

有力证据表明生命起源是地球类似物上的快速过程

David Kipping^{1,*}

¹Dept. of Astronomy, Columbia University, 550 W 120th St., New York, NY 10027

Abstract: 生命早期开始的简单想法暗示，在类似地球的行星上，生命起源是一个快速过程。然而，如果进化通常需要 ~ 4 十亿年才能产生像我们这样的智能生物形式，那么地球生物圈有限的寿命 (~ 5 -6 十亿年) 则要求我们的出现有一个早期 (可能非常非典型) 开始——这是一个弱人择原理的例子。我们先前提出的客观贝叶斯分析地球年代学最终得出了一种公式，用于计算生命起源快速和缓慢情景之间的最小赔率比 (相对于地球的寿命而言)。从微化石的时间点 (37 亿年前) 得出支持快速生命起源的赔率为 3:1，而来自碳同位素的证据 (4.1 十亿年前) 给出的赔率为 9:1，两者均低于“强证据”的标准阈值 (10:1)。然而，最近获得的 LUCA (42 亿年前) 的结果首次将赔率推过了这个阈值 (名义上为 13:1)。实际上，对于生物圈最终寿命的所有可能数值和古代文明的推测假设而言，赔率比是 $>10:1$ 。我们首次正式拥有强证据支持生命在类似地球条件下的快速出现这一假设 (尽管这样的环境本身可能稀少)。

% 生命早期起源的简单想法暗示了在类似地球的行星上，生命起源是一个快速过程。然而，如果进化通常需要约 40 亿年才能产生像我们这样的智慧生物，则地球生物圈有限的生命期 (5-60 亿年) 要求我们的出现有一个早期 (可能是高度非典型的) 开始——这是弱人择原理的一个例子。在之前的工作中，本文作者对地球的年代进行了客观贝叶斯分析，并最终得出了一种公式来计算生命起源快速和缓慢情景之间的最小赔率比 (相对于地球的生命期)。从微化石时间 (37 亿年前) 得出了支持快速生命起源的 3:1 的赔率，而来自碳同位素证据 (41 亿年前) 给出的赔率为 9:1，两者都低于“强证据”的标准阈值 (10:1)。然而，最近 Moody 等人的 (2024) 42 亿年前 LUCA 的结果首次将赔率推过了这个门槛 (名义上的 13:1)。事实上，对于生物圈最终寿命的所有可能值以及古代文明的推测性假设，赔率比都大于 10:1。我们第一次有了正式的强证据支持生命在类似地球条件下迅速出现的假设 (尽管这样的环境本身可能很罕见)。

1 弱人择原理提出的推理难题

地球上生命存在的最早化石证据来自格陵兰西南部 37 亿年前的变质沉积岩，其中含有 1-4 厘米高的叠层石 [1]。一旦大约 $(4.404 \pm 0.008)\text{Ga}$ [2] 时海洋形成，地球可能就变得适合生命出现，因此生命显然开始得很快 ($\leq 700\text{Myr}$)。假设这个时间尺度在类似地球的系外行星上是典型的，从而得出“生命不是一件挑剔、犹豫和不太可能的事情”，引用与叠层石发现相关的评论文章 [3]。

然而，考虑进化过程所需的时间尺度，以产生具有统计学、地质学、古生物学等能力的自我意识生

物¹是相当长的,比如 37 亿年,就像这里发生的那样。据估计,由于太阳亮度的增加,地球的生物圈将在大约 0.9 Gyr[4] 内崩溃,这意味着生命的最新纪元开始并仍有时间发展到像我们这样的形式将是 28 亿年前。在这个图景中,生命必须在 23 亿年前 (3.6 ± 0.8) 开始——否则我们就不会在这里讨论它了。因此,观测到的 37 亿年的值并不令人惊讶。这是一个选择效应影响我们的偏见的例子,具体来说是所谓的“弱人择原理”[5]的一个案例。

贝叶斯统计学家此前曾试图根据这一时间线评估快速生命起源的可能性[6]。然而,最初的工作不允许同时推断生命起源和进化的时间尺度,考虑到弱人择原理带来的共变性这一点至关重要。本文作者解决了这个问题[7],并将问题重新表述为假设比较(而不是后验推理),从而消除了看似主观选择的先验对出现率的影响。结果得到了快速与慢速生命起源情景之间的最小值赔率比,由以下表达式给出

$$\frac{\mathcal{Z}_{\text{fast-life}}}{\mathcal{Z}_{\text{slow-life}}} \geq \begin{cases} \frac{T}{2t'_L} & \text{if } T \geq 2t'_L + t'_I, \\ \frac{Tt'_L}{4(T-t'_I)t'_L - 2t'^2_L - (T-t'_I)^2} & \text{if } T < 2t'_L + t'_I, \end{cases} \quad (1)$$

其中, T 是地球生物圈的寿命, t'_L 是生命第一次出现在历史记录中的时间(这必然晚于真正的出现日期),而 t'_I 则是从那时直到智能生命出现的时间(假设为当前纪元)。利用先前发表的 $T = 5.304\text{Gyr}$ [2, 4]、来自微化石的 $t'_L = 0.7\text{Gyr}$ [1] 和 $t'_I + t'_L = 4.404\text{Gyr}$ (即,智能体最近出现)的估计值,可以得到 3.8:1 的几率比。通过分析碳-13/12 同位素比率[8],表明生命开始于 4 亿年前 ($4.10 \pm 0.01\text{Gya}$),这会将几率调整为 8.7:1。然而,两者都未达到通常用来定义“强证据”的 10:1 的阈值[9]。因此,迄今为止的证据令人着迷但并不实质。

% 假设生命起源是快速过程与缓慢过程的几率比。每条曲线代表了使用公式 1 计算出的几率比,作为生物圈最终寿命 T 的函数——尽管我们已经减去了现代纪元以得到 x 轴上的剩余时间。关于生命最早证据的先前估计给出了虚线和点划线,但 42 亿年前的新 LUCA 日期极大地提高了几率因子。事实上,三条实线显示了无论怎样选择 T 或甚至是非常极端的选择(石炭纪和寒武纪时期)作为地球上最早的文明 t_{I} ,几率总是大于 10:1——这由表示最小值的圆圈所证明。

2 LUCA 生活于 42 亿年前的意义

最近的一项研究[10]通过利用前 LUCA 基因重复的分歧时间分析和使用微生物化石及同位素记录进行校准,对这些数字进行了修订,并确定了最后通用共同祖先(LUCA)的时间。更新公式(1)以考虑到 LUCA 生活在 $4.20^{+0.13}_{-0.11}$ 亿年前[10](95%置信区间),最终将我们推过了阈值至 $13.0^{+5.4}_{-3.1}:1$ (68.3%置信区间)。然而,结果比这还要深远。

有人可能会质疑方程(1)中使用的两个数字: T 和 t'_I 。关于 T ,最近的论点是[11]寿命可能比先前计算的(0.9 Gyr)长得多,达到 1.8 Gyr,并且这将几率调整为 $15.2^{+6.3}_{-3.6}:1$ 。然而,有人可能会质疑文明是否真的能够在地球生物圈衰落末期[12]中出现,并因此主张采取更为保守的 T 。图 1 显示了在公式(1)中变化 T 的影响。我们当然知道 $T \geq 4.404\text{Gy}$ (因为那是我们的到达日期),因此可以发现,在所有情况中,几率超过 11.3,并在 $T = 4.6\text{Gy}$ 处达到最小值(从现在起 2 亿年)。

结果甚至比这更稳健。因为也有人可能会质疑 t'_I 。志留纪假说表明,文明可能早在石炭纪时期(3.5 亿年前)就已经出现,而今天我们对此没有任何记录[13]。图 1 显示,即使这种情况下也导致了所有

¹本文中可能定义的“智能”,尽管承认这是一个定义不清且带有偏见的术语。

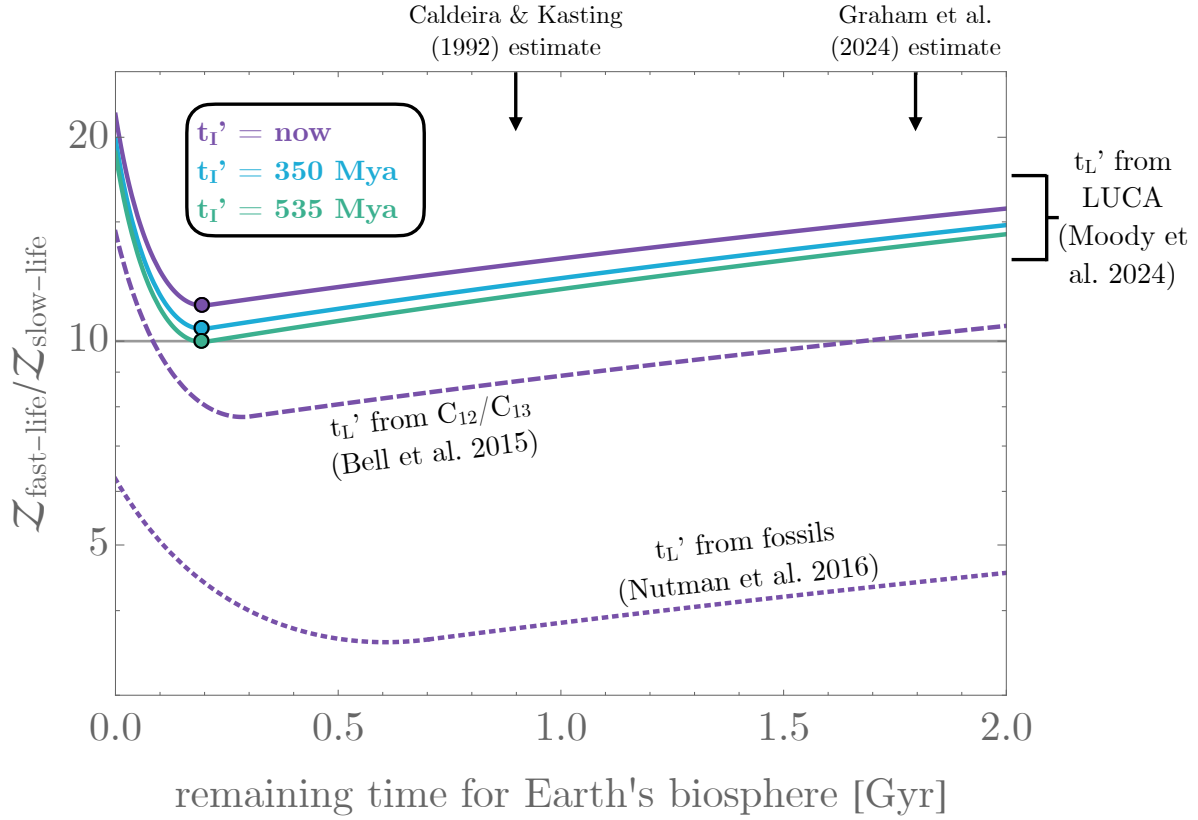


Figure 1: 假设生命起源是一个快速过程与慢速过程的比值。每条曲线代表使用公式 1 计算出的比值，作为生物圈最终寿命的功能， T ——尽管我们已经减去了现代纪元以得出在 x 轴上的剩余时间。先前对生命最早证据的估计 [1, 8] 产生了虚线和点划线，但新的 LUCA 日期 42 亿年 [10] 大大提高了概率因子。确实，三条实线显示了概率始终高于 10:1，无论怎样选择 T ，甚至是相当极端的选择（石炭纪和寒武纪时期）作为地球上最早文明的时间点， t_I' 这一点由表示最小值的圆圈所证明。

可能的 T 最小概率因子² 为 10.4:1。最后，或许最极端的可能性是在寒武纪大爆发时期（5.35 亿年前）出现文明，这是地球复杂生命开始的时间点。然而，即使在这种情况下，最小概率因子仍然是 10.0:1。LUCA 的日期如此遥远，以至于它的影响压倒了弱人择原理，以及其他相关参数的任何合理变化。

我们的工作假设生命起源于地球，而不是通过泛种论。相反地考虑一下生命可能首先在火星上开始，然后转移到了地球。冷却时间尺度与行星半径成正比，因此如果地球从月球形成撞击（44.8 亿年前 [14]）到海洋的形成用时 ~ 76 Myr [2]，那么火星可能在 40 Myr 内冷却，并且最早在 45.0 亿年前有海洋。最晚（即最悲观的）的生命起源日期将是 LUCA 值，给出 $Z_{\text{fast-life}}/Z_{\text{slow-life}} > 9.0$ 假设地球适居期为 0.9 Gyr [4]。这变成了 10.5 使用更现代的 1.8 Gyr 值 [11]。相应地，尽管采用各种手段来使这个数字尽可能小，它仍然徘徊在“强证据”门槛附近。对于非定向星际泛种论，在附录中显示了要使其起作用，则几乎所有的星际物体都必须携带生命，这简直是不可能的。

主要结果的呈现有两个注意事项。首先，LUCA 的日期是一个最近的结果，可能经不起推敲；我们的结果在这种意义上是条件性的。其次，我们的结果并未确立生命是普遍存在的，因为地球的条件可能是极其罕见的 [15]。我们接下来的任务显然是要放眼并解决这个问题：类似地球的条件有多常见？

代码和数据可用性

本文未生成代码。

致谢

感谢捐助者道格拉斯·多哈迪，艾琳娜·韦斯特，特里斯坦·扎容茨，亚历克斯·德·瓦尔，马克·埃利奥特，史蒂芬·李，扎卡里·丹尼尔森，查德·萨特，马库斯·吉莱特，蒂娜·杰夫科特，贾森·罗基特，汤姆·唐金，安德鲁·肖恩，雷扎·拉梅赞坎尼，史蒂文·马克兹，尼古拉斯·格贝本，迈克·赫德兰，利·迪肯，瑞安·普罗沃斯特，尼古拉斯·德哈恩，埃默森·加兰德，皇后大道基金会有限公司，斯科特·索耶，伊万·威廉姆斯，姚欣宇，阿克塞尔·尼默詹，布莱恩·卡尔梅尔，纪尧姆·勒桑，丹尼尔·奥曼，罗宾·拉斯卡，巴斯·范加伦，亚当·泰勒，约什·艾利和德鲁·亚伦。我还要感谢休斯顿首届“天体生物学与生命未来会议”的组织者，这次会议上的演讲和对话启发了这篇论文。

References

- [1] Nutman, A. P., Bennett, V. C., Friend, C. R. L., van Kranendonk, M. J. & Chivas, A. R. Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature* **537**, 535–538 (2016).
- [2] Wilde, S. A., Valley, J. W., Peck, W. H. & Graham, C. M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4Gyr ago. *Nature* **409**, 175–178 (2001).
- [3] Allwood, A. Evidence of life in Earth’s oldest rocks. *Nature* **537**, 500–501 (2016).
- [4] Caldeira, K. & Kasting, J. F. The life span of the biosphere revisited. *Nature* **360**, 721–723 (1992).

² 此处不计算误差，因为文明时代现在是假设的。

- [5] Carter, B. Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology.. *IAU Symposium* **63**, 291–298 (1974).
- [6] Spiegel, D. S. & Turner, E. L. Bayesian analysis of the astrobiological implications of life’s early emergence on Earth. *Proc. Nat. Ac. Sc.* **109**, 395–400 (2012).
- [7] Kipping, D. An Objective Bayesian Analysis of Life’ s Early Start and Our Late Arrival. *Proc. Nat. Ac. Sc.* **117**, 11995–12003 (2020).
- [8] Bell, E. A., Boehnke, P., Harrison, T. M. & Mao, W. L. Potentially biogenic carbon preserved in a 4.1 billion-year-old zircon. *Proc. Nat. Ac. Sc.* **112**, 14518–14521 (2015).
- [9] Kass, R. E. & Raftery, A. E. Bayes factors. *J. Amer. Stat. Assoc.* **90**, 773–795 (1995).
- [10] Moody, E. R. R., Álvarez-Carretero,, S., Mahendrarajah, T. A., Clark, J. W., Betts, H. C., Dombrowski, N., Szánthó, L. L., Boyle, R. A., Daines, S., Chen, X., Lane, N., Yang, Z., Shields, G. A., Szöllősi, G. J., Spang, A., Pisani, D., Williams, T. A., Lenton, T. M. & Donoghue, P. C. J. The nature of the last universal common ancestor and its impact on the early Earth system. *Nature Ecology & Evolution* **8**, 1654–1666 (2024).
- [11] Graham, R. J., Halevy, I. & Abbot, D. Substantial extension of the lifetime of the terrestrial biosphere. *Planetary Sci. J.* **In Press**, arXiv:2409.10714 (2024).
- [12] O’Malley-James, J. T., Greaves, J. S., Raven, J. A. & Cockell, C. S. Swansong biospheres: refuges for life and novel microbial biospheres on terrestrial planets near the end of their habitable lifetimes. *Int. J. Astrobiology* **12**, 99–112 (2013).
- [13] Schmidt, G. A. & Frank, A. The Silurian hypothesis: would it be possible to detect an industrial civilization in the geological record?. *Int. J. Astrobiology* **18**, 142–150 (2019).
- [14] Canup, R., Richter, K., Dauphas, N., Pahlevan, K., Cuk, M., Lock, S. J., Stewart, S. T., Salmon, J., Rufu, R., Nakajima, M., Magna, T. Origin of the Moon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* **89**, 53–102 (2023).
- [15] Ward, P. & Brownlee, D. Rare earth : why complex life is uncommon in the universe. *New York: Copernicus* (2000).

附录

最小赔率公式

让我们在这里推导出与 T 相关的最小赔率比的表达式，如图 1 上标记的三个圆所示。首先注意到，在这项工作中，“最小赔率”这个短语有两种上下文含义。第一种含义是论文 [7] 中推导方程 1 时的原始用法。在那里，“最小”的含义是指未知参数 λ_I ——即进化成智能生物的速度。已经证明了，尽管我们不知道 λ_I 的真实值是什么，我们仍然可以通过取 $\lambda_I \ll 1/t'_I$ 的极限情况来给 $\mathcal{Z}_{\text{fast-life}}/\mathcal{Z}_{\text{slow-life}}$ 定义一个下限。这就是原论文中所说的“最小几率”的含义，并解释了为什么方程 1 是不等式而不是等价关系。

然而，公式 1 关于参数 T 也有一个最小可能值。这可以通过简单地对公式 1 关于 T 进行微分，并重新排列以使 T 成为主项，从而给出一个临界值。

$$T_{\text{crit}} = \sqrt{t_I'^2 + 4t_I't_L' + 2t_L'^2}. \quad (2)$$

将上述内容代入公式 1 可得出最小的比值，由给出的

$$\frac{t_I' + 2t_L' + \sqrt{t_I'^2 + 4t_I't_L' + 2t_L'^2}}{4t_L'}, \quad (3)$$

其与方程 2 一起用于定义图 1 中最小值（圆圈）的位置。

ISO 估计值

考虑一个星际物体（ISO）群体，其数密度为 n 。单位时间内撞击地球的 ISO 数量将是该数密度乘以地球的横截面积和 ISO 的特征速度，即 $nv\pi R_{\oplus}^2$ 。我们可以通过增加地球的横截面积来计入引力聚焦效应——另一个因子为 $(1 + v_{\text{esc}}^2/v^2)$ 。因此，此类撞击的特征时间尺度是

$$\tau \simeq \frac{1}{nv\pi R_{\oplus}^2(1 + v_{\text{esc}}^2/v^2)} \quad (4)$$

对于 ISOs，估计 n 是 ~ 0.1 天文单位⁻³ [1, 2, 3, 4, 5]，局部恒星速度分布表明特征值为 $v \sim 30$ 千米/秒。相应地，得到 $\tau \sim 200$ 百万年。由于 LUCA 出现在地球上的时间在 2 亿年内，通过 ISOs 的泛种论需要几乎所有 ISOs 都被赋予了生物体。显然这是不切实际的，因为在太阳系中只有极小部分的小行星和彗星含有来自地球的喷射物。

Appendix References

- [1] Laughlin, G. & Batygin, K. On the Consequences of the Detection of an Interstellar Asteroid. *RNAAS* **1**, 43 (2017).

- [2] Trilling, D. E., Robinson, T., Roegge, A., Chandler, Colin Orion, Smith, N., Loeffler, M., Trujillo, Chad, Navarro-Meza, S. & Glaspie, L. M. Implications for Planetary System Formation from Interstellar Object 1I/2017 U1 (‘Oumuamua). *ApJL* **850**, L38 (2017).
- [3] Do, A., Tucker, M. A., & Tonry, J. Interstellar Interlopers: Number Density and Origin of ‘Oumuamua-like Objects. *ApJ* **855**, 10 (2018).
- [4] Moro-Martin, A. Origin of 1I/’ Oumuamua. I. An Ejected Protoplanetary Disk Object?. *ApJ* **866**, 131 (2018).
- [5] Levine, G. W., Cabot, S. H. C., Seligman, D., Laughlin, G. Constraints on the Occurrence of ‘Oumuamua-Like Objects. *ApJ* **922**, 39 (2021).