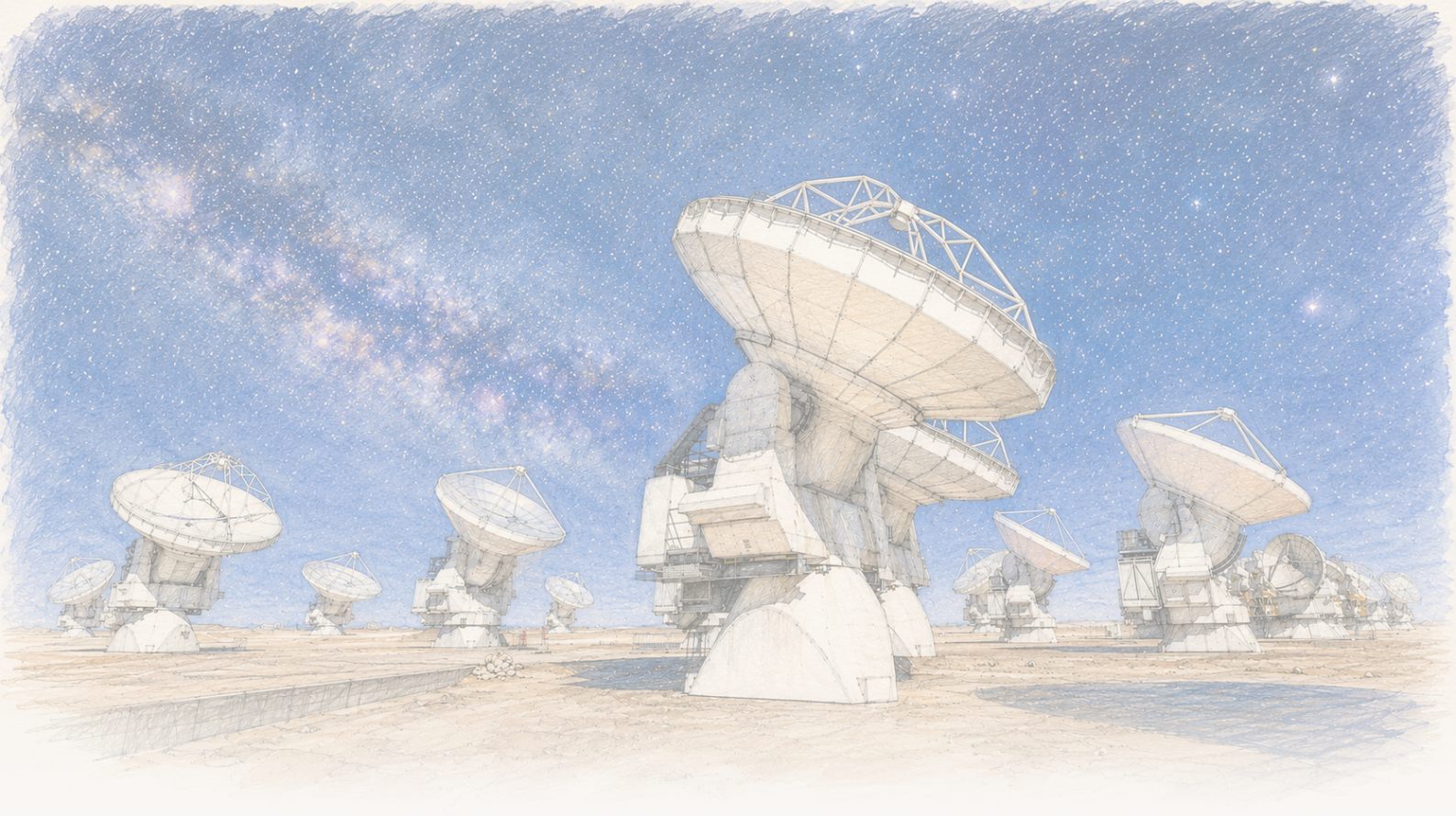




The CLEAN PAPER

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

星際彗星 3I/ATLAS 攜帶的水比我們自己的彗星 形成於更冷的條件下——首次對另一個行星系統 的化學讀取

天文學家使用 ALMA 約束了 3I/ATLAS——第三個已知的星際天體——水中「重」氫與普通氫的比值，發現其強烈富氫：至少約為地球海洋的 40 倍、典型太陽系彗星的 30 倍。這指向在比我們自己的彗星更冷的條件下形成的水。該結果是一個下限，透過間接方式得出（水本身從未被直接偵測到），它與生命或科技無關——只關於化學和寒冷。

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 天線與多台 ALMA 天線一同觀測月光下的夜空。圖片來源：Alex Pérez / ALMA Observatory。

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

來自另一顆恆星的彗星，以及它水中留下的指紋

時不時地，會有一些東西穿過太陽系，而這東西從來不屬於我們。不是小行星帶裡跑出來的岩石，也不是奧爾特雲中沿著漫長軌道回歸的彗星，而是一個沿著開放的雙曲線路徑飛行的天體——它從星際空間進入，繞太陽一圈，然後永遠離開。我們如今見過三個了。第一個是 2017 年的'Oumuamua（奧陌陌），在人們就它到底是什麼達成一致之前，它幾乎已經消失了。第二個是 2019 年的2I/Borisov，它顯然是一顆彗星。第三個於 2025 年 7 月發現，是3I/ATLAS——它包裹在足夠活躍的彗髮之中，足以進行真正的化學探測。

在喧囂開始之前，這裡有一個值得留住的要點。一顆星際彗星，毫不誇張地說，是另一個行星系統的碎片：冰和塵埃在另一顆恆星周圍凝結，很可能在很久以前被一次引力踢飛了出去，漂過銀河系，恰好從我們的太陽附近經過，其冰層開始蒸發——正好在我們的望遠鏡可以觀測的時候。這是一個真正非凡的事實，其非凡程度已經足夠，無需任何添油加醋。

但它往往還是會得到添油加醋。星際天體吸引了一種特殊的屏息報導——暗下來的燈光，可是萬一是誰建造了它呢——3I/ATLAS 也得到了它那份。對那個問題的誠實回答是無聊的那個，而無聊的那個更有趣：它就是一顆彗星。真正的問題從來不是有沒有人製造了它。而是那個更安靜的問題——如果你能讀取在另一顆恆星周圍組裝起來的物質的化學資訊，它會告訴你關於那顆恆星家族的什麼？而你又該如何讀取它？

這一次，讀取的工具是水。水是兩個氫和一個氧，但其中一小部分氫是氘——一種更重的孿生兄弟，一個普通的氫原子攜帶了一份額外的中子。水中重氫與普通氫的比值，記為 D/H ，不是隨機的。它由化學過程決定，主要取決於水最初形成時的溫度：形成的搖籃越冷、越安靜，被鎖入的氘就越多。而由於彗星本質上是一個深凍冰箱——能將冰層保存數十億年——其水中的 D/H 比值可以保存關於這些水形成條件的指紋。

我們對自家系統的指紋已經相當瞭解：地球的海洋和太陽系中不同家族的彗星聚集在一個相當窄的範圍內。尚無人能確定的是，在另一顆恆星周圍形成的水的同一指紋。這就是這篇論文試圖在 3I/ATLAS 中讀取的東西。

作者做了什麼

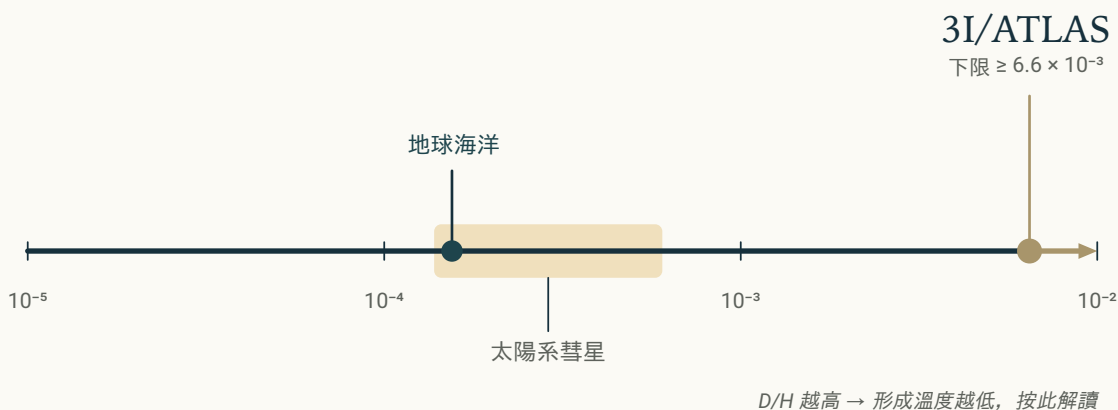
他們在 2025 年 11 月 4 日——彗星繞日六天後——將 ALMA（智利沙漠中的大型電波天線陣列）指向了 3I/ATLAS。他們將其調諧以捕捉彗髮中三種分子的微弱毫米波輝光：普通水（ H_2O ）、重水（ HDO ，其中一個氫是氘）和甲醇（ CH_3OH ）。

他們想要的 D/H 比值，實際上就是重水與普通水的比值。所以他們需要兩者。然後，他們將光譜輸入一個擴張彗星大氣的輻射傳輸模型（名為 **SUBLIME** 的代碼），並用與檢索系外行星大氣成分相同的統計工具進行擬合，以提取溫度、外流速率以及彗星正在產生每種分子的量。

有一個限制條件影響著後續的一切：**他們實際上並沒有偵測到水**。 HDO 和甲醇顯示出清晰、明確的信號。 H_2O 沒有——可能被彗髮的幾何結構或某些尚未確定的因素所掩蓋。所以水的豐度——以及因此 D/H 比值——是從甲醇的激發溫度間接推斷的。他們用一個近似關係來橋接：假設水是彗髮中主導性的碰撞夥伴，他們從甲醇激發溫度推斷出 H_2O 密度，然後從 HDO/H_2O 比值推算出 D/H 。這不是一個直接測量；它是一個建模的、依賴於模型的下限。

3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置

水的 D/H 比值 — 對數尺度



3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置：遠在富氘端，超出地球海洋和整個太陽系彗星種群（此處顯示為近似範圍）。

箭頭標記的是下限——真實值可能更高。高 D/H 比值是冷形成條件的線索，而非一個家庭地址。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

他們發現了什麼

水中的氘含量異常豐富。從 HDO 信號出發——並假設水是彗髮中的主導碰撞氣體——他們推導出 D/H 比值在 $6.6\text{--}16.9 \times 10^{-3}$ 的範圍內，保守下限為 $>6.6 \times 10^{-3}$ 。這比地球海洋的 D/H 值高出約 **40 倍**，比典型的太陽系彗星高出約 **30 倍**。

甲醇是第一個明確的發現。CH₃OH 是彗星化學的一個已知示蹤劑，其檢測明確且穩健。他們的甲醇生產速率範圍涵蓋了基於觀測前光學光譜的早期預印本估計值，為該測量增加了信心。

從甲醇中他們也獲得了溫度。旋轉溫度約為 **25 K**——非常冷——但彗星當時的日心距離為 0.72 AU，這意味著來自太陽的加熱尚不強烈。溫度的分佈被繪製成圖（論文中為圖 2），並與各種化學情景下的模型進行了比較。

這是來自另一個系統的第一張水-D/H 明信片，而且它看起來不像家裡的那張。極高的 D/H 指向在遠比我們彗星曾經歷的更冷、更安靜、熱加工更少條件下形成的水。

強有力的獨立檢查

在他們公佈結果後，另一支團隊使用 **JWST** 對 3I/ATLAS 進行了自己的觀測，並發現了完全相同方向的水-D/H 富集，從而支持了 ALMA 的結論。這是一個教科書式的交叉檢驗。這篇 Clean Paper 的解讀將 ALMA 和 JWST 的結果並行考慮，但側重於首先公佈此測量的論文。

這沒有證明什麼

- 它**沒有**偵測到普通水（H₂O）。這項測量是間接的。
- 它**沒有**給出一個精確的 D/H 值——它是一個依賴於模型的下限，範圍較寬（ $6.6\text{--}16.9 \times 10^{-3}$ ）。
- 它**沒有**識別出母恆星或其具體位置。沒有任何軌道反推能追溯到單一的來源系統。
- 它**沒有**對生命、科技或人工起源發表任何看法。
- 它**沒有**告訴我們富集是在冷的前恆星雲中繼承的，還是在冷原行星盤中設定的。兩者都符合數據；數據無法區分。

證據有多強？

對高氘富集，證據很強但並非直接。HDO 檢測本身是穩健的，並且得到了獨立 JWST 分析的確認。兩個獨立的設施指向同一個結論：水是富氘的。但水豐度是從甲醇激發溫度推斷的，這為結果增加了一層模型依賴性。

對「比我們的彗星更冷」，推理是在堅實的地基上的。冷形成是高 D/H 的自然解釋，這一點在幾十年來對太陽系彗星的測量中已得到充分確立。非星際機制（例如，彗髮中的輻射驅動的同位素分餾）曾一度被考慮，但隨後被他們的分析排除了。

對精確的數值，信心應該更為中等。範圍較寬，取決於碰撞速率的近似和缺乏 H₂O 檢測。該論文的 D/H 是一個下限，不是一個點估計。

JWST 的交叉檢驗大大增強了結論——比任何一個單獨的設施都要強。

對解釋而言，推理是良好動機但並非唯一。冷形成是高 D/H 的自然解釋；這種冷是繼承的還是後來施加的則尚未解決，母系統也無法識別。

簡言之：水在寒冷中形成這一點是牢固的；究竟有多冷，以及究竟為什麼，則被誠實地保持開放。

為什麼重要

幾十年來，地球水來自何處——以及是什麼設定了正在形成的行星系統中水的氘指紋——這一問題完全依靠在我們太陽系內部進行的測量來回答。這是該圖景首次被擴展到經過驗證是在另一顆恆星周圍形成的物質。

它給出的答案不是「到處都和家裡一樣」。而是恰恰相反：另一個系統可以在寒冷到足以留下我們彗星從未攜帶過的指紋的條件下沉積其冰層。這是一個小而具體的證據，證明了一件安靜而重大的事情——構建行星的固體的化學和歷史可能因恆星而異。而且它並非來自一艘跨越光年的太空船，而是來自捕捉到另一個系統的一塊流浪碎片在墜落經過時，在它消失之前讀取它的水。

清潔摘要

3I/ATLAS 是第三個已知的星際天體，也是第二顆活躍的星際彗星——一塊來自另一個行星系統的碎片，正在一次性穿過我們的系統。天文學家在彗星最接近太陽時使用 ALMA，在其彗髮中偵測到了重水（HDO）和甲醇，但未偵測到普通水，並由此推斷出水中的氘氫比。他們發現其氘含量強烈富集——下限高於 6.6×10^{-3} ，約為地球海洋的 40 倍、典型太陽系彗星的 30 倍——指向在比太陽系彗星更冷、加工程度更低的條件下形成的水。這個數字是透過模型間接獲得的下限，而非直接測量，它無法說明富集是從冷的誕生雲中繼承的，還是在冷盤中後來設定的，也無法說明彗星來自何處。即便如此，這是對來自另一顆恆星的水的這一特定化學指紋的首次讀取——而且這個指紋與我們的不匹配。

No-BS 檢查

論文所展示的：根據對星際彗星 3I/ATLAS 近日點附近的 ALMA 觀測，得出其水中 D/H 比值的下限 $>6.6 \times 10^{-3}$ （保守情景）——約為地球海洋的 40 倍、典型太陽系彗星的 30 倍——意味著水在比太陽系彗星顯著更冷、熱加工更少的條件下形成。一項獨立的 JWST 分析在方向上一致。

合理但未經證實的：富集是直接從冷的前恆星雲中繼承的，還是在冷原行星盤中形成期間設定的。兩種情景都符合數據；數據無法區分。

它沒有展示的：任何關於生命、科技或人工起源的內容；一個精確的 D/H 值（它是一個下限）；母恆星的身分或位置；高 D/H 背後的具體機制；或者這個單次觀測結果不受彗髮變化的影響。

主要侷限：H₂O 未被直接偵測到，因此水豐度——以及 D/H 比值——是透過甲醇激發溫度間接推斷的，假設水是主導碰撞夥伴，並使用作者稱為約束不佳的近似碰撞速率；結果是一個單次觀測的、依賴於模型的限值；母系統無法識別。

普通讀者應該抱有多大信心？高度信心——3I/ATLAS 的水確實是富氘的，形成溫度比我們的彗星更冷，且這與外星人毫無關係。中等信心——對富集的確切程度，這是一個依賴於模型的下限。低度信心——對具體的原因和誕生地，這些仍然開放。恰當的立場：對來自另一個恆星系統的化學明信片的安靜驚嘆——不是一個謎團，也不是一艘太空船。

來源

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/>