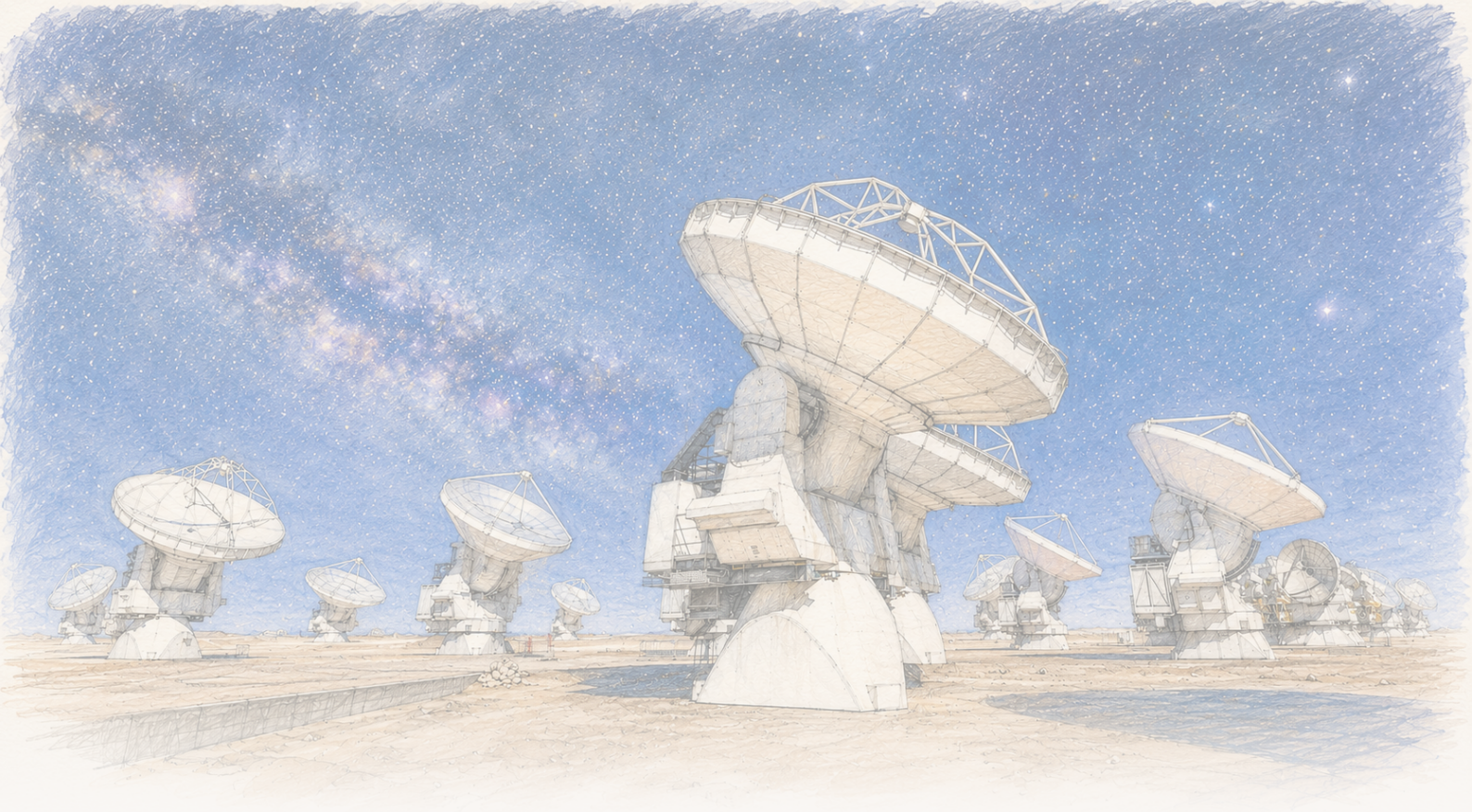




The CLEAN PAPER

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
· 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



前景中的 DV-59 天线与多台 ALMA 天线一同观测月光下的夜空。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，以及它水中留下的指纹

时不时地，会有一些东西穿过太阳系，而这东西从来不属于我们。不是小行星带里跑出来的岩石，也不是奥尔特云中沿着漫长轨道回归的彗星，而是一个沿着开放的双曲线路径飞行的天体——它从星际空间进入，绕太阳一圈，然后永远离开。我们如今见过三个了。第一个是 2017 年的‘Oumuamua（奥陌陌），在人们就它到底是什么达成一致之前，它几乎已经消失了。第二个是 2019 年的 2I/Borisov，它显然是一颗彗星。第三个于 2025 年 7 月发现，是 3I/ATLAS——它包裹在足够活跃的彗发之中，足以进行真正的化学探测。

在喧嚣开始之前，这里有一个值得留住的要点。一颗星际彗星，毫不夸张地说，是另一个行星系统的碎片：冰和尘埃在另一颗恒星周围凝结，很可能在很久以前被一次引力踢飞了出去，漂过银河系，恰好从我们的太阳附近经过，其冰层开始蒸发——正好在我们的望远镜可以观测的时候。这是一个真正非凡的事实，其非凡程度已经足够，无需任何添油加醋。

但它往往还是会得到添油加醋。星际天体吸引了一种特殊的屏息报道——暗下来的灯光，可是万一是谁建造了它呢——3I/ATLAS 也得到了它那份。对那个问题的诚实回答是无聊的那个，而无聊的那个更有趣：它就是一颗彗星。真正的问题从来不是有没有人制造了它。而是那个更安静的问题——如果你能读取在另一颗恒星周围组装起来的物质的化学信息，它会告诉你关于那颗恒星家族的什么？而你又该如何读取它？

这一次，读取的工具是水。水是两个氢和一个氧，但其中一小部分氢是氘——一种更重的孪生兄弟，一个普通的氢原子携带了一份额外的中子。水中重氢与普通氢的比值，记为 D/H ，不是随机的。它由化学过程决定，主要取决于水最初形成时的温度：形成的摇篮越冷、越安静，被锁入的氘就越多。而由于彗星本质上是一个深冻冰箱——能将冰层保存数十亿年——其水中的 D/H 比值可以保存关于这些水形成条件的指纹。

我们对自家系统的指纹已经相当了解：地球的海洋和太阳系中不同家族的彗星聚集在一个相当窄的范围内。尚无人能确定的是，在另一颗恒星周围形成的水的同一指纹。这就是这篇论文试图在 3I/ATLAS 中读取的东西。

作者做了什么

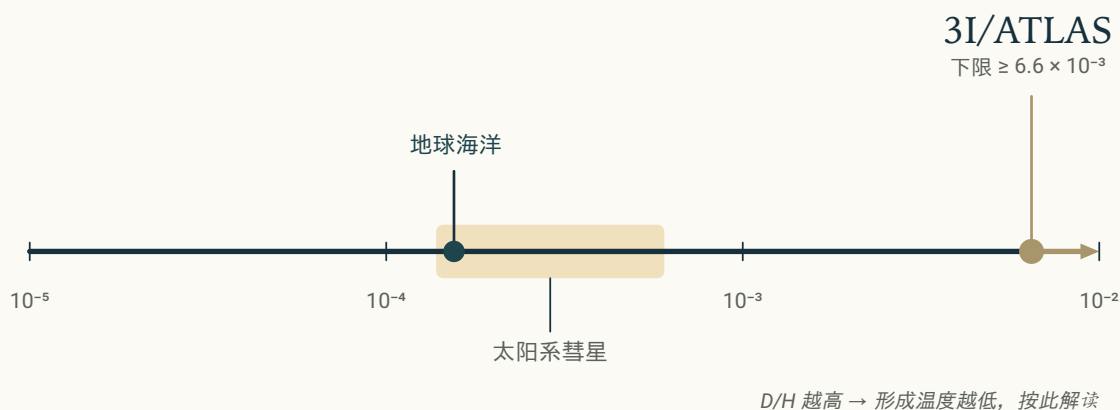
他们在 2025 年 11 月 4 日——彗星绕日六天后——将 ALMA（智利沙漠中的大型射电天线阵列）指向了 3I/ATLAS。他们将其调谐以捕捉彗发中三种分子的微弱毫米波辉光：普通水（ H_2O ）、重水（HDO，其中一个氢是氘）和甲醇（ CH_3OH ）。

他们想要的 D/H 比值，实际上就是重水与普通水的比值。所以他们需要两者。然后，他们将光谱输入一个扩张彗星大气的辐射传输模型（名为 SUBLIME 的代码），并用与检索系外行星大气成分相同的统计工具进行拟合，以提取温度、外流速率以及彗星正在产生每种分子的量。

有一个限制条件影响着后续的一切：**他们实际上并没有检测到水**。HDO 和甲醇显示出清晰、明确的信号。 H_2O 没有——可能被彗发的几何结构或某些尚未确定的因素所掩盖。所以水的丰度——以及因此 D/H 比值——是从甲醇的激发温度中间接推断的。他们用一个近似关系来桥接：假设水是彗发中主导性的碰撞伙伴，他们从甲醇激发温度推断出 H_2O 密度，然后从 HDO/ H_2O 比值推算出 D/H 。这不是一个直接测量；它是一个建模的、依赖于模型的下限。

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：远在富氘端，超出地球海洋和整个太阳系彗星种群（此处显示为近似范围）。

箭头标记的是下限——真实值可能更高。高 D/H 比值是冷形成条件的线索，而非一个家庭地址。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

他们发现了什么

水中的氘含量异常丰富。从 HDO 信号出发——并假设水是彗发中的主导碰撞气体——他们推导出 D/H 比值在 $6.6\text{--}16.9 \times 10^{-3}$ 的范围内，保守下限为 $>6.6 \times 10^{-3}$ 。这比地球海洋的 D/H 值高出约 **40 倍**，比典型的太阳系彗星高出约 **30 倍**。

甲醇是第一个明确的发现。CH₃OH 是彗星化学的一个已知示踪剂，其检测明确且稳健。他们的甲醇生产速率范围涵盖了基于观测前光学光谱的早期预印本估计值，为该测量增加了信心。

从甲醇中他们也获得了温度。旋转温度约为 **25 K**——非常冷——但彗星当时的日心距离为 0.72 AU，这意味着来自太阳的加热尚不强烈。温度的分布被绘制成图（论文中为图 2），并与各种化学情景下的模型进行了比较。

这是来自另一个系统的第一张水-D/H 明信片，而且它看起来不像家里的那张。极高的 D/H 指向在远比我们彗星曾经历的更冷、更安静、热加工更少的条件下形成的水。

强有力的独立检查

在他们公布结果后，另一支团队使用 **JWST** 对 3I/ATLAS 进行了自己的观测，并发现了完全相同方向的水-D/H 富集，从而支持了 ALMA 的结论。这是一个教科书式的交叉检验。这篇 Clean Paper 的解读将 ALMA 和 JWST 的结果并行考虑，但侧重于首先公布此测量的论文。

这没有证明什么

- 它**没有**检测到普通水（H₂O）。这项测量是间接的。
- 它**没有**给出一个精确的 D/H 值——它是一个依赖于模型的下限，范围较宽（ $6.6\text{--}16.9 \times 10^{-3}$ ）。
- 它**没有**识别出母恒星或其具体位置。没有任何轨道反推能追溯到单一的来源系统。
- 它**没有**对生命、技术或人工起源发表任何看法。
- 它**没有**告诉我们富集是在冷的前恒星云中继承的，还是在冷原行星盘中设定的。两者都符合数据；数据无法区分。

证据有多强？

对于高氘富集，证据很强但并非直接。HDO 检测本身是稳健的，并且得到了独立 JWST 分析的确认。两个独立的设施指向同一个结论：水是富氘的。但水丰度是从甲醇激发温度推断的，这为结果增加了一层模型依赖性。

对于“比我们的彗星更冷”，推理是在坚实的地基上的。冷形成是高 D/H 的自然解释，这一点在几十年来对太阳系彗星的测量中已得到充分确立。非星际机制（例如，彗发中的辐射驱动的同位素分馏）曾一度被考虑，但随后被他们的分析排除了。

对于精确的数值，信心应该更为中等。范围较宽，取决于碰撞速率的近似和缺乏 H₂O 检测。该论文的 D/H 是一个下限，不是一个点估计。

JWST 的交叉检验大大增强了结论——比任何一个单独的设施都要强。

对解释而言，推理是良好动机但并非唯一。冷形成是高 D/H 的自然解释；这种冷是继承的还是后来施加的则尚未解决，母系统也无法识别。

简言之：水在寒冷中形成这一点是牢固的；究竟有多冷，以及究竟为什么，则被诚实地保持开放。

为什么重要

几十年来，地球水来自何处——以及是什么设定了正在形成的行星系统中水的氘指纹——这一问题完全依靠在我们太阳系内部进行的测量来回答。这是该图景首次被扩展到经过验证是在另一颗恒星周围形成的物质。

它给出的答案不是“到处都和家里一样”。而是恰恰相反：另一个系统可以在寒冷到足以留下我们彗星从未携带过的指纹的条件下沉积其冰层。这是一个小而具体的证据，证明了一件安静而重大的事情——构建行星的固体的化学和历史可能因恒星而异。而且它并非来自一艘跨越光年的宇宙飞船，而是来自捕捉到另一个系统的一块流浪碎片在坠落经过时，在它消失之前读取它的水。

清洁摘要

3I/ATLAS 是第三个已知的星际天体，也是第二颗活跃的星际彗星——一块来自另一个行星系统的碎片，正在一次性穿过我们的系统。天文学家在彗星最接近太阳时使用 ALMA，在其彗发中检测到了重水（HDO）和甲醇，但未检测到普通水，并由此推断出水中的氘氢比。他们发现其氘含量强烈富集——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——指向在比太阳系彗星更冷、加工程度更低的条件下形成的水。这个数字是通过模型间接获得的下限，而非直接测量，它无法说明富集是从冷的诞生云中继承的，还是在冷盘中后来设定的，也无法说明彗星来自何处。即便如此，这是对来自另一颗恒星的水的这一特定化学指纹的首次读取——而且这个指纹与我们的不匹配。

No-BS 检查

论文所展示的：根据对星际彗星 3I/ATLAS 近日点附近的 ALMA 观测，得出其水中 D/H 比值的下限 $>6.6 \times 10^{-3}$ （保守情景）——约为地球海洋的 40 倍、典型太阳系彗星的 30 倍——意味着水在比太阳系彗星显著更冷、热加工更少的条件下形成。一项独立的 JWST 分析在方向上一致。

合理但未经证实的：富集是直接从冷的前恒星云中继承的，还是在冷原行星盘中形成期间设定的。两种情景都符合数据；数据无法区分。

它没有展示的：任何关于生命、技术或人工起源的内容；一个精确的 D/H 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；或者这个单次观测结果不受彗发变化的影响。

主要局限： H_2O 未被直接检测到，因此水丰度——以及 D/H 比值——是通过甲醇激发温度间接推断的，假设水是主导碰撞伙伴，并使用作者称为约束不佳的近似碰撞速率；结果是一个单次观测的、依赖于模型的限值；母系统无法识别。

普通读者应该抱有多大信心？ 高度信心——3I/ATLAS 的水确实是富氘的，形成温度比我们的彗星更冷，且这与外星人毫无关系。中等信心——对富集的确切程度，这是一个依赖于模型的下限。低度信心——对具体的原因和诞生地，这些仍然开放。恰当的立场：对来自另一个恒星系统的化学明信片的安静惊叹——不是一个谜团，也不是一艘宇宙飞船。

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/>