可能不靠侥幸，而是通过为所需基因的演化提供空间来摆脱麻烦。但是，不同于芭芭拉·赖特发现的高度聚焦的机制——只针对表达糟糕的、有缺陷的特异基因，罗森伯格发现的突变无差别地影响着所有热点区域的基因，无论它们正在努力制造大量的蛋白质，还是无所事事。从这种意义上讲，罗森伯格发现了一种更基本也更通用的机制。

我们可以做个类比。想象你被困在一栋失火的房子里，你猜测某个地方有一扇可以打开逃生的窗户，是哪一扇窗户呢？也许这栋房子有12扇窗户。一个真正聪明的人会事先了解发生火灾时的逃生程序，以防万一。但你没有这样做。那么，接下来应该怎么做才最明智呢？当然是一扇窗户一扇窗户地尝试了。在缺乏其他信息的情况下，随机抽样程序和其他方法并无差别。真正愚蠢的做法是在房间里完全随机地乱跑，或者躲进橱柜，又或者钻到床底下。有目标的随机性比完全随机更高效。好吧，细菌并非绝顶聪明，但也不是愚不可及，它们会聚集在最有可能产生积极影响的地方。

显然，“压力”一词在这里以及本章接下来的语境中肯定不是指心理状态，而是指以某种方式让细胞或生物体受到威胁或挑战的环境，比如，饥饿或受伤。

Jablonka, *Evolution in Four Dimensions*.

Caporale, ‘Chance favors the prepared genome’.

所有这种魔法般的突变是怎么产生的呢？回想一下，它并不那么令人惊讶。显然，如果涉及的机制灵活多变，并且这些机制本身能演化（演化性的演化），演化

过程就会更顺利。很早很早以前，通过自身的演化摆脱麻烦的细胞具有生存优势。当环境有所要求时，演化—自适应提升机制就会被开启，而当形势大好时又会被回拨，这种机制对生物而言是一种优势。对压力^⑤的适应性响应无疑是一种古老的机制（实际上是涉及一连串过程的一系列机制，从偶发机制到聚焦机制再到定向机制），它能基于良好的生物目的而演化。生物学家埃娃·亚布隆卡将适应性突变描述为一种“知情搜索”。她的结论是：“细胞找到突变解决方案的概率增加了，因为它过去的演化历程已经构建了一种系统，该系统可以为在何时何地产生突变提供智能提示。”^⑥这并不是对达尔文学说的否定，而是对它进行了详尽阐述，理解这一点至关重要。这就是“达尔文学说2.0”。生物化学家林恩·卡波拉尔写道：

“拒绝将完全随机的基因变异视为基因组演化的基底，并不是对达尔文和华莱士的自然选择理论的否定，而是为其提供了一种更深入的理解。”^⑦这些新近的实验带有些许拉马克学说的意味，它们对达尔文学说进行了提炼，即自然不仅选择最能适应环境的生物，还会选择最合适的生存策略。

上述观点阐明了生物是如何利用过去的信息描绘未来的。这些信息既是历经漫长岁月遗传下来的（比如，我在前文探讨的“应急基因”），也来自上一代的表现遗传变化。因此，生命也许可以被描述为一条陡然上升的信息学习曲线。生物不必通过试错法来演化，每一代也无须浪费时间从头开始做重复工作。事实上，它们可以从生命过往的经验中受益，这一进步趋势显然违背了热力学第二定律（该定律讲述了一个关于退化和衰败的故事）。

基因中的麦克斯韦妖

尽管适应性突变令人惊讶，但它们仍然暗示了基因组是外部随机因素引发的打击或愚蠢错误的被动受害者。也就是说，虽然基因组有一定的操控力，但这仍是一个概率事件。假设处于困境中的细胞根本不必依赖外部力量来产生突变，会怎么样？如果这些细胞能够主动操控它们的基因组，又会怎么样？

事实上，它们显然能做到这一点。有性生殖涉及基因组的几次切分和重组，有些重组是随机的，有些则受到监督。在此过程中细胞混合使用多种方法，无论是哪种方法，细胞都会精心地对它们的DNA进行重新“洗牌”。有性生殖并非唯一的例子。要纠正发生在DNA复制过程中的错误，就需要有另一套基因组负责管理。DNA的大多数直接损伤（比如，受到辐射或热干扰后的损伤）绝对不会遗传给子细胞，因为损伤会及时得到修复。人类的DNA会遭受毁灭性的突变损伤，据估计，每一代的总体复制错误率为1%，这还是在未进行内部的“高科技”校对、编辑和纠错的情况下；如果采取了这些操作，错误率就能降到令人难以置信的100亿分之一。所以，细胞能通过监控和主动编辑它们的基因组，达到高保真度，从而努力维持现状。

我们现在遇到了一个迷人的问题：细胞能够主动编辑它们的基因组，从而改变现状吗？在凯恩斯和罗森伯格的研究开展前的几十年间，著名植物学家、细胞生物学家芭芭拉·麦克林托克针对这一问题做了一系列非凡的研究。20世纪20年代，当她还是一个学生的时候，麦克林托克就开始用玉米这种植物做实验，并确定了我们今天知道的染色体结构和组织方式的很多基本性质。她后来还因此获得了诺贝尔生理学或医学奖，也是第一位独享该奖项的女性科学家。在一台普通显微镜的帮助下，麦克林托克看到了暴露在X射线下时玉米染色体发生的变化。她的研究报告引起了轰动，但也遭到了很多批评，以至于1953年她决定停止发布研究数据。她观察到的现象是毋庸置疑的，即当受到辐射时，染色体会断裂成片段。但一个让人大吃一惊的事实是，这些片段通常会以新颖的排列方式被重新接合在一起。就像《鹅妈妈童谣》中的矮胖子一样，它能以一种巴洛克形式重装。明显的染色体重组似乎破坏性极大，事实也常常如此：在有些情况下，突变植物会继续复制它们那被严重修改过的基因组。至关重要的是，麦克林托克发现大尺度的突变绝非随机行为，玉米细胞似乎为它们的基因组被破坏准备了应急计划。更令人惊讶的是，如果植物受到环境压力，比如感染病害或遭受机械损伤，自发性染色体断裂就会发生，而无须X射线干扰；在染色体完成复制后，断裂的片段会重新接合起来。1948年，麦克林托克取得了她研究生涯中最惊人的发现：染色体片段可以转座，即在基因组内改变位置。这种现象就是广为人知的“跳跃基因”（也称“转座子”），颜色为马赛克模式的玉米就是这样产生的。

今天，基因组转座被看作演化过程中的普遍现象。据估计，人类基因组中有多达一半的染色体经历过这种“基因体操”。癌症研究者也很熟悉转座现象。一个得到大量研究的例子是费城染色体（以它的发现地的名字命名），它能够引发人类白血病，因为9号染色体的一段转座到22号染色体上。在某些晚期癌症病例中，染色体可能变得极其错乱，以致几乎无法辨识。染色体被大规模地重排，包括整条染色体被复制，以及孤立的片段取代了健康细胞中的有序排列。有一个极端的例子被称为“染色体碎裂”，即染色体先分解成几千个片段，然后重排成杂乱无章的怪物。

尽管我们勉强承认麦克林托克是正确的，但她的研究结果还是令人不安，因为它们意味着细胞可以主动改变其基因组。显然，她本人也是这样认为的。麦克林托克因为发现了“可移动的遗传因子”而获得诺贝尔奖，她在发表获奖演讲时说道：

Barbara McClintock, ‘The significance of responses of the genome to challenge’, The Nobel Foundation (1984);
http://nobelprize.org/nobel_prizes/medicine/laureates/1983/mcclintock-lecture.pdf.

结论似乎是必然的：细胞能感知到它们的细胞核中断裂的染色体片段的存在，然后激活某种机制，将这些片段一个一个地重新拼接起来……细胞能够感知这些断

裂的片段，指挥它们靠近彼此，然后将它们拼接起来，使两条DNA单链结合而成的双链找到正确的复制方向，这种能力尤为清楚地表明了细胞对于发生在其内部的事物的敏感性……未来的目标是确定细胞对自身的了解程度，以及它遇到挑战时如何有意识地利用这份了解……监控基因组活动和纠正常见错误；感知不寻常或意料之外的事件，并常以重组基因组的方式对它们做出响应。我们已经了解基因组的组分，这使得重组基因组成为可能。然而，对于细胞如何感知危险并做出响应，我们仍然一无所知。 ②

See, for example, Jürgen Brosius, ‘The contribution of RNAs and retro position to evolutionary novelties’, *Genetica*, vol. 118, 99 (2003).

事实上，转座和可移动的遗传因子只是冰山一角。当面对挑战时，细胞有很多“重写”其基因组的方式，就像计算机程序会修复漏洞或升级以执行新任务那样。詹姆斯·夏皮罗年轻时曾与麦克林托克合作，对相关机制进行了全面研究。其中一项研究被称为“逆转录”，即从DNA转录基因序列的RNA，有时能将它的序列逆转录为DNA。在RNA从DNA转录信息之后，有许多修饰RNA序列的机制，所以逆转录为细胞通过修饰RNA来改变自身的DNA开辟了道路。一种已得到详尽研究的特异逆转录基因是BC1 RNA（大脑细胞质RNA 1），它在啮齿动物的神经系统中发挥着重要作用。 ③

如今，科学家已经意识到，逆转录的多样化过程在演化中扮演着重要角色，而且可能解释了人类与黑猩猩之间的大部分基因差异。

信息的反向流动不仅限于从RNA到DNA。由于基因组修复受到细胞中复杂相互作用的控制，因此“修复还是不修复”或“如何修复”的相关决策，可能取决于形成后经过修饰的各种蛋白质。结果是，蛋白质及其在细胞的生命周期中得到的修饰，能够影响基因组的内容；也就是说，表观遗传影响着基因遗传。总之，夏皮罗已经确认了有大约12种不同的机制，使一个在系统层面上运行的细胞可以由此影响自身DNA的信息内容，他将这个过程称作“天然遗传工程”。用一句话概括新达尔文生物学的核心法则，就是信息单向地从惰性的DNA流动到可移动的RNA，再流动到功能性蛋白质。用计算机做类比，达尔文学说中基因组是一种只读数据文件。但是，麦克林托克、夏皮罗和其他科学家的研究打破了这个神话，表明我们更应该将基因组视为一种读写存储系统。

Wagner, *Arrival of the Fittest*, p. 5.

Wagner, *Arrival of the Fittest*, p. 5.

Kevin Laland, ‘Evolution evolves’, *New Scientist*, 42–5 (24 September 2016).

我在本章中阐述的达尔文学说的改进，以某种方式解释了“适者到来”之谜。目前有很多研究案例都暗示存在着不同的机制，其中很多都带有拉马克学说的意味，不过我们还没有发现能够支配这些现象的系统性信息管理规律或原则。然而，我们很容易想象，生物学家正在观察一个在表观遗传层面上完全隐蔽的信息处理系统。“自然的很多创新（有些完美得让人觉得不可思议），呼唤能加快生命创新能力发展的自然法则……”^⑩瑞士演化生物学家安德烈亚斯·瓦格纳写道，“演化远不只是我们眼睛看到的那么简单……适应性不仅由机会驱动，还由一系列规律驱动，这些规律允许自然在随机变异发生的那一点儿时间内，发现新的分子和机制。”^⑪圣安德鲁斯大学的演化生物学家凯文·莱兰是“扩展演化综论”（EES）的提出者之一。“是时候放弃遗传基因是构建我们身体的蓝图这种观点了，”他写道，“基因信息只是影响生物个体的因素之一。生物在其自身及其后代的发育过程中扮演着建设性的积极角色，因此它们会影响演化的方向。”^⑫

Deborah Charlesworth, Nicholas H. Barton and Brian Charlesworth, ‘The sources of adaptive variation’, *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 284: 20162864 (2017).

传统的生物学家不会放弃对这种观点的持续批驳。被视为异端邪说的拉马克学说总能激发盛怒，扩展演化综论也面临充满争议的挑战，因为它宣称表观遗传变化能传递给后代。达尔文学说的“纯正”版本究竟需要得到多大程度的修正，仍是一个颇具争议性的问题。^⑬恰当地说，争论远未结束。

癌症：多细胞生物付出的残酷代价

在数百万年的演化历程中，在单个生物的生命周期内，基因组都发生着深刻的变化。关于后者，最极端的例子就是世界第二大杀手——癌症。尽管癌症令人惧怕，但它为我们了解过去的演化历程打开了一扇引人入胜的窗户。

D. Hanahan and R. A. Weinberg, ‘The hallmarks of cancer’, *Cell*, 100(1): 57 – 70 (January 2000); doi: 10.1016/S0092-8674(00)81683-9, PMID 10647931; and ‘Hallmarks of cancer: the next generation’, *Cell*, 144(5), 646 – 74 (4 March 2011); doi: 10.1016/j.cell.2011.02.013.

癌症没有严格的定义，相反，它的标志性特征大约有12个。^⑭人类的晚期癌症可能表现出其全部特征，也可能只表现出其部分特征。这些特征包括：急速上升的突变率，不受限制的细胞增殖，细胞凋亡（程序性细胞死亡）机制无效，免疫逃逸，血管生成（形成新的供血系统），新陈代谢的变化，以及转移（癌细胞倾向于扩散至全身，侵入远离原发性肿瘤的器官）这个最广为人知的医学难题。

最近，第四种治疗方案（免疫疗法）已经得到大量关注，它通过对身体的免疫系统增压来摧毁癌细胞。早期研究成果显示其前景光明，但要知道这种技术能否产生革命性效果为时尚早。

在生物学领域，癌症是被研究得最多的课题。在过去50年间，有超过100万篇相关论文被刊发。因此，你也许会觉得惊讶，我们竟然还没有就癌症的定义、癌症产生的原因和癌症嵌入地球生命史的方式达成共识。人们很少把癌症理解为一种生物学现象，而是把它视为一种无论如何也要消灭的疾病。世界上大部分的大型研究都致力于对抗癌症，然而，标准的癌症疗法（手术、放疗和化疗的组合）几十年来几乎未曾改变。^④除少数几种癌症以外，癌症患者的存活率仅略有增加，或者完全没有起色。毕竟化疗往往是最后一搏，只能延长数周或数月而非数年的生命。我们不能把这一令人沮丧的事实归咎于缺乏科研经费。自尼克松就任美国总统并在1971年向癌症宣战以来，仅美国政府就在癌症研究方面花费了1000亿美元，慈善机构和医药公司也为此投入了几十亿美元。

C. Athena Aktipis et al., ‘Cancer across the tree of life: cooperation and cheating in multicellularity’, *Philosophical Transactions of The Royal Society B*, 370: 20140219 (2015); <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2014.0219>. Of course, not all species are equally susceptible.

Tomislav Domazet-Lo.o et al., ‘Naturally occurring tumours in the basal metazoan Hydra’, *Nature Communications*, vol. 5, article number: 4222 (2014); doi: 10.1038/ncomms5222.

研究几乎没有进展，也许是因为科学家看待癌症问题的方式错了？关于癌症，存在着两种常见的误解，即癌症是一种“现代病”，而且主要危害人类。这些都不是真相。癌症或癌性现象能在几乎所有的哺乳动物、鸟类、爬行动物、昆虫甚至是植物身上找到。雅典娜·阿克提皮斯及其合作者的研究表明，癌症或癌性现象存在于所有多细胞生物中，包括真菌和珊瑚（见图13）。^⑤癌症实例甚至可以在低等动物水螅身上找到。^⑥

多细胞生物独立出现过好几次，但真正的多细胞生物仅限于真核生物。然而，细菌可以大量集聚，菌落有时会显示出类似癌症的现象。

癌症在物种间的分布如此广泛，这一事实指出了它的古老演化起源。比如，人类和苍蝇的共同祖先可以追溯到6亿年前，而癌症易感生物这个更广泛类别的收敛点可以追溯到10亿年前。这意味着癌症一直伴随着多细胞生物（后生动物），而且是合情合理的。不言而喻，癌症是一种身体疾病，所以说单个细菌患有癌症是不合逻辑的。但是，“身体”并非一直存在。在长达20亿年的时间里，地球生命只有单

细胞生物；大约15亿年前，第一种多细胞生物出现，这个地质年代被称为元古代（Proterozoic，在希腊语中的意思是“更早期的生命”）。

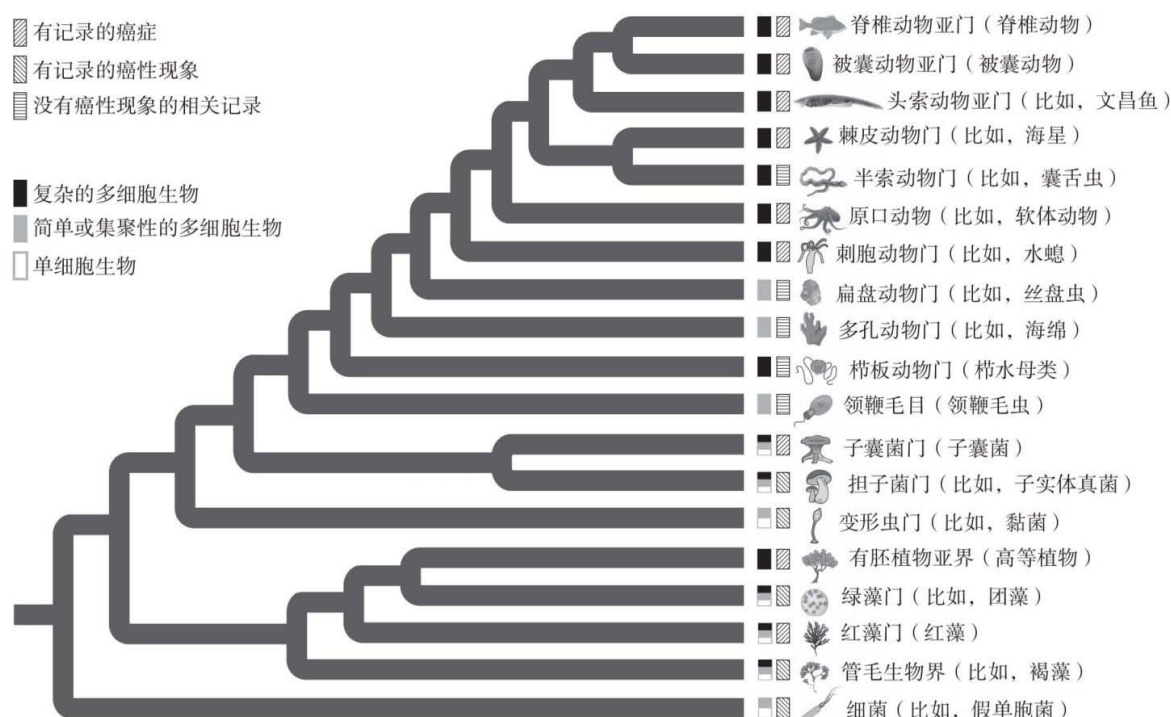


图13 几乎遍布生命树的癌症或癌性现象

图片来源：修改自C. Athena Aktipis et al., Cancer across the tree of life: cooperation and cheating in multicellularity, Philosophical Transactions of The Royal Society B, 370: 20140219 (2015), 经过原作者同意。

这会是何时呢？就是当染色体末端的称为端粒的“小帽子”磨损殆尽时。

生命从单细胞形态向多细胞形态的转换，势必带来生命逻辑的根本性改变。在单细胞生物的世界里，只有一种命令：复制，复制，复制！从这种意义上说，单细胞生物是永生的。然而，多细胞生物完全不同。永生已被“外包”给专门的生殖细胞（比如精子和卵子），它们的工作就是将生物的基因传递给后代。同时，作为这些生殖细胞的载体，多细胞生物的身体也与单细胞生物表现得完全不同，前者终将死亡。身体的细胞（体细胞）保留了它们过去永生状态的微弱回声，即有限的复制能力。比如，一个典型的皮肤细胞能分裂50~70次。当一个体细胞到达其使用期限时，它要么休眠（衰老状态的一种），要么自杀（细胞凋亡）。但这并不意味着

它所属器官的终结，因为同样类型的置换细胞将由干细胞制造出来。但最终置换过程也会停止，生物体因此死亡，只留下种系后代（如果有）将基因遗产传递下去。

既然在短暂的爆发性复制后就会死亡，为什么任何一个“心智正常”的细胞还要参与多细胞生物的生存呢？在伟大的演化生存游戏中，这种做法有可能获得什么优势？生物学领域中，总是存在着权衡。通过加入基因相似的细胞群，一个特定细胞可通过生殖细胞为大多数基因的传播做出贡献。如果作为整体的细胞群拥有个体细胞不具备的生存功能，基因遗产的算法就会偏向于群体而非个体细胞。当算法看起来正确时，个体细胞和生物体之间就会达成协议。个体细胞加入“集体项目”并死去，而作为回报，生物体会承担起传播个体细胞中基因的责任。因此，多细胞生物中隐含着生物体与其个体细胞成员达成的“契约”，这份契约早在超过10亿年前的元古代就签订了。

多细胞生物是一个好创意，它是人类产生的基础；但它也有劣势。当个体加入群体共同努力时，就容易出现欺骗行为。这是人类社会的常见现象，人们从有组织的政府那里获得国防、福利救济和基础设施等生存福利，但也需要为此纳税。众所周知，总有人意图骗取福利而逃避纳税。这种现象遍布世界各地。为了解决这一问题，政府制定了重重规则（比如，澳大利亚的税法长达100万词；在美国，税收法规复杂得超乎想象）。然后，政府和执法机构监督这些法规的实施。尽管进行了精心设计，但税收系统仍不完善，骗子和执法者之间展开了“军备竞赛”——互联网诈骗和身份盗用是当下的典型例子。在多细胞生物体内，也会上演类似的军备竞赛。为了让个体细胞遵守契约，就必须进行层层调控，并且由生物体来监督，从而阻止欺骗行为。因此，一个特定的体细胞（皮肤细胞、肝细胞、肺细胞等）通常只在规则允许的情况下发生分裂。当需要更多个这种类型的细胞时，细胞内部的“复制程序”会自行处理。但如果分裂不当，调节机制就会出面干预，阻止它分裂；如果该细胞抗命不遵，调节机制就会判处该细胞死刑（细胞凋亡）。关于严格执法的案例之一，发生在当个体细胞发现其处于错误的组织环境中时。比如，如果一个肝细胞被偶然间运送到或有意移植到肺部，那么这个细胞在肺部不会过得好。来自肺部组织的化学信号识别出，它们这里有一个闯入者（“它不是我们中的一员！”），并可能判处这个闯入者死刑。

在多细胞生物中，对个体细胞来说欺骗行为意味着什么呢？它意味着这个细胞默认采取单细胞生物的利己策略：复制，复制，复制。换句话说，就是不受控制的细胞增殖或癌症。简单来说，癌症是体细胞和生物体之间的古老契约被破坏了，每个细胞都回到了更原始、自私的生存状态。

为什么执法行动会失败？原因有很多，其中显而易见的一个是，“警察基因”受到辐射或致癌化学物质的破坏。有一组可以抑制肿瘤的基因，其中最广为人知的是 *p53* 基因。如果 *p53* 遭到破坏，肿瘤就有可能不再受到抑制。另一个触发因子是

免疫抑制。获得性免疫系统的职责包括监控癌症。如果该系统正常运行，就能发现初期的癌细胞，并在造成麻烦之前杀死（或监禁和抑制）它们。但癌细胞可以用化学手段掩藏自己，从而躲避免疫系统的监控。它们还能招募“侦察兵”（巨噬细胞），让这些“侦察兵”像被俘虏的间谍一样为它们效力，进而破坏免疫系统。肿瘤相关巨噬细胞（TAM）会庇护肿瘤，并阻挠免疫系统攻击癌细胞。

癌症的发生有两个必不可少的条件：一是正常细胞采取欺骗策略，二是生物体内的监控系统在某处失效。常规的解释是体细胞突变理论，根据该理论，衰老、辐射或致癌化学物质导致细胞行为不端、我行我素，所以基因损伤在体细胞中不断累积。结果，赘生物或者说新细胞种群会迅速发展出（这是正统理论的说法）我在前文中提到的显著特征，包括不受控制的细胞增殖，以及癌细胞扩散至全身和侵入远端器官的趋势。体细胞突变理论假定，在每个宿主中，仅通过某类快速的达尔文自然选择过程就能使相同的癌症特征从头再造，在此过程中最具适应性的（也是最凶险的）癌细胞会通过失控式复制战胜其竞争对手，最终杀死宿主（和它们自己）。尽管地位牢固，但体细胞突变理论几乎没有预测力，它的解释与基于个例编撰的“原来如此”的故事差不多。更糟糕的是，它不能解释突变何以在如此短的时间内（是的，再次强调这一点），赋予单一赘生物如此多的提升其适应性的功能增益。不断增加的基因损伤和缺陷，使一个赘生物获得如此强大的新功能和如此多的可预测特征，这似乎也是自相矛盾的。

追踪癌症的深层演化根源

Paul C..W. Davies and Charles H..Lineweaver, ‘Cancer tumours as Metazoa 1.0: tapping genes of ancient ancestors’ , Physical Biology, vol. 8, 015001 – 8 (2011).

与前文中一样，这里所说的“压力”是指一种有威胁性的微环境，比如致癌物、辐射或缺氧。“心理压力大会可能会患癌症”这一广为传播的观点，与我在这里所探讨的物理压力没有显著的关联。

在过去几年里，我和我的同事追溯了癌症在遥远过去的起源问题，并提出了一种有些许不同的解释。^②我们惊讶于一个事实，即癌细胞几乎从无新故事。相反，它只是盗用了宿主生物的既有功能，其中许多功能都是非常基本和古老的。比如，无限制增殖就是几十亿年来单细胞生命的基本特征。毕竟，生命的延续需要复制，而细胞可以在几十亿年间学习如何持续面对各种威胁和挑战。癌细胞转移是指通常固着的细胞变得可移动，离开肿瘤并扩散至全身的过程。这类似于胚胎发生早期的情况：未成熟细胞通常不会锚定于一个位置，而是以有序的模式大量出现在各个指定位置上。循环的癌细胞倾向于侵入其他器官，这与免疫系统使伤口愈合时所做的事非常相似。这些肿瘤学家深谙的事实，加上癌症在不同阶段的可预测、高效进展方式，使得我们相信，癌症不是受损细胞随机杀死正常细胞的情况，而是一种古老

的、井然有序的对生存压力的有效响应。^⑫至关重要的是，我们认为癌症的各种显著特征并不是随着赘生物的出现独立演化而来的（这意味着这些特征是偶然出现的），而是被有意开启的，并且被系统性地用作赘生物的有序响应策略的一部分。

触发因素和根本原因之间的区别就好比运行一个基本又常用的计算机软件包，比如，微软的文字处理软件（Word）。“打开”命令触发了文字处理软件，但使这一现象发生的根本原因在于文字处理软件，这种软件在计算机产业早期就已经出现了。

总之，我们关于癌症的观点是：它不是损伤的产物，而是对损伤性环境的系统响应——一种原始的细胞防御机制。癌症是细胞应对恶劣环境的一种方式。它可能被突变触发，但它的根本原因是对应急生存程序的一种古老深嵌式工具箱的自我激活。^⑬这两种理论的关键区别可以用一个类比来阐述。对一个在操场上受到欺侮的孩子来说，他的生存策略就是逃跑。这种行为是自我驱动的，攻击者的推搡和拳头会触发受欺侮者的逃跑行为，但这不是让受欺侮者逃跑的根本原因——他不是被推跑的，而是自发跑掉的。再来看另一个类比。如果一台计算机遭到攻击（可能是由于软件损坏或受到机械打击），它就会启动安全模式（见图14）。这是一种默认程序，使计算机在受损的情况下仍能运行其核心功能。同样，癌症也是一种默认状态，受到威胁的细胞会运行其古老的核心功能，由此保存它的重要功能，其中增殖是最古老、最重要和最受保护的功能。触发癌症的威胁不一定是辐射或化学物质，也可能是组织老化、低氧张力或各种机械压力，包括受伤（甚至是电子干扰）。有很多因素可以单独或共同导致细胞采取它内置的“癌症安全模式”。

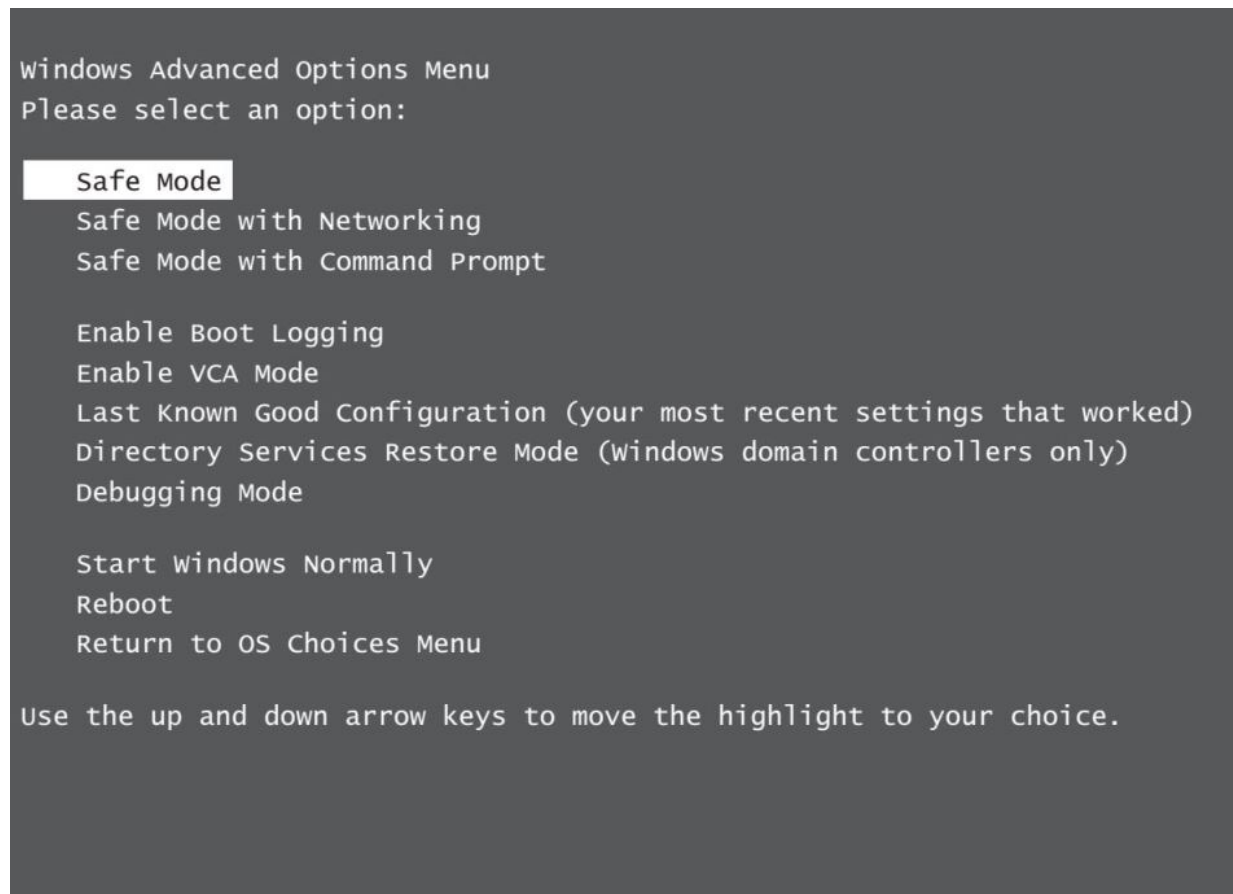


图14 选择安全模式的界面

当遇到启动问题时，你的计算机屏幕上可能会出现类似的信息提示。它表明有某种损坏导致计算机操作系统只能运行其核心功能，直到问题被解决。癌症可以做类似的事情，运行默认的核心功能（这种功能是从十几亿年前演化来的），同时忽略或者禁用某些新近演化出来的附加生物功能。

尽管癌症默认程序的要素非常古老，可追溯至生命的起源，但有些更精致的特征是在演化过程后期出现的，尤其是在6亿~15亿年前，那时原始的后生动物刚刚出现。在我们看来，癌症是一种返祖现象或默认的祖先形态；用专业术语来表达，它是一种返祖表型。由于癌症深植于多细胞生命的逻辑，因此它的古老机制得到了非常好的保存，与它作战注定是一项艰巨的挑战。

我们的理论做出了很多具体的预测，比如，我们预期那些与癌症有因果关系的基因（通常被称为癌基因），在多细胞生物出现的时期大量聚集。对此我们有任何证据吗？是的。通过比较许多物种的基因差异的数量，我们有可能依据基因序列数据估算出基因的年龄。这一屡试不爽的技术被称为“演化年龄层学”

（phylostratigraphy，也称系统基因分层），科学家可借此重构生命树，从今天的共同特征进行倒推，演绎出它们在过去的收敛点（见图15）。

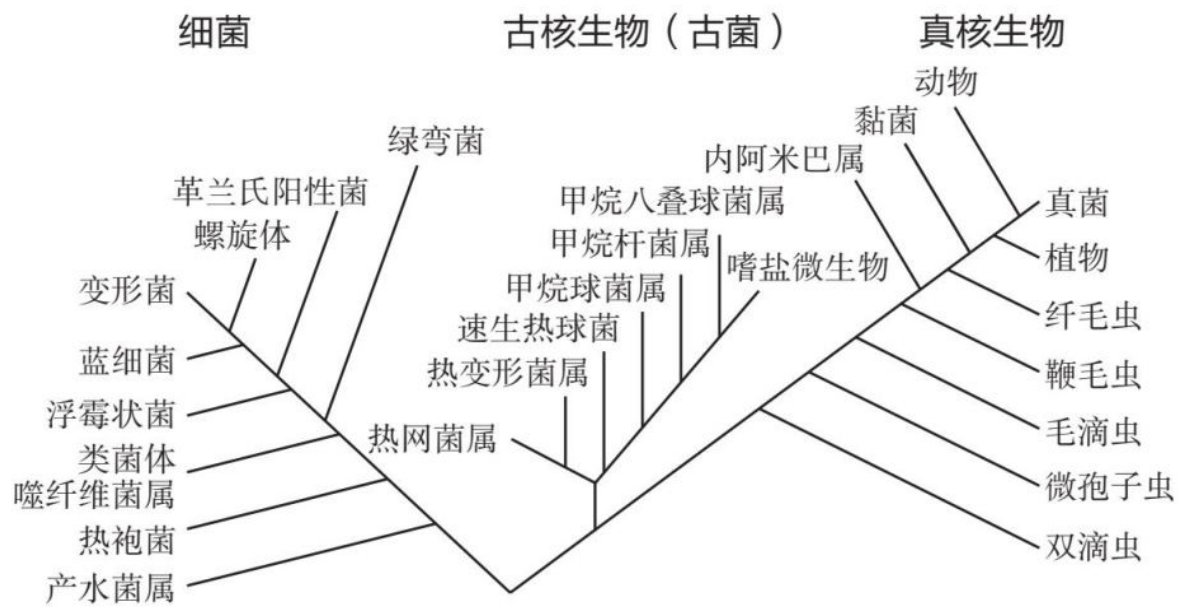


图15 追溯生命树的历史

自从达尔文率先画出生命树，用于表示随时间推移发生的物种分化，生物学家便开始尝试用化石记录重构生命史。现在，他们也在使用一种叫作“演化年龄层学”的技术，依据多物种的基因序列来判定它们远古时期的共同祖先。图中的生命树展示了由一个共同的远古起源分化而来的三大生命域。线段的长度表示遗传距离。这棵生命树的最后一个共同祖先生活在35亿年前。

Tomislav Domazet-Lo.o and Diethard Tautz, ‘Phylostratigraphic tracking of cancer genes suggests a link to the emergence of multicellularity in metazoa’, BMC Biology, 20108:66 (2010); <https://doi.org/10.1186/1741-7007-8-66>.

Anna S..Trigos et al., ‘Altered interactions between unicellular and multicellular genes drive hallmarks of transformation in a diverse range of solid tumors’, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol..114, no. 24, 6406 - 6411 (2017); doi: 10.1073/pnas.1617743114; see also Kimberly J..Bussey et al., ‘Ancestral gene regulatory networks drive cancer’, Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 114 (24), 6160 - 62 (2017).

在德国进行的一项研究使用了4个不同的癌症基因数据集，结果表明这些基因的标记峰值出现于后生动物开始演化的时期。^⑤最近，澳大利亚墨尔本的戴维·古德和安娜·特里格斯领导了一项关于7种肿瘤的分析研究，重点关注基因表达。^⑥他们根据演化年龄将基因分为16个组，然后比较每组基因在癌组织和正常组织中的

表达水平。结果很惊人，正如我们预测的那样，超表达的癌基因归属于两个年代久远的组别，而低表达的基因则归属于年代较近的组别。此外，他们还发现随着癌症发展到更具攻击性的危险阶段，更为古老的基因表达水平更高。这证实了我们的观点，即癌症在宿主生物体内的发展能快速逆转演化之矢，让细胞在数周或数月内回归其原始祖先的形态。从更一般的意义上讲，澳大利亚研究小组发现，相较于后来在多细胞生物年代演化产生的基因，与单细胞生物有关的基因在癌细胞中的活性更强。

Luis Cisneros et al., ‘Ancient genes establish stress-induced mutation as a hallmark of cancer’, PLoS ONE; <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176258> (2017).

在该研究中，它是指被证明与癌症的产生存在因果关系的基因。

我们在亚利桑那州立大学进行的相关研究中，考察了基因的突变率。^⑤返祖理论预测，年代越久远的基因在癌细胞中发生突变的概率越低（毕竟它们的职责是运行“安全模式”程序），而年代越近的基因在癌细胞中发生突变的概率越高。我的同事金伯莉·伯西和路易斯·西斯内罗斯考察了总计19756个人类基因，并使用了英国桑格研究院汇编的被称为“COSMIC”（癌症体细胞突变目录）的数据库。他们把这些数据与包含大约1.8万个物种基因序列的数据库结合起来，其中基因序列数据库涵盖所有生物分类群，可以进行演化年龄分析。这使得我的同事能够预测人类基因组中的基因演化年龄。他们发现，产生于距今5亿年间的基因的确更有可能发生突变（在正常组织中是这样，在肿瘤组织中尤其如此）；而正如我们预期的那样，10亿年前产生的基因发生突变的概率低于平均水平。他们还证实了德国的研究结果，即癌基因^⑥的产生时间可追溯至多细胞生物出现之时。这一研究成果支持了我们的看法：癌症是由功能破坏驱动的，正是这些功能演化产生了多细胞生物。COSMIC数据库将基因分成了显性和隐性，我的同事发现，隐性突变癌基因的演化年龄显著长于大多数人类基因。

用专业术语来描述，它们被称为细菌中那些基因的“种间同源基因”。

最强有力的研究成果来自一个完全不同的问题：癌基因对生物体有什么益处？一个名叫“DAVID”（注释、可视化和集成发现数据库）的基因注释工具根据功能对基因进行分类。当西斯内罗斯和伯西将COSMIC的数据输入DAVID时，显示的结果是9.5亿年前产生的隐性癌基因在两种核心功能上得到强化：细胞周期控制和DNA双链断裂损伤（DNA遭受的最严重的损伤）的修复。通过考察基因的演化史，研究人员有了重要发现。在相同的DNA修复途径中，非突变基因^⑦相当于细菌中的那些驱动对压力做出响应的适应性突变的基因。就像在细菌中一样，这些基因的作用是通过演化出一种摆脱困境的途径，竭力增加细胞的突变率，帮助它们生存下去。我在前文中解释过苏珊·罗森伯格的发现：当细菌感知到DNA双链断裂时，它会切换至

草率凌乱的修复机制，在断裂的双链中任何一条上制造出一连串错误（突变）。我们很想知道，癌细胞是否也会在双链修复期间切换至破坏模式？答案是肯定的。我的同事研究了分属7种不同癌症（胰腺癌、前列腺癌、骨癌、卵巢癌、皮肤癌、白血病和脑癌）的764个肿瘤样本，其中有668个肿瘤样本在DNA断裂处周围出现了突变癌基因聚集的现象。这与我们的理论完全相符，即受压细胞会通过重新唤醒祖先基因网络，产生高突变率，从而发生癌变。因此，癌症最为人熟知的特征之一就是自我伤害（这也是它为什么常能通过演化出抗药性变体而让化疗失效）。这一研究成果也很好地印证了返祖理论：癌症只是盗用了古老的应激反应机制，今天细菌仍在使用这种机制，其演化起源可追溯至单细胞生物。

Amy Wu et al., ‘Ancient hot and cold genes and chemotherapy resistance emergence’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 33, 10467 – 72 (2015).

增变基因：可提高基因突变率的基因。——编者注

正如面临生存压力的细菌那样，癌细胞的突变也不是随机的，而是存在着确定的突变“热点”和“冷点”（突变率低的区域）。这很有道理。多细胞生物应该努力保护其基因组的关键部分，比如，那些负责运行细胞核心功能的基因；同时，在与新近演化产生的不太重要的性状有关的附加功能上投入较少的资源。由普林斯顿大学的罗伯特·奥斯汀和埃米·吴领导的研究项目，把癌细胞放在治疗性毒素（阿霉素）中，并研究它们对这种药物的抗药性的演化情况。他们发现，冷点基因的演化年龄显著长于平均水平。^②这些新的研究结果有助于解释，为什么自然选择没有消除癌症这种祸害。如果肿瘤真是一种回归祖先形态的方式，我们就可以预期，驱动癌症的古老路径和机制具有最强的保护和保存能力，因为它们能实现生命最基本的功能。如果还没有灾难降临到相关细胞身上，生物就不可能摆脱这些路径和机制。我们研究的增变基因^③就是一个例子。

George Johnson, ‘A tumor, the embryo’s evil twin’, *The New York Times*, 17 March 2014.

演化未能消除癌症的另一个原因与胚胎发生有关。30年前，我们发现有些癌基因在胚胎发育过程中扮演着重要角色，如果消除这些基因就会导致灾难性结果。通常来说，这些发育基因会在成年生物体内保持沉默，但如果有什么东西把它们唤醒了，就会引发癌症，这好比成体组织中出现了胚胎发育差错。关于这一点，作家乔治·约翰逊概括得很到位，他把肿瘤称为“胚胎的邪恶孪生兄弟”。^④显然，胚胎的早期发育阶段就是制订生物的基本形体计划的过程，代表多细胞生物的最早阶段。由于细胞概述了胚胎发育早期面临的大不相同的环境，当癌基因的开关开启时，信息流的基因和表观遗传调节物都会受到系统干扰。这种干扰既涉及调节基因之间连接方式的变化，也涉及基因表达模式的变化。我们的研究团队正在尝试寻找

这些变化的信息标记。我们希望，除了确认我在前文中提到的癌症的物理特征，也有可能确认癌症独特的信息特征。这种信息特征就像一种癌症的软件指示器，能在细胞和组织形态的临床变化被注意到之前，就预测到癌症的发生并做出预警。

癌症的返祖理论不仅对癌症的诊断来说很重要，对于治疗也有重要意义。我们认为寻求通用的癌症治愈方案只是在浪费时间和金钱。在意识到癌症深植于多细胞生物的本质之后，我们就能通过创造不利于它那古老的返祖生活方式的条件，向癌症发起挑战，更好地管理和控制（而不是消除）癌症。当面对这类致命性疾病时，只有充分理解癌症在整个演化史中的位置，才会对人口预期寿命产生重大影响。

鬼魅般的量子 and 生命

人们常说，无论人类的发明有多么精巧，大自然的发明总是更胜一筹。在人类发明轮子、水泵、剪刀和棘轮之前，大自然早就在生物学领域发明了具有类似功能的东西。但这些还不是全部。早在人类发明计算机的几十亿年前，大自然就发明了数字信息处理工具。今天，我们正处于一场新技术革命的前夕，这场革命将会带来像数字计算机诞生后一样巨大的变化。我所说的革命就是人们一直在苦心研究的量子计算机。

Richard Feynman, ‘Simulating physics with computers’,
International Journal of Theoretical Physics, vol. 21, 467 - 88
(1982).

理查德·费曼于1982年在加利福尼亚大学伯克利分校发表的一场题为《用计算机模拟物理学》的演讲中，提出了量子计算机的基本概念。^②费曼指出，当普通计算机被用来给分子等量子力学对象建模时，它们很难拿出充足的计算资源来追踪每件事。然而，费曼猜测一台（当时还是假想的）量子计算机可以完成这项任务，因为它可以模拟量子世界的事物。1985年，牛津大学物理学家戴维·多伊奇进一步发展了量子计算理论，并提出了明确的规则，据此规则能把信息书写在原子和亚原子等微观物理系统的量子态中，然后就可以运用量子力学的标准定律来操控这些信息了。

量子计算机的秘密在于“叠加”。在一台普通（经典）计算机中，开关要么开要么关，并分别用“1”和“0”表示。而在一台量子计算机中，这两种状态可以同时出现，因此其开关可以同时表示为“1”和“0”。这种“1”和“0”的叠加不是仅指两个数字各以50%的比例混合，而是指各种可能的混合。物理学家把这种实体称为“量子比特”（又称“量子位”）。你只需要让几十个量子比特纠缠在一起，原则上就可以创造出一台优于最好的普通计算机的设备。

没过多久，物理学家就开始争先恐后地研制量子计算机了。今天，加快开发和营销功能完善的量子计算机，是涉及全球多国政府和多个商业研究机构的价值数万亿美元产业的主要目标。之所以要投入巨额资金，是因为量子

计算机能释放出惊人的计算能力。它不仅能详细地模拟原子和分子过程，还能破解我们在大多数通信过程中设置的密码，并能以极快的速度对庞大的数据库进行分类整理。如果它能得到广泛使用，普通计算机的安全性就会成为一个笑话。量子计算机将对情报服务、外交通信、银行交易和网上购物造成威胁，事实上，在线的任何要求加密的信息都会受到威胁。

但是，量子计算与生命有什么关系呢？在生物学领域，最重要的东西是信息管理。考虑到生命如此擅长操控数字信息，难道它不会学着操控量子比特吗？人们已经给出了很多类似的断言。尽管没有多少证据表明生物参与了真正的量子计算，但越来越显见的是，生命的确利用了某些量子效应。

怪诞的量子理论

我们现在知道，量子力学并不允许超越光速的通信，所以爱因斯坦的反驳有些无力。

爱因斯坦曾将量子效应描述为“如鬼魅一般”。事实上，他眼中的量子效应如此诡异，以至于他坚持认为量子力学对自然界的解释是有瑕疵的。量子力学似乎与爱因斯坦珍视的相对论相互冲突，因为它允许信息超越光速传播；^②而且，“不确定性和非决定论主宰了基本的自然现象”的观点也让他觉得不自在。今天，很少有物理学家会认同爱因斯坦的这种看法。量子力学虽然如鬼魅一般，但它已成为主流的物理学理论。毕竟，该理论不仅解释了从亚原子粒子到恒星尺度的几乎所有事物，还为我们带来了必不可少的技术，比如激光、晶体管和超导体。问题不在于量子力学拥有解释世界和驱动21世纪蓬勃发展的产业的非凡力量，而在于它对现实的本质做出了相当怪诞的解释。

试着想象如下场景：

- 你将一个网球扔向一扇玻璃窗，球弹了回来。你又扔了一次，力度和方向跟之前完全一样，但网球在没有打破窗玻璃的情况下出现在玻璃的另一侧。

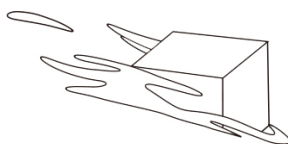
- 你对准袋口击打台球。它滚到洞口边缘，却没有掉进袋里，而是朝你弹了回来，就好像袋口边缘附近有一堵看不见的墙。

· 一个球正沿着马路上的一条排水沟朝十字路口滚去。当它到达那里时，在没有任何侧向力作用的情况下，它自己拐了弯。

对这一反复提及的描述，我们必须进行谨慎的解释。电子并不是真的同时处于两个位置。任何旨在探测其准确位置的实验总会发现它要么处于这个位置，要么处于那个位置；但如果未进行探测，就存在明确的物理效应，表明它所处的位置不确定。

如果这些事件发生在日常生活中，将被视为奇迹，但它们一直在量子物理学领域的原子和分子层面上发生。还有一些怪异的量子效应也是我们在日常生活中看不到的，比如，电子等粒子似乎可以同时处于两个位置，^①相隔几米的一对光子可以自发协调它们的活动（爱因斯坦称之为“鬼魅般的超距作用”）；一个分子可以同时进行顺时针自旋和逆时针自旋。关于这些奇特而真实的量子效应的书有许多，但在这里我只关注一个问题：鬼魅般的量子效应会在生物学领域发生吗？

在微观层面上，所有生物都是量子。毕竟，生命是由化学物质构成的，并且分子的形状、大小和相互作用都需要用量子力学来解释。然而，一旦说到量子生物学，人们就不会这样想了。我们真正想知道的是，隧穿效应（网球穿过窗玻璃的效应）等非凡的量子过程，或者量子纠缠（鬼魅般的超距作用）是否在生命中扮演着重要角色。



迷箱11

它是波还是粒子？不，它是量子！

量子物理学的开创性发现之一是，波有时表现得像粒子。1905年，爱因斯坦率先提出了有关这个观点的假说：光作为一种波，只以光子这种离散包的形式交换能量。反过来，我们通常将电子视为粒子，它们有时表现得像波（所有物质粒子皆如此）。薛定谔写出了描述物质波行为的方程，这种“波粒二象性”正是量子力学的核心。很多令人惊讶的量子效应，比如我前面提到的三个与球有关的场景，都要归因于物质的波属性。争论一个光子或电子到底是波还是粒子毫无意义，实验已经表明，任何一种情况都有可能出现，

但还没观察到两种情况同时出现。人们只需要接受这样一个事实：微观世界的“居民”在日常生活中没有对应物。

1英尺 $\approx$ 0.3米。——编者注

量子波扩散和合并的方式对其物理意义有着重大影响。想象一下，将两块石头一起扔进平静的池塘，它们之间相隔几英尺^{①②}。每块石头都会激起涟漪，而且它们的涟漪会相互重叠。当一块石头的波峰遇到另一块石头的波峰时，它们会增强为更高的波峰。而当一个波峰遇到一个波谷时，两者则会相互抵消。如果没有任何事物干扰，两个波合并后产生的交错波形被称为“相干”。但我们现在假设有一场雹暴在池塘中激起了很多额外的涟漪，这两块石头形成的有序波形就会受到干扰，这被称为“退相干”。说到量子物质波，许多怪诞的量子效应都来自波的相干性。如果相干性消失了，那么大多数非凡的量子效应也会消失。就像水波那样，电子波如果受到干扰，就会发生退相干。生物中的电子不会遭遇雹暴，但它们不得不与“分子风暴”抗争，比如，水分子造成的不间断的热轰击。粗略的计算表明，在大多数的生物条件下，退相干发生得极快。但在某些特殊环境中，似乎存在着例外情况，允许发生反常的慢速退相干。

一般来说，如果某种事物为生命提供了一种优势，哪怕只是轻微的优势，自然选择也会利用它。如果某种“量子事物”能让生命变得更快速、更经济、更优质，我们就可以期待演化会偶然发现它并选择它。然而，我们很快就陷入了这种肤浅的推理造成的麻烦。量子效应是原子和分子秩序的一种微妙、精巧的形式。所有量子效应的敌人都是无序，但生命充满了无序！被随机激发的分子会不可避免地喧嚣，从而对热力学第二定律造成普遍性破坏，到处都是熵！只有在非常特殊的环境中，非凡的量子效应才能在面对这种不可避免的热噪声时得以幸免。参观任何一个研究量子现象的实验室，你都会看到光洁明亮的钢室、闪烁的电子设备、嗡嗡作响的低温恒温器、大量的导线和管、精心排布的激光束，还有计算机。配置众多昂贵、高精度和精细调谐的设备，其主要目的就是减少热骚动造成的干扰：要么通过屏蔽热骚动，使相关量子系统与环境隔离开来；要么将相关事物都冷却至接近绝对零度（大约零下273摄氏度）的温度。大量资金已经投入了量子计算机产业，用于消除一直存在的热干扰威胁。但事实证明，这极其困难。

考虑到物理学家要规避热噪声效应还有很长的路要走，任何鬼魅般的事物还将继续存在于混乱且温度较高的生物体中，这似乎令人难以置信。细胞中蛋白质的温度远高于我们所能想象的孤立的低温系统。但不要忘了麦克斯

韦妖的存在。这种由麦克斯韦精心设计的系统，能在混沌中创造秩序，也能违背热力学第二定律并规避熵的腐蚀效应。尽管我们知道，即便是麦克斯韦妖也不可能违背字面意义上的热力学第二定律，但它肯定可以违背实际的热力学第二定律。生命中充满了麦克斯韦妖。在它们的精妙把戏中，它们是否有可能已经学会了如何蒙骗比特和量子比特，其手法之灵巧就连我们目前技术最尖端的实验室也无法比肩？

隧穿效应

我在亚利桑那州立大学的同事斯图尔特·林赛是一位实实在在的量子生物学家。他重点研究电子如何流过有机分子，尤其是因DNA而为人熟知的A、C、G、T这4种碱基。在他的实验室中，研究人员精通的一种方法是将DNA双螺旋结构解体为单链，然后像吸意大利面条一样，让其中一条单链穿过一个盘子上的微孔（纳米微孔），微孔的两侧安装了一对微型电极。当每个碱基通过微孔时，电子就会穿过它，从而制造出一个微电流。幸运的是，事实表明每种碱基的电流强度和特征都不同，而且其差别是可辨识的，因此林赛的装置可用作高速测序设备。他还发现，氨基酸是电的良导体，这为蛋白质直接测序开辟了道路。

当林赛第一次向我描述他的研究时，我承认自己备感困惑，因为我不知道究竟为什么有机分子可以导电。毕竟，我们使用的橡胶和塑料之类的有机物都是绝缘体，即电的屏障。乍看起来，我们很难理解电子如何找到穿过核苷酸或氨基酸的路径。事实上，答案就存在于被称为隧穿效应（“网球穿过窗玻璃”效应）的奇特量子现象中。即使电子没有足够的能量越过屏障，它们也能穿过屏障。当然，要不是因为电子具有物质波的属性（见迷箱11），它碰到有机分子时就会被弹回来。薛定谔在20世纪20年代提出著名的物质波的波动方程，预言了隧穿效应的存在，相关例证也很快就被发现了。一种名叫 α 衰变的放射性衰变在19世纪90年代首次被观测到，要不是因为隧穿效应，即被发射的 α 粒子隧穿了铀和其他放射性物质的核力屏障，我们就无法理解这一现象。在电子学和材料科学领域，电子隧穿效应为诸多技术的商业化应用奠定了基础，包括重要的扫描隧道电镜。

Harry B. Gray and Jay R. Winkler, 'Electron flow through metallo-proteins', *Biochimica et Biophysica Acta*, 1797, 1563 - 72 (2010).

斯图尔特·林赛能让电子穿过有机分子，自然界也可以做到这一点吗？的确可以。有一类被称为“金属蛋白”的分子，基本上就是将铁等金属原子置于蛋白质中形成的（一个众所周知的例子就是血红蛋白）。金属是良导体，因此它可以让蛋白质导电。隧穿有机分子的现象事实上相当普遍，这就提出了一个奇特的问题：电子为什么想穿过蛋白质呢？一个原因是，这么做有利于新陈代谢。与氧合作用及至关重要的能量分子ATP的合成有关的酶，都依赖于快速的电子传递。灵巧的电子隧穿对生命产能机器的轮子起到了润滑作用，这不仅仅是一种幸运的巧合，这些有机分子一直在经受演化的磨炼。至少根据加州理工学院贝克曼研究所的哈利·格雷和杰伊·温科勒的说法，电子无法隧穿任何混乱的有机分子，而“适合隧穿的有机分子必须满足严格的设计要求，即能快速高效地沿着特定途径传递电荷，并阻止它们偏离路线……以及规避能量流的干扰”。^⑩

Gábor Vattay et al., ‘Quantum criticality at the origin of life’, Journal of Physics: Conference Series, 626, 012023 (2015).

Gábor Vattay et al., ‘Quantum criticality at the origin of life’, Journal of Physics: Conference Series, 626, 012023 (2015).

尽管所有这些都是非常有趣的物理现象，但还有一个引人入胜的更大问题：一般来说，具有高效量子隧穿能力的生物分子，是否更易于被演化过程选择而保存下来？匈牙利罗兰大学的加博尔·沃陶伊及其合作伙伴所做的分析表明，“量子设计”可能并不局限于新陈代谢，而是一种通用的生物学特征。^⑪他们通过研究关键生物分子在导体和绝缘体谱系中的位置，得出了这个结论。他们宣称已经发现了一类新导体，它们占据了绝缘体和无序金属材料之间的关键相变点；许多重要的生物分子显然都属于这一类。用沃陶伊等人的话说，睾酮、孕酮、蔗糖、维生素D₃和咖啡因都在此列。事实上，他们认为，“大多数主动参与生化过程的分子都能准确地被调整到相变点，从而成为临界导体”。^⑫刚好处于导电能力的边界，可能是一种相当罕见的分子属性。考虑到生命的“建筑模块”可以组合出天文数字量级的可能分子，它们成为临界导体的可能性是极小的。因此，必定有强大的演化压力在其中发挥作用。至少在这个例子中，生物体看似的确发现了一种量子优势并对它加以利用。

舞动光影

Gregory S..Engel et al., ‘Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems’, Nature, vol. 446, 782 - 6 (12 April 2007); doi: 10.1038/nature05678.

在很长一段时间里，量子生物学都处于阴影之下，直到2007年一个引人注目的发现照亮了它的前景，并使该学科获得了全世界的关注。由芝加哥大学的格雷戈里·恩格尔领导的一个科学家团队研究了光合作用的物理学机制。^②现在你可能认为，光合作用自然是一种量子现象，毕竟它涉及光子。但这不过是把它归类为无关紧要的量子效应。生物（可能是植物，也可能是光合细菌）利用光线，用二氧化碳和水合成生物质。从这种意义上讲，光子只是能量的来源，它的量子效应是次要的。然而，鬼魅般的东西在下一个阶段就出现了。捕获了光子的分子复合体与实际发生化学反应的中心不是一回事，这就好比田地中的太阳能电池板是给路边的工厂提供电力的。在生物体内，总是存在着对能量的竞争，因此当能量从一个地方传输到另一个地方时（在这个例子中，就是从捕获光子的分子到化学反应中心），避免浪费太多这种有价值的资源是一件值得做的事情。很长时间以来，科学家一直想搞清楚光合作用如何高效地完成了能量传递。现在，非凡的量子效应似乎为此铺平了道路。

为了解释究竟发生了什么事，我需要调用前文中提及的另一种怪诞的量子属性：量子粒子可以“同时处于两个位置”。事实上，它们可以同时出现在多个地方。关于这种现象的一个推论是，一个粒子从A到B，可以同时选择不止一条路径。更准确地讲，它可以选择所有可能的路径，而不只是最短的路径（见图16）。量子力学中应用的微积分方程要求我们对起点与终点之间的所有可行路径求积分，并认为它们都能为粒子到达目的地做出贡献。这听起来十分神秘，但如果粒子被视为一种弥散的波，而不是非弥散性的小团物质，它就不那么神秘了。想象一下，当水波接近系船柱时，它会围绕系船柱发生弯曲，有些往左传播，有些往右传播，并且能在另一侧汇合。量子波也会做同样的事情。然而，当我们试图想象粒子的情况时，我们会发现自己缺乏想象力：单个粒子怎么可能同时去往各处呢？我们如何设想这样的场景？量子力学中对“究竟发生了什么事”的一种流行解释是，把从A到B的每条路径都视为一个独立的世界。如果在粒子的前进道路上有一个屏障（类似于水波遇到了系船柱），那么在有些世界中粒子会向右移动，而在其他世界中粒子会向左移动。

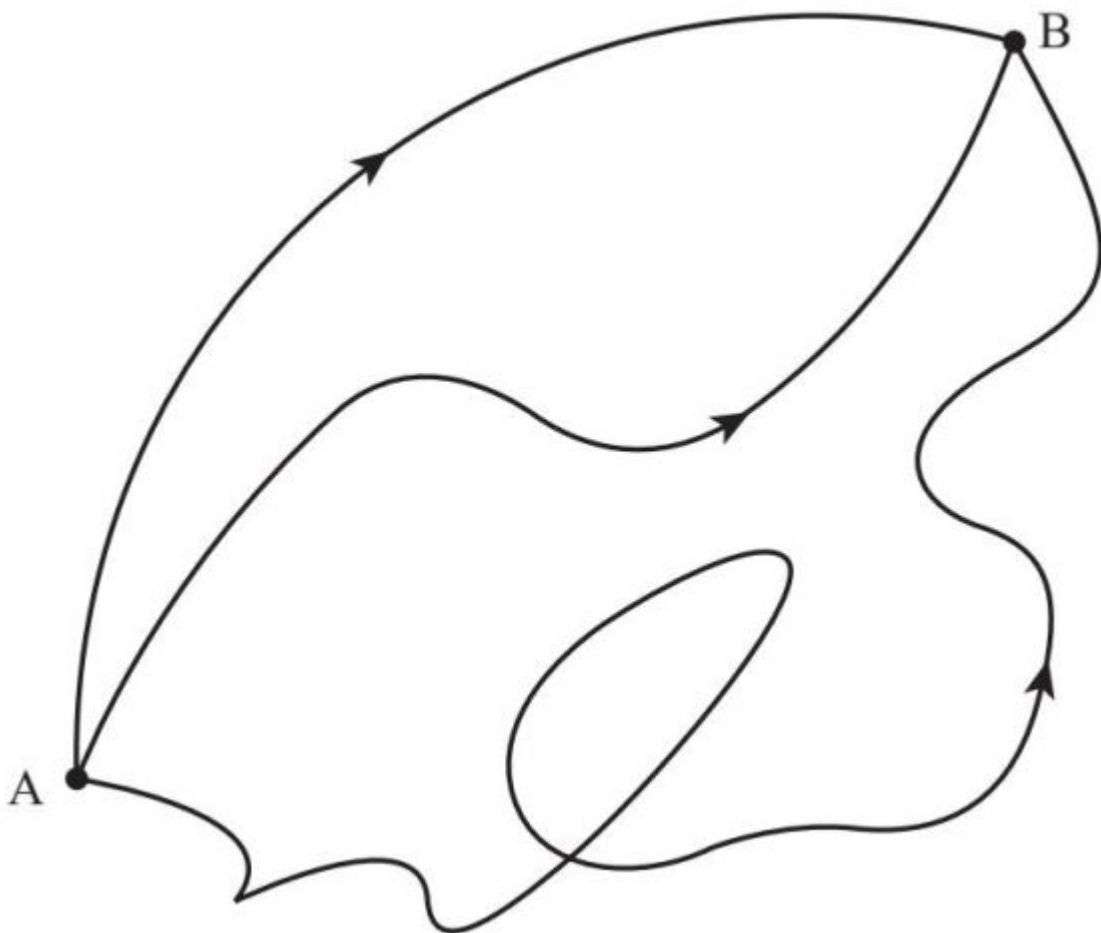


图16 量子路径

在日常生活中，如果一个粒子（比如板球）从A移动到B，那么它会沿着空间中A与B之间的特定路径运动。但原子和亚原子粒子并非如此。根据量子力学的怪诞规律，一个粒子会如鬼魅般选择A和B之间的所有可能的路径。每一条路径都会对该粒子的属性产生影响，而且它们会产生真实的效应。

当然，人们会问：“粒子真正走的是哪条路径？”答案取决于你所说的“真正”指什么，这正是量子力学开始变得含糊不清和令人迷惑不解的地方。不过，我将尽力解释这个问题。几十年前的传统观点认为，这些替代世界（每个世界只包含一条粒子轨迹）仅为现实世界的竞争者；鬼魅般的虚拟世界并非真正存在，而是共同形成了一种混合物——叠加态，“真实世界”的体验从中涌现出来。为了把这个问题说得更清楚，我们可以想象一名实验者从确定的A点将一个电子发射出去，并在确定的B点探测到这个电子。那么，根据量子力学，我们不可能说清楚这个电子是如何从A点到B点的，也就是说，并不存在“真正”的两点间路径。不仅实验者不可能知道电子走的是

哪条路径，就连自然界也不知道。如果你试图在A和B之间安装一个探测器来一窥究竟，那么它会彻底改变实验结果。物理学家约翰·惠勒经常拿量子现象打趣，他喜欢说量子传输“好像一条四周烟雾缭绕的巨龙”，它露出了“锋利的牙齿”和“轮廓清晰的尾巴”（相应地，在A点和B点，研究人员可以接收到关于粒子所处位置的明确信息），但两者之间的部分被笼罩在烟雾之中。

如今，很多主流物理学家坚称，各个不同的量子世界实际上是真实世界，它们平行存在，这种观点就是量子力学的多世界/多宇宙诠释。至于我们为何只能体验到一个世界，人们必须问一个问题：“我们”指什么？假设每个世界都有一个独立版本的你，由于存在多个世界，也就存在多个几乎相同的你。每个版本的你只能看见一个世界。无论一个人（或者说一个人的多个版本？）是否相信量子力学的这种流行但过分的诠释，在这里都无关紧要：人们至少可以放心地说，粒子可以一并尝试从A点到B点的所有路径。

路径模糊是一个重要问题，还是哲学层面的胡言乱语？它当然重要，因为可选择的路径是彼此干涉的（就像围绕系船柱传播的水波）。有时这种干涉会创造出粒子的“禁行区”（在这里，两个波相互抵消，比如波峰遇到了波谷）；有时则相反，这种干涉可以在另一个区域使两个波相互增强。这种性质的量子干涉效应似乎对负责光合作用的分子复合体产生了重大影响。加利福尼亚大学伯克利分校的格雷厄姆·弗莱明及其团队很快就加入了芝加哥大学团队的行列，专注于研究绿硫细菌。这些不起眼的微生物生活在湖水中，以及海平面往下5千米的深海火山口附近。没有阳光能到达这一深度，但炽热的火山口发出一种昏暗的红光，正是这一微弱的光源使绿硫细菌得以存活。该光源的“微弱”程度可以得到量化：据估计，每个负责光合作用的分子复合体一天大约只能获得一个光子，这是一片植物叶子每天所获得光子量的 $1/10^{24}$ 。由于周围的光子极少，绿硫细菌需要竭尽全力地利用好它们获得的能量。实际上，它们的能量利用率接近100%，几乎没有能量被浪费掉。

绿硫细菌的工作机制如下：光子逐个地被吸收到一束捕光触须中，每根触须都充满了一种叶绿素（共有20万个分子）。大约1皮秒（万亿分之一秒）后，被捕获的能量就出现在绿硫细菌的化学反应中心。为了抵达那里，能量必须通过介质传输，该介质类似于电缆或连接你屋顶上的天线和电视机（至少在光纤有线电视出现之前如此）的波导管。在光合作用的例子中，电缆的角色是由被称为“FMO复合体”的分子桥扮演的。它由8个彼此间隔1.5纳米的分子亚基构成，每个分子亚基是由叶绿素构成的，并固定在一个支架蛋白质

上。光子本身会被吸收从而消失，但它的能量会被捕获，并通过一种被生物学家亲切地称为“基托”的分子结构进入FMO复合体。光能在基托中被FMO亚基接收，然后像接力棒一样在其他亚基间传递，直到光能到达与最重要的“工厂”（化学反应中心）毗邻的亚基，在那里它将被用于驱动化学反应。整个过程就是在与时间赛跑，因为必须赶在被外部干扰打断之前完成“送货”工作。

这个过程看起来有点儿复杂和不可靠，因为其间可能出现大量错误、延误和“掉棒”。所有参与其中的分子都大而复杂，会因为热骚动而快速振动。不难想象，宝贵的能量被费尽心心地捕获并径直运往反应中心，结果因在途中散落而被送到无关紧要的地方。但这种状况不会出现，能量会安全且迅速地被送抵目的地。人们曾经认为，能量在传输过程中以一系列简单的跳跃（或传递接力棒）的方式穿过FMO复合体，要在充满热噪声的分子环境中完成这一任务只能靠运气。但我们太小看这种精妙的机制了，因为量子力学在其中发挥着作用。

为了给出简明扼要的量子力学诠释，我先解释一下这种能量是以什么形式储存的。当光子被吸收时，它会从天线分子中释放一个电子（这就是我们熟悉的光电效应），从而留下一个带正电荷的空穴。由于该电子嵌入分子矩阵，它无法逃逸并自由地移动。相反，它会在巨大的轨道上与空穴（物理学家称之为“离域”）松散地结合，这一结构被称为“激子”。激子本身可能在很多方面都表现得像量子粒子，这与它具有类似波的属性有关，能穿过FMO复合体的正是激子而非电子。从路径的角度看，激子有很多选择；而且，如果量子相干性得以保持，激子就能同时选择这些路径。粗略地讲，激子能同时筛选所有选项，找出通往化学反应中心的最佳可能路径，并踏上这条路径。我正在描述的就是一种不同寻常的麦克斯韦妖——量子世界的超级麦克斯韦妖，它可以同时“知道”所有的可行路径，并选出其中最好的一条。用更严谨的物理学语言来表达就是，相干干涉发生在FMO复合体的多个分子中，使得相干的激子实现效率最优化，在能量浪费于分子环境之前就将其运送到反应中心，并且只需要花300飞秒（1飞秒等于 $1/10^{15}$ 秒）。

为了研究这种复杂的机制，加利福尼亚大学伯克利分校团队在实验室中运用超快激光来激发FMO复合体。当能量穿过分子旋涡时，他们能够追踪到它，并宣布某种“量子节拍”（相干振荡）的确对能量的高速传递做出了贡献。

Patrick Rebentrost et al., ‘Environment-assisted quantum transport’, New Journal of Physics, 11 (3):033003 (2009).

这些实验结果十分惊人，因为激子在舞动过程中小心翼翼地保持平衡的做法，似乎会遭到热骚动的破坏。表面看来，量子相干性可以维系的时间大约是粗略估算时间的100倍。尽管热骚动无疑是一种干扰因素，但新近的计算^⑨表明，少量热噪声的存在实际上是一件好事。也就是说，它能在适当的环境中提升能量传递的效率（在我们的例子中，它可以让效率翻倍）。光合作用系统似乎已经精确地演化出这种“适当的环境”。

植物的光合作用比细菌的光合作用更复杂，而且我们仍不清楚，相比植物身上的量子效应，在细菌身上发现的量子效应是否差不多重要。但恩格尔和弗莱明的实验表明，量子辅助的能量传递至少在一种生物捕获光的基本过程中发挥了作用。

鬼魅般的鸟类

鹰雀飞翔，展开翅膀一直向南，岂是借你的智慧？

——《旧约全书·约伯记》（第39章第26节）

尽管有关鸟类导航能力的研究已经有好几百年的历史了，但直到18世纪初，鸟类学家才开始进行系统性记录。芬兰图尔库大学的医学教授约翰内斯·莱什（Johannes Leche）发现，毛脚燕是最早抵达气候寒冷地区的鸟类，平均而言是在每年的5月6日；紧随其后的是家燕，在每年的5月10日。（我从不知道鸟类竟然如此守时。）后来，通过给鸟套上脚环，对鸟类的迁徙模式进行直接观察，科学家获得了更多的数据。近年来，我们开始运用雷达和卫星进行相关的追踪研究。今天，关于这种非凡的现象，我们已经收集了大量信息，包括一些令人难以置信的统计数据。比如，北极燕鸥每年的飞行距离超过8万千米，它们从北极的繁殖地一路迁徙到南极，并在那里度过北半球的冬季。白颊林莺个体只有12克重，但它们可以不停歇地从新英格兰地区（位于美国东北部）越过大西洋飞到加勒比地区，并在那里过冬。有些鸽子在飞行数百千米后，仍能准确地找到回家的路。

这些鸟是怎么做到的？

几年前，我的一个从事物理学研究的同事宣称，即便被蒙住眼睛或者受到误导，他也可以感知到哪个方向是北方。他将这归因于感知到地球磁场的能力。据我所知，目前还没有在人类身上开展这种不同寻常的能力的系统性测试。

科学家发现，鸟类会使用各种方法来寻路。它们既会利用太阳和星星定位，也会利用当地的视觉和嗅觉线索定位。但这并非故事的全部，因为有些鸟在夜晚或阴云密布的环境中也能成功定位。有些科学家把关注点放在地球磁场上，因为它与天气条件无关。20世纪70年代早期开始的信鸽实验表明，将磁体绑在鸟身上会干扰其正确导航的能力。然而，考虑到地球磁场极为微弱，鸟类是如何准确感知到它的呢？^②

很多物理学家声称，是量子物理学让鸟类“看见”磁场，从而让它们拥有了导航能力。显然，在生物体内有某种类似指南针的东西，它与大脑结合起来共同执行校正飞行方向的任务。想要追踪这种“指南针”并不容易，但在过去几年里，有一种合理的备选方案涌现出来。该方案建立在量子力学的基础上，事实上它依赖于量子力学最奇异的特征之一。

所有的基本物质粒子都有一种名叫自旋的属性。对于旋转体的概念，我们当然都很熟悉，理解起来也很简单，毕竟地球本身就在自转。我们可以把一个电子想象成一个微缩版地球，尽管它被缩小为一个点，但仍然保留了自旋的属性。与行星不同，每个电子都有完全一样的自旋量子数，就像每个电子都有相同的电荷和质量一样，这是它们共有的基本属性。当然，电子也在原子内旋转，但旋转的速度和方向各不相同，这取决于它们身处哪类原子中和哪个能级（轨道）上。但我正在谈论的是电子固有的自旋特征，因此我们完全可以把这种特征称为“固有自旋”。

这与鸟类的导航能力有什么关系呢？电子拥有电荷，是带电粒子的原型，这也是它们被称为电子的原因。正如迈克尔·法拉第在1831年发现的那样，移动的电荷会产生磁场。即便电子没有从一个地方移动到另一个地方，它也一直在自旋，并能围绕自身产生一个磁场。可以说，所有电子都是微型指南针。考虑到电子既带有磁性又携带电荷，它们会像指南针那样响应外部磁场。也就是说，电子会从外场感受到力的作用，而这种力试图扭转电子，使电子形成与外场相反的两极（北极和南极）。然而，实际情况很复杂。与指南针不同，电子会自旋。当外力作用于自旋体时，自旋体不会待在原地旋转，而是一边旋转一边移动，这个过程被称为“进动”。也就是说，自旋轴

本身会绕着外力线旋转。熟悉斜旋陀螺（它会绕着地心引力垂线进动）的人，应该能明白我的意思。

如果一个孤立的电子除了感受地球磁场力，其他什么都不必做，它就会以每秒2000次的频率进动。然而，大多数电子都在原子内绕核旋转，并且原子本身的由原子核和其他电子形成的内在电磁场强过了地球磁场，相较之下，后者的效应几乎可以忽略不计。但如果一个电子从原子中被移走，情况将会完全不同。如果原子吸收了一个光子，这种现象就会发生。随着电子与原子核的距离增大，原子的磁场会迅速减弱，而地球磁场对电子的行为来说会变得更重要。因此，被发射的电子会以不同的方式进动。

Roswitha Wiltschko and Wolfgang Wiltschko, ‘Sensing magnetic directions in birds: radical pair processes involving cryptochrome’, *Biosensors*, 4, 221 – 42 (2014).

鸟类的眼睛总在接收光子，这也是眼睛的作用所在。可以说，鸟类眼睛中的电子有机会作为微型指南针为它们导航，但前提是鸟类知道被弹射的电子正在做什么。受到光线干扰的电子必须以某种方式参与某种化学反应，从而向鸟类大脑发送信号，其内容就是关于它们活动的信息。鸟类的视网膜充满了有机分子，研究人员已经把关注点放在了其中被称为“隐花色素”的蛋白质上。^②当隐花色素的一个电子被一个光子弹射出去时，它不会断绝与它过去所属分子的所有关系。爱因斯坦所说的“鬼魅般的超距作用”会在此时出现，并为鸟类服务。即使被从原子中弹射出去，该电子也仍然与留在蛋白质原子中的另一个电子互相纠缠，但由于两者的磁场环境不同，它们的进动过程互不协调。这种状态不会持续太长时间，被弹射的电子和剩下的带正电荷的分子（被称为“自由基”）是化学反应的主要目标。（自由基在细胞内不停地搞破坏，它们被视为从糖尿病到癌症的许多疾病的罪魁祸首。）根据鸟类指南针理论，这些特殊的自由基要么互相反应（通过重组），要么与视网膜中的其他分子发生反应，形成神经递质，向鸟类的大脑发送信号。随着这种鬼魅般联系的具体细节和两个电子间不协调进动的变化，这种神经传导反应的速率也会有所不同，而且它是地球磁场与隐花色素分子之间夹角的直接函数。所以从理论上讲，鸟类或许真的能够看到映入它视野的磁场。这是多么有用啊！

Roswitha Wiltschko and Wolfgang Wiltschko, ‘Sensing magnetic directions in birds: radical pair processes involving cryptochrome’, *Biosensors*, 4, 221 – 42 (2014).

有证据支持这个如鬼魅般的纠缠故事吗？的确有。德国法兰克福大学的一个研究小组用从斯堪的纳维亚迁徙到非洲的欧亚鸚（俗称知更鸟）做了实验，正如鸟类指南针理论预测的那样，它们的测向能力完全取决于环境光的波长和强度。^⑤该实验的结果表明，当决定往哪个方向飞时，鸟类会结合视觉信息和磁测数据做出判断。这个研究小组还尝试将环境磁场的强度增加一倍，刚开始这会干扰欧亚鸚的方向感，但这些聪明的小家伙在大约一小时内就找到了解决办法，以某种方式重新校准了它们的磁感应“设备”，以适应环境的变化。

Thorsten Ritz et al., ‘Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass’, *Nature*, 429, 177–80 (13 May 2004); doi: 10.1038/nature02534.

真正起决定性作用的证据来自加利福尼亚大学欧文分校的索尔斯滕·里茨做的实验，在该实验中，鸟类受到了无线电频率（兆赫）的电磁波干扰。如果发射的电磁波与地磁场方向平行，它们就不会对鸟产生任何影响；但如果电磁波被垂直发射到鸟身上，鸟就会受到干扰。^⑥研究人员将在不同频率的电磁波和不同的环境光条件下所做的很多实验的结果综合起来，发现了共振现象的存在。这是一种我们都很熟悉的现象，即被一个系统吸收的能量会在某个频率处达到峰值，比如，当歌剧演唱家的声音达到某个频率时，会令一个葡萄酒杯破碎。如果量子诠释是正确的，人们就可以合理地预期共振现象的出现，因为无线电波可以被调到有机分子的典型跃迁频率，并且有可能干扰重要的如鬼魅般的量子纠缠的产生。

量子鸟类学的时代已经到来！

你鼻子上的量子“妖”

嗅觉是生物学领域的量子“妖”发挥作用的另一个绝妙案例。哪怕是嗅觉不太灵敏的人也能分辨很多种不同的气味，而一名专业的调香师（业界称其为“灵鼻子”）可以区分数百种有细微差别的香味，能与一名大师级品酒师的敏锐识别能力相媲美。

嗅觉是怎么实现的？简言之，答案就在于鼻子内部有大量的分子受体（许多不同形状的空腔），可供分子在其中活动。如果空气中的某个分子刚好有与分子受体互补的形状，它们就能结合起来，像成套的锁和钥匙那样。一旦对接过程发生，信号就会被传导至大脑：“香奈儿5号”或诸如此类的信

息。当然，我对这一过程进行了简化：气味识别通常需要结合来自几种不同受体的信号。不过很显然，嗅觉受体的行为就像典型的麦克斯韦妖，它们能根据形状准确地对分子进行分类（麦克斯韦妖则依据分子的速度分类，两者的道理是一样的），并拒绝与自身不匹配的分子。因此，嗅觉受体为了生物的生存而过滤信息，并将相关信息传递到大脑。（诚然，它们在识别香奈儿香水的气味时，或许并非出于生物生存的考虑，但在识别烟味时应该考虑了这一点。）

See Mark Anderson, ‘Study bolsters quantum vibration scent theory’, *Scientific American*, 28 January 2013; see also https://www.ted.com/talks/luca_turin_on_the_science_of_scent and ‘Smells, spanners, and switches’ by Luca Turin, *inference-review.com*, vol. 2, no. 2 (2016).

然而，简单的锁钥模型显然是有缺点的。大小和形状类似的分子可能会发出完全不同的气味；反过来，不同分子的气味却可能是相似的。这十分令人费解。有证据指向一种更细微的辨别层面——拥有更敏锐感觉的麦克斯韦妖。事实上，几十年来的旧观点认为，除分子的大小和形状以外，分子的振动特征也有可能影响气味。分子能够四处振动（而且确实在振动，还记得前文提过的热骚动吧），就像不同的乐器有不同的音色那样。音色是由特定的谐波混合产生的，分子的振动模式也会产生类似的效应。因此，飘浮在空中的分子受到撞击，到达鼻部不断抖动的“停靠站”，负责“提货”的受体会做出进一步的有效区分。然而，直到1996年，这一识别机制才被真正搞清楚。当时，伦敦大学学院的卢卡·图林指出，量子力学也许在其中扮演着某种角色。具体而言，一个电子之所以能从气味分子转移到受体，正是量子隧穿效应发挥作用的结果。^②图林认为，隧穿电子与气味分子的振动状态耦合在一起（这是分子物理学中的常规机制），而且受体分子中的电子被调至与气味分子的特定振动频率相匹配的能级。隧穿电子通过从振动中吸收一个能量子（物理学家称之为“声子”，是一种声波量子），将停靠在鼻部的气味分子的身份信息传递给受体。如果电子的能量与受体的能级结构相匹配，隧穿效应就会发生，比喻意义上的“光线”也会在鼻子中穿行。

An excellent critical review of the subject is given by Ross D. Hoehn et al., ‘Status of the vibrational theory of olfaction’, *Frontiers in Physics*, 19 March 2018; doi: 10.3389/fphy.2018.00025.

图林的想法促进了嗅觉振动理论的发展，并为各种气味间令人困惑的相似性和差异性提供了一种可能的解释：其原因在于气味分子的振动模式，而不是形状。嗅觉振动理论还有可验证的优点。其中一种验证方法是改变气味分子的振动模式，但与此同时保持其化学结构（和形状）不变。这一实验可以通过将各个原子替换为它们的同位素来完成，比如氘，它的原子核是由一个质子和一个中子构成的，质量大约是普通氢原子的两倍，但两者属于同一种化学元素。将普通氢原子转换为氘原子，可以保持分子的形状不变，但会显著改变分子的振动频率。这是因为在消耗相同能量的情况下，越重的原子移动得越慢，振动频率也越低。多个实验似乎都证实了氘化分子的做法会改变气味，但实验结果仍存在争议，而且模棱两可。^⑩最近，图林用果蝇做了实验，发现它们能区分含有普通氢原子的气味分子和含有氘原子的相同分子。实验者还训练果蝇学会躲避氘化分子，他们发现果蝇也会避开不相关的分子——该分子的振动模式与氘化分子相匹配。所有这些实验结果都支持如下结论：振动信息的量子隧穿效应至少是果蝇识别气味的关键因素。

量子生物学：仅此而已？

近一个世纪以来，量子力学就像犹太教的神秘哲学“卡巴拉”的一个秘密。但今天（很大程度上是由于量子计算），薛定谔的猫走出了箱子，我们所有人都不得不面对这只指数生长的“野兽”，它就潜伏在当前的世界图景之中。

Scott Aaronson, ‘Are quantum states exponentially long vectors?’ Proceedings of the Oberwolfach Meeting on Complexity Theory, arXiv:quant-ph/0507242v1, accessed 8 March 2010.

——斯科特·阿伦森^⑪

尼尔斯·玻尔说过，任何不为量子力学撼动的人都还没有理解它。它的确令人震撼。尽管量子力学能很好地解释事物，但它击碎了现实。于是，“量子”和“怪诞”这两个词会不可避免地交织在一起。量子力学的怪诞之处在于，粒子可以同时位于两个地方，或者通过“量子隐形传态”穿过屏障，又或者到访平行世界……如果这些现象发生在日常生活中，就会显得十分怪异。但是，它们总在原子和分子的微观世界里发生。既然有如此多可供使用的量子魔法，你或许会期盼生命也能因此充满魔力。的确如此！正如我在本章中描述的那样，过去几年里有越来越多的证据表明，几个重要的生物

过程可能利用了怪诞量子效应的某些方面。它们提供了诱人的暗示，即量子魔法可能遍布于生命。如果量子生物学不只是一系列奇特的现象，那么它有可能像分子生物学在过去半个世纪里所做的那样，给生命科学研究带来深刻的变革。

当薛定谔发表著名的都柏林演讲时，量子力学才刚刚取得胜利。它解释了很多非生物的属性。而且，在那个年代的很多物理学家看来，量子力学足够有说服力，也足够怪诞，所以它也能解释生命。换句话说，人们希望量子力学或某些新的“后量子力学”能发现迄今为止仍隐藏在生物的极端复杂性背后的“生命原理”。在演讲中，薛定谔的确利用了某些来自量子力学的常规技术成果，去解释生物信息如何能以稳定的形式被储存起来，但他没有试图援引我在本章中描述的那些怪诞的量子效应来解释生命的非凡属性。

在薛定谔发表演讲之后的几十年里，极少有生物学家关注量子力学。大多数生物学家仍然满足于诉诸经典的球棍化学模型来解释生物学领域的一切。但在过去几年里，他们突然对量子生物学产生了兴趣，尽管他们的一些不切实际的断言已经在某种程度上引发了人们对这一学科的质疑。关键在于，如果的确有非凡的量子魔法在生物体内上演，那么这些魔法只是奇怪的反常现象，还是包含了生命的所有重要过程的“量子冰山”的一角？我讲述过的案例并没有穷举已得到研究的所有可能的量子生物效应，但根本问题在于，生物的复杂性是相当令人困惑的，这从我给出的冗长繁复的解释中可见一斑。这种复杂性为微妙的量子效应提供了足够的藏身之处，反过来，我们也很容易误认为可以用简单的量子理论模型来解释复杂的生命现象。

The issue here is that there are different types of noise and their disruptive effects on quantum systems can be very different. Recent calculations have identified a regime in which a certain form of noise paradoxically enhances quantum transport effects. See, for example, S. F. Huelga and M. B. Plenio, ‘Vibrations, quanta and biology’, *Contemporary Physics*, vol. 54, no. 4, 181–207 (2013); <http://dx.doi.org/10.1080/00405000.2013.829687>. See also reference 6.

为量子生物学举证的问题在于，“量子”和“生物学”这两个词对应的是彼此间关系紧张的两个领域。量子效应在孤立、冰冷的简单系统中表现得十分明显；而生物体是温暖又复杂的，许多部分之间都存在强有力的相互作用。量子力学建立在相干性的基础之上，而外部干扰会破坏相干性。但正如

我在前面章节中解释的那样，生命喜欢噪声，生物学中的麦克斯韦妖利用热能来创造和移动。生物体内混乱喧嚣：分子四处乱转，彼此不断碰撞，交换能量并重塑结构。尽管在物理实验室里精心控制的环境中，这种混乱能够得到抑制，但我们不可能制止生物体内的这种混乱。然而，让噪声和量子相干性持续共存于适当的环境，有助于生物学现象的发生。 ⑩

量子生物学不仅可用于解释生命，还能教会量子工程师一些能赚大钱的“把戏”。如今，量子工程领域的主要关注点是量子计算。考虑如下统计数据：一台只有270个纠缠粒子（纠缠等同于鬼魅般的联系）的量子计算机，其信息处理能力要比一台能模拟出整个可观测宇宙的普通计算机（操控比特）的能力更强大。这是因为一台量子计算机的能力会随着纠缠粒子的数量增加而呈指数增长，所以，仅有270个纠缠的亚原子粒子的量子计算机有 2^{270} 种状态，这个数量相当于 10^{81} （宇宙中原子微粒的总数是 10^{80} 个）。如果所有这些状态都是可操控的，就会产生如有神助的计算能力。如果仅凭很少的粒子就有潜力处理令人抓狂的海量信息，难道我们不应该期待看到这类处理能力在自然界的某处展现出来吗？一个显而易见的地方就是在生物体上。

Apoorva Patel, ‘Quantum algorithms and the genetic code’,
Pramana, vol. 56, 365 (2001).

几年前有人声称，执行遗传密码的分子机器也许就是一种量子计算机。 ⑪ 尽管少有证据支持DNA在执行真正的量子计算，但某种形式的量子增强信息处理过程可能一直在生物体内进行。麦克斯韦妖通过将随机的热运动转化为被储存起来的信息，避开了熵的降解效应和热力学第二定律。量子领域的麦克斯韦妖同样可以避开会破坏量子相干性的热降解效应，从而将随机的外部噪声转换成可储存的量子比特。如果生命已经演化出这类“妖”，能将量子相干性保持足够长的时间，从而使遗传机制可以操控存储的量子比特，显著的信息处理加速现象就有可能发生。即便只是轻微的加速，也有可能显现出优势并被演化选中。

Philip Ball, ‘Is photosynthesis quantum-ish?’, Physics World,
April 2018.

Adriana Marais et al., ‘The future of quantum biology’, Royal
Society Interface Focus, vol. 15, 20180640 (2018).

即便如此，我也应该以审慎的论调结束本章。我探讨过的所有假定性的量子生物学效应仍在被人们激烈地争论着。¹²有些早期断言过于夸大，我们在得出任何明确结论之前还需要做更多实验。生物系统的复杂性通常会排除任何简单的理解方式，所以我们无法用理解熟悉的经典振动的方式去理解类似波的量子效应。目前我们对大多数实验结果还需要抱持开放的态度，以便发现其他可能的解释。关于这个问题，似乎还没有定论。¹³

那么，关于生物体实施了真正的量子计算，这一推断是正确的吗？很久以前，当思考量子计算的深远意义时，我忽然有了一种奇怪的想法。我们很难想象任何非生物的、自然产生的系统能够进行量子计算，这促使我问自己：为什么会存在这样一种可能性，即生命不能利用量子计算来指数级地增强其信息处理能力？如果自然界没有利用宇宙中无处不在的信息，为什么物理定律会允许远超香农想象的信息处理能力存在呢？难道这一尚未开发的信息处理潜能被自然界雪藏了138亿年，只是为了让人类工程师来开发利用吗？

我充分意识到，我的这种想法在科学论证方面是站不住脚的，它只是一种哲学（有人可能会说是神学）论证。我之所以提出这些问题，是因为作为理论物理学家的经验告诉我，如果某个证据确凿的物理学理论预测某事有可能发生，那么自然界似乎总会利用这种预测。比如希格斯玻色子，它是在1963年被理论预测存在的，但直到2012年才真正被发现。其他例子还包括反粒子和 Ω^- 粒子。在所有例子中，我们都能对自然界中可能存在的事物做出明确定位，事实上，它们也总能在那里被找到。当然，还有很多猜想性理论所做的预测尚未被实验证实，所以我的论证必须建立在可靠的理论基础之上。但量子力学是我们既有的最可靠理论，它的预测几乎从未被质疑。量子力学在像神一样进行指数级信息的管理方面拥有一席之地，难道是自然界忘了填补这一空白吗？我并不这样认为。

第6章

生命的起源

生命究竟有多么非凡？答案是：不可思议。我们当中那些研究化学反应网络的人，对像生命这样的事物却一无所知。

George Whitesides, ‘The improbability of life’, in: John D. Barrow et al., *Fitness of the Cosmos for Life: Biochemistry and Fine-tuning* (Cambridge University Press, 2004), p. xiii.

——乔治·怀特塞兹 

从像湍流和雪花这样的日常系统，到像星云和旋涡星系这样的宏大宇宙结构，我们所在的宇宙充满了复杂性。然而，有一类复杂系统显得尤其非凡，那就是生命。在都柏林的演讲中，薛定谔将反抗热力学第二定律的能力确定为生命的重要属性。通过收集、处理和将信息应用于目的性活动，生物赢得了对抗熵的胜利。通过将信息模式和化学反应模式结合起来，以及使用麦克斯韦妖来获得极高的热力学效率，生命从分子的混沌中变戏法般地创造出相干性和秩序。所以，科学面对的最大难题之一是，这种独特的安排最初是如何发生的。

Stanley Miller, ‘A production of amino acids under possible primitive Earth conditions’, *Science*, vol. 117 (3046): 528 - 9 (1953).

生命是如何开始的？由于生物体既有“硬件”部分又有“软件”部分，分别对应化学结构和信息处理过程，生命起源问题的难度倍增。历史上出现过一个奇怪的巧合：就在克里克和沃森关于DNA的双螺旋结构的著名论文在《自然》期刊上发表的三周后，1953年5月15日出版的《科学》期刊发表了一篇文章，该文章由一位名叫斯坦利·米勒的名不见经传的化学家所写，题为《在可能的早期地球环境下之氨基酸生成》。后来，米勒因为这篇文章被誉为在实验室尝试重新创造生命的先驱。  米勒将常见气体的混合物和一些水放入一个烧瓶，并对烧瓶中的混合物放电一周，最后产生了一堆棕色的沉淀物。化学分析结果显示，这个简单的过程成功制造了生命所需的某些氨基

酸。米勒似乎仅用一瓶气体和一对电极，就在通向生命的漫漫长路上迈出了第一步。这两篇论文中的一篇涉及生命的大型信息分子，另一篇涉及生命的简单化学构件，它们结合在一起恰当地反映了生物学的核心问题：复杂的有机化学反应模式和复杂的信息模式，哪个先出现？或者，它们通过某种方式相互引导并同步创造出生命？显然，我们不可能只用化学反应来解释生命，还必须考虑到有组织的信息模式的起源。同样，我们也不能单靠信息来解释生命，还需要知道逻辑运算是如何从分子中涌现的，包括数字信息存储和用数学方式编码指令，这意味着逻辑运算在编写语义内容。语义信息是一个更高层面的概念，它在分子层面上毫无意义。无论化学反应有多复杂，仅靠化学反应绝不可能产生遗传密码或语境指令。用化学反应来解释编码信息，就好比指望计算机硬件能自发编程。想充分解释生命起源，就要更好地理解信息流动和存储的组织原理，以及将这些原理与化学反应网络结合起来的方式。而且，化学反应网络的定义应足够宽泛，能同时涵盖生物领域和非生物领域。因此，最重要的问题是：这些原理能从已知的物理学知识中衍生出来，还是需要我们发掘出一些全新的知识？

起初……

Francis Crick, *Life Itself: Its Origin and Nature* (Simon and Schuster, 1981), p. 133.

Charles Darwin, letter he posted to his friend Joseph Dalton Hooker on 29 March 1863. For a contextual historical essay, see Juli Peretó, Jeffrey L. Bada and Antonio Lazcano, ‘Charles Darwin and the origin of life’, in: *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, vol. 39, 395 - 406 (2009).

弗朗西斯·克里克曾经将生命的起源描述为“近乎奇迹，必须满足非常多的条件才能实现”。^①生命越是近乎奇迹，我们就越难弄清楚它是如何起源的，这一点千真万确。1859年，查尔斯·达尔文的杰作《物种起源》首次出版。他在这本书中提出了一种惊人的理论，解释了生命如何经过几十亿年的演化，从简单的微生物发展成今天丰富而复杂的地球生物圈。但他的解释巧妙地回避了“生命最初是如何产生的”这个问题。“人们可能还会猜测物质的起源。”他在写给朋友的一封信中俏皮地说道。^②直到今天，我们对生命起源问题的研究仍未取得太大进展，但我们通过大爆炸理论或多或少地了解了物质的起源。我希望本书前面那些章节已经让你相信，生命不仅是古老

的现象，而且确实是不同寻常的事物。那么，我们应该如何解释从非生物到生物的转变呢？

露头 (outcrop) 指岩层、岩体、矿体等露于地表的部分。——编者注
J. William Schopf et al., ‘SIMS analyses of the oldest known assemblage of microfossils document their taxon-correlated isotope compositions’, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, no. 1, 53 - 8 ;doi: 10.1073/pnas.1718063115.

实际上，生命起源的谜题是把三个问题合成了一个：生命是在何时何地以何种方式产生的？我先回答何时的问题。最早的化石记录可以追溯到35亿年前，按地质年代划分，那时是太古代。我们很难找到太古代的岩石，更不用说从中发现化石了。然而，一块太古代燧石的露头^⑤已经得到了深入研究。这块燧石位于澳大利亚西部的皮尔巴拉地区，从黑德兰港出发，驱车大约4小时就可以到达燧石所在地。那里地形崎岖，植被稀少，河床几乎干涸，很容易暴发山洪。山丘是深红色的，岩石露头里藏有重要的古代微生物的活动遗迹。这些岩石所属的地质年代表明，我们的地球在诞生后的10亿年里就出现了生命的原始形态。最具说服力的证据来自被称为“叠层石”的奇怪地质特征。叠层石看似一排排波浪线或小的隆起物装点着裸露的岩石表面。如果我们的解释是正确的，这些就是35亿年前覆盖着微生物的土丘的残留物——土丘是由连续的微生物群落将颗粒物一层一层地沉积在裸露的岩石表面形成的。今天，地球上只有少数几个地方存留着类似的叠层石结构，以及活着的微生物“居民”。大多数地质学家都相信，皮尔巴拉地区的叠层石（和世界上其他更年轻的岩石）是类似于化石遗迹的东西，可以追溯至遥远的过去。皮尔巴拉地质组还包含了其他生命迹象，比如一种古礁系统的残余物和少量推定的个体微生物化石。我们很难只凭借形状就判断出这些岩石中的印记是化石，因为有机质早就消失了。然而，对生物成因的解释就在最近取得了进展。^⑥地球上约有1%的碳是以较轻的同位素 ^{12}C 的形式存在的。生命偏爱这种较轻的碳元素，所以化石中的这种同位素通常会略多。对皮尔巴拉岩石的分析表明，各种碳的同位素的比例与这些印记的物理形状有关——如果它们是不同的种类微生物的化石，就会产生这种相关性。我们很难从生物学以外的角度来解释这些结果。

从皮尔巴拉岩石中找到的证据告诉我们，地球上的生命至少产生于35亿年前，但它并没有给出生命具体产生于何时的线索。所有更古老的生物活动遗迹可能已经被常规的地质作用清除了，或者毁于小行星撞击——约38亿年

前地球曾受到大型小行星的撞击，正是这次撞击让月球表面变得坑坑洼洼。关键问题在于，缺少更古老的岩石。格陵兰岛上有一些可以追溯到38亿年前的岩石，带有生物改性的迹象，但并不明确。不管怎么说，地球本身只有45亿多年的历史，而生命存在的时间至少占据了地球历史的80%。

生命开始于何地？

生命起源于何时的问题至少有迹可循，但要猜出生命最早出现于何处可就难上加难了。我所说的何地并不是指纬度和经度之类的坐标，而是指地质和化学环境。

需要说明的第一件事是，尚未有充分的证据表明，地球生命是在地球上产生的。也许，地球生命是在其他地方产生的，之后才来到适宜生存的地球。比如，地球生命有可能起源于火星，因为35亿年前的火星比现在更温暖也更潮湿，很像现在的地球。从某些方面讲，火星能为生命起源前的化学反应提供更有利的环境。比如，小行星撞击火星的后果可能不像撞击地球那么严重，火星这颗红色星球的化学成分也更有利于驱动新陈代谢。显然，还需要有一种方式将生命从火星传播到地球，这种方式也是存在的。在太阳系形成的早期阶段，小行星和彗星对其他星球的撞击非常剧烈（至今尚未完全停止），大量岩石被冲击到太空中，其中许多还进入了太阳轨道。就这样，一些火星上的岩石最终落在地球上（反之亦然，地球上的岩石也有可能落在火星上）。这些从火星来的岩石被称为陨石，我们可以从世界各地收集到它们，我所在的大学就有几块。纵观地球的历史，有几万亿吨的火星物质落到了我们的星球上。由于安居在岩石中，微生物能够抵御太空的恶劣环境。在穿越行星际空间的过程中，最大的危险来自辐射，但即使是一块中等大小的岩石也足以把大多数的辐射屏蔽在外。据估计，有些抗辐射性强的微生物甚至可以在太空岩石中存活几百万年，这一时间长度足以让它抵达地球并播下火星的生命之种。同样的情景也可以反向发生，结果就是活的地球微生物落到了火星上。这意味着地球与火星并不是彼此隔离的，微生物在地球与火星之间的交叉传播可能贯穿整个历史，以至于我们很难确定地球上的生命产生于地球而非其他星球。还有一种可能性（虽然较小），那就是地球上的生命来自金星。如今的金星非常不适合生命存活，但它在几十亿年前也许是适合的。有些人还认真考虑过另一种可能性，即生命最早是在彗星上孕育的，然后通过直接撞击或在与地球“擦肩而过”时掉落的尘埃来到地球上，后者的可能性更大一些。

就算认为生命的摇篮不是地球而是其他星球，也无助于解答一个更重要的问题：什么样的地质环境有利于诞生生命？人们提出过许多场景：深海火山口，干涸的潟湖，海底岩石的孔穴……唯一能让每个人都认同的观点大概是，氧气曾是一个不利于生命存活的因素。今天，复杂生物体需要氧气来进行新陈代谢，但这是后来才出现的情况。大约在20亿年前，地球大气中只有非常少的游离氧。直到10亿年前，地球大气中的氧含量才达到今天的水平。呼吸氧气的感觉很好，但氧气是一种高活性物质，能攻击和分解有机分子。需氧生命已经演化出各种机制来应对它，比如使用抗氧化剂。即便如此，活性氧也仍然常常破坏DNA并引发癌症。因此，当谈到生命的起源时，游离氧反倒成了生命的敌人。

当天体物理学家托马斯·戈尔德在20世纪80年代末提出可能存在着一个位于地下深处的高温生物圈时，他得到的只有嘲讽。然而，他的观点是完全正确的。

当然，对生命而言必不可少的元素肯定包括氧，还有氢、氮、碳、磷和硫。真正必要的元素是碳，它是所有有机化合物的基础，也是生命的一种理想选择，因为它能形成无数种复杂的分子。化学家设想生命出现的早期过程一定发生在碳（比如二氧化碳）供应和氢供应充足的地方。氢可能处于游离状态，或者作为甲烷或硫化氢的组分存在。一种被普遍接受的观点是，生命的起源地就在海底火山口附近，那里的硫供应充足，而且岩石表面可以提供各种可能的催化剂。由于在海底火山口附近发现了丰富的生态系统，科学家已经将关注点放在了这些地方。从火山深处喷出的灼热、高压流出物很危险，位于这里的食物链最底层的主要生产者被称为“超嗜热生物”，这些不怕死的生物中有一些能在温度超过120摄氏度的水中生存（由于存在强大的压力，水在这种温度下不会沸腾）。以前没人想到能在黑暗的海底发现生命，更不会有人想到能在火山口附近的压力锅式环境中发现生命。但惊喜不会就此止步。近几十年来，生物学领域最令人惊讶的发现之一是，生命并不局限于地球表面或海洋，还可以延伸到很深的地下，包括陆地之下和海底之下。地下生物圈的全貌仍在探索之中，但科学家已经在地表之下几千米的岩石中发现了活的微生物（我在第2章提到的南非嗜极微生物就是一个例子）。^⑤

人们还在进行着激烈的争论：生命是起源于地壳深处，还是先在地表产生（或者可能来自火星），然后渗入地下？基因测序已经表明，超嗜热生物位于生命树最古老的枝干上，这暗示着热复原性是地球生物的一种非常古老的特征。但是，这并不一定意味着超嗜热生物是最早出现的生物。生命也许

诞生于某个更冷的地方，然后开始多元化，有些微生物演化出必要的热损伤修复机制，使它们能在炙热的地下或海底火山口附近定居。由于在早期的撞击中可能有大天体撞到了地球，高温导致地表的大部分区域（如果不是整个地球）都失去了生机，唯有地下的超嗜热生物能存活下来，因此它们只反映了遗传瓶颈效应，并不代表最早的生命形式。目前，我们不可能知道这个问题的答案。

自从有了化学环境（不是有氧环境！）这一基本概念，科学家便纷纷追随米勒在1953年的开创性做法，花了几十年的时间试图在实验室中重新创造生命产生的条件，这些尝试或许可以阐明通往生命起源的漫漫长路上那些最初的化学反应步骤。随后科学家又做了很多生命起源前的合成实验，但说实话，他们并未取得太大进展。尽管科学家非常聪明，也为此付出了很多心血，但如果以揭开生物分子的复杂性之谜为标准，可以说他们做的这些尝试完全不得要领。

科学家费尽心思做的这些实验之所以不能解开生命起源之谜，有一个更根本的原因。正如我在本书中强调的那样，生命的显著特征就在于它能以有序的方式存储和处理信息。当然，生命也需要复杂的化学反应过程：有机分子形成了基底，生命在此基础上运行“软件”。但化学反应过程只是故事的一半，也就是“硬件”部分。显然，存在着从非生物到生物的化学途径，虽然我们几乎不知道它是什么，但真实的化学反应步骤的重要性可能比不上这个至关重要的转换：从早期的分子混沌转变到有序的信息管理。这一转换是如何发生的？

生命是如何起源的？

我把最难的问题留到最后来回答，即生命是如何诞生的。简言之，没人知道生命是如何诞生的！更糟糕的是，甚至没人知道如何估算生命出现的概率。但有很多东西都取决于这个问题的答案。如果生命很容易出现，那么宇宙中应该充满了生命。此外，如果地球生命是将某些形式的生命原理纳入其基本规律范畴的宇宙之产物，在宏伟的宇宙系统图景中，人类的定位就显然不只是“怪异的化学意外的产物”。

“分子达尔文学说”由来已久，它认为“裸”分子能够以不同的效率进行复制，而且自然选择会筛选出其中最好的。RNA世界假说就属于这一范畴。虽然这些研究富有启发意义，但它们都非常不自然，需要进行精心的人为干

预（比如，准备材料和做出选择）才能实现。这些理论与自然界的相关性并不显著。

正如我已经提到的那样，我们对从非生物到生物的途径缺乏基本的了解。我们甚至不清楚该途径是一段漫长而平缓的路，经过跋涉攀登上生命起源前的那座“不可能的山峰”；还是时断时续、时缓时急，伴随着长时间的停滞和巨大的向前飞跃（或者更形象地说，向上飞跃）。考虑到“不可能的山峰”高得令人难以置信，对一种化学混合物来说，试图在攀登过程中靠一次次的向下滑落来寻找立足点，这肯定是行不通的。所以，必定存在某种棘轮效应，能够锁定成果，以及在生命系统等待再次向前迈进的机会时限制损失。尽管诸如此类的想法看似合理，但又碰到了目的论这一难题。由化学物质组成的“原始汤”并不知道自己在试图制造生命——实际上它什么都不知道——所以它不可能为了保护来之不易的复杂性而有意破坏热力学第二定律。想象化学物质为产生生命而“努力奋斗”的场景，显然是无比荒谬的做法。一旦生命诞生，目的论难题就不会出现了，因为自然选择可以逐渐积累演化的成果，DNA存储器也可以锁定这些成果。但如果没有自然选择，化学反应过程就无法诉诸这样的演化机制。^②

Manfred Eigen and Peter Schuster, *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-Organization* (Springer, 1979).

向下滑落（或倒退）对几乎所有通往生命的复杂性途径的相关研究而言，都是一个十分棘手的问题。有很多精巧的实验和理论分析结果表明，化学混合物能自发产生复杂性，但它们都遇到了同样的问题：接下来会发生什么呢？一种“化学汤”如何基于某种自发产生的复杂性，不断形成更复杂的东西，并且一路攀爬，直到登上那座“不可能的山峰”之巅？解决这一棘手问题的最具前景的思路，来自对“自催化”化学循环的研究。其观点是，某些分子发生反应形成其他分子，比如，A和B反应生成C，而C又恰好成了加速A和B反应的催化剂。这就形成了一个反馈回路：分子群催化了产生自身的化学反应。如果把这个过程放大，就有可能存在一张巨大的有机分子网络，并形成自催化的准稳态系统。该系统中有很多环环相扣的反馈回路，它们结合在一起形成一张自给自足、稳固健全又错综复杂的化学反应网络。^③所有这些很容易用文字表述，但真的存在这种化学系统吗？是的，那就是生物体，它们具有上述所有特征。但现在我们进入了循环论证，因为我们想弄清楚所有这些非凡的化学反应过程在生命出现之前是如何发生的。我们不能说问题本身就蕴含了答案，然后宣称我们已经解答了问题。

问题比我所阐述的要复杂得多。生命的一个信息特征是，它会使用数学编码来管理数字信息。回想一下，在用于制造蛋白质的氨基酸“工具箱”中，A、G、C、T这4个字母组成的三联体代表了特定的约20种氨基酸。从DNA传递到蛋白质“合成机器”（核糖体、转移RNA等）的编码指令，是香农信息论发挥作用的最好例子：编码指令扮演了信息的角色，通信信道是细胞内的水，噪声则是途中的信使RNA遭受的热损伤或化学突变损伤。

正如我们所知，对生命起源的解释必须包含对这种数字信息管理，尤其是遗传密码起源的解释。这种密码不一定是已知生命使用的真实密码，但我们需要对某种密码的起源做出解释。这是一个难上加难的问题，生物化学家尤金·库宁和阿尔乔姆·诺沃日洛夫称之为“演化生物学领域最令人敬畏的问题”。他们认为，“如果不能结合对编码原则本身的起源和对体现该原则的翻译系统的理解，该问题就是空洞无物的”，而且它不会很快得到解决：

Eugene V. Koonin and Artem S. Novozhilov, ‘Origin and evolution of the genetic code: the universal enigma’, IUBMB Life, February 2009;61(2): 99 – 111 (February 2009); doi: 10.1002/iub.146.

在总结关于密码演化研究的最新进展时，我们无法摆脱质疑。它似乎同时面临着两个根本性问题：为什么遗传密码会以这种方式出现？它是如何产生的？这两个问题早在50多年前分子生物学诞生之时就被提了出来，即便再过50年它们也很重要。让我们感到安慰的是，在生物学领域再也找不出比它们更本质的问题了。

毋庸置疑，生物学家已经被遗传密码的起源问题困扰了很长时间。一种流行的观点认为，原始生命没有使用遗传密码，我们今天拥有的遗传密码代表了一种软件升级，它是在后来的自然选择过程中发生的。RNA世界假说就是沿着这条路线发展起来的。由于生物化学家在1982年发现RNA既能存储信息，又能催化RNA参与的化学反应（也许不能生成蛋白质，但可能足以产生基本的生命物质），他们很想知道“RNA汤”能否发现其变异副本，并独立地从这些副本中做出选择，产生蛋白质。然而，即便这种解释是沿着正确的路线展开的，它也根本不可能估计出这种情景发生在一颗行星上的概率。不难想象，其概率是极低的。

Jacques Monod, *Chance and Necessity*, trans. A Wainhouse: (Alfred A. Knopf, 1971), p. 171.

George Simpson, 'On the nonprevalence of humanoids', Science, vol. 143, issue 3608, 769-75 (21 February 1964).

Christian de Duve, *Vital Dust: The Origin and Evolution of Life on Earth* (Basic Books, 1995).

Mary Voytek, quoted in Bob Holmes, 'The world in 2076: We still haven't found alien life', *New Scientist*, 16 November 2016.

50年前生物学家的主流观点是，生命的起源是化学反应的侥幸产物，涉及一系列概率极低的事件，以至于在可观测宇宙的其他任何地方都不可能再出现生命。我在前文中引述过克里克的名言。他的法国同胞雅克·莫诺批评了这样一种观点：生命以某种方式“整装待发”，无论何时，只要条件允许它就会产生。他将在科学家中流行的一种观点总结如下：“宇宙不会孕育生命”，因此“人类最终会知道，他们在冷漠而浩瀚的宇宙中是孤独的存在，他们的出现只是一种偶然”。^⑫乔治·辛普森是第二次世界大战后涌现的伟大的新达尔文学说拥护者之一，他将SETI（地外智慧生物搜寻）计划视为“一种以极小的胜算与历史对赌的行为”。^⑬莫诺和辛普森等生物学家得出的悲观结论基于这样一个事实：生命机器以如此多的具体方式展现着它的极端复杂性，以至于我们无法想象它不是一次偶然的化学反应的产物。一名科学家在20世纪60年代公开宣称他相信宇宙中存在地外生命（更不用说地外智慧生物），无异于一种学术上的“自杀”行为。这和宣称自己相信精灵存在没什么两样。然而，到了20世纪90年代，情况发生了变化。比如，生物学家、诺贝尔奖获得者克里斯蒂安·德迪夫将宇宙描述为“生命的温床”。他相信，只要有任何一丝可能，生命就会出现，他称其为“宇宙之必然”。^⑭今天，这似乎已经成为一种流行的观点，人们据此认为宇宙中存在大量适居行星。比如，NASA天体生物研究所前负责人玛丽·沃伊泰克就表达过这样的感想：“考虑到其他行星都会围绕其他恒星转动，我们无法想象生命不会在其他地方出现。”^⑮其实，这不仅是有可能的，而且真的很容易想象。比如，假设从非生物到生物的转换涉及100个连锁化学反应，其中每个反应都需要在特定的温度范围内进行（比如，第一个反应是5~10摄氏度，第二个是20~30摄氏度，等等）。也许这种转换还需要严格限定压力、盐度和酸度范围，更不用说一系列催化剂的存在了。在可观测宇宙中，也许只有一颗行星具备生命产生的条件。所以，我的结论是：适居性并不意味着有生命存在。

为什么如今搜寻地外生命的行动获得了科学界的认可呢？要知道，半个世纪前它还是一个禁忌话题！毫无疑问，如此多的太阳系外行星的发现，为天体生物学家提供了强大的动力。尽管在20世纪60年代我们没有发现太阳系

外行星，但大多数天文学家仍然推断它们是存在的。如今，天体生物学家进一步指出，在太空中发现的有机分子，可以证明宇宙中散布着适合产生生命的丰富“原材料”。也许情况的确如此，但在诸如氨基酸之类的简单生命构件与能够进行新陈代谢和复制的细胞之间，仍然存在着一条巨大的复杂性鸿沟。跨越这条鸿沟的最初一小步或许已经在太空中完成了，但这一事实几乎无关紧要。然而，当前人们对地外生命的存在持乐观态度，还有一个理由：人们认识到有些类型的生物能够在比我们过去的认知更广泛的物理条件下存活，这让人们对火星等行星上存在生命充满了期待，并且在一般意义上拓展了对类地行星的构成要素的定义。但这最多能让生命出现的概率增加一两倍。与这种乐观态度相反的观点是，在一锅由生命的构件组成的“化学汤”中，随机形成任何特定的复杂分子的概率都极低。在我看来，关于生命是如何产生的，我们几乎一无所知，所以试图估计生命出现的概率只是徒劳之举。你不可能算出一个未知过程的概率！就搜寻地外生命的计划能否成功这个问题，我们给出的答案没有任何置信度可言。

Carl Sagan, ‘The abundance of life-bearing planets’,
Bioastronomy News, vol. 7, 1 - 4 (1995).

关于生命无处不在，有一种论证具备一定的说服力。卡尔·萨根曾经写道：“生命的起源必定是一件极有可能发生的事，只要条件允许，它就会出现！”^⑤事实的确如此，在地球变得适合生命存活后，生命很快（从地质学的角度来讲）就在地球上出现了。因而，萨根推断生命必定很容易出现。遗憾的是，这一结论不一定成立。为什么呢？因为如果生命并未很快出现，它可能还来不及演化成智慧生物，地球就变得不适居了，被稳步增加的太阳热量烤成了“薯片”（在大约8亿年内，太阳的温度会变得非常高，能将地球的海洋煮沸）。简言之，除非生命不失时机地产生，否则我们今天根本不可能在这里探讨生命起源的问题。所以，考虑到我们在地球上的存在取决于地球生命的形成，地球生命的起源完全有可能是一个极端的异常值和一个巨大的奇迹。

在实验室里创造生命

人们有时会认为，如果能在实验室里创造出生命，就将清楚地证明，地球生命的产生不是一个意外，而是一件容易的事。媒体报道常会让公众误以为生命已经在实验室里被创造出来了，伴随它们的道德潜台词通常是，以这种方式“扮演上帝”可能会招致造出弗兰肯斯坦所遭受的那种报应。比如，

2010年5月20日的英国《每日电讯报》刊登了一篇题为《科学家克雷格·文特尔第一次在实验室里创造出生命，引发了关于人类“扮演上帝”的争议》的专题报道。这完全是一种误导，其误解来自对“创造”一词的模棱两可的解读。从某种意义上讲，人类创造生命的历史已经有几百年了，最明显的例子就是狗。狗是一种人工驯化的动物，它们的祖先是狼。经过数代的杂交育种和精心选择，人类才把狼驯化成狗。两万年前地球上只有狼，没有大丹犬或吉娃娃犬。近年来，基因移植等基因工程技术已经使很多新生物被创造出来，包括各种转基因食品。像CRISPR这样的基因编辑新技术，可以根据需要或多或少地改写基因组。文特尔及其同事所做的研究是出色且值得我们关注的。他以一种简单的微生物（生殖支原体）为实验对象，用定制版DNA替代了它原本的DNA。换句话说，文特尔几乎保留了所有的“硬件”部分（细胞），只改变了“软件”部分（DNA）。这种支原体热情地启动了新“软件”，并运行了再造的遗传指令。这种新生物被称为“实验室支原体”。就好比买了一台个人计算机，给它重新安装了你个人版本的操作系统，这能等同于创造了一台计算机吗？不能。如果我们草率地谈论在实验室里创造生命，就会将化学反应与信息（等同于硬件与软件）混同。我想表达的核心观点是，文特尔对现有生命的再造与从零开始创造生命完全不是一回事。

媒体报道偶尔会指出，雄心勃勃的目标即将实现。《纽约时报》于2011年7月27日发表了一篇报道，它的标题颇富戏剧性：《它活着！它活着！它也许就在地球上》。该文章写道：“少数化学家和生物学家……正在运用现代遗传学的工具，试图迸发弗兰肯斯坦式灵感的火花，以弥合横亘在非生命与生命之间的鸿沟。他们说，当试管中的化学物质变成生命之时，这一天就会到来。”这篇报道并未失实。然而，从事这项实验的科学家对生命的定义太宽泛了：能自复制且偶尔出现错误（突变）的分子混合物。从化学的角度来讲，该实验无疑是一项非凡的成就，也为解开生命的谜题提供了一块有用的拼图。不过，实验者应该承认，他们的分子复制系统距离自主存在的活细胞还差得很远。

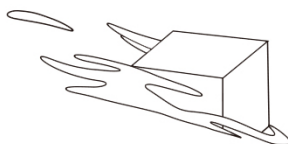
根本问题并不在于这些实验使用的组分过于简单，而在于更深层次的原因。即使想要获得目前媒体报道的这种有限的成功，也需要有特殊设备和技术人员、纯化和精炼的物质、高保真的物理条件，以及大笔资金。最关键的是，它还需要聪明的设计者（科学家）。有机化学家在开展实际操作之前，必须对自己要制造什么实体有一个事先的构想。我无意贬低从事这些研究的科学家，也并非不看好合成生物学领域的光明前景，而是要阐明这些研究成果与生命的自然起源之间的区别。天体生物学家想知道，在没有精良的设

备、纯化程序、环境稳定系统，以及（最重要的）聪明的设计者的情况下，生命是如何产生的。也许生命确实很容易在实验室里被制造出来，但仍然极不可能在肮脏且不确定的自然环境中自发产生。毕竟有机化学家能轻易地制造出塑料，但它并不能自发生成。像弓和箭这样的简单事物，尽管小孩也会制造，但它们绝不可能自发出现。所以，仅凭我们可能（会在某一天）发现生命很容易创造，无法证明生命的出现是“宇宙之必然”。

Erwin Schrödinger, *What is Life?* (Cambridge University Press, 1944), p. 80.

如果要给这场争辩画上句号，科学家必须以各种不同的方式一次又一次地合成生命，并揭示某些可应用于现实世界的通用原理。然而，这又会引发另一个深刻的问题：这些原理是潜藏在已知的科学知识之中，还是需要我们运用全新的知识去揭示它们？薛定谔对这个问题抱持开放的态度：“当常用的物理定律在解释生命方面遇到困难时，我们不能因此灰心丧气，因为我们已经获得的关于生物结构的知识带来的意料之中的结果。我们也必须做好准备去发现一种新的可以解释生命的物理定律。”^①我认同薛定谔的看法。我相信，新的定律和原理会从极其复杂的信息处理系统中涌现出来，而且对生命起源的充分解释将来自对这种系统的详尽研究。我会在本书的结语部分再次探讨这一猜想。

与此同时，在观测研究的前沿，一切并非毫无希望。



迷箱12

生命是一种行星现象吗？

正如我们所知，生命有三个基本特征：基因、新陈代谢和细胞。显然，它们并不是同时产生的，因此，生命起源研究面临的一大挑战，就是确定哪个特征最先出现。在这三个特征中，细胞是最容易形成的。正因为存在很多能自发产生细胞结构的物质，所以有一种早期猜想认为，早期地球上的大量小囊泡可用作天然的“试管”，大自然可以利用它们展开复杂的有机化学实验。细胞也能实现另一种重要功能。达尔文式演化需要一个个单位去做出选

择，而细胞正好符合要求。就算是一个非生物斑块，也可以通过分裂成两个更小的斑块而勉强实现复制，这为一群类似实体的演化开辟了道路。如果没有个体的存在，达尔文学说的原始版本就毫无意义。

Harold Morowitz and Eric Smith, *The Origin and Nature of Life on Earth: The Emergence of the Fourth Geosphere* (Cambridge University Press, 2016).

最近，一种相反的观点得到了关注。细胞也许是在复杂的化学反应已经建立了新陈代谢循环和网络等东西之后才出现的。这种化学自组织可能发生在在大尺度的地方，比如浩瀚的海洋。一旦新陈代谢过程实现了自维持和自增强，就为分裂产生独立单位开辟了道路，并伴随着活细胞的产生达到高潮。这是一种自上而下的生命起源路径。前细胞阶段可能只出现在热力学有利环境中，比如深海火山口，也可能遍布整个地球。埃里克·史密斯和已故的哈罗德·莫洛维兹认为，生命从本质上说是一种地质现象或行星现象，在这一过程中，早期地球的化学反应是与前生命共同演化的。他们推测，最终生命是从某种行星相变中产生的。^②这是一种有趣的假说。

影子生物圈

如果运气在生命产生的过程中只扮演了次要角色，并且正如德迪夫所说，这一过程更像“一种自然规律”或一种必然，那么生命的蓝图是否有可能以某种方式内嵌在物理定律之中，并因此成为一个本质上对生物友好的宇宙的预期产物呢？也许吧。问题在于，这些都是哲学沉思，而非科学思考。哪种定律暗示了只要条件允许，生命就会或多或少地自发出现呢？在物理定律中，没有哪一个会挑选生命作为它“偏爱”的状态或目标。目前发现的所有物理定律和化学反应都“无视生命”，也就是说，它们是丝毫不在意物质的生物状态的通用规律，对非生物状态的物质同样适用。如果自然界存在着有效的“生命原理”，那么它至今尚未被我们发现。

出于论证的需要，请允许我加入乐观主义者的阵营，他们认为生命很容易出现，并且在宇宙中广泛存在。如果生命的出现是必然发生的普遍之事，那么我们如何获得相关证据呢？如果我们发现了另一种生命样本（在另一颗行星、卫星或彗星上），使我们确信生命可以独立于已知生命从零开始产生，德迪夫的“宇宙之必然”假说就会立即得到证实。在我看来，寻求另一次生命起源，前景最光明的地方就是我们的星球。如果生命真的很容易产

生，正如很多科学家笃信的那样，生命在地球上应当有多次起源。我们怎么知道情况不是这样呢？有谁真正见过吗？

Paul C. W. Davies et al., ‘Signatures of a shadow biosphere’, *Astro biology*, vol. 9, no. 2, 241 – 51 (2009).

试着想象这样一种场景：40亿年前，生命在地球上出现。1000万年后，一颗大型小行星撞击地球，释放出巨大的热量，致使海洋被煮沸，地球表面一片死寂。然而，这个巨大的打击并未摧毁所有生命。大量岩石被喷射到太空中，其中有些含有地球的第一代微型“居民”。这些岩石会围绕太阳转动，其中的微生物可以存活数百万年。最终，有些岩石会以陨石的形式重新掉落到地球上，并将生命带回家。但与此同时，在灾难性的小行星撞击发生后的数百万年内，生命有了第二次起源（记住，生命很容易出现），所以当被喷射出去的岩石返回地球时，我们的星球上就有了两种生命形式。因为各种巨大天体的撞击持续了两亿年，同样的场景会一次次地上演，以至于当撞击的次数最终减少时，可能已经存在几十种互相独立地出现生命，它们共同居住在地球上。有一个令人着迷的问题：在这些我们尚不了解的生命形式中，是否至少有一种存活至今？几乎所有的地球生命都是从微生物开始的，而你不可能通过观察微生物的差异来判断不同的生命形式。你必须深入探究微生物的分子结构。所以，有可能存在这样一种情况：那些代表了我们的生命形式的微生物，与代表其他生命形式的微生物（真正的外来生物，有其独立的起源）混杂在一起。这些外来微生物种群被称为“影子生物圈”，它们带来了一种有趣的可能性，即我们眼前可能就有外来生物，但这种可能性至今仍被微生物学家所忽略。

发现“影子生物”是一大挑战。我和我的同事已经想出了一些宽泛的策略，我也在《怪异的沉默》（*The Eerie Silence*）一书中做出了相关解释。我们可以在极端环境中寻找这类生物，因为那些地方不存在已知生命形式——就连嗜极微生物也没有，比如海底火山口附近的流出物温度超过130摄氏度的区域。另一方面，如果影子生物与已知生命形式混杂在一起，寻找工作的难度就会更大。破坏或减缓所有已知生物的新陈代谢的化学制剂，可能会使少数影子微生物种群繁荣发展并凸显出来。已经有科学家开始沿着这一路线进行研究，但考虑到这一发现的重大影响，该研究得到的关注真是少得惊人。要解决这个问题，就需要发现一个微生物（一个即可），它代表的是我们不知道的生命形式。如果我们手上（或在我们的显微镜下）有一个生物，其生化特性与我们完全不同，就可以由此确定它有独立的起源，我们也会拥

有一个极具生物多样性的宇宙。如果生命能产生两次，那么它肯定也可以产生无数次。外来微生物并不必然存在于某个遥远的行星，它可能就在地球上。也许我们明天就会发现它，从而颠覆我们对宇宙和人类所处位置的看法，并极大地增加智慧生物存在于宇宙中其他地方的可能性。

John Maynard-Smith and Eörs Szathmáry, *The Major Transitions of Evolution* (Oxford University Press, 1995).

回顾过去35亿年的历史，生命的起源是其间最早和最重要的转变。然而，演化史也包含其他重大转变，如果没有这些关键步骤，接下来的进步就不可能发生。在生命出现之后，又过了10亿年左右，才发生了下一次重大转变：真核生物的诞生。另一次重大转变是有性繁殖，之后是从单细胞生物到多细胞生物的跃迁。是什么促成了这些更进一步的转变的发生？它们有共同的根本特征吗？真核生物、有性繁殖和多细胞生物都涉及显著的物理变化，但真正有意义的不是生物的形态或复杂性的变化，而是相伴而来的信息架构的重组。每一次转变都象征着一一次重大的“软件升级”，其中最重大的升级发生在大约5亿年前，即原始中枢神经系统的产生。从那时快进到今天，人类大脑成为已知最复杂的信息处理系统。毫无疑问，该系统产生了生命的神奇迷箱中最令人惊讶的谜题——意识。

第7章

机器中的幽灵

关于心灵的本质——意识，我们知道的和古罗马人一样多：一无所知。

Werner Loewenstein, *Physics in Mind* (Basic Books, 2013), p. 21.

——维尔纳·勒文施泰因^①

Erwin Schrödinger, *Mind and Matter* (Cambridge University Press, 1958).

在都柏林发表演讲的13年后，埃尔温·薛定谔在剑桥大学做的主题为“意识的物理学基础”的系列演讲中再次谈及生命。^②他聚焦于“什么样的物质过程与意识直接相关？”这个问题，继续用物理学家的视角解读非凡的生命现象。在生命的诸多令人困惑的属性中，意识尤其引人注目。它的起源无疑是当今科学面临的重大难题，也是人类在2500多年的苦思冥想之后依然几无头绪的唯一问题。如果薛定谔提出的“生命是什么？”这个问题已经被证明很难回答，那么“心灵是什么？”的问题则是难上加难。

一个引人注目的案例发生在本书写作期间，一个名叫查理·加德的婴儿生来就患有一种显然无法治愈的综合征，导致他几乎没有意识。法庭的裁决是移除他的生命支持系统，而非让他接受实验性治疗。

1973年，英国出现了一个著名的法律案例——眼虾案例。一个16岁的女孩因为用电炉煮活虾而被控告残忍地对待动物。这一控诉最终被撤销了，但它受到了苏联媒体的关注。当时英国正处于产业调整和经济衰退期。莫斯科媒体将眼虾案例视为西方堕落的例子：当工人们反抗正在崩塌的资本主义体系时，英国人怎么还在关心如此琐碎的事情呢？

对心灵或意识的解释不仅是一个学术上的挑战，很多伦理和法律问题都取决于意识是否或在多大程度上存在于生物体之中。比如，关于堕胎、安乐死、脑死亡、植物人状态和闭锁综合征的看法，都取决于相关主体在多大程度上拥有意识。^③人为地延长一个不再有意识的人的生命，是正确的做法吗？我们如何判断一个无法做出回应的脑卒中患者是否能意识到自己身处的

环境，以及是否需要得到照料？动物权利涉及对残忍的定义，它通常建立在非正式论证的基础上，比如动物是否及何时遭受痛苦或“感到疼痛”。^②有一个与此相关的新兴领域，即非生物智能。机器人有意识吗？如果有，它们有权利和责任吗？如果我们基于可靠的科学理论而接受了“意识程度”的定义，也许就能对这些有争议的问题做出更好的判断。

Gilbert Ryle, *The Concept of Mind* (Hutchinson, 1949).

我们缺乏关于意识的完备性理论。西方社会有一种流行观点认为，意识心理本身就是一个实体。该观点通常可追溯至17世纪的法国哲学家和科学家勒内·笛卡儿，他设想人类由两类事物构成——身体和心灵，即他指称的“广延实体”（物质实体）和“思想实体”（心灵实体）。在流行的基督教文化中，后一个概念有时会与灵魂发生混淆。信徒认为，有一种非物质的额外成分寓居在我们的身体中，并在我们死后飘到某处。近现代哲学家（就这一问题而言，还有神学家）通常不认同笛卡儿的二元论，并把它戏称为笛卡儿式“权力分立”；他们倾向于把人视为统一的实体。1949年，牛津大学哲学家吉尔伯特·赖尔发明了一个意含嘲讽的短语“机器中的幽灵”，用它来描述笛卡儿的立场（他称之为关于心灵的“官方观点”）。他不屑一顾地将控制我们的机械身体的无形心灵类比为司机操控汽车。^③赖尔认为，这一神秘的“教条”不仅在事实上是错误的，在概念上也存在严重缺陷。不过，在大众的想象中，心灵仍被视为机器中的某种模糊不清的幽灵。我在本书中已经论证了，用信息概念可以解释生物那些令人惊讶的属性。生物的信息处理机制的最高表现形式是大脑，所以我们很容易假定，信息的某个方面会在心灵与物质之间架起一座桥，就像它在生命与非生命之间做的那样。信息的漩涡模式不会形成“幽灵”，就像它不会形成“生命力”一样。不过，类似麦克斯韦妖的分子结构对信息的操控，也许是对赖尔嘲讽的二元论的微弱回应。然而，这种二元论并非植根于神秘主义，而是植根于严谨的物理学和计算理论。

意识产生于大脑吗？

Alan Turing, ‘Computing machines and intelligence’, *Mind*, vol. 49, 433 – 60 (1950).

这也是近年来上映的关于图灵的电影的名字。

我们在进入正题之前，先想一下：当我们在日常生活中谈论意识时，你口中的意识指什么。大多数人都会给出一个粗略的简单定义：意识是我们对周围环境和自身存在的一种感知。有些人可能还会提到自由意志。我们拥有由情感、想法和感觉构成的心理状态，而且我们的心理世界通过大脑，以某种方式与物理世界连接起来。这就是我们目前对意识的了解。如果我们试图更准确地定义意识，就会碰到和我们试图定义生命时一样的问题，甚至难度更大。对计算机的诞生做出了巨大贡献的数学家阿兰·图灵，于1950年在《思想》（*Mind*）期刊上发表了一篇论文，阐释了这一问题。^②图灵还在文中提出了一个意味深长的问题：“机器会思考吗？”这表明他预见了今天令人头疼的人工智能的本质问题。他的主要贡献是通过他的“模仿游戏”^③定义了意识，该游戏通常被称为“图灵测试”。它的基本思想是，如果一个人向一台机器发问，并且无法判断答案来自机器还是另一个人，这台机器就可被定义为“有意识的”。

有些人反对这个定义，因为即使计算机可以令人信服地模仿意识的表象，也不意味着它真的有意识；他们认为图灵测试纯粹是在以类比的方式定义意识。但是，我们不也一直在通过类比的方式与他人交流吗？笛卡儿写过一句知名的话：“我思，故我在。”不过，尽管我知道我自己的想法，但我不是你，所以我不可能知道你的想法。我也许可以通过与自身的类比，从你的行为推断出有意识寓居在你的身体中，但我永远无法确证这一点，反之亦然。我最多说：“你看上去好像正在思考，所以你看上去好像存在。”这里存在一种被称为“唯我论”的哲学立场，即否认其他意识的存在。我不会在这里详细探讨它，因为如果正在阅读本书的你不存在，你就不会对关于唯我论的论证感兴趣，我也会浪费自己的时间。

哲学家已经花了几百年的时间，试图融合意识（心灵）和物质（身体）这两个世界，这一复杂难解的问题有时也被称为“心身问题”。几千年来，关于意识或心灵的一个流行观点是，它是所有事物普遍的基本特征。这种学说被称为“泛灵论”，它有很多变体，但其共同特征是，它们都相信意识作为一种基本属性，遍布整个宇宙；而人类意识只是对宇宙精神实质的一种表达、聚焦和放大。从这个方面看，它与活力论有一些共同要素。这种想法一直延续到20世纪，比如，它的某些方面可以在荣格心理学中找到。然而，泛灵论不能很好地与现代神经科学相容，后者强调了电化学反应的复杂性。尤其是，较高级的大脑功能显然与神经结构的集体组织有关。如果说每个神经元都是一点儿意识，很多神经元的集合是十足的意识，那么这种说法毫无意义。只有当数百万个神经元被整合到一张高度互联的复杂网络中时，意识才

会产生。在人脑中，意识体验是由很多同时出现的构件组成的。比如，如果我意识到一片风景，我对它的瞬间体验就包括了来自整个视野的视觉信息和听觉信息，这些信息在大脑的不同区域得到精巧的处理，然后被整合成一个连贯的整体，并以某种方式传递给“意识自我”（无论它是什么），最终产生一种有意义的整体体验。

所有这一切引出了一个令人好奇的问题：意识究竟在哪里？一个显而易见的答案是，它位于我们的两耳之间。但我们还是无法完全确信这一点。长期以来，情感之源被认为并非与大脑有关，而是与其他器官有关，比如肠道、心脏和脾。事实上，古代信念的残留仍在，比如，愤怒的人会被描述为在“发泄他们的脾气”，我们还会用“肠道的感觉”（gut feeling）来指代直觉。而且，在浪漫的爱情中使用诸如“甜心”“心动”“伤心”之类的词汇，是很普遍的。你不太可能用“你是我的甜脑”（更不可能用“你是我的甜杏仁核”）这句话来赢得一位女性的芳心，即使从科学角度讲这样表述更准确。

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics* (Oxford University Press, 1989).

Fred Hoyle, *The Intelligent Universe* (Michael Joseph, 1983).

从根本上讲，我们如何确定意识之源只存在大脑内？你可能会认为，重击头部会导致人们失去意识，所以“意识之所”必定在颅骨内。但我们并不能通过逻辑推理得出这个结论。一个令我怒火难遏的新闻节目导致我把电视机砸了，屏幕一片空白，但这并不意味着新闻播音员就在电视机中。电视只是一个接收器，而真正的新闻播报行为发生在数千米之外的演播室中。大脑或许只是“意识信号”的接收器，而这些信号产生于其他地方？也许在南极洲？（这不是一种严肃的说法，我只是打个比方。）事实上，认为“外在”的某人或某物能“将想法放入我们的大脑”是一种普遍观点，笛卡儿本人就通过设想有一个淘气的“魔鬼”故意扰乱我们的心灵而提出了这种可能性。今天，有很多人相信心灵感应。所以，认为意识具有离域性的基本想法并没有那么牵强附会。有些杰出的科学家已经开始认同这样一种观点：出现在我们意识中的东西并非都发源于我们的大脑。一种流行且相当神秘的观点认为，数学灵感的闪现能以如下方式发生：数学家的意识以某种方式实现了“突破”，进入数学形式和关系的柏拉图王国，它不仅在大脑之外，还在时空之外。^②天文学家弗雷德·霍伊尔提出过一个更大胆的假说：大脑中的量子效应使外部信息可以输入我们的思维过程，并指导我们接近有用的科学概

念。他认为，这种“外部指导”可能是一种存在于遥远的未来宇宙的超级智能，它可以利用量子力学的一种微妙但众所周知的时光倒流属性，引领科学进步。^⑩即便这种疯狂的想法遭到驳斥，延展的意识也有可能在未来成为常态。通过将某些思想活动外包给强大的计算设备（可能位于云端），并通过Wi-Fi技术将其连接到大脑，人类的智力就能得到增强。所以，到那时我们应该将人类大脑的功能重新定义为：部分作为意识接收器，部分作为意识制造者。

在这里，“计算机”不是一个恰当的词，它与我们今天所说的计算机不是一回事，因为后者几乎肯定无法模拟意识。

我们的想法产生于大脑之外，这种猜想还有一个极端版本，那就是感知模拟理论。如今，它备受某些哲学家的青睐，并因为《黑客帝国》之类的电影而广为人知。它的大概观点是，我们以为的“真实世界”实际上是精致的虚拟现实，后者是由真实世界中真正的超级计算机创造出来的。^⑪其中，我们人类只是模拟意识的模件。我们对模拟者一无所知——他们是谁或什么形式的存在，抑或它是什么——因为我们被困在模拟系统内，我们根本不可能进入模拟者所在的超验世界。在我们所置身的虚假的模拟世界中，我们有（虚假的）模拟身体，包括模拟大脑，但伴随意识的真实想法、感觉和情感等，绝不是在虚假的大脑中产生的，而是在另一个平行世界的模拟系统中产生的。

思考这些稀奇古怪的场景是一件很有趣的事，但从此刻起，我将坚持一种保守的观点，即意识的确以某种方式产生于大脑。而且，我将探寻什么样的物理过程可以做到这一点。请不要对我这种狭义的议事日程感到失望，因为其中仍然存在着大量有待解决的挑战性问题。

心胜于物

即使是非唯我论者——接受其他人也有意识的那些人——也不会认同非人类生物拥有意识的观点。大多数人似乎愿意假设他们的宠物拥有意识，但即使沿着生命树回溯到它最原始的枝干，也无法找到一条明显的界线，更没有行为线索表明哪些生命形式是有意识的。老鼠有意识吗？苍蝇呢？蚂蚁呢？细菌呢？如果我们以类比的方式论证，意识的一个重要特征就是能感知环境，并能恰当地响应变化。细菌似乎是具有目的地朝着食物移动的，但

我们很难想象，一个细菌真的会像你我那样“感到饥饿”。然而，谁又能保证它不会如此呢？

有时，科学家会诉诸脑解剖学来探究意识问题。显然，大脑及相关神经系统所做的大部分工作都是无意识的。大脑的基本功能，比如处理和整合感觉信号、搜寻记忆、控制肌体活动、保持心脏跳动等，都是在无意识状态下完成的。当一个人失去意识时（比如，在深度睡眠中或处于麻醉状态），大脑的很多区域仍能正常工作，这表明整个大脑并不都是有意识的，或者更准确地说，产生意识只是部分脑区（通常是指皮质丘脑区域）的功能。但我们很难准确判断这一脑区有什么属性，而这些属性是其他无意识但仍然极为复杂的脑区不具备的。此外，表现出智能行为的某些动物，比如鸟类，拥有与人类迥然不同的大脑解剖结构，所以要么意识与智能之间并非密切相关，要么将意识归因于特定脑区的看法是一种误解。

有件事是没有争议的，即大脑能够处理信息。因此，人们总是试图从我们大脑内部的信息模式中寻找意识的来源。当主体体验到这种或那种感觉、情绪和感官输入时，大脑中发生了什么？针对这一问题，神经科学家已经在绘制大脑活动图谱方面取得了巨大进展，但这件事做起来并不容易。人类大脑包含了1000亿个神经元（与银河系中的恒星数量相当），并且每个神经元都会与成百上千个其他神经元连接，形成巨大的信息流网络。几十亿个快速激活的神经元会通过该网络传送复杂的、级联的电化学信号。在这种电子混沌中，连贯的意识以某种方式产生了。

对这个问题刨根究底，我们希望得到如下两个问题的答案：

第一，哪种物理过程产生了意识？这是薛定谔提出的问题。比如，大脑中的电涡流模式似乎可以产生意识，但全国电力网的电涡流模式能产生意识吗？如果你对前一种情况的回答是肯定的，而对后一种情况的回答是否定的，问题就出现了：意识的产生是否完全取决于模式，而与电无关？是否存在一个模式复杂性的临界值，以至于大脑足够复杂，电力网则不够复杂？如果模式能解释意识的产生，它必须与电有关，还是说任何复杂的闪烁模式都能产生意识，比如湍流或生物化学循环？又或者，是否需要某种其他成分，人们可能会把它称为意识的“电+”理论，果真如此的话，“+”代表什么东西呢？没人知道。

第二，考虑到意识是存在的，它们如何在物质世界中产生影响？意识如何与物质联结，从而对物质产生因果作用？这是古老的心身问题。如果我选

择移动我的胳膊，我的胳膊也移动了，那么在物理宇宙中必定有某个事物发生了变化（我胳膊的位置）。但这件事是如何发生的？我的“选择”或“决定”如何转化为原子的运动？如果你告诉我，我移动胳膊的愿望只是一种电涡流模式，是它激发电信号通过神经到达我的胳膊并引起肌肉收缩，那么你的这种说法毫无意义，因为这不过是诉诸第一个问题来解释第二个问题。

针对小孩子的心理学实验表明，直到两岁左右人才会发育出完整的自我意识。

看完我的描述，你会发现它隐含着一种总是出现在关于意识的讨论中的假设，即存在一个拥有意识的行为主体、人或实体。意识“属于”某个人。当然，我指的是自我意识。严格说来，我们必须区分对世界的意识和对自我的意识（自我意识）；也许一只苍蝇能够意识到这个世界，却不能像一个行为主体那样意识到自身的存在。毫无疑问，人类具有强烈的自我意识，^⑤以及某种“机器中的幽灵”般的感受。无论这种二元论有何哲学缺陷，我们似乎都可以肯定地说，几乎每个人都会把意识视为真实存在的东西。但它们究竟是什么呢？它们既不是物质，也不是以太物质。它们也许是信息？不是传统意义上的信息，而是大脑中涡旋的非常特殊的信息模式。神经回路中的信息流以某种方式产生意识，这种普遍性观点似乎显而易见，但对意识的充分解释还需要再进一步。如果意识的信息基础是正确的，意识的存在和信息的存在就是同一个问题。但我们不能让意识脱离物质而存在。正如罗尔夫·兰道尔告诉我们的那样，“信息就是物质的”，所以意识也必定与大脑中的物质活动有关。

但如何相关呢？

时间之矢

过去、现在和未来只是一种顽固而持久的幻觉。

Albert Einstein, letter to widow of his friend Michel Besso,
dated 21 March 1955.

——阿尔伯特·爱因斯坦^⑥

连接神经信息与意识的一条线索来自人类经验的最基本的方面，那就是我们对时间流逝的感知。即使在感觉剥夺的情况下，人们也能保有对自我和

自身持续存在的感知，所以时间的流逝是自我意识的一个组成部分。在第2章中我讲到，时间之矢的存在可以追溯到热力学第二定律，直至宇宙的初始条件。关于这一点，没有任何异议。然而，很多人混淆了物理学意义上的时间之矢和心理学意义上的时间流动感。科普文章中经常使用诸如“时间向前流动”或“时光倒流”的可能性之类的短语。

一个显而易见的事实是，我们的日常生活的时间上具有内在的方向性，如果我们看到反序现象，比如，打破的鸡蛋恢复如初或气体自动回到混合前的状态等，我们就会大吃一惊。注意，我是在以严谨的方式描述物理状态的时间序列，但人们常以“时间之矢”作为标准来探讨这一问题。这种用词不当的做法有严重的误导性，“矢”不是时间本身的一种属性。在这方面，时间与空间稍有不同。想想地球的自转，它定义了一种非对称性（在北极和南极之间）。我们有时也会用箭头（矢）来表示空间：指南针指向北，并且在地图上让箭头指向北方是一件约定俗成的事情。然而，我们绝对不会说，地球北极与南极之间的非对称性（或者地图上的箭头）是一种“空间之矢”。空间对自转的地球或南北极不以为意，类似地，时间也对鸡蛋的破碎或复原及气体的混合或分离漠不关心。

人们常把对时间流动的感知称为“时间之矢”，这种做法显然混淆了两种不同的比喻。第一种是用箭头来表明空间定向（正如指南针做的那样），第二种是用飞行的箭象征定向运动。当指南针的箭头指向北时，并不表示你正在向北移动。同样，为了在事件序列中把过去与未来区分开，而将箭头与世界上发生的一连串事件联系起来，这种做法本身没什么问题。但有问题或者说荒诞的是，声称这种非对称性箭头意味着一种沿着事件的时间轴朝向未来的运动，即时间的运动。

只要你注意到时间流逝不可测量，我的论证就会进一步得到强化。没有一种实验室里的仪器能探测到时间的流动。你可能正在想，难道时钟也不能测量时间的流动吗？的确不能。时钟测量的是事件之间的时间间隔，通过将时钟指针的位置与世界的状态（比如，球的位置或观察者的心理状态）关联起来实现。诸如“引力让时间变慢”和“时间在太空中比在地球上流逝得快”之类的非正式描述，其真正的意思是，在太空中时钟的指针走得比它在地球上慢（事实的确如此，我们很容易通过比较时钟的示数进行验证）。在所有术语中，被滥用最多的一个就是“时光倒流”。时间本身根本不会“流动”。正确的物理学表述应该是：在不变的时间中，物理状态的正常定向序

列是有可能逆转的，比如，在一场地震中废墟自发聚集起来形成一座建筑，麦克斯韦妖在混沌中创造秩序。逆转的不是时间本身，而是状态序列。

在任何情况下，时间显然都不会运动。运动描述了事物状态（比如，一个球的位置）从一个时间点到后来的时间点的改变。时间本身不能“运动”，除非存在另一个时间维度，让我们能据此判断时间的运动。毕竟，“时间过得有多快？”这个问题的答案只能是“一秒一秒地过”——这完全是同义反复！要是你还没被上述论证说服的话，请试着回答这样一个问题：“如果时间流逝的速率发生变化，你要怎么做才会知道呢？”如果时间的流逝加速或减速了，这个世界看起来会有什么不同吗？如果你明天醒来后时间的流逝速率加倍了，与此同时你的思维过程的速率也加倍了，那么一切看似都没变。同理，如果你醒来后，世间万物的速度都增至原来的两倍，你也一样，这个世界看上去就没什么不一样。一言以蔽之，“时间流逝”的字面意义是说不通的。

尽管哲学家提出上述观点是在一个多世纪以前，但“时间流逝”的比喻仍有着巨大的影响力，以至于日常语言很难不用到它。虽然很难，但并非不可能。所有涉及时间流逝的关于世界的陈述都可以被更复杂冗长的陈述取代，后者不会提到时间流逝，只会把这个世界每时每刻的状态与同一时刻的大脑/心灵状态联系起来。以“我们在下午6点满怀期待地欣赏了令人着迷的日落”的陈述为例。同样的基本可观测事实也能被复杂地表述为：“时钟指向下午5点50分时，太阳还在地平线上，观察者的大脑/心灵处于期盼状态；时钟指向下午6点10分时，太阳落到地平线以下，观察者的大脑/心灵处于迷醉状态。”在日常生活中，以非正式的方式说到时间之矢或时间流逝是不可避免的；但当追溯到时间的物理学意义本身时，就说不通了。

毫无疑问，我们有一种非常强烈的心理印象，即我们的意识会伴随着无法遏止的时间流逝而消逝，因此我们完全有理由为时间流逝的感觉寻求科学解释。在我看来，对于这种常见的感觉，可以由神经科学来提供解释，而不是物理学。我们可以用头晕来做一个粗略的类比。原地旋转几圈，然后突然停下来，你就会有一种强烈的印象，即世界正在围着你转，即使这显然不是事实。这种现象可被归因于内耳和大脑中的生理过程，你停下来后感觉自己还在旋转，这不过是一种幻觉。同样，关于时间运动的感觉也是一种幻觉，它在某种程度上大概与记忆在大脑中的存储方式有关。

由此得出结论：时间不会流逝。（希望你现在已经被我说服了！）

Lewis Carroll, Alice's Adventures in Wonderland (1865).

那么，是什么在流逝呢？我认为，答案是对转瞬即逝的自我的意识觉察，时时刻刻都在变化。认为时间在流逝或流动的错误观念，可归咎于人们对恒定自我的潜在假设。人们很自然地认为，当世界因为“时间流逝”而变化时，“他们”自身会保持不变。但正如刘易斯·卡罗尔创作的《爱丽丝漫游奇境》中爱丽丝所说：“回到昨天毫无必要，因为那时的我是另一个人。”^⑤爱丽丝说得对，今天的你不同于昨天的你。诚然，在今天的你和昨天的你之间存在着强相关关系，这两个你有很多共同之处，它们是由记忆、信念、欲望、态度和其他事物构成的一连串信息，通常变化得很慢，以致造成了一种连续的印象。但连续性不是守恒。未来的你与世界的（可观测的）未来状态相关，过去的你也与世界的（可观测的）过去状态相关。在每个时刻，与那时的世界状态相关的那个你都会把这种关联理解为“现在”。事实上，那个“现在”只是对那时的那个你而言。仅此而已！

对时间流逝的误解揭示了，“自我”是已存储信息的一种缓慢演化的复杂模式。该模式可以在之后的时间里存取，并提供一种信息模板，新的感知可据此完成匹配。因此，时间流逝的幻觉正是来自不可避免的轻微错配。

大脑电路中的麦克斯韦妖

There are other cells too, called glial cells. They actually outnumber neurons. Their role is still not completely clear.

关于难以捉摸的自我，就谈到这里吧。我们该怎么看待大脑呢？关于这个问题，我们有比较牢固的认知基础。只需稍做观察，就能发现大脑中充斥着电化学反应。我们先来看一些令人震惊的统计数字。人类大脑中约有1000亿个神经元，这些脑细胞是信息处理过程的“发电站”。^⑥每个神经元都有一根被称为轴突的纤维，长达一米及以上。轴突就像电线一样，将神经元连接起来形成一张致密的网络。轴突可以分叉几百次，每个神经元都能与多达1万个其他神经元相连。一个神经元的轴突不会直接进入另一个神经元，相反，神经元上布满了浓密的“毛发”（树突），轴突会与其中一个树突连接，其他轴突则会与同一个神经元的其他树突连接，从而创造出同时整合来自很多轴突的输入信号的机会。据估计，人脑中可能共有多达1000万亿个神经连接，其复杂程度令人震惊。神经元能以疯狂的速率“射击”（通过轴突发送脉冲），每秒可达50次。所有这些使得大脑每秒能执行大约 10^{15} 次逻辑

运算，比世界上最快的超级计算机还快。最引人注目的是，一台超级计算机每秒会产生数百万焦耳的热，而大脑执行类似任务时产生的热只相当于一个低瓦数的电灯泡！尽管这可能足以令人印象深刻，但大脑仍然在高于兰道尔极限很多个数量级的水平上运行（关于兰道尔极限的内容详见本书第53页）。

轴膜是神经元轴突表面的细胞膜。——编者注

See, for example, ‘Ion channels as Maxwell demons’, in: Werner Loewenstein, *The Touchstone of Life* (Oxford University Press, 1999).

大脑通常被比作一种电路，就电流是大脑运行的根本机制而言，这一说法是正确的。但计算机（或电力网）中的电信号是由在导线中流动的电子形成的，而轴突这种大脑中的“导线”的工作方式截然不同。轴膜^①上遍布小洞，这些小洞每次开关时只允许一个粒子通过，非常像麦克斯韦妖在操控挡板上的小门。^②在这个例子中，轴膜上的特异蛋白质会选择不同的离子（带电原子）而不是分子。这些小洞其实是窄管，被称为“电压门控离子通道”。它们通过打开和关闭“门”，让正确的离子通行，错误的离子则被拒之门外。这一机制以如下方式创造出沿轴突传播的电信号：当神经元处于惰性状态时，轴突内部带有负电荷，外部带有正电荷，这样一来轴膜内外就有了一个很小的电压（或者说极性）。轴膜本身是绝缘体，当来自神经元的信号抵达时，作为响应，“门”会打开，允许钠离子从轴膜外流入轴膜内，并使电压反转。接下来，不同的离子通道会打开，允许钾离子反向流动——从轴膜内流到轴膜外，恢复初始电压。这种极性反转通常只会持续千分之几秒，但转瞬即逝的干扰会在轴膜的相邻部分触发同样的过程，继而触发下一个相邻部分，以此类推。就这样，信号沿轴突传至另一个神经元。所以，尽管神经元会互相发送电信号，但信号只能通过极性行波来传递，而不是通过电流传递。

为了实现这一壮举，蛋白质需要具备令人惊讶的分辨能力。尤其是，它们需要在钠离子和钾离子之间做出区分（钾离子只比钠离子大一点儿），以便让正确的离子按各自的方向通过轴膜。蛋白质穿过轴膜，并提供了一个贯穿轴突内外的通道。该通道有一个狭窄的瓶颈，一次只允许一个粒子通过。极化的蛋白质产生的电场使效率最大化，只需做很少的功就可以推动离子穿过通道。当通道打开时，每秒通常会有数百万个离子穿过。蛋白质的分类精准度极高，每通过1000个离子，只有1个会出错。为了决定何时开启和关闭

“门”，成群的蛋白质运用传感器探测当极性行波到达附近时膜电位的变化。

这种麦克斯韦妖式活动的结果是，电流的脉冲（尖峰信号）沿成群或成列的轴突传递，直到它们到达另一个神经元（有时是另一个轴突），从而激发或抑制该神经元/轴突的活动。神经元不只是将信号循规蹈矩地传递给下一个神经元的无源继电器，它们还拥有在信号处理过程中起到至关重要作用的内在结构。具体来说，彼此分离的轴突与树突通过叫作突触的结构相连。突触中有约20纳米宽的间隙（被称为突触间隙），如果环境合适，信号就能越过这一间隙。在突触间隙中起到桥接作用的不是类似电流的东西，而是大量叫作神经递质的分子。我们对有些神经递质很熟悉，比如血清素和多巴胺，对其他一些神经递质则了解不多。这些分子被突触小泡（类似被膜包裹的微型细胞）释放出来，弥漫在突触间隙中，并与远端的受体结合。这样一来，电压变化就会在目标神经元中产生。比如，在静息状态下，神经元携带负电荷，与外部环境之间约有70毫伏的电压，并通过将离子泵出细胞膜来维持。神经递质的连接可促使细胞膜允许离子（比如，钠离子、钾离子、氯离子）通过，从而改变膜内外的电压。如果电压降到某个临界值以下（也就是说，细胞膜内的负电荷减少了），神经元就会发出脉冲信号并沿其轴突传导到其他神经元，以此类推。有些神经递质则会使膜内外的电压增加（细胞膜内的负电荷增加），这会抑制神经元发送信号。从许多神经元传来的信号可以进行汇聚和合并，所以神经系统就像一个逻辑电路，根据输入信号的组合状态，让神经元要么处于开启状态（发送信号），要么处于关闭状态（静息状态）。

大脑“电路”的结构本身又如何呢？有很多细节我们仍不清楚，但神经回路并不是静态的，它会根据个体的体验发生变化。比如，新的记忆就是通过主动重构大脑电路形成的。因此，婴儿的大脑中并非生来就有一张固定的“电路图”，而是有着密集的神经连接。这些神经连接可以随婴儿的成长和学习而不断被重构和修剪。

如何测量意识？

如果意识是涌现出来的，是一个有机整体涌现的集体产物，我们应该如何从信息的角度看待它呢？每个神经元都能处理一些信息，大量的神经元能处理更多的信息，这种说法是有道理的。但从算术角度看待信息（仅计算比特数）不过是另一种形式的泛灵论，因为它不能解释意识最重要的属性，即

来自不同脑区的信息被整合成一个整体。威斯康星大学麦迪逊分校的朱利奥·托诺尼及其同事试图定义“集成信息”，并用它测量意识。其核心思想是，用精确的数学语言描述一种直觉概念，即涉及大脑问题时整体大于部分之和。

恰当地说，如果神经网络被分解了（某些神经连接被剪断），它就会彻底停止思考。朱利奥·托诺尼用于测量意识的计算方法就采取了这一基本思路。然而，也许还有其他更有效的公式。

当应用于网络时，集成信息的概念就会十分清晰。试着想象一个有输入端和输出端的黑箱。黑箱里有一些电子产品，比如由逻辑元素（“AND”“OR”等运算符）连接起来的网络。从外部看，我们通常不可能仅通过检视输入和输出之间的因果关系就推导出电路布局，因为功能相同的黑箱可能由截然不同的电路构成。但如果箱子被打开，情况将会完全不同。假设你用一把剪刀剪断了网络中的某些导线，然后用各种输入数据重新运行系统。如果输出数据发生了显著改变，这个电路就可被描述为高度集成的；而在低度集成的电路图中，剪断一些导线影响并不大。举一个简单的例子，假设黑箱里有两个独立的自主电路，它们有各自的输入端和输出端。虽然我们可以用导线将这两个电路连接起来，但这种做法完全是多余的，因为没有信号会通过这些导线在两个电路间流动。我们可以肆无忌惮地剪断这些导线。^⑤

Giulio Tononi et al., ‘Integrated information theory: from consciousness to its physical substrate’, *Perspectives*, vol. 17, 450 (2016).

Larissa Albantakis, ‘A tale of two animats: what does it take to have goals?’, *FQXi prize essay* (2016).

Masafumi Oizumi, Larissa Albantakis and Giulio Tononi, ‘From the phenomenology to the mechanisms of consciousness: integrated information theory 3.0’, *PLoS Computational Biology*, vol. 10, issue 5, e1003588 (May 2014).

托诺尼及其同事设计了一种方法，通过检视把电路分解成片段的所有可能的方式，并搞清楚有多少信息会因此丢失，来计算一个通用电路的不能削减的互联性。高度集成的电路会因为分解而失去大量信息。以这种方式计算的精确集成度用希腊字母“ Φ ”表示。根据托诺尼的理论， Φ 值大的系统（比如大脑）在某种意义上比 Φ 值小的系统（比如恒温器）拥有更强的意

识。应该说明的是， Φ 的精确定义十分专业，我在这里就不做介绍了。^①一般而言，如果黑箱里的各种元素极大程度地限制着彼此的活动，比如，系统中存在大量的反馈回路和重要的交互作用， Φ 值就很大。但如果系统只涉及信息从输入端到输出端的单向有序流动（一种前馈系统）， Φ 值就为0。在前一种情况下，尽管从外部看黑箱似乎是一个单一系统，但事实上它是各自独立的信息处理过程的集成。生物学青睐集成系统（大脑就是一个最佳案例），因为从构成要素和连接方面讲，集成系统是更经济的系统，而且比功能相同的纯粹前馈系统更灵活。托诺尼研究小组的成员拉丽莎·阿尔巴塔基斯指出，生物（或机器人）表现出的自主性与高 Φ 值密不可分，“从内在视角看，一个具有因果自主性的实体需要有一个集成的因果结构；仅能‘处理’信息是不够的”。^②通过运用 Φ 来测量意识，研究人员发现了很多令人吃惊的现象：“有些简单系统拥有最低程度的意识，有些复杂系统却没有意识；两个功能相同的不同系统，可能其中一个有意识，而另一个没有意识。”^③

读到这里，你可能已经被专业术语搞得晕头转向了，让我做一个类比吧。想象有一个由20名成员组成的委员会，负责以保密的方式评选每年一次的“史密斯科学卓越奖”。提交给委员会的输入数据是被提名者名单及相关资料，他们的输出数据是获奖者名单。对公众而言，委员会看上去就是一个黑箱：被提名者名单进入黑箱，从黑箱里出来的是获奖者名单。但现在我们从内部视角来看这一过程。如果成员们是彼此独立且未经协商进行投票的，这个委员会就是非集成的，它的 Φ 值为0。但假设其中存在派系：有几位成员赞同区别对待原则，还有几位成员则认为该奖项被过多地授予了化学家，等等。由于存在群体归属需求，成员们的决策会相互制约。这样一来，就有了一种测量集成度的方法，它可以通过每个派系内部的“交联”来体现。此外，如果委员会进行了广泛的内部讨论（大量的反馈和交谈），然后做出了一致的决定， Φ 值就会达到最大。在这种情况下，如果委员会的某个成员被指定为速记员，负责记录整个决策过程，但不参与讨论，委员会的 Φ 值就会降低，因为它并不是完全集成的。

在辨识有意识的集成信息的过程中，会不可避免地出现许多仍未解答的问题，尤其是真实的神经功能与逻辑电路活动的相似度。尽管我们经常用计算机进行类比，但大多数神经科学家并未将大脑视为更高效的数字计算机。大脑的确能够处理信息，但其工作原理与我用来打字的个人计算机完全不同。我们甚至不清楚，大脑是不是以数字化的方式处理信息。大脑在运行很多神经功能时更像一台模拟计算机。然而，集成信息理论是一种值得肯定的

尝试，它以量化的方式认真对待意识，并能基于因果性和信息流，为意识测量问题提供理论支撑。

自由意志和行为主体

所以我说，原子必然会不时地略微偏离它的轨道。

Titus Lucretius Carus, *De rerum natura*, Book II, line 216.

——提图斯·卢克莱修·卡鲁斯 

人类意识有一个我们熟悉的属性，那就是自由感。它是这样一种感觉：未来会以某种方式向我们敞开大门，人类能够决定自己的命运，并根据自己的意志改变历史的轨迹。自由意味着，如果你想，你就可以停止阅读本章内容（但我希望你不要做出这一选择）。简言之，人类是作为行为主体而采取行动的。

一个世纪之前，自由意志似乎与科学水火不容。大脑是由原子构成的，原子会做原子该做的事情，即遵循物理定律。由于意识可以通过改变我们的大脑活动（并因此支配我们的行为）的方式影响未来，它必定也会以同样的方式对我们施加物理作用力。简言之，大脑中一个正在“开心地”向左运动的原子会突然向右运动。这一难题自古就为人所知，并被提图斯·卢克莱修·卡鲁斯戏称为“原子转向”。一个完全决定论的机械宇宙不会为自由意志留下任何空间；未来完全是由宇宙今天的状态决定的，包括大脑、神经元和构成大脑的原子本身。如果世界是一个封闭的机械系统，那么让意识扮演物理实在的角色似乎注定会失败，因为这无疑是过度决定论。

这是19世纪末的情况。随后量子力学出现了，它具有内在的不确定性。在恰当的环境下，由于量子的怪诞属性，一个正在向左运动的原子的确仅靠自身就能偏离轨道，突然向右运动。20世纪30年代，量子非决定论似乎拯救了人类的自由意志。然而，情况并非如此简单。要想拥有自由意志，我们就不会真的想要非决定论：我们希望自由意志可以决定自己的行为。所以，一种更微妙的观念浮出了水面。也许意识能通过“给量子骰子灌铅”间接地影响原子，这样一来，尽管原子可能有一种反复无常的固有倾向，但某种偏差或微移会在某处悄然产生。这就为意识进入物质世界提供了入口，允许意识通过诱骗的方式悄然潜入因果链的量子间隙。遗憾的是，即便如此，这也在统计学意义上违背了量子力学定律。量子物理学或许能容纳不确定性，但并

不等同于它能容纳混乱。量子力学涉及非常精确的概率规则，相当于一个“公平的骰子”，而被意识“灌铅”的骰子必然会违背量子规则。

那么，还有其他解决方案吗？为了实现行为主体与构成行为主体的原子及分子在行为上协调一致，科学家和哲学家已经耗费了大量时间。行为主体不一定是像人类那样有审慎动机的复杂生物，它可能只是一心寻求食物的微生物。行为主体有目的性的行为和其组分无目的性的行为之间仍然是脱节的。有目的性的行为（如果这一术语让你觉得不舒服，也可以称之为目标导向行为）是如何从不关心目标的原子和分子中涌现的？

信息论也许能给出答案。我们需要注意的第一件事是，行为主体不是一个封闭的系统。行为主体的出现本身就涉及对它所在环境的变化做出响应。当然，生物会以很多方式与其所在环境建立联系，正如我在前面的章节中指出的那样。但即便是非生物的行为主体，比如机器人，也能基于程序设置从其所在环境中收集信息，并对信息进行处理，从而做出恰当的物理响应。一个真正的封闭系统不会像一个行为主体那样（以统一的方式）行动。所以，这为解释过度决定论问题提供了一个切入点。只要系统是开放的，就存在着平行叙事的空间；其中一种叙事在原子层面上，另一种则在行为主体层面上，两者互不冲突。

想想人脑是如何被划分成诸多区域的，比如大脑左半球、大脑右半球、丘脑、皮质、杏仁核等。在这一整体结构中，并非所有神经元都相同。相反，它们根据不同的功能被组织成各种模块、群或簇。有一个精确定义的单位是“皮质柱”，该模块由几千个属性相似的神经元构成，它们可被视为单种种群。比如，在考虑刺激 - 响应关系时，神经科学家会将皮质柱视为个体单位。大脑中有一个功能明确的区域，对应的是皮肤表面的触觉。比如，连接到拇指的神经元的位置靠近连接到食指的神经元。如果某人刺破了你的拇指，你大脑特定区域的神经元模块就会被“点亮”，并激起运动反射（你可能会说“好疼！”）。神经科学家可以用因果关系来解释这一现象，他们把“拇指模块”视为一种简化的统一行为主体。

Erik Hoel, ‘Agent above, atom below: how agents causally emerge from their underlying microphysics’, FQXi prize essay (2017). Published in Anthony Aguirre, Brendan Foster and Zeeya Merali (eds.), *Wandering towards a Goal: How Can Mindless Mathematical Laws Give Rise to Aims and Intention?* (Springer, 2018), pp. 63 – 76.

实际上，每个人都认同，明智的做法是用更高级的模块来解释大脑活动，而非对每个神经元进行复杂得不可思议的描述。托诺尼的集成信息理论表明，更高级的描述更简单，而且更高级的系统实际上能比其组分处理更多的信息。这种反直觉的断言得到了托诺尼研究小组前成员、现就职于哥伦比亚大学的埃里克·赫尔的证实。赫尔运用通常的数学分析方法，并依据“有效信息理论”，研究了以某种方式（比如本书第240页提及的黑箱）将微观变量聚集起来的效应。^④他想搞清楚那些有着相关意图和目标导向行为的主体是如何从潜藏的微观物理系统中涌现出来的，而后者并不具备行为主体的相关属性。他的结论是，有些因果关系可能只存在于行为主体层面。这与还原论的大部分观点相反，在忽略了小尺度的内部特征的情况下，相较于对系统做出的更详尽、更细粒度的描述，物理系统的宏观状态（比如，一个行为主体的心理状态）实际上具有更大的因果力。他的研究结论可以总结成一句话：“宏观可以战胜微观。”

尽管有这些严谨的分析，但执拗的还原论者可能会指出，从原则上讲，对刺激－响应模式的完整描述仍然需要具体到系统的原子层面。在这令人厌烦的长期争论中，存在着一个明显的缺陷，因为它并未考虑系统的开放性。让我来解释一下。对刺激（比如，拇指被刺破）做出响应通常需要0.1秒的时间。现在想象一下，刺激－响应系统由上千个神经元构成，这些神经元又被数百万个轴突连接成网络，它们以每秒50次的频率发出信号。再回想一下前文中的讨论，类似麦克斯韦妖的系统可对钠离子和钾离子进入和离开轴突进行调节，从而驱动信号的传递。以每秒50次的频率发出信号的神经元会沿轴突传递信号，轴突涉及数百万个离子的交换。所以，在对被刺破的拇指做出响应之前的0.1秒内，系统会与神经元外环境交换几万亿个原子粒子。那些离开的粒子退出了有序的系统因果链，迷失在环境的随机热噪声中，并被其他蜂拥而至的粒子取代。因此，试图在原子尺度上用关于拇指被刺破的底层信息来解释刺激－响应模式是行不通的。就算从原则上讲，我们试图解释的因果链也不存在于那个层面。

顽固的还原论者会这样反驳：如果把系统的环境、系统的环境的环境……直到把整个宇宙都考虑进来，会怎么样？从原则上讲，这种观点认为，发生的每件事（包括大脑模块的活动）都能在原子或亚原子层面上得到解释。因此，如还原论者所说，为了拯救自由意志而诉诸行为主体的开放性，就是在钻一个假空子。但在我看来，还原论者的论证（通常由著名科学家提出）是荒谬的。没有证据表明宇宙是一个封闭的确定性系统，它有可能是无限的。即便不是无限的，它也是一种非确定性的量子系统。

量子大脑

尽管量子非决定论不能解释确定性的意志，但量子力学和意识之间的可感知联系仍是深刻和持久的。模糊的量子领域与具体的日常体验世界之间的连接处，正是人们期盼意识和物质相遇的地方。在量子力学中，这被称为“测量问题”，它也是问题所在。我在第5章中解释过，在原子层面事物是如何变得怪诞和含糊不清的。然而，一旦进行量子测量，结果就会变得精确和清晰。比如，如果一个粒子的位置被观测到，我们就会得到一个明确的结果。这样一来，之前的模糊突然变为明确，不确定性被确定性取代，诸多相互竞争的平行世界也会被单一的特定世界取代。现在的难题在于，测量系统包含了设备、实验室、物理学家、一些学生……它本身就是由遵从量子规则的原子构成的。在由薛定谔和其他物理学家提出的量子力学规则中，不存在任何能从量子微观世界所具有的鬼魅般重叠的伪现实特征中，投影出一个特定、单一和具体的现实世界的规则。这一问题如此棘手，以至于包括以通用构造器闻名的冯·诺依曼在内的一些物理学家认为，其中的“具体化因素”（这里的“具体化”通常被称为“波函数坍缩”）可能就是实验人员的意识。换句话说，当观测结果进入观测者的意识时，啪的一下，模糊的量子世界突然凝结成日常体验的现实世界。如果意识能做到这一点，那么它能以一种微妙的方式对物质产生影响吗？必须承认，今天认同这种对量子测量的精神论解释的科学家并不多，尽管学界仍未就如何对量子测量过程中发生的现象做出更好的解释达成共识。

Penrose, The Emperor's New Mind.

Penrose, The Emperor's New Mind.

牛津大学数学家罗杰·彭罗斯在大约30年前，针对量子模糊性与人类意识之间的关系提出了一种新看法。^①如果意识能以某种方式影响量子世界，那么出于对称性的考虑，我们可以预期量子效应也会在意识的产生过程中扮演某种角色。而且，除非大脑中存在量子效应，否则我们很难理解这一角色是如何扮演的。在第5章中，我描述了量子生物学领域如何解释光合作用和鸟类的导航行为，所以我们似乎有理由认为，神经元的行为可能也受到了量子过程的影响。彭罗斯就是这样认为的。更准确地说，他声称有些穿过神经元内部的微管可能会以量子力学的方式处理信息，从而极大程度地提升神经系统的信息处理能力，并在这一过程中以某种方式产生意识。^②在得出这一结论之前，彭罗斯及其同事、麻醉学家斯图尔特·哈梅罗夫考虑了麻醉效应。

在麻醉过程中，各种分子会渗入神经突触，在大脑的很多常规功能不受影响的情况下令患者失去意识。然而，这个过程仍未得到充分理解。

我们必须承认，彭罗斯和哈梅罗夫的理论已经引发了大量质疑。反对意见与退相干问题有关，我在“迷箱11”中解释过这个问题。简单想一想就能明白，在大脑内部温暖而嘈杂的环境中，量子效应的退相干速度会比思维的速度快得多。尽管我们很难得出明确的结论，但量子力学在此之前已经给我们带来了许多惊喜。

George F. R. Ellis, Denis Noble and Timothy O' Connor, 'Top-down causation: an integrating theme within and across the sciences?', Royal Society Interface Focus, vol. 2, 1-3 (2012).

A proposal somewhat along these lines has also been made by a group of physicists at Oxford University. See Kobi Kremnizer and André Ranchin, 'Integrated information-induced quantum collapse', Foundations of Physics, vol. 45, issue 8, 889-99 (2015).

我在前文中描述了朱利奥·托诺尼及其同事如何定义了一种被称为集成信息的量，并用 Φ 来表示它，用于测量意识程度，也为探索量子力学与意识之间的关系提供了另一种方法。回想一下，集成信息量化了一个复杂系统的整体功能大于部分功能之和的程度。因此，它取决于系统的整体状态：不仅取决于系统的大小或复杂性，还取决于其组分的组织方式，以及组分与整体之间的关系。像一个原子这样的简单量子系统的 Φ 值很小，但如果将该原子与测量设备结合起来，这个整体系统的 Φ 值就会变大，具体数值取决于设备的性质。如果一个有意识的人被纳入该系统，成为“设备”的一部分，那么 Φ 值当然会很大。不过，对该系统而言，人并非必要因素。如果量子系统随时间变化的方式取决于 Φ 值，会怎么样？如果不去管它，原子只会遵从由薛定谔在20世纪20年代提出的量子物理学的一般规律。但对拥有大量集成信息的十分复杂的系统来说（比如，一个人类观测者）， Φ 值则会变得至关重要，终将引发波函数坍缩，也就是说投影出单一的具体现实。这是另一个具有自上而下的因果关系的例子，^⑧作为整体的系统（在这个例子中，它的准确定义是由集成信息给出的）在原子这种较低层的组分上施加了因果力。在我的例子中，自上而下的因果关系是用信息来定义的，从而为信息法则被纳入基础物理学提供了一个明确的案例。^⑨

无论这些猜测性的想法有什么价值，我认为恰当的说法是：如果我们希望将意识纳入物理学理论，那么它需要以某种方式融入量子力学，因为量子力学是我们对自然界最强有力的描述。要么意识违背了量子力学，要么意识可被量子力学解释。

意识是目前头号科学性问题，甚至也是头号生存性问题。大多数科学家只想绕开它，认为它会让他们深陷泥潭，而那些已经投身其中的科学家和哲学家常常束手无策。信息论为我们提供了一条前进之路。大脑是一个结构极为复杂、组织极为精巧的信息处理器官。回望生命史，每次重大转变都涉及生物信息架构的重组。大脑是离我们最近的重大转变，它创造了能够思考的信息模式。

David Chalmers, *The Character of Consciousness* (Oxford University Press, 2010).

然而，并非每个人都认同破解信息架构问题就能解释意识，即便人们承认意识体验只与大脑中的信息模式有关。纽约大学的澳大利亚籍哲学家戴维·查尔默斯把意识问题划分成“简单问题”和“困难问题”。^②简单问题（事实上远没有那么简单）是指了解这种或那种体验的相关神经连接，也就是说，当行为主体看见这个事物或听到那个声音时，确认大脑中的哪些神经元被“点亮”了。这是科学研究能够胜任的部分。但就算我们知道所有的相关神经连接，也无法知道拥有这种或那种体验“会是什么感觉”。这就是内在主观性的一面，比如对红这种颜色的体验，哲学家称之为“主观体验特性”。有些人认为，与主观体验特性有关的难题永远也解不开，其部分原因与“我不能仅因为你的行为方式多少与我相似就确信你存在”的问题相同。果真如此的话，“意识是什么”的问题就会永远超出我们的认知范围而无法得到解答。

结语

当与生物打交道时，人们就能深刻地感受到物理学有多么原始。

Albert Einstein, letter to Leo Szilárd. See R. W. Clark, Einstein: The Life and Times (Avon, 1972).

——阿尔伯特·爱因斯坦 

薛定谔在1943年发表都柏林演讲时发起的挑战，至今仍能引起人们的共鸣。生命能用物理学来解释，还是说它是一个永恒的谜题？如果物理学能解释生命，那么现有的物理学能胜任这项任务吗，还是说我们可能需要全新的物理学——新概念乃至新定律？

在过去几年里，有一个现象越来越明显，那就是信息在物理学与生物学之间架起了一座有力的桥梁。直到最近，信息、能量和熵之间的相互作用才被阐明，而这距离麦克斯韦提出他那令人印象深刻的麦克斯韦妖的概念已过去了150多年。纳米技术的进步使科学家可以开展精巧得令人难以置信的实验，去验证涉及物理学、化学、生物学和计算等交叉领域的基本问题。尽管这些进展已经提供了有用的线索，但到目前为止，信息物理学在生物系统中的应用还很零散，也不成体系。我们缺少一系列全面的原理，用于在统一的理论框架内解释生命的神奇迷箱中的所有谜题。

尽管生物信息的确是在物质中实体化的，但它并非物质所固有的。零散的信息在生物体中留下了自己的行踪，在这一过程中，它们并没有违背物理定律，但也不能被这些定律解释，即我们不可能从已知的物理定律中得到信息定律。为了恰当地将生命与物理学融合起来，我们需要构建新的物理学。考虑到物理学和生物学之间的概念鸿沟如此之深，而且现有的物理定律已经为构成生物体的个体原子和分子提供了相当令人满意的解释，因此，对生命的充分解释显然涉及总体上更深刻的东西，至少需要对物理定律本身的性质做出修正。

自牛顿时代以来，物理学家对定律的理解一直相对狭隘。我们熟悉的物理学是在17世纪的欧洲发展起来的，而它一直受到天主教教义的束缚。尽管伽利略、牛顿及其同时代的科学家受到了古希腊思想的影响，但他们对物理定律的看法大多受到一神论的影响。根据一神论，有一个全能的神以一种理

性且明白易懂的方式指挥宇宙的运转。早期的科学家将物理定律视为神的意志。古典基督教神学坚持认为上帝是永恒不变的完美存在，超越了时空；上帝创造了随时间改变的物质世界，但上帝保持不变。因此，造物主和被造之物间的关系是不对等的：世界的持续存在完全取决于上帝，但上帝并不依存于世界。既然人们认为宇宙法则反映了神性，法则就必定是不变的。1630年，笛卡儿非常清晰地表达了这一观点：

René Descartes, *Philosophical Essays and Correspondence*, ed. Roger Ariew (Hackett, 2000), pp. 28 - 9.

正是上帝创造了自然规律，就像一个国王为自己的王国制定了律法……你将被告知，如果上帝已经创造了这些真理，那么他也能像国王改变律法一样改变他创造的规律。对于这个问题，我们可以肯定地说：是的，要是上帝意志能够改变的话。但我认为它们是永恒不变的。上帝同样如此。^②

在物理学中，“演化”一词与它在生物学中的定义完全不同，这容易造成概念混淆。

不可逆的原因在于，有关波函数的各个分支的相位信息被观测行为破坏了。

出于这些本质上属于神学的理由，300多年前建立的物理学反映了固定的法则与变化的世界之间的非对称性。这一观念已经影响我们太长时间，以至于我们很少注意到它是一个巨大的假设。但我们没有逻辑方面的理由认为它必定如此，也不能通过具有说服力的论证证明法则本身绝对不变。事实上，我已经探讨过一个基础物理学中的著名例子，它表明法则确实会随环境发生变化，那就是量子力学中的测量行为。测量或观测一个量子系统会引发其行为的巨变，这通常被称为波函数坍缩。我们可以对该现象做以下简要回顾：当不受其他因素干扰时，一个量子系统（比如，一个原子）会根据薛定谔提供的精确的数学法则演化；^③但当该系统与一个测量设备结合起来，并对某个量（比如，一个原子的能量）进行测量时，原子的状态就会突然变化（坍缩）。重要的是，前一种演化是可逆的，而后一种是不可逆的。所以，就量子系统而言，有两种完全不同的法则：当系统不受干扰时是一种，当系统被观测时则是另一种。注意，这里有一条与信息有关的线索。通过对一个量子系统进行测量，实验者会获得关于系统的信息（比如，一个原子处于哪个能级），但被测量系统的熵会激增。测量之后我们对系统先前状态的了解比测

量之前更少，因为坍塌是不可逆的。^⑫所以，实验者获得了一些信息，也失去了一些信息。

Charles Darwin, *On the Origin of Species* (John Murray; 1st edn, 1859), p. 490.

让我们回到生物学领域。显然，认为法则不会改变的观点并不适用。达尔文很早以前就在《物种起源》的结尾强调了如下差别：“……当地球按照固定的引力定律持续运转时，许许多多最美丽和最神奇的生命形式，即是从如此简单的开端演化而来，并且仍处于演化之中。”^⑬生物演化具有无限的多样性和新奇性，但缺乏可预测性，这与非生物系统的演化方式截然不同。然而，生物学领域并不处于混沌状态，其中有很多有序的规则，这些规则大多与生物的信息架构有关。以遗传密码为例：核苷酸的三联体“CGT”通过编码形成了一种名叫精氨酸的氨基酸（参见表1）。尽管这一编码规则没有例外情况，但由此把它视为像固定的引力定律一样的自然规律，就大错特错了。几乎可以肯定的是，从“CGT”到精氨酸的编码规则很早以前就出现了，它可能源于更早也更简单的规则。生物学领域充满了类似的例子，其中有些规则适用于很多生物，比如孟德尔的遗传定律；也有些规则的适用范围相当有限。当我们思考演化史这出大戏时，生命的游戏必定会被视为一种规则随时间变化的主观体验性游戏。

而且，规则通常取决于相关系统的状态。为了把这一重要观点表述清楚，让我做一个类比。国际象棋是一种有固定规则的游戏，但规则不能决定游戏的结果，而棋手可以。虽然有很多种可能的棋局，但如果我们仔细审视所有棋局就会发现，棋子在棋盘上的移动遵循的都是同样的游戏规则。现在，想象一种不同的象棋游戏（我们可以把它称为“象棋+”），它的规则可以随着游戏的进展而改变。尤其是，为了更好地与生物进行类比，它的规则变化取决于游戏的状态。比如，如果白方即将获胜，那么之后黑方被允许每次将“王”移动两格，而不是一格。再比如，如果黑方比白方多两个

“兵”，那么白方既可以让“兵”向前移动，也可以让它向后移动。（这些规则也许很愚蠢，但有些不那么极端的规则变化可能会让游戏变得更好玩。玩“象棋+”游戏时，一个初学者甚至可以战胜国际象棋大师。）我举的这两个例子涉及“改变规则的规则”或元规则，它们本身是固定的。但这只是为了便于说明，事实上元规则不一定是固定的：它们可能会遵从一种元-元规则，或者为了避免无限退行而随机变化（比如由抛硬币来决定）。在后一种情况下，“象棋+”就变成了一种部分依赖于技巧、部分取决于运气的游戏。

无论是哪种方式，“象棋+”的游戏规则都显然比传统象棋更加复杂，也更加不可预测，并且会产生多种游戏状态——棋盘上的棋子呈现出多种排布模式——而这些状态是有固定规则的传统国际象棋无法实现的。在这里，我们看到了生命的影子：生命开辟了各种“可能性空间”，这些区域是非生物系统无法进入的。

Nigel Goldenfeld and Carl Woese, ‘Life is physics: evolution as a collective phenomenon far from equilibrium’, *Annual Reviews of Condensed Matter Physics*, vol. 2, 375–99 (2011).

Nigel Goldenfeld and Carl Woese, ‘Life is physics: evolution as a collective phenomenon far from equilibrium’, *Annual Reviews of Condensed Matter Physics*, vol. 2, 375–99 (2011).

随状态函数改变的法则是对自我指涉概念的一种概括：一个系统能做什么取决于该系统是怎样变化的。回想一下第3章中介绍的自我指涉概念，继图灵和冯·诺依曼的工作之后，它成了通用计算和复制的核心。放松“法则必须固定不变”的严格要求，并将自我指涉考虑进来，这需要有一个全新的科学和数学分支，但少有人涉足该分支的研究。伊利诺伊大学的物理学家奈杰尔·戈登费尔德是认可这种方法的少数理论物理学家之一。“自我指涉应该成为正确理解演化现象的一个必不可少的部分，但它很少得到明确的思考。”他写道。^②戈登费尔德将生物学与物理学中像凝聚态理论这样的标准研究课题进行对比后发现，在物理学中，“支配系统随时间演化的规则与系统本身的状态之间存在着明显的分离……处于支配地位的方程并不依赖于方程的解。在生物学中，情况则有所不同。支配系统随时间演化的规则是以抽象的方式被编码的，最显而易见的例子就是基因组本身。系统随着时间推移而演化，基因组本身可以被修改，其支配规则本身也会被改变。从计算机科学的角度来讲，人们可能会说，物理世界可被视为由两种不同的组分构成：程序和数据。但在生物世界中，程序就是数据，反之亦然”。^③

Other commentators have suggested something similar. For example, Philip Ball writes, ‘If there’s a kind of physics behind biological teleology and agency, it has something to do with the same concept that seems to have become installed at the heart of fundamental physics itself: information.’ See ‘How life (and death) spring from disorder’, *Quanta*, 26 January 2017, p. 44.

George F. R. Ellis, Denis Noble and Timothy O' Connor, 'Top-down causation: an integrating theme within and across the sciences?', Royal Society Interface Focus, vol. 2, 1-3 (2012).

在第3章中，我描述了我的同事阿莉莎·亚当斯和萨拉·沃克做的一个简单实验，她们试图将自我指涉的状态相依性规则融入元胞自动机。果然，她们的计算机模型显示出生命的关键特征——无限的多样性。然而，这只是一幅草图。为了让她们的分析结论变为现实，有必要将自我指涉的状态相依性规则应用于复杂的真实物理系统的信息模式。这一工作尚未完成，我希望有人能大胆迎接这一挑战。^⑩最终产生的规则不同于传统的物理学法则，它将被应用于系统层面，而不是像粒子那样的个体组分，这是一种自上而下的因果关系。^⑪要想与我们已知并钟爱的物理学法则相容，新规则在粒子层面产生的任何影响都必须很小，否则我们就会注意到它们。但这不会成为障碍。由于大多数分子系统本就是混乱的、不易察觉的，微小的变化能累积起来并产生非常深远的影响。在微观层面，仍有大量空间可以让新物理学以一种我们至今尚未发现的方式发挥作用，不过，想在个体分子层面发现它是非常困难的。在诸多细微而广泛的影响因素共同作用下，它们对整个系统内的信息流产生的累积影响可能会占据支配地位，但仍然令人费解，因为潜在的因果机制被忽视了。

在复杂系统的行为中可能隐藏着新法则，或者至少是系统性规则，这并不是一个革命性的观点。几十年前人们就已经发现，精妙的数学模型潜藏在许多混沌系统中（这里的“混沌”指这类系统是 unpredictable 的，即使我们拥有关于力和初始条件的精确知识也无济于事。天气就是一个典型的例子）。于是，物理学家开始探讨“混沌的普遍性”。我在这里要提出的问题是“信息组织的普遍性”，并期待我们能在一大类特定的复杂系统中发现普遍的信息模式，该模式至少能在一定程度上解释生物的特征。

Sidney Fox, 'Pre-biotic roots of informed protein synthesis', in *Cosmic Beginnings and Human Ends*, eds. Clifford Matthews and Roy Abraham Varghese (Open Court, 1993), p. 91.

Gary Steinman and Marian Cole, 'Synthesis of biologically pertinent pep tides under possible primordial conditions', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 58, 735 (1976).

关于理论就谈到这里吧，尽管我们只了解了这些新观点的皮毛。其实验前景又如何呢？在这一问题上，我们将遭遇生物那令人难以置信的复杂性。如果我提出的新状态相依性信息法则只对生物有效，它就只是另一个版本的活力论。将物理学与生物学统一起来的理论，其总体目标是移除横亘在两者之间的所有障碍，由此我们就能期待新规则既在生物世界有效，也在非生物世界有效。几十年前在美国亚拉巴马州，整个职业生涯都专注于研究生命起源的生物化学家悉尼·福克斯声称已经发现了这样的效应。他发表的实验证据表明，当氨基酸相互连接成链状结构（被称为“肽链”）时，它们会倾向于组合成在生物学意义上有用的分子，也就是蛋白质。“氨基酸自行决定它们在缩合反应中的顺序。”他写道。^②若果真如此，他的断言就能证明化学法则会以某种方式支持生命，好像它们有先见之明一样。宾夕法尼亚州立大学的加里·斯坦曼和玛丽安·科尔也报告了非随机性肽链的形成，甚至还做出了更大胆的声明：“这些结果引发了一种猜想，即独特的、生物学意义上的肽序列也许在生命起源前就已经产生了。”^③

A start along these lines has been made in the following paper: Ivo Grosse et al., ‘Average mutual information of coding and noncoding DNA’, Pacific Symposium on Biocomputing, vol. 5, 611–20 (2000), where they write, ‘Here, we investigate if there exist species-independent statistical patterns that are different in coding and noncoding DNA. We introduce an information-theoretic quantity, the average mutual information (AMI), and we find that the probability distribution functions of the AMI are significantly different in coding and noncoding DNA.’

“化学反应能被巧妙地操控，从而有利于生命出现”这种观点遭到了广泛驳斥，事实上，福克斯和其他科学家提供的证据也少有人相信，它们表明化学反应确实会在构建分子对的过程中做出倾向性选择。这一过程在量子力学框架内很容易理解，但如果将信息法则应用于分子组织，情况可能就会完全不同。^④

很多物理学家（包括德迪夫）都支持“宇宙之必然”的观点，却没有意识到我们需要新法则或原则来快速追踪生命的起源。他们诉诸已知化学法则的普遍性，并有意避开本位主义——为什么我们/地球如此特殊？但这种观点有些一厢情愿，我十分怀疑已知的化学法则并未包含生命的原则，因为已知的化学法则没能在分子与信息之间架起概念的桥梁。

如果我们已经顺利找到了状态相依性信息法则的备选方案，它们就会提示我们：系统会以某些方式自组织，从而增强其信息处理能力，或者导致集成信息“不合理”地累积。最近的一项研究发现，在某些环境中，就因果力而言的确是“宏观战胜微观”。该结论提出了这样一种可能性：在复杂系统中，更高级和更古老的信息处理模块的自组织方式受到偏爱，这可能是一种普遍趋势。当我们从信息组织的角度而不是从化学反应的复杂性角度出发时，从非生物到生物的路径也许会短得多。若果真如此，它将极大地加快我们探究生命的再次起源的步伐。

在本书中，我已经绘制了正在迅猛发展的科学新领域的图景。正如我写的那样，几乎每天都有新论文发表或者新实验结果公布，它们直接影响了信息物理学及其在生命故事中扮演的角色。这是一个尚处于发展初期的领域，许多问题的答案尚未可知。如果存在着有效的新物理定律——也许是涉及状态相依性和自上而下的因果关系的信息定律——我们该如何让它们与已知的物理定律相容？这些新定律是确定性的，还是包含了偶然性的成分，就像量子力学那样？事实上，量子力学真的涉足其中吗？它在生命中确实扮演着不可或缺的角色吗？除了这些无法衡量的问题，关于生命起源，还有很多未解的难题。生命的信息模式最初是如何产生的？宇宙中的任何新事物都是法则和初始条件结合的产物。我们还不清楚生物信息形成的初始必要条件，或者即使先跳过这个问题，相比于信息法则或者复杂系统中其他有效的组织原则的运行，自然选择所扮演的角色到底有多重要，我们也不知道。所有这些问题都需要解答。

There is the even thornier question of where any laws ultimately come from, a topic that I tackled in *The Goldilocks Enigma* (2006).

一定会有人反对我阐述信息原则的方式，尤其是在深层次上赋予信息原则以“法则”的荣耀。尽管大多数科学家出于实用目的，都乐意按照他们自己的方式把信息模式视为“事物”，但还原论者坚称这只是一种方法论上的便利之举。而且从原则上说，所有这类“事物”都能被还原为基本粒子和物理法则，因此信息模式超出了“存在”的定义范畴。还原论者会警告我们，信息模式并非“真实存在”，它只存在于我们的想象中。尽管还原论者可能认同某些规则会在复杂系统中涌现出来，但他们坚称这些规则并不享有物理定律的基础地位（物理定律是所有系统的基础）。还原论者的观点无疑是强有力的，但它建立在对物理定律本质的一种重要假设之上。我们当前看待物

理定律的方式，导致了物理系统中的分层现象：物理定律位于底部的概念层，而涌现的定律堆积在上层，两者之间存在着断层。当遇到生物系统的问题时，分层现象就会变得特别明显，因为在生物学领域，不同层面之间及大小和复杂性各不相同的过程之间通常都能很好地融合：因果关系既可以是自下而上的（从基因到生物体），也可以是自上而下的（从生物体到基因）。为了将生命纳入物理定律的范畴，并且为信息本身作为一种基本实体的现实提供坚实的基础，正如我主张的那样，我们需要对物理定律的性质进行彻底的重新评估。 ②

“上帝鸿沟”是指，凡是无法给出科学或合理解释的现象，就用上帝的全知全能去解释；然而，上帝的存在本身也需要得到合理解释，于是就出现了“上帝鸿沟”。——译者注

Jacques Monod, *Chance and Necessity*, trans. A. Wainhouse (Vintage, 1971), p. 180.

Christian de Duve, *Vital Dust: The Origin and Evolution of Life on Earth* (Basic Books, 1995), p. 300.

如果你认为这些晦涩的思考只对少数科学家、哲学家和数学家来说很重要，那就大错特错了。它们不仅对于解释生命很重要，还对了解人类存在的本质和我们在宇宙中的位置来说意义重大。在达尔文之前，人们普遍认为是上帝创造了生命。今天，大多数人都接受生命是自然起源的。尽管科学家的确还不能对生命如何从非生命转变而来做出完备的解释，但转而支持生命是一次性奇迹的说法，又掉进了“上帝鸿沟” ③ 的陷阱，这意味着存在一个宇宙魔术师，他偶尔会按照自己的意志移动分子，但大多数时候都会让分子遵从固定的物理定律。然而，在“自然主义”的宽泛范畴中，存在着非常不同的哲学（甚至神学）意蕴。关于生命的起源，有两种对比鲜明的观点：一种是雅克·莫诺捍卫的偶然性假说，另一种是克里斯蒂安·德迪夫的“宇宙之必然”观念。莫诺诉诸生命的偶然性来支撑他的虚无主义哲学观。“古代圣约已经成了遗迹，”他悲观地写道，“（人类的）命运无从知晓，人类的责任同样如此。上天堂还是下地狱，这完全是个人的选择……宇宙并未孕育生命，也不是为了人类而形成生物圈。” ④ 在回应莫诺的消极信念时，德迪夫写道，“你错了，宇宙并非如此”， ⑤ 并继续发展他的“有意义的宇宙”的观点。归根结底，关键的问题是：生命起源能否与物理定律相容？那些定律能否把生物将要成为的样子奇迹般地预测出来？没有证据显示已知的物理定律有利于生命出现，或者说它们“对生命视而不见”。但是，如果存在我设想的那种新的状态相依性信息规律呢？我的预感是，它们并不具有预测生

命起源的特殊性，但它们可能会有利于形成广泛的复杂信息管理系统——我们知道生命就是这种系统的典型代表。通过这种普遍性方式，宇宙的定律也许本就是有利于生命诞生和存活的，这绝对是一个令人振奋的想法。

这些猜测性的观点远不同于认为“创造奇迹的神能从尘土中创造出生命”的观点。但如果生命（也许还有意识）的涌现被视为自然界中注定会发生的事，这就会使我们作为活生生的、会思考的存在，拥有一种宇宙层面上的意义。

那样的话，我们就会在宇宙中真正体验到家的感觉。（免费书分享更多搜索雅书）

延伸阅读

第1章 生命是什么？

Anthony Aguirre, Brendan Foster and Zeeya Merali (eds.), *Wandering towards a Goal: How Can Mindless Mathematical Laws Give Rise to Aims and Intention?* (Springer, 2018)

Philip Ball, ‘How life (and death) spring from disorder’, *Quanta*, 25 January 2017; <https://www.quantamagazine.org/the-computational-foundation-of-life-20170126/>

Steven Benner, *Life, the Universe and the Scientific Method* (The FfAME Press, 2009)

Paul Davies and Niels Gregersen (eds.), *Information and the Nature of Reality: From Physics to Metaphysics* (Cambridge University Press, 2010)

Nick Lane, *The Vital Question: Energy, Evolution and the Origins of Complex Life* (Norton, 2015)

Ilya Prigogine and Isabelle Stengers, *Order out of Chaos* (Heinemann, 1984) Erwin Schrödinger, *What is Life?* (Cambridge University Press, 1944; Canto edn, 2012)

Sara Walker, Paul Davies and George Ellis (eds.), *From Matter to Life: Information and Causality* (Cambridge University Press, 2017)

Carl Woese, ‘A new biology for a new century’, *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, vol. 68, no. 2, 173 – 86 (2004)

第2章 走近麦克斯韦妖

Derek Abbott, ‘Asymmetry and disorder: a decade of Parrondo’ s paradox’ , *Fluctuation and Noise Letters*, vol. 9, no. 1, 129 – 56 (2010)

R. Dean Astumian and Imre Derényi, ‘Fluctuation driven transport and models of molecular motors and pumps’ , *European Biophysics Journal*, vol. 27, 474 – 89 (1998)

Peter Atkins, *The Laws of Thermodynamics: A Very Short Introduction*(Oxford University Press, 2010)

Philip Ball, ‘Bacteria replicate close to the physical limit of efficiency’ , *Nature*, 20 September 2012;
<http://www.nature.com/news/bacteria-replicate-close-to-the-physical-limit-of-efficiency-1.11446>

Charles H. Bennett, ‘Notes on Landauer’ s principle, reversible computation and Maxwell’ s Demon’ , *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, vol. 34, 501 – 10 (2003)

Philippe M. Binder and Antoine Danchin, ‘Life’ s demons: information and order in biology’ , *European Molecular Biology Organization (EMBO) Reports*, vol. 12, no. 6, 495 – 9 (2011)

S. Chen et al., ‘Structural diversity of bacterial flagellar motors’ , *EMBO Jour nal*, 30 (14), 2972 – 81 (2011); doi:
<http://dx.doi.org/10.1038/emboj.2011.186>

Kensaku Chida et al., ‘Power generator driven by Maxwell’ s demon’ , *Nature Communications*, 8:15301 (2017)

Nathanaël Cottet et al., ‘Observing a quantum Maxwell demon at work’ , *Pro ceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 29, 7561 – 4 (2017)

Alexander R. Dunn and Andrew Price, ‘Energetics and forces in living cells’ , *Physics Today*, vol. 68, no. 2, 27 – 32 (2015)

George Dyson, *Turing's Cathedral: The Origins of the Digital Universe*(Vintage, 2012)

Lin Edwards, 'Maxwell's demon demonstration turns information into energy' , *PhysOrg.com*, 15 November 2010;
<https://phys.org/news/2010-11-maxwell-demon-energy.html>

Ian Ford, 'Maxwell's demon and the management of ignorance in stochastic thermodynamics' , *Contemporary Physics*, vol. 57, no. 3, 309 – 30 (2016)

Jennifer Frazer, 'Bacterial motors come in a dizzying array of models' , *Scientific American*, 16 December 2014

Gregory P. Harmer et al., 'Brownian ratchets and Parrondo's games' , *Chaos*, 11, 705 (2001); doi: 10.1063/1.1395623

Peter Hoffman, *Life's Ratchet* (Basic Books, 2012)

—, 'How molecular motors extract order from chaos' , *Reports on Progress in Physics*, vol. 79, 032601 (2016)

William Lanouette and Bela Silard, *Genius in the Shadows: A Biography of Leo Szilárd, the Man behind the Bomb* (University of Chicago Press, 1994)

C. H. Lineweaver, P. C. W. Davies and M. Ruse (eds.), *Complexity and the Arrow of Time* (Cambridge University Press, 2013)

Norman MacRae, *John von Neumann: The Scientific Genius Who Pioneered the Modern Computer, Game Theory, Nuclear Deterrence, and Much More* (American Mathematical Society; 2nd edn, 1999)

J. P. S. Peterson et al., 'Experimental demonstration of information to energy conversion in a quantum system at the Landauer limit' , *Proceedings of The Royal Society A*, vol. 472, issue 2188 (2016): 20150813

Takahiro Sagawa, ‘Thermodynamic and logical reversibilities revisited’, *Journal of Statistical Mechanics* (2014); doi: 10.1088/1742-5468/2014/03/P03025

Jimmy Soni and Rob Goodman, *A Mind at Play: How Claude Shannon Invented the Information Age* (Simon and Schuster, 2017)

第3章 生命的逻辑

Gregory Chaitin, *The Unknowable: Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science* (Springer, 1999)

Peter Csermely, ‘The wisdom of networks: a general adaptation and learning mechanism of complex systems’, *BioEssays*, 1700150 (2017)

Deborah Gordon, *Ants at Work: How an Insect Society is Organized* (Free Press, 2011)

Andrew Hodges, *Alan Turing: The Enigma: The Book that Inspired the Film ‘The Imitation Game’* (Princeton University Press, 2014)

Douglas Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (Basic Books, 1979)

Bernd-Olaf Küppers, *Information and the Origin of Life* (MIT Press, 1990)

Janna Levin, *A Madman Dreams of Turing Machines* (Knopf, 2006)

G. Longo et al., ‘Is information a proper observable for biological organization?’, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, vol. 109, 108–14 (2012)

Denis Noble, *Dance to the Tune of Life: Biological Relativity* (Cambridge University Press, 2017)

Paul Rendell, *Turing Machine Universality of the Game of Life: Emergence, Complexity and Computation* (Springer, 2015)

Stephen Wolfram, *A New Kind of Science* (Wolfram Media, 2002)

Hubert Yockey, *Information Theory, Evolution and the Origin of Life*(Cambridge University Press, 2005)

第4章 达尔文学说2.0

Daniel Dennett, *Darwin' s Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*(Simon and Schuster, 1995)

Robin Hesketh, *Introduction to Cancer Biology*(Cambridge University Press, 2013)

Eva Jablonka and Marion Lamb, *Evolution in Four Dimensions*(MIT Press, 2005)

George Johnson, *The Cancer Chronicles: Unlocking Medicine' s Deepest Mystery*(Vintage, 2014)

Stuart Kauffman, *The Origin of Order: Self- organization and Selection in Evolution*(Oxford University Press, 1993)

Lewis J..Kleinsmith, *Principles of Cancer Biology*(Pearson, 2005)

Matthew Niteki (ed.), *Evolutionary Innovations*(University of Chicago Press, 1990)

Massimo Pigliucci and Gerd B..Müller (eds.), *Evolution, the Extended Synthesis*(MIT Press, 2010)

Trygve Tollefsbol (ed.), *Handbook of Epigenetics*(Academic Press, 2011)

Andreas Wagner, *Arrival of the Fittest*(Current, 2014)

Robert A..Weinberg, *The Biology of Cancer*(Garland Science, 2007)

Edward Wilson, *The Meaning of Human Existence*(Liveright, 2015)

第5章 鬼魅般的量子 and 生命

Derek Abbott, Paul Davies and Arun Patti (eds.), *Quantum Aspects of Life*(Imperial College Press, 2008)

Richard Feynman, ‘Simulating physics with computers’ , *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, nos. 6/7 (1982)

Johnjoe McFadden and Jim Al-Khalili, *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*(Bantam Press, 2014)

Masoud Mohseni, Yasser Omar, Gregory S..Engel and Martin B..Plenio (eds.), *Quantum Effects in Biology*(Cambridge University Press, 2014)

Leonard Susskind and Art Friedman, *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*(Basic Books, 2015)

Peter G..Wolynes, ‘Some quantum weirdness in physiology’ , *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 106, no. 41, 17247 – 8 (13 October 2009)

第6章 生命的起源

A..G..Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life: A Scientific Detective Story*(Cambridge University Press, 1985)

Matthew Cobb, *Life’s Greatest Secret: The Race to Crack the Genetic Code*(Basic Books, 2015)

Paul Davies, *The Fifth Miracle: The Search for the Origin of Life* (Allen Lane, 1998)

Christian de Duve, *Vital Dust: The Origin and Evolution of Life on Earth*(Basic Books, 1995)

Freeman Dyson, *Origins of Life* (Cambridge University Press; 2nd edn, 1999)

Pier Luigi Luisi, *The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology* (Cambridge University Press; 2nd edn, 2016)

Eric Smith and Harold Morowitz, *The Origin and Nature of Life on Earth*(Cambridge University Press, 2016)

Woodruff T. Sullivan III and John A. Baross (eds.), *Planets and Life* (Cambridge University Press, 2007)

Sara Walker and George Cody, ‘Re-conceptualizing the origins of life’ ,*Philosophical Transactions of The Royal Society* (theme issue), vol. 375, issue 2109 (2017)

第7章 机器中的幽灵

David Chalmers, *The Conscious Mind: In Search of a Fundamental Theory*(Oxford University Press; rev. edn, 1997)

Daniel Dennett, *Consciousness Explained* (Little, Brown, 1991)

George Ellis, *How Can Physics Underlie the Mind? Top-down Causation in the Human Context* (Springer, 2016)

Douglas R. Hofstadter and Daniel C. Dennett, *The Mind’s I: Fantasies and Reflections on Self and Soul* (Basic Books, 2001)

Stuart Kauffman, *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity* (Oxford University Press,

1996)

Arthur Koestler, *The Ghost in the Machine* (Hutchinson, 1967)

Nancey Murphy, George F. R. Ellis and Timothy O' Connor (eds.),
Down ward Causation and the Neurobiology of Free Will (Springer,
2009)

Roger Penrose, *The Emperor' s New Mind: Concerning Computers,
Minds and the Laws of Physics* (Oxford University Press, 1989)

Bruce Rosenblum and Fred Kuttner, *Quantum Enigma: Physics
Encounters Consciousness* (Oxford University Press; 2nd edn, 2011)

索引

癌症

表观遗传

不可能的山峰

超距作用

地外生命

叠层石

泛灵论

非周期性晶体

耗散结构

基因网络理论

棘轮

集成信息理论

扩展演化综论

拉马克学说

兰道尔极限

量子计算

量子纠缠

麦克斯韦妖

鸟类导航

判定问题（停机问题）

社会性昆虫

生命游戏

生物电路

时间之矢

适应性突变

适者到来

嗜极生物

数字医生

隧穿效应

体细胞突变理论

天体生物学

通用构造器

图灵测试（模仿游戏）

图灵机（通用计算机）

退相干

微生物组

西拉德引擎

细胞周期

现代综合论

心身问题

信息引擎

形态发生

演化年龄层学

影子生物圈

宇宙之必然

元胞自动机

状态相依性规则

自催化

自繁殖

自我意识

自我指涉

自由意志

自主存在