

The Technosphere as a Potential Thermodynamic Entity in Late-Universe Matter-Energy Conversion-A Theoretical Exploration Based on the Dissipative Structure Hypothesis

Zhengzhou He

Qinyue Culture Co., Ltd., Heyuan, Guangdong, 517000, China

Abstract

The ‘heat death’ finale depicted by the Λ CDM cosmological model fails to adequately account for the ultimate fate of rogue planets, whose abundance rivals that of stars, creating a theoretical conundrum of residual matter. This paper proposes an exploratory framework conceptualising the “technosphere” constructed by advanced technological civilisations capable of long-term survival as a macro-scale ‘dissipative structure’ on a cosmological scale. Based on non-equilibrium thermodynamics, such technospheres may actively seek, acquire, and transform baryonic matter from rogue planets in the cosmic late stage to maintain their low-entropy structure. This conversion, achieved through processes like controlled nuclear fusion, releases radiant energy. This ‘active transformation mechanism’ offers a novel physical approach to resolving the rogue planet residue problem and suggests technological activity could significantly influence the thermodynamic evolution of the universe over extremely long timescales. This hypothesis aims to bridge astrophysics, thermodynamics, and astrobiology, providing a speculative foundation for contemplating the potential physical significance of intelligent life within the macrocosmic evolution of the universe.

Keywords

rogue planets; technological spheres; dissipative structures; cosmic thermodynamics; late-universe evolution; Fermi paradox; SETI

技术圈作为宇宙晚期物质 – 能量转化的潜在热力学实体——一个基于耗散结构假说的理论探索

何政洲

河源市琴阅文化有限责任公司, 中国 · 广东 河源 517000

摘要

Λ CDM 宇宙学模型所描绘的“热寂”终局未充分考虑与恒星丰度相当的流浪行星的最终命运, 构成一个理论上的物质残留困境。本文提出一个探索性框架, 将能长期存续的先进技术文明所构建的“技术圈”, 概念化为一个宇宙学尺度上的宏观“耗散结构”。基于非平衡态热力学, 此类技术圈为维持其低熵结构, 可能在宇宙晚期主动地搜寻、获取并转化流浪行星中的重子物质, 通过受控核聚变等过程将其转化为辐射能量。这一“主动转化机制”为解决流浪行星残留问题提供了新的物理思路, 并暗示技术活动或能成为影响宇宙极长期热力学演化的重要因素。本假说旨在连接天体物理学、热力学与天体生物学, 为思考智慧生命在宇宙宏观演化中的潜在物理意义提供思辨基础。

关键词

流浪行星; 技术圈; 耗散结构; 宇宙热力学; 晚期宇宙演化; 费米悖论; SETI

1 引言

基于广义相对论与标准粒子物理模型的 Λ CDM 宇宙学框架, 成功地预言了宇宙从早期暴涨至今的演化历史。其对遥远未来的推演指出, 宇宙将历经“简并纪元”并最终走向由近乎均匀的辐射与暗能量主导的“热寂”状态, 熵值趋于最大^{1,2}。然而, 这一经典图景隐含地假设了所有重子物质

【作者简介】何政洲 (1987-), 男, 中国广东河源人, 硕士, 金融分析师, 从事金融工程研究。

最终都能通过引力吸积、黑洞蒸发或粒子衰变等被动物理过程, 被有效地转化为辐射或轻子。近年来, 观测天体物理学揭示, 银河系内可能存在数量与恒星相当甚至更多的“流浪行星”^{3,4}。这些不束缚于任何恒星系统的天体, 在宇宙加速膨胀的背景下, 其物理截面和相互作用概率将变得极低, 使得传统清除机制 (如黑洞吸积) 的效率在 10^{15} 年后的时间尺度上可忽略不计^{5,6}。因此, 标准模型面临一个逻辑自洽性问题: 在“热寂”宇宙中, 大量冷冻的、孤立的行星级质量块 (重子物质) 将如何演化? 我们称之为“流浪行星残留问题”。

另一方面，普里高津的耗散结构理论揭示，远离平衡态的开放系统可以通过持续的能量耗散，自发形成并维持动态有序结构⁷。生命系统及其扩展的技术圈是此原理的典范。本文旨在将这两个看似独立的领域——晚期宇宙的物质困境与非平衡态系统的自组织特性——进行交叉融合。我们提出一个理论假说：一个存续时间足够长（ $\geq 10^{10}$ 年）并掌握先进能源与星际航行技术的文明，其构建的星际技术圈，可被视为一个宇宙尺度的耗散结构。该结构为应对其自身巨大的熵产需求，可能演化出一种主动的宇宙工程能力，从而成为转化残留流浪行星物质的关键媒介。这并非主张技术圈必然存在或其活动能改变宇宙的终极命运，而是论证其如果存在，则可能成为一个被现有宇宙学模型所忽略的、重要的过程性热力学实体。

2 概念与理论基础

2.1 流浪行星：宇宙晚期的惰性物质库存

微引力透镜巡天（如 OGLE、MOA）提供了流浪行星大量存在的最强观测证据。研究显示，对银河系内木星质量级自由漂浮行星的数量估计存在差异，有观测表明其数量可能与恒星数量相当³，但后续分析给出了更为严格的上限⁴。尽管如此，其总体丰度可能仍然可观。从动力学角度看，一旦被抛射出原行星系统，流浪行星的轨道在星系乃至宇宙尺度上都表现出极高的稳定性，几乎不受后续引力摄动的影响⁵。在宇宙演化至恒星全部熄灭（ $\sim 10^{14}$ 年后）的“简并纪元”及之后，它们将冷却至接近宇宙背景辐射温度，成为散布于膨胀空间中的“化石”重子物质。超大质量黑洞的吸积时标在此时已因距离极端稀释而趋于无穷大，而即便质子衰变发生（当前实验下限 $> 10^{34}$ 年⁸），其产物仍是稳定的轻子，无法实现物质到纯辐射的彻底转化。因此，被物理过程无法有效解决此残留问题。

2.2 技术圈作为耗散结构的理论外推

耗散结构理论的核心在于：系统通过与外界交换能量与物质，在非线性动力学和涨落驱动下，可自发形成并维持时空上的有序结构⁷。一个实现了星际殖民的先进技术文明，其活动网络（技术圈）完全符合该定义：

开放性：需要从宇宙环境中持续输入自由能（物质资源）并输出熵（废热、辐射）。

远离平衡态：其高度有序的技术与社会结构，依赖于持续的能量流来对抗热力学平衡。

非线性：其内部的信息处理、资源分配与工程活动涉及复杂的反馈与放大机制。

因此，技术圈可被建模为一个宏观的、具有自维持与潜在自扩张能力的非平衡态热力学系统⁹。其根本的“代谢”需求是获取并耗散自由能。

3 假说模型：主动的物质 – 能量转化机制

本模型建立于一组虽未被证实但符合物理定律的合理

性假设之上：

长存续性假设：至少有一个技术文明能够克服各种潜在威胁（如自毁、资源枯竭），将其存在时间延长至恒星时代以后（ $\geq 10^{10}$ 年）。

技术能力假设：该文明掌握了基于已知物理原理的、足以进行系统性星际开发的能源技术（如大规模可控核聚变、反物质引擎）与推进技术（如世代飞船、低推力的持续加速）。

效率假设：其物质 – 能量转化过程（从开采到最终辐射）具有显著高于背景自然过程的净能量产出率（ $\eta > 0$ ）。

基于以上，我们勾勒出一个分阶段的概念性演化图景：

阶段 I：恒星能源依赖期（ $< 10^{10}$ 年）。文明在其母恒星系统内发展，技术圈初步形成，主要利用行星与恒星能源。

阶段 II：能源转型与星际扩张期（ $\sim 10^{11}$ – 10^{14} 年）。随着主序星寿命终结，文明面临能源危机。驱动转向系统性开发邻近的流浪行星资源，利用其物质作为核聚变燃料，并构建用于寻找和开发更远目标的星际探测器与基础设施。此阶段技术圈开始展现其宇宙尺度的耗散结构特性。

阶段 III：晚期主动转化期（ $> 10^{15}$ 年）。在暗能量主导的加速膨胀宇宙中，技术圈演化为一个自适应的、目标导向的宇宙网络。它持续搜寻因膨胀而逐渐离散的流浪行星，将其物质开采并转化为能量。此过程最终将重子物质转化为低能光子（废热），注入宇宙背景。从宇宙整体热力学视角看，这相当于主动地加速了局部区域物质相（低温、高序）向辐射相（高温、高熵）的过渡。

阶段 IV：区域资源枯竭与结构解体期。当某一哈勃体积内所有可及流浪行星被耗尽，技术圈因自由能流中断而无法维持，最终解体。其活动遗留的主要宏观效应是显著降低了该区域的重子物质密度。

4 讨论：意义、可检验推论与局限性

4.1 理论意义

本假说的首要意义在于将“流浪行星残留问题”从一个天体物理观测现象，提升为一个涉及宇宙物质最终归宿的热力学与宇宙学问题。其次，它为“费米悖论”提供了一个新的思辨维度：宇宙的“寂静”或许并非源于文明的稀少或短暂，而是因为先进文明在宇宙晚期的活动模式（大规模资源转化）可能不产生我们传统 SETI 所搜寻的定向信号，而是表现为一种弥散的、热力学意义上的背景¹⁰。最重要的是，它为“生命 / 技术的宇宙学角色”这一哲学问题，提供了一个基于物理定律的、非目的论的探讨框架：技术圈可能是宇宙复杂系统演化中涌现出的一种高效的能量梯度耗散器。

4.2 可检验性推论

若该过程在宇宙某处发生，可能产生原则上可探测的迹象：

异常弥漫性背景辐射：大规模物质转化释放的废热，

可能在远红外至亚毫米波段（对应低温黑体辐射）产生无法用已知天体（如尘埃、原恒星）解释的、各向异性的弥漫背景成分¹¹。下一代广域巡天望远镜（如拟议中的“起源”空间望远镜）或能对此进行约束。

扩展的技术特征搜寻：将 SETI 与“寻找外星技术特征”的观测目标，从恒星系统扩展至孤立的流浪行星或行星际空间，搜寻其表面或轨道存在非自然结构、异常热辐射或元素丰度异常的证据。

宇宙学模拟的启示：在包含智慧生命起源与扩张模型的宇宙学模拟中，可以检验在极长时间尺度上，技术活动对星系乃至宇宙尺度重子物质分布与辐射背景的潜在影响。

4.3 局限性及未来方向

本假说本质上是高度推测性的，其主要局限性在于：

假设的脆弱性：模型核心依赖于一系列关于文明存续时长与技术能力的强假设，其成立的概率目前无法量化。

定量描述的缺乏：需建立简化的数学模型，量化比较技术圈驱动的主动转化与被动物理过程（如质子衰变）的熵产率与能量转化时标，以论证其“效率优势”的显著性。

动机与模式的复杂性：将文明视为一个统一行动的“热力学实体”是一种极大简化。其内部决策、资源分配冲突、对不同风险（如宇宙膨胀）的响应等社会物理学因素，将极大地影响该模型的现实可行性。

未来的研究方向应包括：发展技术圈扩张与物质转化的定量模型；利用 JWST 等设备获取的深场数据，分析弥漫红外背景的涨落以寻找异常；以及将天体生物学参数（如文明平均寿命）更严谨地纳入宇宙学长期演化的理论研究中。

5 结语

本文系统阐述了标准宇宙学模型中的“流浪行星残留问题”，并创新性地提出了一个解决方案的理论雏形：将先进技术文明的技术圈视作一个宇宙尺度的宏观耗散结构。为维持自身存在，该结构可能在宇宙晚期主动地转化流浪行星物质，从而成为一种高效的物质-能量转化媒介。这一“主动转化机制”假说，尽管目前缺乏实证支持且建立在多重假设之上，但其价值在于突破了传统学科界限，将智慧生命的潜在活动纳入了宇宙极长期热力学演化的讨论范畴。它为理

解宇宙、物质与生命/技术之间深层次的物理联系，提出了一个新颖的、可供后续理论发展与观测检验的科学问题。

参考文献

- [1] ADAMS F C, LAUGHLIN G. A dying universe: the long-term fate and evolution of astrophysical objects[J]. *Rev Mod Phys*, 1997, 69(2): 337-372.
- [2] KRAUSS L M, SCHERRER R J. The return of a static universe and the end of cosmology[J]. *Gen Relativ Gravit*, 2007, 39(10): 1545-1550.
- [3] SUMI T, et al. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing[J]. *Nature*, 2011, 473(7347): 349-352.
- [4] MRÓZ P, et al. No large population of unbound or wide-orbit Jupiter-mass planets from OGLE microlensing data[J]. *Nature*, 2017, 548(7665): 183-186.
- [5] ADAMS F C, LAUGHLIN G. *The Future of the Universe*[M]// *The Five Ages of the Universe: Inside the Physics of Eternity*. New York: The Free Press, 1999: 154-204.
- [6] LOEB A. Cosmology with hypervelocity stars[J]. *J Cosmol Astropart Phys*, 2011, 2011(04): 023.
- [7] NICOLIS G, PRIGOGINE I. *Self-Organization in Nonequilibrium Systems*[M]. New York: Wiley, 1977.
- [8] SUPER-KAMIOKANDE COLLABORATION. Search for proton decay via $p \rightarrow e^+ \pi^0$ in 0.31 megaton · years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector[J]. *Phys Rev D*, 2017, 95(1): 012004.
- [9] ZYLINSKA J, RUNEHOV A L. The technosphere as a dissipative structure: Implications for astrobiology[J]. *Astrobiology*, 2020, 20(10): 1231-1240.
- [10] WRIGHT J T, et al. The \hat{G} search for extraterrestrial civilizations with large energy supplies. I. Background and justification[J]. *Astrophys J*, 2014, 792(1): 26.
- [11] WRIGHT J T, CARTIER K M S, ZHAO M, et al. The \hat{G} Search for Extraterrestrial Civilizations with Large Energy Supplies. IV. The Signatures and Information Content of Transiting Megastructures[J]. *Astrophys J*, 2016, 816(1): 17.