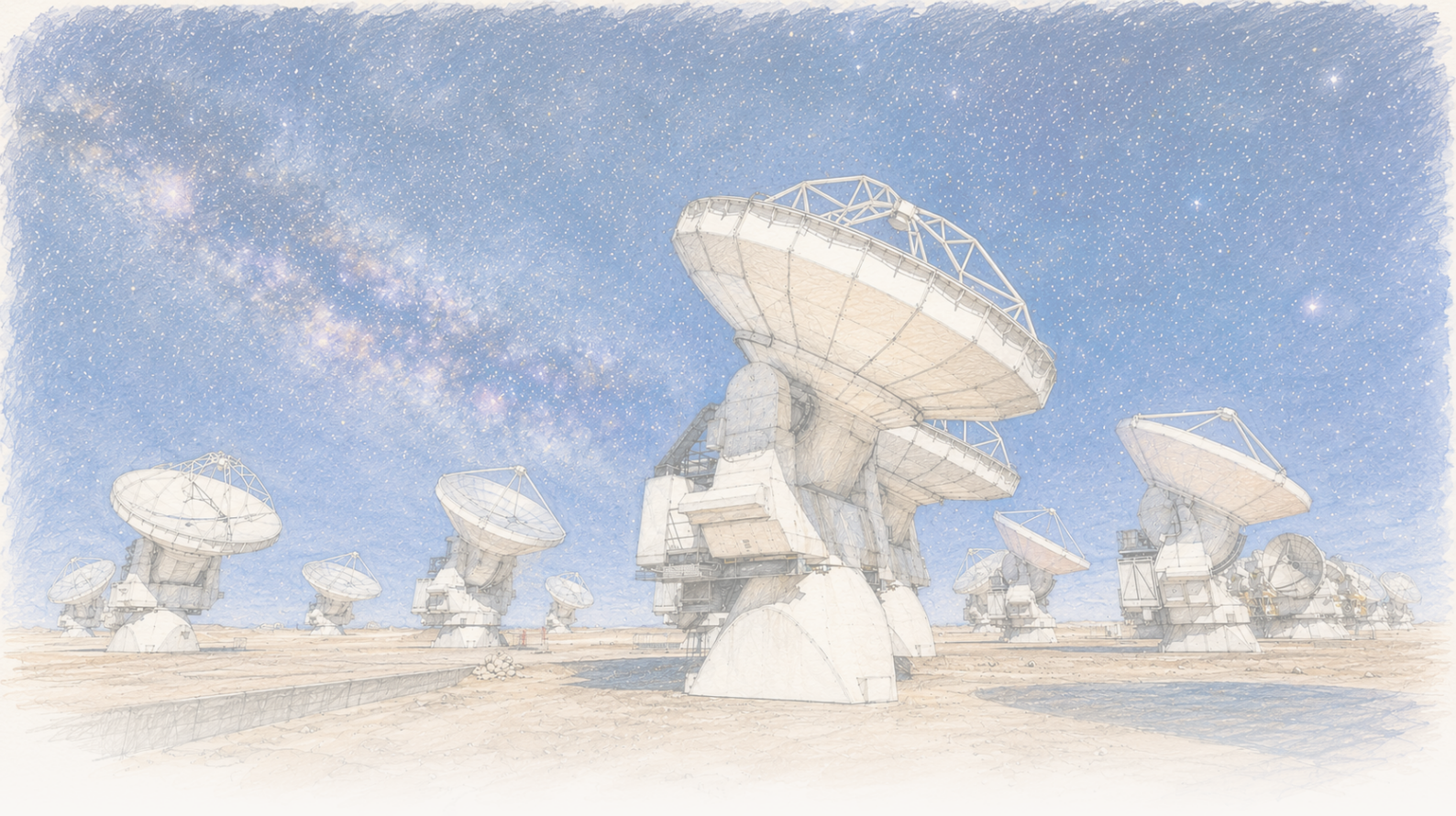




The CLEAN PAPER

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 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 天線，多座 ALMA 天線正在觀測月光下的夜空。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，以及它水中的指紋

偶爾，會有某種從未屬於我們的東西穿過太陽系。它不是小行星帶裡偏離軌道的岩石，也不是沿著漫長牽引線從奧爾特雲折返的彗星，而是一個沿著開放雙曲線軌道運行的天體——它從星際空間進入，繞太陽一圈，然後永遠離去。我們現在已經看見三個。第一個是 2017 年的 'Oumuamua，幾乎在大家還沒對它究竟是什麼達成共識之前就消失了。第二個是 2019 年的 2I/Borisov，毫無疑問是一顆彗星。第三個於 2025 年 7 月發現，名為 3I/ATLAS——它到來時包覆著一層十分活躍的彗髮，足以讓人實際研究其化學成分。

在喧囂開始之前，值得先記住這一點。星際彗星，字面上就是另一個行星系統的一小片碎屑：在另一顆恆星周圍凝結的冰與塵埃，很可能很久以前受到重力踢擊而被拋出，穿越銀河系漂流，恰好足夠接近我們的太陽，讓它的冰體開始昇華，而我們的望遠鏡又正好能觀測到。這才是真正非凡的事實，而且已經驚人到不需要任何額外渲染。

但它往往還是會被加上渲染。星際天體總會吸引某種特別煽情的報導——燈光轉暗，再來一句「但如果是有人製造的呢」——而 3I/ATLAS 也分到了自己的一份。對那個問題，誠實的答案是無聊的那個，而無聊的答案其實更有意思：它是一顆彗星。真正的問題從來不是「是否有人製造了它」，而是更安靜的那個——如果你能讀取一個在另一顆恆星周圍形成的天體的化學成分，它會告訴你那顆恆星所屬家族的哪些事？而你究竟要如何讀取它？

這次用來解讀它的是水。水由兩個氫原子和一個氧原子組成，但其中有一小部分氫是氘——氫的較重孿生物，也就是比普通氫原子多帶一顆中子的氫。水中重氫與普通氫的比例寫作 D/H，並不是隨機的。它主要取決於水最初形成之處的化學環境有多冷：形成環境越冷、越平靜，越多氘就會被鎖在其中。而由於彗星本質上就是一座深度冷凍庫——能讓冰體冷藏數十億年——其中水的 D/H 比例便能保存水形成時環境條件的指紋。

我們對自己系統的指紋已有相當不錯的了解：地球海洋與太陽系各類彗星的數值聚集在相當狹窄的範圍內。但從來沒有人確定過，圍繞另一顆恆星形成的水具有怎樣的指紋。這正是這篇論文要從 3I/ATLAS 中讀取的資訊。

作者做了什麼

他們在 2025 年 11 月 4 日把 ALMA——智利沙漠中的大型射電天線陣列——指向 3I/ATLAS；那是在彗星繞過太陽六天之後。他們調整觀測頻率，捕捉彗髮中三種分子微弱的毫米波輻射：普通水（H₂O）、重水（HDO，其中一個氫是氘），以及甲醇（CH₃OH）。

他們要找的 D/H 比例，實際上就是重水與普通水的比例。因此兩者都需要。他們接著把光譜送入膨脹中的彗星大氣輻射傳輸模型（一套名為 SUBLIME 的程式），再用與反演系外行星大氣成分相同類型的統計工具進行擬合，以求得溫度、外流情況，以及彗星產生的各種分子數量。

接下來的一切都受到一個關鍵限制影響：**他們其實沒有探測到水**。HDO 和甲醇出現了；H₂O 本身則停留在噪聲以下。這不是因為普通水不足——它的含量遠多於重水。某條譜線是否出現，不只取決於分子存在多少，也取決於那條特定譜線本身有多容易被觀測，而這裡有兩件事不利於水譜線。第一是大氣：他們能鎖定的 H₂O 譜線（接近 183 GHz）正好位於地球自身含水大氣吸收最強的位置，所以從地面讀取那裡的彗星水，就有點像隔著霧看蠟燭——論文指出，這些低能量水譜帶會受到強烈的大氣吸收，而 241 GHz 附近的重水（HDO）譜線則落在較乾淨的窗口。第二是靈敏度：水通道的噪聲大得多——HDO 每波束 21 mJy，相比之下水通道約為 500 mJy——因此即使分子含量很高，訊號也可能埋在其中。在霧與噪聲的雙重作用下，數量充足的普通水仍低於偵測門檻，而稀有得多、在乾淨安靜窗口中捕捉到的重水則清楚現身。（從太空中、在大氣層之上，同樣的水就容易觀測得多：JWST 後來在彗星通過近日點之後，於紅外線波段探測到了彗星的水——因此 ALMA 未能探測到水，只涉及那條穿過地球大氣的譜線，並不表示水不存在。）所以普通水的含量必須間接推斷——主要是根據甲醇譜線如何被激發，而這取決於甲醇分子與水碰撞的頻率。這確實是一項測量，但它依賴模型，作者也明確說明了這一點。

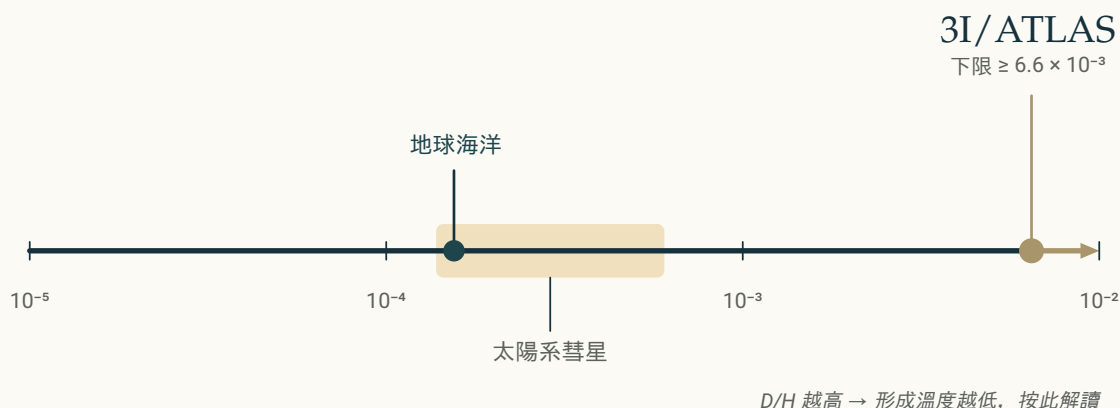
他們發現了什麼

- **有重水，但沒有普通水**。HDO 和幾條甲醇譜線都被清楚探測到；H₂O 則沒有。由於 D/H 比例建立在普通水產生率的上限之上——這是刻意如此處理的，因為水譜線本身仍低於噪聲——所以得到的氘比例是**下限**，而不是單一數值。
- **氘有顯著富集**。在他們較保守的情境中，水的 D/H 比例大於 6.6×10^{-3} ——大約是地球海洋數值的**40 倍以上**，也是典型太陽系彗星的**30 倍以上**。無論採用兩種估算中的哪一種，3I/ATLAS 都位於迄今所有水 D/H 測量結果的極高端。

- **它可能不是這一晚的偶然結果。**這項測量來自單一觀測時段，但對鄰近 ALMA 資料的初步查看顯示，日與日之間沒有大幅波動；而一項獨立的 3I/ATLAS JWST 分析，取自一個多月後的資料，也指向同一方向——富含氘的水。

3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置

水的 D/H 比值 — 對數尺度



3I/ATLAS 的水在氘尺度上的位置：遠在富氘端，超出地球海洋以及整個太陽系彗星族群（此處以約略範圍表示）。箭頭標示的是一個下限——真實數值可能更高。高 D/H 比例是低溫形成條件的線索，不是出生地的地址。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

這可能意味著什麼

水的 D/H 比例偏高，是水在非常寒冷（低於約 30 K）的地方結冰，之後沒有再經歷大幅受熱改造的特徵。因此最直接的解讀是：3I/ATLAS 的水形成於比我們太陽系彗星中的水更冷、更溫和的條件下——也就是說，它的母行星系統以不同於我們的方式形成了冰體。

作者對下一步很謹慎，我們也應該如此。要形成如此富含氘的水有兩種途徑，而這項測量無法區分兩者：這些水可能從該系統誕生時的寒冷雲氣中繼承了富集，也可能是在彗星於寒冷外盤中形成時才形成這種富集。無論是哪一種，重要的結論都仍然成立——塑造 3I/ATLAS 的條件，並不是塑造我們彗星的條件——但其中的原因仍未定案。

因此，這是人類第一次讀取來自另一個行星系統物質的水形成指紋，並發現它與我們自己的不相符。

這並不能證明什麼

- 它對生命、技術或意圖**什麼也沒有說**。根本沒有一個被建造出來的「它」；「星際」描述的是軌跡，而不是起源故事。這是對水化學的測量。
- 這**不是**精確的 D/H 數值。它是下限，而且所指的水從未被直接探測到——其含量是根據另一種分子甲醇的激發狀態，在假定水是甲醇的主要碰撞對象下推斷的。
- 它**沒有**揭示 3I/ATLAS 出生於哪裡。母恆星無法被可靠辨認，而高 D/H 比例是關於條件的線索，不是出生地的地址。
- 它**沒有**解決水為何富含氘。「從寒冷出生雲繼承」與「在彗星形成於圓盤期間設定」都符合資料；論文沒有在兩者之間作出選擇。
- 這是對一個天體在一個觀測時段進行的測量。相互印證令人鼓舞，但還不是長時間基線的觀測。

證據有多強？

有兩件事應該分開衡量：結果的方向，以及確切的數值。

- **方向很穩健**。3I/ATLAS 的水明顯富含氘，是由一個保守的下限所顯示；這個下限遠高於整個太陽系彗星族群，而且獲得獨立 JWST 分析的支持。這一部分並不脆弱。
- **數值依賴一連串模型推論**。由於 H₂O 未被探測到，水的含量——以及由此得到的 D/H 比例——仰賴從甲醇激發狀態間接推斷水的含量。這假定水是彗髮中主要的碰撞夥伴（在近日點附近合理，但不能排除 CO₂ 的貢獻），並使用近似且公認約束不足的碰撞速率。作者標明了所有這些限制，並刻意將結果報告為一個限值，而非測定值。
- **解釋有充分依據，但不是唯一解釋**。低溫形成是高 D/H 的自然解釋；這種低溫究竟是繼承而來，還是後來形成的，仍未解決，而母系統也無法辨識。

簡而言之：水是在低溫下形成的，這點站得住腳；究竟有多冷，以及究竟為什麼，則仍坦然留待解答。

為什麼重要

數十年來，地球的水從何而來——以及在形成中的行星系統裡，什麼決定了水的氘指紋——這些問題完全依靠在我們自己的太陽系內進行的測量來回答。這是第一次把那張圖擴展到明確形成於另一顆恆星周圍的物質。

它給出的答案不是「到處都像家鄉」。恰恰相反：另一個系統能在足夠寒冷的條件下形成冰體，留下我們的彗星從未攜帶過的指紋。這是對一件悄然宏大的事情所提供的一小塊具體證據——構成行星的固體物質，其化學成分與歷史可以因恆星而異。而這個證據不是來自一艘跨越光年的太空船，而是來自捕捉另一個系統的一塊零散碎片從我們身旁掠過，並在它消失之前讀取其中的水。

重點摘要

3I/ATLAS 是已知的第三個星際天體，也是第二顆活躍的星際彗星——另一個行星系統的一塊物質，僅一次穿過我們的系統。天文學家利用 ALMA 在彗星最接近太陽的時段附近進行觀測，在其彗髮中探測到重水（HDO）和甲醇，卻沒有探測到普通水，並由此推斷水的氘氫比。他們發現其中的氘有顯著富集——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——這指向形成於比太陽系彗星更寒冷、經歷較少後續改造之條件下的水。這個數值是透過模型間接得到的下限，不是直接測量；它也無法說明富集是從寒冷出生雲繼承而來，還是在彗星形成於寒冷圓盤期間形成的，更無法說明彗星來自何處。即便如此，這仍是第一次讀取來自另一顆恆星的水所具有的這種特定化學指紋——而這個指紋與我們的不相符。

務實檢視

論文顯示的內容：根據對近日點附近星際彗星 3I/ATLAS 的 ALMA 觀測，在保守情境下，其水 D/H 比例的下限為 $>6.6 \times 10^{-3}$ ——約為地球海洋的 40×、典型太陽系彗星的 30×——這表示其水形成時的條件明顯比太陽系彗星更寒冷、受熱改造更少。獨立的 JWST 分析也在方向上與此一致。

合理但尚未證明的內容：這種富集究竟是直接從寒冷的前恆星雲繼承而來，還是在彗星於寒冷原行星盤中形成期間形成的。兩種情境都符合資料；資料無法區分它們。

它沒有顯示的內容：任何關於生命、技術或人工起源的訊息；精確的 D/H 數值（它是下限）；母恆星的身分或位置；高 D/H 背後的具體機制；或這項單一觀測時段的結果不受彗髮變化影響。

主要限制：H₂O 未被直接探測到，因此水的含量——以及 D/H 比例——是根據甲醇激發狀態間接推斷的，前提是水是主要碰撞者，並使用作者稱為約束不足的近似碰撞速率；結果是依賴模型的單一觀測時段限值；母系統無法辨識。

一般讀者應有多少信心？對於 3I/ATLAS 的水確實富含氘、形成時比我們的彗星更寒冷，以及這完全與外星人無關，可以有高度信心。對於富集的確切程度，信心中等，因為那是依賴模型得出的下限。對於具體成因和出生地，信心低，因為它們仍是開放問題。恰當的態度是：對來自另一個恆星系統的化學明信片安靜地感到驚奇——它不是謎團，也不是太空船。

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/>