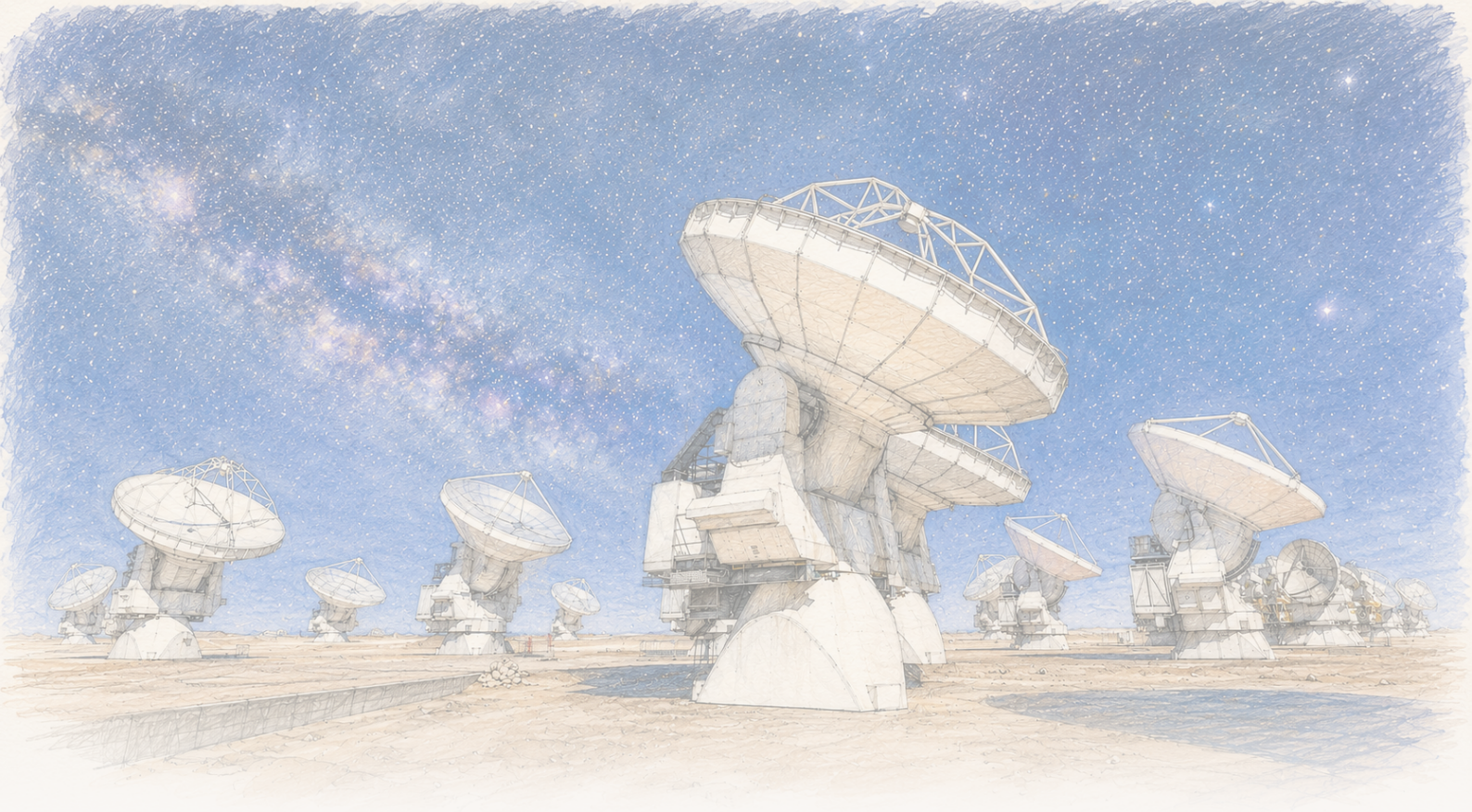




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

星际彗星 3I/ATLAS 携带的水比我们自己的彗星形成于更冷的条件下——首次对另一个行星系统的化学读取

天文学家使用 ALMA 约束了 3I/ATLAS——第三个已知的星际天体——水中“重”氢与普通氢的比值，发现其强烈富氘：至少约为地球海洋的 40 倍、典型太阳系彗星的 30 倍。这指向在比我们自己的彗星更冷的条件下形成的水。该结果是一个下限，通过间接方式得出（水本身从未被直接检测到），它与生命或技术无关——只关于化学和寒冷。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Water D/H in 3I/ATLAS as a Probe of Formation Conditions in Another Planetary System*, L. E. Salazar Manzano, T. Paneque-Carreño et al., *Nature Astronomy* (2026) · DOI: 10.1038/s41550-026-02850-5



前景是 DV-59 天线，多面 ALMA 天线正在观测月光下的夜空。图片来源：Alex Pérez / ALMA Observatory。

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

来自另一颗恒星的彗星，以及它的水中指纹

每隔一段时间，就会有某个原本不属于太阳系的天体穿过这里。它不是来自小行星带的流浪岩石，也不是沿着漫长轨道从奥尔特云返回的彗星，而是一颗沿开放双曲线轨道运行的天体——它从星际空间进入，绕太阳运行一圈，然后永远离开。我们已经看到过三个。第一个是 2017 年的 ‘Oumuamua，在人们还没来得及就它究竟是什么达成共识之前，几乎便消失了。第二个是 2019 年的 2I/Borisov，毫无疑问是一颗彗星。第三个于 2025 年 7 月被发现，名为 3I/ATLAS——它到来时带着足够活跃的彗发，能够让我们真正研究其中的化学成分。

在各种喧嚣开始之前，有一点值得记住。一颗星际彗星，按字面说就是另一个行星系统的一小块碎片：围绕另一颗恒星凝结的冰和尘埃，很可能在很久以前受到引力扰动而被抛出，漂流穿过银河系，恰好经过太阳附近，使其中的冰开始沸腾升华，而这一切又恰好发生在我们的望远镜能够观测到的区域。这才是真正非凡的事实，已经惊人到不需要任何额外渲染。

但它往往还是会被额外渲染。星际天体总会吸引某种格外夸张的报道——灯光变暗，接着是“但如果它是某人造出来的呢”——3I/ATLAS 也没少受到这类关注。这个问题诚实而无聊的答案，恰恰更有意思：它是一颗彗星。真正的问题从来不是它是不是某人制造的，而是一个更安静的问题——如果你能读懂一个在另一颗恒星周围形成的天体的化学成分，它会告诉你关于那颗恒星的行星家族什么？而你究竟要怎样读懂它？

这一次，用来阅读的工具是水。水由两个氢原子和一个氧原子组成，但其中一小部分氢是氘——一种更重的孪生体，也就是带有一个额外中子的普通氢原子。水中重氢与普通氢的比例写作 D/H，并不是随机的。它主要由水最初形成时的温度决定：形成环境越冷、越平静，锁定其中的氘就越多。而由于彗星本质上是一台深度冷冻机——能够让冰在数十亿年间一直处于冷藏状态——其中水的 D/H 比值就可能保留水形成时环境条件的指纹。

我们对自身太阳系的指纹已经相当了解：地球海洋和太阳系中不同彗星家族的数值集中在一个相当狭窄的范围内。过去没有人真正确定过围绕另一颗恒星形成的水所带有的同类指纹。这正是这篇论文试图从 3I/ATLAS 中读出的东西。

作者做了什么

他们在 2025 年 11 月 4 日将 ALMA——位于智利沙漠的大型射电天线阵列——对准 3I/ATLAS；那时距离这颗彗星绕过太阳刚好六天。他们调谐设备，捕捉彗发中三种分子发出的微弱毫米波长辉光：普通水（H₂O）、重水（HDO，其中一个氢原子是氘）和甲醇（CH₃OH）。

他们要找的 D/H 比值，本质上是重水与普通水的比值。因此两者都需要测量。随后，他们将光谱输入一个膨胀彗星大气的辐射转移模型（一个名为 SUBLIME 的代码），再用与反演系外行星大气成分相同类型的统计工具进行拟合，从而提取温度、外流情况，以及彗星产生各类分子的数量。

接下来的一切都受到一个限制的影响：**他们实际上没有探测到水**。HDO 和甲醇被探测到了；H₂O 本身则低于噪声水平。这并不是因为普通水不够多——它的数量远多于重水。某条谱线能否出现，不仅取决于分子存在多少，还取决于那条特定谱线本身有多容易被观测到；这里有两件事对水谱线不利。第一是大气：他们能够观测的 H₂O 谱线（接近 183 GHz）恰好位于地球自身富含水的空气吸收最强的位置，所以从地面读取那里的彗星水，就有点像试图透过雾看一支蜡烛——论文指出，这些低能量水谱带会受到强烈的大气吸收，而 241 GHz 附近的重水（HDO）谱线则落在一个更干净的窗口中。第二是灵敏度：水通道的噪声要大得多——每波束约 500 mJy，而 HDO 为 21——因此即使信号很强，也可能藏在噪声之下。在雾和噪声的共同影响下，数量丰富的普通水低于检测阈值；反而是稀少得多、落在干净安静窗口中的重水清晰地显现出来。（从太空中、在大气层之上，同样的水就容易观测得多：JWST 后来在彗星过近日点之后于红外波段探测到了它的水——所以 ALMA 的未探测到，指的是穿过地球大气的那一条谱线，而不是水不存在。）因此，普通水的数量必须间接推断——主要依据甲醇谱线如何被激发，因为这取决于甲醇分子与水发生碰撞的频率。这确实是一种测量，但依赖模型；作者对此说得很明确。

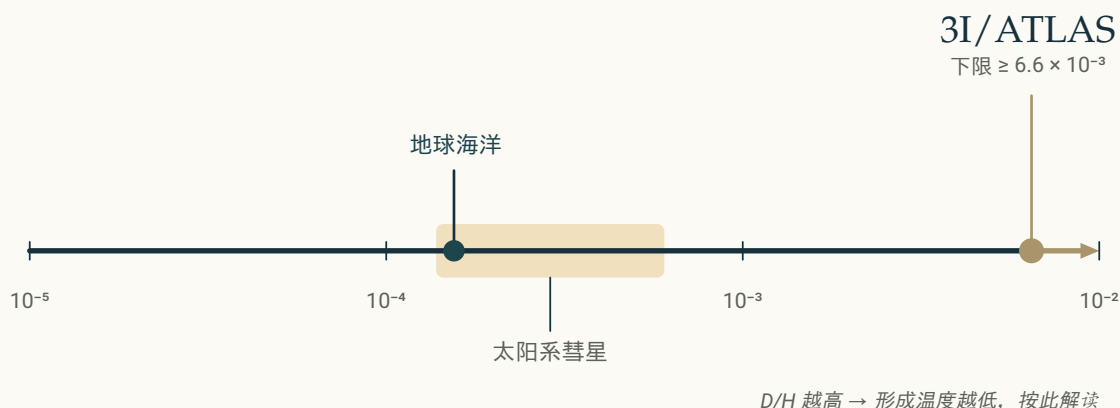
他们发现了什么

- **有重水，但没有普通水**。HDO 和几条甲醇谱线被清晰探测到；H₂O 没有。由于 D/H 比值依赖于普通水产生率的上限——这是有意这样处理的，因为水谱线本身低于噪声——所以得到的氘比是一个下限，而不是单一数值。
- **氘显著富集**。在他们的保守情景中，水的 D/H 比值大于 6.6×10^{-3} ——超过地球海洋数值约 40 倍，也超过典型太阳系彗星数值约 30 倍。按照他们的两种估算中的任何一种，3I/ATLAS 都处在迄今所有有水 D/H 测量结果的极高端。

- **它可能不是某一个夜晚的偶然结果。**这次测量来自单个观测时段，但对邻近日期的 ALMA 数据的初步查看没有显示出日与日之间的大幅波动；一个独立的 JWST 分析则在一个多月后进行观测，并指向同一方向——富含氘的水。

3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置

水的 D/H 比值 — 对数尺度



3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置：远在富氘一端，超过地球海洋以及整个太阳系彗星群体（此处显示为近似范围）。箭头标出一个下限——真实数值可能更高。高 D/H 比值是低温形成条件的线索，而不是出生地地址。

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

这可能意味着什么

高水 D/H 比值，是水在极其寒冷的地方（低于约 30 K）冻结、此后又没有受到热量大幅改造的标志。因此，最直接的解读是：3I/ATLAS 的水形成于比我们太阳系彗星中的水更冷、更温和的条件下——这也意味着它的母行星系统形成冰的方式与我们不同。

作者对下一步推论很谨慎，我们也应该如此。要形成这样富含氘的水，有两种方式，而这次测量无法区分它们：水可能从这个系统诞生时的寒冷云团中继承了这种富集，也可能是在彗星于寒冷外盘中形成时，后来才获得这种特征。无论是哪一种，重要的结论都成立——塑造 3I/ATLAS 的条件并不是塑造我们彗星的条件——但其中的原因仍然没有确定。

因此，这是人类第一次读出来自另一个行星系统的物质所携带的水形成指纹，并发现它与我们自己的指纹并不匹配。

这并不能证明什么

- 它对生命、技术或意图**什么也说明不了**。并不存在一个被建造出来的“它”；“星际”描述的是一条轨道，而不是一个起源故事。这是对水化学的测量。
- 它**不是**一个精确的 D/H 数值。这是一个下限，而且它所指的水从未被直接探测到——水的丰度是根据另一种分子甲醇的激发状态推断出来的，前提是水是甲醇碰撞的主要对象。
- 它**没有**揭示 3I/ATLAS 诞生于何处。无法可靠确定它的母恒星，而高 D/H 比值是关于条件的线索，并不是出生地地址。
- 它**没有**解决水为何富含氘的问题。“从寒冷的诞生云继承而来”和“在盘形成过程中确定”都符合数据；论文没有在两者之间做出选择。
- 这是在一个观测时段测量的一个天体。相互印证令人鼓舞，但还不是长时间基线的结果。

证据有多强？

有两件事应当分开衡量：结果的方向，以及确切的数值。

- **方向是稳健的。** 3I/ATLAS 的水明显富含氘，这一判断是保守的下限；它远高于整个太阳系彗星群体的范围，并得到独立 JWST 分析的支持。这一部分并不脆弱。
- **数值依赖一条建模链。** 由于没有探测到 H_2O ，水的丰度——进而 D/H 比值——依靠从甲醇激发状态间接推断水。这一过程假设水是彗发中占主导地位的碰撞对象（在近日点附近是合理的，但不能排除 CO_2 的贡献），并使用近似的、诚然约束很差的碰撞速率。作者标明了所有这些问题，并有意将结果表述为一个下限，而不是一次测量。
- **这种解释有充分依据，但不是唯一解释。** 低温形成是高 D/H 的自然解释；这种低温究竟是继承而来，还是后来施加的，仍未解决，而母系统也无法确定。

简而言之：水是在低温下形成的，这一点站得住脚；究竟有多冷以及究竟为什么，则应当诚实地保持开放。

为什么这很重要

几十年来，关于地球上的水来自何处，以及是什么决定形成中的行星系统里水的氘指纹，这些问题完全依靠在我们自己的太阳系内进行的测量来回答。这是人类第一次把这张图谱扩展到明确形成于另一颗恒星周围的物质。

它给出的答案不是“到处都像家里”。恰恰相反：另一个系统可以在足够寒冷的条件下形成它的冰，从而留下我们的彗星从未携带过的指纹。这是一小块具体证据，指向一个悄然宏大的事实——构成行星的固体物质，其化学性质和历史可能因恒星而异。它并不是来自一艘跨越数光年的航天器，而是来自我们捕捉到另一个系统的一块流浪碎片从旁经过，并在它消失之前读出了其中的水。

简明总结

3I/ATLAS 是已知的第三个星际天体，也是第二颗活跃的星际彗星——一块来自另一个行星系统、一次性穿过我们太阳系的碎片。天文学家利用彗星最接近太阳前后的 ALMA 观测，在其彗发中探测到了重水（HDO）和甲醇，却没有探测到普通水，并据此推断水的氘氢比。他们发现其中的氘显著富集——D/H 比值的下限高于 6.6×10^{-3} ，约为地球海洋的 40 倍、典型太阳系彗星的 30 倍——这指向在比太阳系彗星更寒冷、受后期加工更少的条件下形成的水。这个数值是通过模型间接得到的下限，不是直接测量；它无法说明这种富集是从寒冷的诞生云继承而来，还是后来在寒冷的盘中形成，也无法说明这颗彗星来自何处。即便如此，这仍然是人类第一次读取来自另一颗恒星的水所携带的这种特定化学指纹——而这枚指纹与我们的并不相同。

不绕弯检查

论文显示了什么：通过 ALMA 对近日点附近的星际彗星 3I/ATLAS 进行观测，得到其水 D/H 比值 $>6.6 \times 10^{-3}$ 的下限（保守情景）——约为地球海洋的 40×、典型太阳系彗星的 30×——这意味着其水形成于明显更寒冷、经历热加工更少的条件下，而不是太阳系彗星所处的条件。独立的 JWST 分析也支持这一方向。

合理但尚未证实的内容：这种富集究竟是直接从寒冷的前恒星云继承而来，还是在彗星于寒冷原行星盘中形成时产生。两种情景都符合数据；数据无法区分它们。

它没有显示什么：与生命、技术或人工起源有关的任何内容；精确的 D/H 数值（它是一个下限）；母恒星的身份或位置；高 D/H 背后的具体机制；或者这个单一观测时段的结果不受彗发变化影响。

主要限制：没有直接探测到 H₂O，因此水的丰度——以及 D/H 比值——是根据甲醇激发状态间接推断的，前提是水是主要碰撞对象，并使用了作者称为约束很差的近似碰撞速率；结果是单一观测时段、依赖模型的下限；母系统无法确定。

普通读者应有多大信心？对于 3I/ATLAS 的水确实富含氘、形成时比我们彗星的水更冷，以及这完全与外星人无关，可以有较高信心。对于富集的确切程度，信心中等，因为那是依赖模型的下限。对于具体成因和诞生地，信心较低，因为它们仍是开放问题。恰当的态度是：对来自另一恒星系统的一张化学明信片安静地惊叹——它不是谜团，也不是宇宙飞船。

来源

Nature Astronomy (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41550-026-02850-5>

arXiv 2603.07026

<https://arxiv.org/abs/2603.07026>

Independent JWST corroboration (Cordiner et al., arXiv 2603.06911)

<https://arxiv.org/abs/2603.06911>

ALMA data archive (project 2025.A.00002.T)
<https://almascience.nrao.edu/aq/>