

生命的定律

(中国科学院国家天文台 钱磊 编译自 Charles S. Cockell. *Physics Today*, 2017, (3): 43)

尽管生物具有令人惊叹的多样性，但是生命形式和生命过程受限于在大尺度和小尺度起作用的普适原理。

对生命现象认识的核心是，明确物理定律在何种程度上限定了在所有层次上可能的生物结构。最终，为了正确应对这个挑战，我们可能不得不找到另外的进化过程并进行统计上正确的比较。对可能存在的不寻常生命结构的研究动机大多来自天体生物学，这门科学的研究包括生命如何起源、进化并覆盖了地球表面，以及生命在其他地方是否存在，以什么形式存在。然而，即使没有观测到外星生命，我们仍然能从地球上的进化过程学到很多东西。

翅膀和轮子

在一篇现在已成经典的文章中，迈克尔·拉布拉(Michael La-Barbera)讨论了很早以来生物学家闲谈时最喜欢的一个问题：为什么生物不使用轮子？人们在各种形式的运动中都使用轮子。为什么生物拒绝它们？除了进化出旋转肌肉和静

脉的生物力学问题外，轮子还有一个固有的物理问题，它们受到地形的限制：它们不能克服高度大于其半径的障碍，除非被举起来。

相比更大的生物，地形对于身材矮小的蚂蚁而言更不规则。但即使在人类的尺度，腿对于克服障碍也比轮子有效得多。此外，许多基材，例如沙子或潮湿的土壤，会对轮子运动产生相当大的阻力。有趣的是，在世界上平坦干燥的平原地区，蜣螂推粪球(图1)，接近球形的风滚草球滚过原野。生物确实有潜力成功实现快速运输的地方探索了球或轮状的结构。

另一种形式的运动展示了不可克服的物理障碍。昆虫飞行的空气动力学现在是生物物理中蓬勃发展的课题。生物进化已经探索了大气中空气动力学升力的简单定律。在翅膀的上方产生一个低压区所需的特征性的机翼形状已经被磨练出来(图2)。然而，进化的雕琢不足以让

很多昆虫飞起来，它们臃肿的身体需要额外的帮助。在过去20年，有研究已经揭示了昆虫如何能从它们微小的翅膀获得每一点的升力和推力。有一种这样的机制被称为相对分合(clap and fling)。当翅膀进入逆行程时，它们拍在一起，这个策略将它们之间的空气挤出，提供了额外的推力。翅膀随后分开进入正行程，快速流入补充空隙的空气增强了翅膀表面的环流，从而增加了升力。

生命的分子极限

所有生物，从长翅膀的鸟到行走的蚂蚁都由分子构成。这些分子同样有极限。二十种氨基酸串在一起形成200个氨基酸的链就有 10^{260} 种可能的蛋白质。增长这条链，数量会更令人难以置信。要多少个世纪的生物化学研究才能搞清楚所有这些分子？然而，当研究人员对蛋白质测序并研究它们的折叠方式时，变得很明显的是，不管氨基酸的序列为何，可采用的那部分蛋白质的形态的数量确实是非常有限的。

氨基酸链和分子一样，倾向于以达到最低能量状态的方式折叠。每一个相接的折叠步骤都由热力学支配，以寻求最稳定的状态。这些步骤不是独立的，折叠蛋白质的一部分会影响蛋白质其他部分的折叠。蛋白质会寻求有限数量的热力学上有利的位形。



图1 轮子和生物。现在还不知道有什么生命形式用轮子替代腿，但在世界上地面干燥而平坦的地方，进化确实探索了用球或轮状装置作为高效的运输方式。图中一只蜣螂在将它的财富滚回家

一些生物学家一直在争论是否存在生物学定律，或者是否这个领域用达尔文进化论观点来看更好。这两种观点不仅是相容的，而且是分不开的。达尔文的进化论，通过变异和选择，测试了多种多样的形式，但产生的生物符合物理定律，受到在任何尺度都起作用的普适原理严格的限制。

生命的元素

一类陨石，碳质球粒陨石，包含一些我们太阳系中最原始的物质。人们发现它们含有糖(由此可以形成碳水化合物)、氨基酸(由此可以形成蛋白质)、长链羧酸(其性质像浸入水中的细胞膜脂质)甚至碱基(遗传编码的信息单元)。这些证据表明在太阳系的原行星盘(煎饼状的尘埃和岩石涡旋，我们的太阳和行星在其中形成)中，形成主要种类的生命分子的基本单元其合成条件是理想的。

使得碳适合作为生命原子的所有性质背后是一个简单的原理：泡利不相容原理，它确保加入轨道和亚轨道的电子整齐地配对。泡利不相容原理决定了相继的电子层，这些电子层确定了原子的半径和反应性。碳形成一系列氨基酸(无论是在躁动的生物中还是在原行星盘中混乱的旋涡气体中)的倾向性表明，泡利的原理是组装生物的基本物理基础。

达尔文的进化论是不能漫无目标地在元素周期表里挑选元素，创造无穷无尽的生命形式的。复杂的碳化学是生物学的一个特征，因为它是量子物理学的结果。

生物收集能量的机制

生物化学家皮特·米切尔首先提



图2 昆虫的翅膀。蜻蜓翅膀的结构不是进化中的偶然。相反，它是由物理定律引导的进化结果，这些物理定律导致了提取每一点可能的升力和推力的模式

出了生物从环境中提取能量的详细机制，他因为这项工作获得了1978年的诺贝尔化学奖。在原子中，生物体可能从中提取能量的是相对较容易接近的电子，米切尔的化学渗透过程所用的正是电子。

电子由供体(有失去电子倾向的分子)从环境中聚集起来，在细胞或线粒体膜中运动，然后被电子受体吸收。在你我体内，这层膜是线粒体膜，电子供体是有机物，电子受体是氧：你午饭吃的三明治是一种美味的吃电子的方式。

化学渗透美丽的简洁性在于，电子供体和受体的交换使得各种生命形式能在各种不同的地方生长。将电子受体从氧换成硫酸盐就有了可以在地下深处生活的硫酸盐还原菌——它们是负责生物圈中硫循环的微生物。将三明治换成铁、氢或氨作为电子供体就得到了化能无机自养生物，它们可以在岩石、火山热泉池和热液喷口中生活，依靠行星地质原始物质而不是阳光或来自其他有机体的有机食物。

物理还是随机？

生命必然是由物理定律塑造的。鸟儿必须符合空气动力学原理，蛋白质折叠必须符合热力学，使用电子的能量采集系统必须符合这些亚原子粒子的各种能量状态。不太明确的是，物理学在多大程度上限制了达尔文进化论的可能性的范围。人们早已理解了占主导地位的碳基分子而不是硅基分子构建生命所基于的物理原理。

物理学家的一项工作是研究在何种程度上偶然产生在不同层次的生命中是可能的，并探索生命系统结构的可预测性。在此探索中，天体生物学家的角色是试图确定我们是否能找到另外一个演化模式来检验这样的假设——生物(从能量采集系统到整个生物体的形式和形状)都被严格限制为几种形式。我已经在这篇文章和其他地方指出了这一点。尽管对于很多富有想象力的科幻作家而言可能是失望的，但如果这个假设最终被接受，我们就会发现地球上的生命不是一个例外。