arXiv:2603.02372v1 [stat.OT] 2 Mar 2026

悲观下限对德雷克方程的影响

预印本

Max Baak无所属机构，荷兰阿姆斯特丹
max.baak@gmail.com

Hella Snoek
阿姆斯特丹大学
Nikhef
阿姆斯特丹
荷兰
h.l.snoek@uva.nl

2026年3月4日

摘要

人们普遍认为，观测到地球上的生命，并不能为其他类地行星上存在生命的概率提供有用信息。这一观点最早由 Brandon Carter 正式提出，其依据是我们自身存在所带来的选择效应。类似地，德雷克方程要么被用于估算银河系中活跃且能够进行通信的地外文明总数（n^g 文明），即不包括人类；要么将人类纳入估算，但认为人类这一数据点没有参考价值。相关文献提出了悲观界线：如果 n^g 文明 低于某个值，人类便是银河系（或可观测宇宙）中独一无二的文明；然而，基于人类的存在，并未对 n^g 文明 定义任何统计下限。

Daniel Whitmire 最近对卡特生命起源论证提出质疑，声称其背后的逻辑存在缺陷：卡特在贝叶斯定理中使用的条件似然，并非在地球上出现生命这一证据发生之前进行评估，而是在之后进行评估。正确处理后，人择选择效应便会消除，而地球上观测到生命终究能够为生命出现的概率提供有用信息。

遵循这一论证，我们将德雷克方程视为一项统计计数实验，用以估算所有技术文明的数量，并将人类这一数据点作为有用证据纳入其中。由此可以为可观测宇宙中的 $n^o_{\rm civ}$ 设定一个悲观下限：在 95% 置信水平下为 $n^o_{\rm civ} > 0.051$；对于银河系，则在 95% 置信水平下为 n^g 文明$> 8\times10^{-13}$。具体而言，这排除了预测可观测宇宙中存在 $n^o_{\rm civ} \ll 1$的模型，并缩小了稀有地球等假说的可行参数空间。我们的分析大幅缩小了德雷克方程参数空间中预测人类孤独存在的部分；应用下限后，本研究发现P（$n^o_{\rm civ} > 1|$ 人类）$= 97.6\%$，这表明可观测宇宙中只有人类这一结果并不受青睐。对于 $n^o_{\rm civ} = 1$ 的低端估计，我们计算出存在其他可通信文明的概率为 42%。

关键词 Drakeequation · 自然发生 · 旧证据问题 · 计数实验 · 统计推断 · Fermi paradox · 搜寻地外文明计划

1 引言

在最近的两篇论文中，Whitmire [2023, 2025] 驳斥了卡特生命起源论证，现概述如下。

卡特生命起源论证（卡特 [1983]）基于我们存在所隐含的选择效应：人类发现自己身处一颗必然发生过自然发生的行星上，因此，有人据此认为，仅凭这一观察并不能提供有关自然发生实际概率的信息。这一论证在文献中得到了广泛认可

（克里克 [1981], 博斯特罗姆 [2013], 施皮格尔和特纳 [2012], 马什 [1993], 库克拉 [2010], 沃尔瑟姆 [2014],沃克 [2017]）。

根据卡特的观点，无论自然发生是容易的假设（自然发生容易）还是困难的假设（自然发生困难），地球上的生命（LoE）都存在；也就是说，条件似然为 P(LoE|自然发生容易) $= P$(LoE|自然发生困难) $= 1$。因此，代入贝叶斯定理并使用 P(自然发生容易) $+ P$(自然发生困难) $= 1$，可得： P(自然发生容易|LoE) $= P$(自然发生容易)。换句话说，地球上的生命这一证据并无信息量，因为它不会更新先验概率。我们可以称之为命运原则：如果假设我们的存在向来是既定事实，那么我们的存在便没有信息量。需要注意的是，如果卡特的观点正确，那么一旦有证据存在，条件似然就等于 1，与假设无关，因此该证据在预测方面无关紧要。

Whitmire 借鉴贝叶斯确认理论中的“旧证据问题”（格莱莫尔 [1980]），对卡特论证提出质疑，并指出人们错误地认为地球上存在生命这一证据没有信息量。评估一个模型时，证据是否已经显现并不重要。对于旧证据，即先前已知的证据（例如地球上的生命），应以反事实或“历史”的方式评估贝叶斯定理中的条件似然：不是像卡特那样在证据出现之后评估，而是在证据出现之前评估。

旧证据论证可以通过一个抛硬币示例轻松说明：现有证据表明一枚硬币已经连续 N 次正面朝上。要推断硬币是公平的还是不公平的，正确的分析不应使用（没有信息量的）后验条件概率 1，而应使用抛硬币之前的概率：对于公平硬币为 $(1/2)^N$，对于连续两次正面朝上的不公平硬币则为 1。更多示例请参见 Whitmire [2023] 。

考虑到历史评估，观测到地球上的生命具有信息价值，且人择选择效应已被消除：在自然发生发生之前，地球与其他任何前生物地球类行星都无法区分，因此可以视为所有类地行星这一更广泛类别中的一个代表性例子。此外，关于地球上自然发生的任何结论也应适用于这一参照类；尽管人类身处自然发生必然已经发生的地球上。

本文采用旧证据论证，为德雷克方程设定统计下限，并评估相应的影响。为此，我们既不假设也不主张生命广泛存在，例如，这与平庸原理不同。银河系或可观测宇宙中的类地行星数量可能有限，而自然发生的概率也可能极低。尽管观测到地球上的生命具有信息价值，但它只是一个数据点，因此由这一实例得出的任何推断都意义有限。无论如何，相应的下限为我们判断可观测宇宙中是否存在地外生命这一问题提供了有用信息。

我们将 $n^{g\ \text{文明}}$ 和 n^{o}_{civ} 分别定义为银河系和可观测宇宙中德雷克方程的估计值。若认为人类的证据没有提供有效信息，或认为德雷克方程仅适用于地外文明，那么模型 $n^{g\ \text{文明}} \ll 1$ ($n^{o}_{\text{civ}} \ll 1$) 表明，我们很可能是银河系（可观测宇宙）中唯一的文明。文献中定义了悲观界线：如果 $n^{g\ \text{文明}}$ (n^{o}_{civ}) 低于某个值，那么人类就是银河系（可观测宇宙）中独一无二的；如果高于该值，则必定存在或曾经存在其他技术文明。按照本文倡导的包容性解释，模型预测需要纳入已观测到的可通信文明数量，即 $n_{\text{obs}} \geq 1$。因此，对 $n^{o}_{\text{civ}} \ll 1$ 和 $n^{g\ \text{文明}} \ll 1$ 的估计会受到统计约束——它们可能无法排除人类存在的可能性——现有模型预测也可能需要据此更新。

此外， n^{o}_{civ} 的下限提高了其他可通信文明存在的概率。任何此类事件发生的概率都受计数统计支配。当预期事件数接近于零时，发生一个事件的概率也接近于零。然而，在已经发生第一个事件、且预期值必然与之相容的情况下，发生第二个事件的可能性要高得多——例如，采用基线估计 1 时。

我们的贡献明确且有两点。a）我们为可观测宇宙中可进行通信的文明的存在定义了一个悲观下限。b）我们展示了由此带来的统计学影响，即对含有 $n^{o}_{\text{civ}} \ll 1$的模型的参数空间进行限制，从而使可观测宇宙中存在其他技术文明的可能性更高。

2 相关工作

在相关文献中，德雷克方程（Drake [1965]）和人类这一数据点的描述并不一致。德雷克方程常在搜寻地外智能计划（SETI）或费米悖论的语境下进行讨论，并被作为一种函数，用于估算银河系中能够与地球通信的地外文明数量（Valamontes [2025], Prantzos [2013], Maccone [2010]）。此外，德雷克方程也常被正确地描述为包含人类；然而，无论是隐含还是明确地，人类的证据都被视为对该方程低端预测毫无信息价值的

（Molina [2019],Sandbergetal. [2018]）。

Frank 和 Sullivan 三世 [2016] 提出了这样一个问题：在可观测宇宙中，是否曾经存在过哪怕一个其他技术物种？他们还对其他技术物种曾经演化出来的概率设定了一个限值。基于人类的存在，他们认为，宜居带行星发展出技术物种的概率存在一条 $f_{bt} \sim 2.5 \times 10^{-24}$ 悲观线。如果 f_{bt} 小于该值，那么人类就是可观测宇宙中唯一演化出来的技术文明。如果 f_{bt} 大于该值，那么其他技术文明也应当已经演化出来。然而，作者并未将其表述为 f_{bt}的统计下限，也没有认为该值同样适用于人类。在本文中，我们将进一步拓展这项工作。

Balbi 和 Lingam [2023] 开展了贝叶斯分析，旨在基于人类的存在，并取决于银河系中此类行星的（未知）数量N_E，为类地行星上自然发生的概率（p_{LE}）设定一个下限。对于 p_{LE} 的下限，他们发现该下限高度取决于 N_E 的取值以及 p_{LE}的先验分布。从本质上说，信息不足以单独约束 p_{LE}；然而，他们没有为预期发生次数 $p_{LE}N_E$设定下限，而本文将对其进行约束。
Sandberg 等人 [2018] 将式 1 中所有因素的不确定性纳入考量，并对由此得到的数值进行抽样，以估算 n^g 文明的数量，发现其数值比可观测宇宙中恒星总数倒数低了许多个数量级。根据他们的研究，独处于银河系中的概率为 52%，独处于可观测宇宙中的概率为 38%。如果纳入尚未观测到任何地外文明这一费米观测，这些数字还会升高（具体升高幅度取决于模型）。然而，作者忽略了 $n_{\rm obs} \geq 1$的信息，而这一信息为 n^g 文明设定了下限。像本文这样将其纳入考量后，“我们很可能独处于可观测宇宙中”这一结论便大大弱化了。

据我们所知，尚无类似研究为 $n^o_{\rm civ}$ 或 n^g 文明设定悲观下限，并评估相应的影响。

3 德雷克方程

德雷克方程假设技术文明的演化与行星及其宿主恒星相关，通常以如下形式表示:

$$n^g_{\rm civ} = R^*\, f_p\, n_e\, f_l\, f_i\, f_c\, L\,, \tag{1}$$

各项的含义如下:

R^*：银河系中的恒星形成率；f_p：拥有行星的恒星所占比例；n_e：每颗恒星在宜居带内、环境适宜生命生存的行星平均数量；f_l：实际出现生命的行星所占比例；f_i：出现智慧生命的行星所占比例；f_c：发展出通信技术、向太空发射可探测信号以表明自身存在的文明所占比例；L：这些文明发射此类可探测信号的持续时间。

另一种表述方式改用银河系中的恒星数量 N^* 进行缩放，并以存在比例 f_L 取代 L。一个广为人知的例子是稀有地球假说（Ward 和 Brownlee， [2000]），其前提是类地行星十分罕见。稀有地球估算额外纳入了五个比例，将宜居行星范围缩小到类地行星。该假说主要预测 n^g civ 的值较小，尤其是 n^g civ $\ll 1$。

德雷克方程还存在许多其他变体（Westby 和 Conselice [2020], Hetesi 和 Regály [2006],Maccone [2012, 2015]）。这些版本通常会在公式中加入（或修改）一些分数项，以细化生命可能出现的条件。

实际上，德雷克方程中的参数应被视为平均值，例如，用以概括可能的时空条件。也可以将德雷克方程理解为对类地行星和其他类型宜居行星的预测之和，其中每一类都具有不同的参数值。

德雷克方程没有明确的估计值。它的许多项，例如 f_l， f_i， f_c， L，都高度不确定，其对数范围可达数十个数量级。同样，对 n^g 文明的预测也跨越多个数量级，

从几乎不存在，到几乎每颗恒星都存在（Sandberg 等人 [2018]）。基本上，存在两个预测学派：$n^g_{\text{文明}} \sim R^* L$ 和 $n^g_{\text{文明}} \leq 1$。值得注意的是，对 $n^g_{\text{文明}}$ 的某些估计比可观测宇宙中恒星总数的倒数低许多个数量级（Koonin [2014],Totani [2020], Scharf 和 Cronin [2016]）。

需要强调的是，德雷克方程预测的是银河系中活跃且可通信的文明总数，而不仅仅是地外文明的数量。德雷克方程或其变体列出了影响技术文明通过发射可探测信号，在宜居行星上显现自身存在的可能性的因素。从本质上说，它描述的是银河系中的一个比例：从所有诞生（或可供利用）的恒星开始，逐项筛选。最终留下的文明都处于活跃状态、能够通信且可被探测。
德雷克方程的每个因素都适用于地球和人类；没有任何因素将它们排除在外。[1] 认为该公式 somehow 不适用于人类，这与其设计原则背道而驰：只要具备合适（尽管未知）的条件，智慧生命就能在任何宜居行星上发展。

从统计学角度看，搜寻可通信文明是一项计数实验，将估算数量与观测数量进行比较。既然德雷克方程的估算包含地球上的生命，那么按照 Whнтmire 的论点，观测总数也必须包含人类这一实例。

在此采用的表述中，基于 N^*， n_e 右侧的所有因子都归并为一个概率参数 p_L，该参数随宜居带内行星总数 N^g_H 成比例变化：

$$\begin{aligned} n^g_{\text{civ}} &= N^* f_p n_e p_L \\ &= N^g_H p_L \,. \end{aligned} \tag{2}$$

考虑到银河系之外还有许多恒星，一种值得关注且与此相关的替代方案预测了可观测宇宙中的可通信文明总数。这会大幅提高 N^*，使恒星数从 3×10^{11} 增至 2×10^{22}（Silburt等人 [2015]）。[2]假设可观测宇宙中的宜居行星数量 N^o_H 也按同样比例变化，并且假设 p_L 的值相同，那么 n^o_{civ} 也会如此。

4 悲观下限

Frank 和 Sullivan 三世 [2016] 推导出悲观线：在宇宙历史上，地球是技术文明唯一曾经演化出的地点，即 $f_{bt} = f_l\, f_i\, f_c \sim 2.5 \times 10^{-24}$。他们不考虑活跃技术文明；方程 1 中的 L 一项被明确忽略。悲观线是通过模拟思想实验得出的。从统计学角度来看，取 f_{bt} 这个值，如果将宇宙历史重新运行 100 次直至当前状态，那么只有一次会有技术物种在可观测宇宙的某个宜居行星上演化出来。银河系和星系团也分别设定了悲观界线。

作者实际上认为，地球上的生命无法为其他世界上自然发生的概率提供信息： f_{bt} 仅被视为其他技术文明存在的悲观线，而不是适用于包括人类在内所有文明的统计下限。（如果德雷克方程仅适用于地外文明，那么鉴于缺乏相关证据， $f_{bt} < 10^{-24}$ 的取值完全可以接受。）

我们从两个方面扩展了这项工作。首先， $f_{bt} > 2.5 \times 10^{-24}$ 是可观测宇宙中所有技术文明在99%置信水平下的统计下限。模拟实验清楚地表明了这一点：在100次重复运行中，有99次从未演化出任何技术文明；也就是说，对于更小的 f_{bt} 值，人类的存在在统计上是不可能的。

我们认为， f_{bt} 的下限不应基于银河系、星系团或其他有限的恒星群体。曾经演化出的技术文明数量与适宜恒星和宜居行星的数量成正比。显然，使用可观测宇宙中所有可用的恒星，才能设定最普适的悲观下限。

其次，弗兰克和沙利文的方法被扩展到可观测宇宙中所有活跃 技术文明。为此，本文再次采用模拟示例。假设将宇宙的演化重新运行 100 次，直至其当前状态，那么只有一次会出现这样的状态：可观测宇宙中的某颗宜居行星上存在一个活跃技术物种。同样，由此得出的下限可能无法排除人类存在的可能性。

[1]即使按照（严格的）定义，认为技术文明必须能被地球上的我们探测到，这仍然不能排除人类。[2]詹姆斯·韦布空间望远镜在早期宇宙中发现的明亮星系数量高于预测值，这表明现有星系形成模型需要进一步完善（这是一个仍在研究的领域），但并不意味着这些理论或其预测已被推翻。

符号	分布
R^*	对数均匀分布(1, 100)
f_p	对数均匀分布(0.1, 1)
n_e	对数均匀分布(0.1, 1)
f_l	$1 - \exp(-\lambda V t)$ $\lambda V t \sim$ 对数正态分布(1, 50)
f_i	对数均匀分布(0.001, 1)
f_c	对数均匀分布(0.01, 1)
L	对数均匀分布(10^2, 10^{10})

表1：所用参数范围。

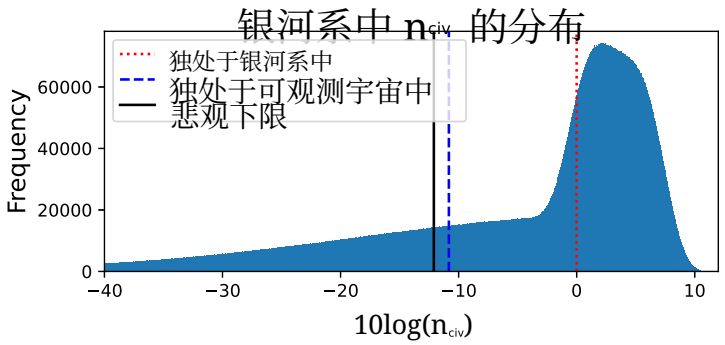

图 1：根据 Sandberg 等人 [2018] 重现的在考虑公式 1 中所有因素的不确定性时 n^g_{civ} 的分布。

基于少量计数测量进行统计推断已十分成熟。本文采用式 2 中的参数。可观测宇宙中出现的可通信文明数量 n_{obs} 服从泊松分布，且仅取决于 n^o_{civ}，前提是 N^o_H 较大（$\gg 100$），并假设 p_L 较小（< 0.1）。至少存在一个此类文明的概率，等于 1 减去任何宜居行星上均未出现此类文明的概率：

$$\begin{aligned} P(n_{\text{obs}} \geq 1 | \, p_L, \, N^o_H) &= 1 - (1 - p_L)^{N^o_H} \\ &= 1 - \left(1 - \frac{n^o_{\text{civ}}}{N^o_H}\right)^{N^o_H} \\ &\simeq 1 - e^{-n^o_{\text{civ}}}, \end{aligned} \tag{3}$$

其中，该估计值n^o_{civ} 是总期望值。
同样 适用于考虑不同类别的宜居行星（i），其中 $n^o_{\text{civ}} = \sum_i p_{L,i} \, N^o_{H,i}$ ：

$$\begin{aligned} P(n_{\text{obs}} \geq 1 | \, \{p_{L,i}, \, N^o_{H,i}\}) &= 1 - \prod_i (1 - p_{L,i})^{N^o_{H,i}} \\ &\simeq 1 - e^{-\sum_i p_{L,i} \, N^o_{H,i}}. \end{aligned} \tag{4}$$

换言之，$P(n_{\text{obs}} \geq 1 | \, n^o_{\text{civ}}) = 1 - e^{-n^o_{\text{civ}}}$。例如，$P(n_{\text{obs}} \geq 1 | \, n^o_{\text{civ}} = 1) = 63\%$。对于 $n^o_{\text{civ}} \ll 1$，近似而言，$P(n_{\text{obs}} \geq 1 | \, n^o_{\text{civ}}) \approx n^o_{\text{civ}}$。
若至少发生一次，根据公式 3，n^o_{civ} 的 95% 置信水平下限为 0.051。根据恒星的比率，对于银河系，这对应于 $n^g_{\text{civ}} > 8 \times 10^{-13}$ 在 95% 置信水平下的下限。
这意味着，任何低于此下限的模型预测（例如稀有地球假说的预测）在统计上都被排除。

5 悲观下限的影响

为展示悲观下限的影响，这里重现了 Sandberg 等人 [2018] 的部分结果。作者为方程1中的所有因子纳入了估计的不确定性（不考虑相关性），并对相应的 n^g_{civ}取样。为完整起见，表1总结了先验分布。由此得到的 n^g_{civ} 分布在图1中作为先验预测检验重现。预测阵营 $n^g_{\text{civ}} \leq 1$ 和 $n^g_{\text{civ}} \sim R^* L$均体现在该分布中。向小值延伸的大部分指数尾部，源于 f_l背后的建模选择，反映了该参数存在较大的不确定性。表1中的不确定性合起来涵盖了多个数量级[3]；图中截去了尾部，但在我们的设定中，其取值小于 10^{-100}。

作者利用德雷克方程预测活跃技术文明的总数，但研究中隐含地假设，地球上的生命无法为其他世界上的自然发生提供有用信息。他们指出，考虑到不确定性，$n^g_{\text{文明}}$ 所产生的数值中有相当大的比例表明，人类是银河系乃至

[3]鉴于旧证据论证，表1中的先验涵盖了从智慧生命不存在到智慧生命在可观测宇宙中极为丰富的各种情形，应将其解读为证据出现之前的先验，而非人类发展之后的后验。

模型	$P(n_{\text{civ}} < 1)$ 在银河系中	$P\ (n_{\text{civ}} < 1)$ 在可观测宇宙
Sandberg 等人	52%	38%
我们的重新估算	48%	26%
具有下限	32%	2.4%

表2： n^{g} 文明分布的关键结果。

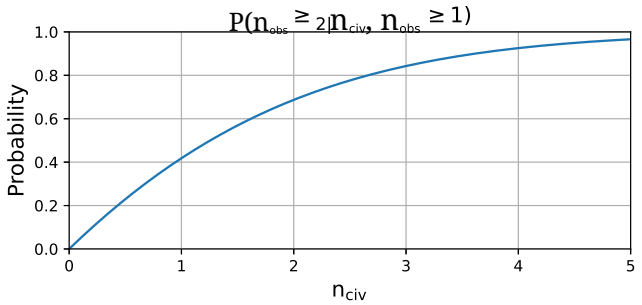

图2：在已知人类存在的前提下，外星文明存在的概率随 n^{o}_{civ}变化的情况。

可观测宇宙中唯一的文明。参数空间中相应的比例见表2。我们的研究也较好地再现了这些数值。[4]

纳入所得出的悲观下限后，下限以下的尾部在统计上被排除。银河系中人类独自存在的参数空间仍然相当大，但在我们的研究中已从48%降至32%。然而，就可观测宇宙而言，人类独自存在的比例大幅下降，从26%降至2.4%。换言之，鉴于地球上存在生命，参数空间中有97.6%已$n^{o}_{\text{civ}} > 1$ 。

这以一种微妙却重要的方式改变了论文的结论。我们仍可能是银河系中唯一的生命，但如今我们并非可观测宇宙中唯一生命的可能性要大得多。

对于泊松统计，如果只要求某事件以相当高的概率至少发生过一次，那么 n^{o}_{civ} 的下限约为1。这是一个直观的结果：如果你观察到一次事件，那么事件的预期数量很可能为1次或更多。在没有探测到其他文明的情况下，并将人类视为一个数据点，对事件预期数量最符合统计学直觉的估计是 $n^{o}_{\text{civ}} = 1$。虽然可以提出其他先验，但采用 $n^{o}_{\text{civ}} = 1$可作为基于现有证据的基准保守估计。我们用这个数值来说明下限带来的概率后果。

图2显示了在至少观测到一个事件的情况下，其他可通信文明存在的概率如何随 n^{o}_{civ} 变化：

$$\begin{aligned} P(n_{\text{obs}} \geq 2 | n^{o}_{\text{civ}}, n_{\text{obs}} \geq 1) &= \frac{P(n_{\text{obs}} \geq 2 | n^{o}_{\text{civ}})}{P(n_{\text{obs}} \geq 1 | n^{o}_{\text{civ}})} \\ &= \frac{1 - (1 + n^{o}_{\text{civ}})\, e^{-n^{o}_{\text{civ}}}}{1 - e^{-n^{o}_{\text{civ}}}} . \end{aligned} \tag{5}$$

该公式对接近 1 的 n^{o}_{civ} 值较为敏感。当 $n^{o}_{\text{civ}} < 1$ 时，其近似为 $n^{o}_{\text{civ}}/2$。当 $n^{o}_{\text{civ}} \gg 1$ 时，概率会迅速升至100%。 $n^{o}_{\text{civ}} = \{0.051, 0.5, 1, 2, 4\}$ 的取值分别对应 $\{2.5, 22.9, 41.8, 68.7, 92.5\}$% 的概率。

核心结论是：在第一个技术文明出现，且期望值必然与之相容的前提下，存在第二个技术文明的可能性相对较高。即使采用 $n^{o}_{\text{civ}} = 1$ 的基线估计，在可观测宇宙中存在其他可通信文明的概率也有 42%。

6 讨论与局限性

本文的结果以接受这样一个前提为条件：地球上人类的存在具有预测信息价值。虽然我们认为旧证据论证合乎逻辑且站得住脚，但我们也承认，将这一论证应用于人择原理是否有效，仍是统计学与哲学讨论的主题。

按照旧证据论证，我们认为，预测 n^{g} 文明 或 n^{o}_{civ} 的模型需要更新，将人类出现所带来的悲观下限纳入其中。尤其是，具有 $n^{o}_{\text{civ}} \ll 1$ 的模型会受到影响，而具有 n^{g} 文明 $\ll 1$的模型受影响程度较小。

[4] n^{g} 文明在 Sandberg 等人 [2018] 的分布尾部极为平坦，因此独处的概率比例略高。

悲观下限以一种微妙的方式深化了我们对地外生命可能存在这一问题的理解。在银河系层面，下限的影响有限。稀有地球假说并未被排除，只是其相空间中的一部分被排除了。如图所示，我们仍可能是银河系中唯一的生命；不过，任何此类模型在统计上都未必能排除人类的存在。在可观测宇宙中，独处的可能性如今已不太受支持，研究重点因而转向 $n^o_{\rm civ} \geq 1$ 的模型阵营。我们强调，即便采用 $n^o_{\rm civ} = 1$ 的低端估计，其他技术文明仍有相当大的存在可能。

将德雷克估算分解为来自类地宜居行星和其他类型宜居行星的贡献之和，且每类行星采用不同参数时，应当理解：虽然下限仍适用于总和，但它仅来自前一类。其他类别的参数不受约束，这意味着它们对 $n^o_{\rm civ}$ 的贡献仍可能低至零。

本研究仅致力于根据人类的存在确立 $n^o_{\rm civ}$ 的下限。除了 $n^o_{\rm civ} = 1$ 这一最简基准值外，本文不对 $n^g{}_{\text{文明}}$ 或 $n^o_{\rm civ}$ 及其可能范围作出预测。图 1 中 $n^g{}_{\text{文明}}$ 的分布很大程度上取决于对德雷克方程参数不确定性的建模选择。我们没有纳入费米观测的约束作用，即未探测到任何地外信号这一事实。正如 Sandberg 等人 [2018], 所做的那样，纳入这一观测可以通过依赖模型的方式约束 $n^g{}_{\text{文明}}$ 分布的上端（或 $n^o_{\rm civ}$）。因此，综合分析可以从上下两方面收窄 $n^g{}_{\text{文明}}$ （或 $n^o_{\rm civ}$）的可能范围。尽管这种综合评估留待未来研究开展，但本文确立的下限以及由此对德雷克方程参数空间施加的限制，本身在统计上仍然稳健。

7 结论

根据 Whitmire 的论点，地球上的生命对预测其他类地行星上自然发生的概率具有参考价值；本文将德雷克方程视为统计计数实验中对所有技术文明数量的估计，并将人类作为有参考价值的数据点，进而探讨其统计学后果。这为可观测宇宙设定了悲观下限：95% 置信水平下为 $n^o_{\rm civ} > 0.051$，而银河系的下限为 $n^g{}_{\text{文明}} > 8 \times 10^{-13}$ （95% 置信水平）。

将这一界限纳入考量后，银河系中的稀有地球假说虽未被排除，但相空间的低端范围受到限制。然而，我们的研究发现，独处于可观测宇宙中的可能性如今已不被看好$P(n^o_{\rm civ} > 1 | n_{\rm obs} \geq 1) = 97.6\%$。采用 $n^o_{\rm civ} = 1$ 的低端估计值，可得出可观测宇宙中存在其他可通信文明的概率为 42%。

我们认为，这些结果有力地支持继续搜寻地外生命。

致谢

我们感谢 Ilan Fridman 仔细审阅稿件，也感谢我们的理发师 Dave 和 Stefan，就地外生命的存在展开了富有见地的讨论。

参考文献

Daniel P Whitmire。自然发生：重新审视卡特论证。《国际天体生物学杂志》，22(2)：94–99，2023年。

Daniel P Whitmire。生命起源时间尺度。*arXiv* 预印本 *arXiv:2503.18217*，2025年。

Brandon Carter。人择原理及其对生物演化的启示。《伦敦皇家学会哲学汇刊》。*A*辑，数学与物理科学，310(1512):347–363，1983。

Francis Crick。《生命本身：其起源与本质》。生命本身：其起源与本质，1981年。Nick Bostrom。人择偏差：科学与哲学中的观测选择效应。Routledge，2013年。David S Spiegel 和 Edwin L Turner。生命早期出现在地球上的天体生物学含义的贝叶斯分析。《美国国家科学院院刊》，109(2):395–400，2012年。Roy Mash。地外智能论证中的大数与归纳。科学哲学，60(2): 204–222，1993年。André Kukla。《地外生命：一种哲学视角》。Rowman & Littlefield，2010年。David Waltham。《幸运星球：地球为何与众不同——以及这对宇宙中的生命意味着什么》。Basic Books，2014年。

Sara Imari Walker。生命起源：一个物理学难题——关键问题综述。《物理学进展报告》，80(9): 092601，2017年。Clark Glymour。为什么我不是贝叶斯主义者。载于：《理论与证据》。普林斯顿：普林斯顿大学出版社。第63–93页，1980年。Frank Drake。对智慧地外生命的射电搜索。《外生物学的现状》，32:323，1965年。Antonios Valamontes。对德雷克方程的批判性分析：估算地外文明的局限与缺陷。2025年。doi:10.13140/RG.2.2.27784.94726。Nikos Prantzos。德雷克方程与费米悖论的联合分析。《国际天体生物学杂志》，12 (3):246–253，2013年。Claudio Maccone。统计费米悖论。《英国行星际学会杂志》，63(5):222，2010年。José Antonio Molina Molina。寻找标准德雷克方程。*arXiv*预印本 *arXiv:1912.01783*，2019年。Anders Sandberg、Eric Drexler 和 Toby Ord。消解费米悖论。*arXiv*预印本 *arXiv:1806.02404*，2018年。Adam Frank 和 Woodruff T Sullivan III。对宇宙中技术物种普遍程度的一项新实证约束。《天体生物学》，16(5):359–362，2016年。Amedeo Balbi 和 Manasvi Lingam。超越平庸性：生命有多常见？《皇家天文学会月刊》，522(2):3117–3123，2023年。Peter D Ward 和 Donald Brownlee。《稀有地球：复杂生命为何在宇宙中并不常见》。2000年。Tom Westby 和 Christopher J Conselice。智慧生命的天体生物学哥白尼弱界限与强界限。《天体物理学杂志》，896(1):58，2020年。Zsolt Hetesi 和 Zsolt Regály。德雷克方程的一种新解释。《英国行星际学会杂志》，59: 11–14，2006年。Claudio Maccone。统计德雷克方程。载于《数学搜寻地外文明计划：统计学、信号处理、太空任务》，第3–72页。Springer，2012年。Claudio Maccone。用于系外行星与搜寻地外文明计划搜索的统计德雷克–西格方程。《宇航学报》，115:277–285，2015年。Eugene V Koonin。细胞生命的起源。《安东尼·范·列文虎克》，106(1):27–41，2014年。Tomonori Totani。暴胀宇宙中的生命涌现。《科学报告》，10(1):1671，2020年。Caleb Scharf 和 Leroy Cronin。在行星尺度上量化生命起源。《美国国家科学院院刊》，113(29):8127–8132，2016年。Ari Silburt、Eric Gaidos 和 Yanqin Wu。对开普勒太阳型恒星周围行星族群的统计重建。《天体物理学杂志》，799(2):180，2015年。