

自然界复杂性的兴起

埃里克·j·查伊森

塔夫茨大学赖特科学教育中心, 马萨诸塞州梅德

福02155USA, USA电子邮件:eric.chaisson@tufts.

edu URL: www.tufts.edu/as/wright-center

摘要。宇宙进化——广义上的变化——已经成为所有科学中一个强大的统一因素，是整个自然界复杂性上升的基础。这种复杂性可以通过检查标准化能量在开放的、非平衡的热力学系统中流动的速率来定义和量化，从夸克到类星体，从微生物到心灵。

1. 介绍

科学目前有三大前沿:非常大的、非常小的和非常复杂的。在过去四分之一世纪的研究和教学中，我对这三个令人困惑的领域都做出了小小的贡献。更根本的是，我试图跨越它们的界限，探索它们之间的共性——特别是把天体物理学和生物化学结合在一个叫做“宇宙进化”的大交叉学科中。这样的工作有助于为天体生物学或生物天文学这一新兴学科提供智力蓝图。

一些同事在寻求统一的过程中探索了超弦、11维和全新的物理学。相比之下，我接受了明显围绕在我们周围的四维世界的进化概念，而不必引入任何新科学。但我对进化的看法是广泛而包容的，将达尔文主义纳入一个更广泛的方案，旨在理解所有空间和时间尺度上的变化。

宇宙进化是对整个宇宙历史中辐射、物质和生命之间许多不同的发展和生成变化的研究。因此，它不仅适用于天文系统，而且适用于所有有组织的结构，包括生命。因此，物理的、生物的和文化的进化都是这个综合的、进化的世界观的一部分。简而言之，我的尝试是将生命自然地、或许是不可避免地纳入更大的宇宙学视角。

2. 新结果

三年前，在99年的生物天文学会议上，我定量地描绘了一种将生命系统嵌入标准的大爆炸宇宙论的方法(查伊森)

2000;参见查伊森 1998年和1999年)。此后,我在一本长达一本书的专著(查伊森 2001)中加强并扩展了这一分析。

我的论点的关键是,所有有序结构都可以通过检查开放的非平衡系统的能量流动来进行经验判断。通过将流经这些系统的能量归一化到每个系统的质量,有序结构的复杂性——从星系到恒星到行星再到生命——就可以“在同一页上”进行比较。这种复杂性与规范化的能量流有关,我们不应该感到惊讶,因为在一个膨胀的、不平衡的宇宙中,是自由能从热力学上推动混沌的秩序,事实上,随着时间的推移,这种秩序在解耦后大约10年越来越明显。

所有这样的复杂系统都可以被证明符合热力学第二定律;在这样的系统中,熵在局部减少,但在其周围环境中,熵在全局上增加的量更大。然而,熵的度量很难用数字来指定,这类系统的信息内容也是如此。因此,考虑到获得、储存或表达的能量是明确定义的、物理上直观的和可测量的,采用能量学议程的另一个原因。能量——做功或引起变化的能力——是自然科学中已知的最通用的货币

在这里,我扩展了我之前的分析,总结了在广泛的物理、生物和文化系统中标准化的能量流的更多实证发现。除了少数例外,自由能率密度被证明是复杂性的一个有用的定量指标,实际上是复杂性从大爆炸到人类的上升。

图1绘制了各种有序系统的自由能率密度的上升,连接了覆盖这些系统在自然界中盛行的时间持续时间的水平直方图。正如预期的那样,在过去的几十亿年里,复杂性的上升非常迅速,特别是自寒武纪以来。固体曲线近似于标准化能量流的增加,这种能量流最好地表征了整个宇宙历史上的秩序、形式和结构。圈出的插入部分显示了通过各种恒星、行星、植物、动物、社会和机器的自由能率密度的进一步计算的更多细节。

以星星为例。恒星的复杂性肯定会随着它们的热梯度和元素梯度随着时间的推移而变陡;随着年龄的增长,需要更多的信息来描述它们。它们的能量率密度也会在时间上增加,从“诞生”的原恒星,到成熟中期“生命”的主序星,再到接近“死亡”的红巨星。这仅仅是天文学家使用的光/质量比的变化。周而复始,循环往复;建立、分解、改变——我们称之为恒星“进化”的过程,减去任何基因、遗传或显性功能,因为这些都是生物进化的增值品质,远远超出了天文系统的进化。

以动植物为例。在这里,除了一些例外,在整个进化过程中,复杂性的上升是显而易见的,能量流诊断学再次证明了这一点。这就是生物学家使用的特定代谢率的变化。生命形式每单位质量需要获得的能量比任何恒星都多,而且随着生物进化,这种需求越来越大。在生命的丛林中继续前进——细胞、组织、器官、有机体——我们发现的情况大同小异。从生命的前体分子开始,一直到植物、动物和大脑,总的趋势都是一样的

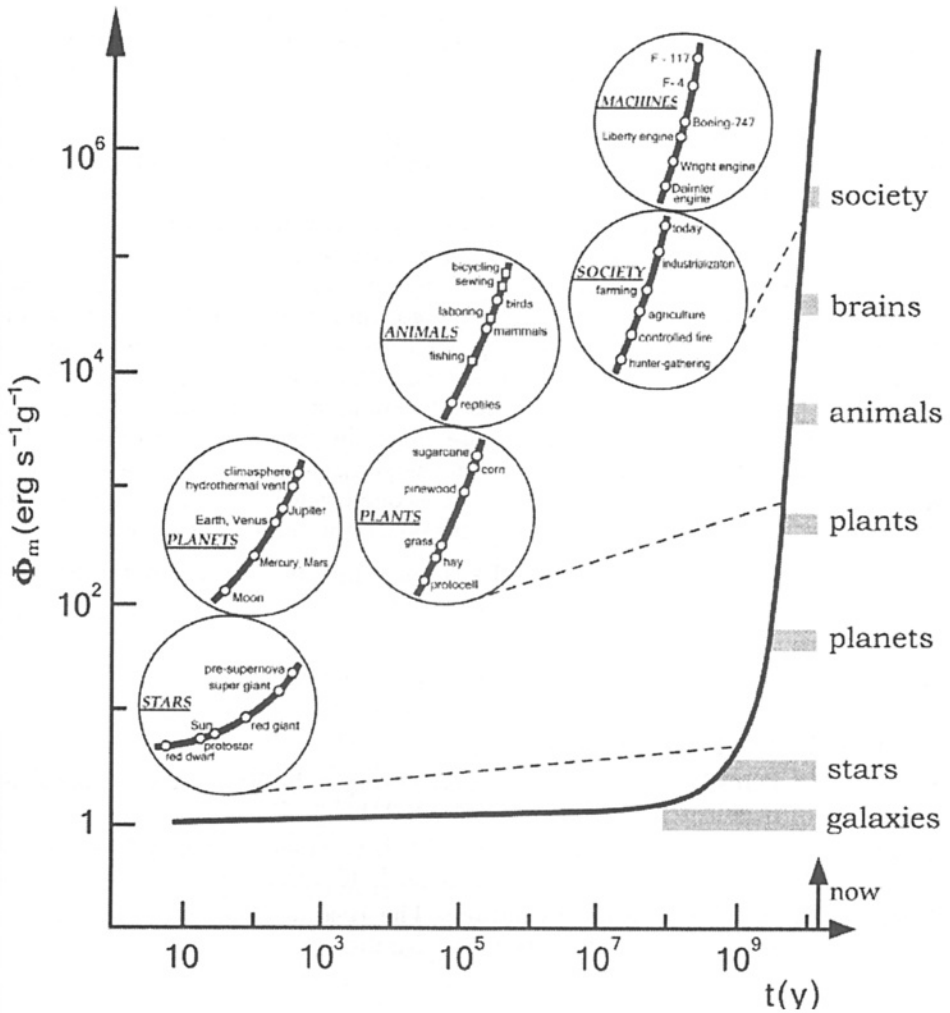


图1所示。自由能率密度 Φ_m ，在这里以 $\text{erg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 为单位计算，并以对数-对数尺度随时间绘制，在过去140亿的过程中出现的广泛有序系统中，自由能率密度急剧上升。

有生命的形式就像无生命的恒星和行星一样:系统的感知复杂性越大,通过该系统的能量密度流就越大——要么是为了建立它,要么是为了维持它,或者两者兼而有之。

最后,考虑一下社会及其文化的演变。再一次,我们可以追溯社会进步,主要是能源消耗,因为我们的原始人祖先取得了各种与人类相关的成就。从数量上讲,同样的能量率密度从一百万年前的狩猎采集者到过去几千年的农学家,再到当代的工业家,都在增加。而在这里,在通往文明的道路上,以及在我们制造的砖块、机器和芯片中,能量是驱动因素。能量率密度显然随着当今这个小工具丰富的社会的日益复杂而上升——任何担心功率密度的工程师都可以证明这一点。

与其他任何单一因素相比,能量流似乎是一个主要的手段,在这个过程中,大自然的各种系统自然地,也许是不可避免地,在一个不断膨胀的宇宙中产生了复杂性。其中一些系统利用了最佳的能量,从而进化出令人印象深刻的生命、思想和意识的典型复杂性——包括,尤其是,一种足以使我们回顾和探索沿着早期时间之箭发生的过去事件的有知觉的好奇心。反过来,能量,特别是人类对它的明智和最佳的利用,可能会引导我们未来的命运沿着持续的时间之箭前进。

一个关于宇宙演化的广泛的教育产品,适合大学和高级中学的入门课程,可以在赖特中心的网站上找到:www.tufts.edu/as/wright-center/cosmic-evolution。

致谢。这项工作得到了瑞士日内瓦达德利赖特基金会的部分支持。

参考文献。

Chaisson, E. J. 1998, *BioSystems*, 46, 13

Chaisson, E. J. 1999, in *Quest for a Unified Theory of Information* ed. Hofkirchner, (Amsterdam: Gordon & Breach), 231

Chaisson, E. J. 2000, in *ASP Conf. Ser. 213, Bioastronomy '99: A New Era in the Search for Life* ed. G. Lemarchand & K. Meech, 35

Chaisson, E. J. 2001, *Cosmic Evolution: The Rise of Complexity in Nature*, (London: Harvard University Press Cambridge)