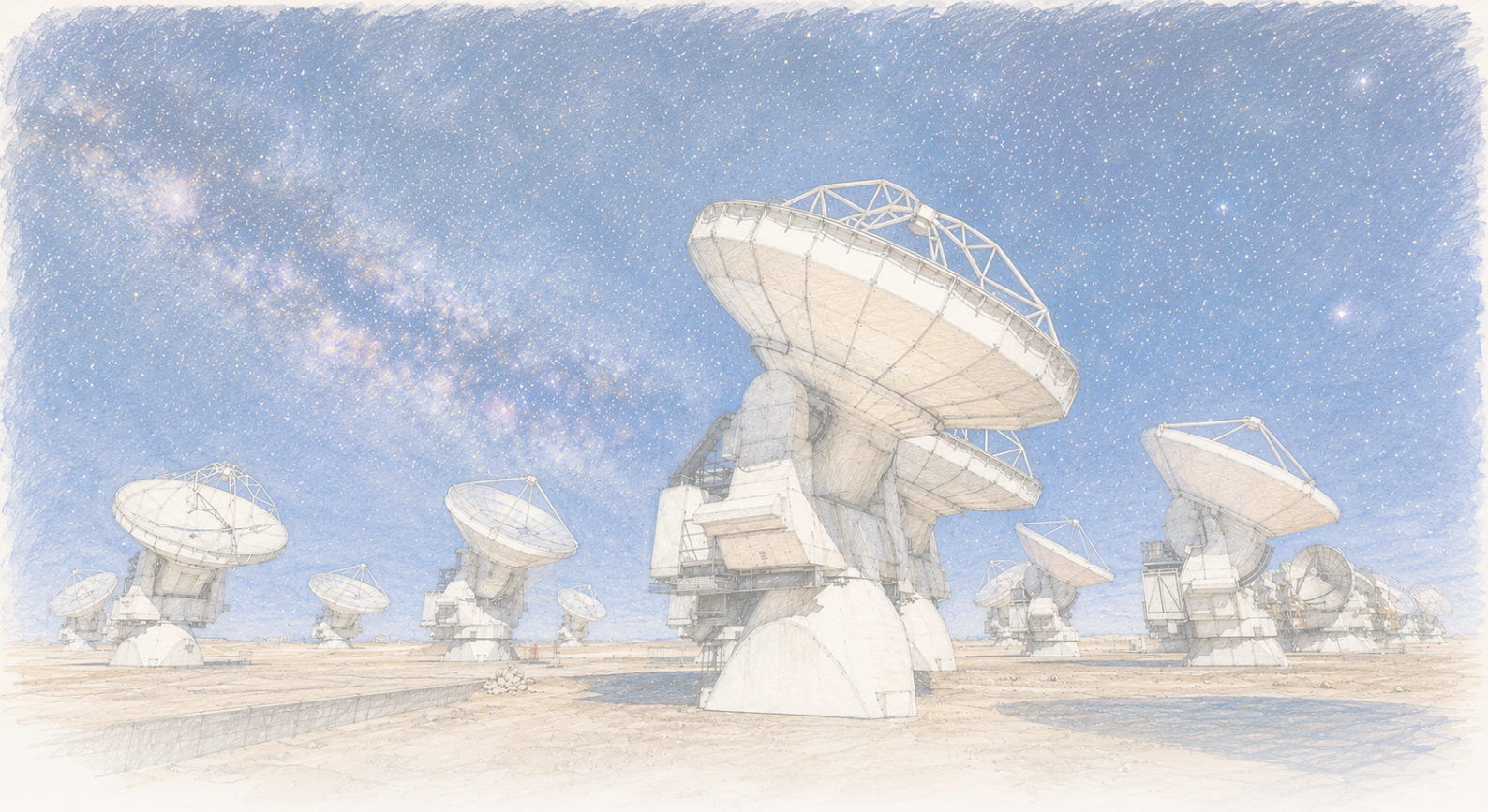




The CLEAN PAPER

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

恒星間彗星 3I/ATLAS は、私たち自身の彗星よりも冷たく形成された水を運んでいる——別の惑星系の初めての化学的読み取り

ALMA を用いて、天文学者たちは 3 番目に知られた恒星間天体である 3I/ATLAS の水に含まれる「重い」水素と普通の水素の比を制約し、それが強く重水素に富んでいることを見出した。すなわち、少なくとも地球の海洋の約 40 倍、典型的な太陽系彗星の約 30 倍である。これは、私たち自身の彗星よりも冷たい条件のもとで形成された水を指し示す。この結果は間接的に導かれた下限値であり（水そのものは一度も直接検出されなかった）、生命や技術については何も語らず、化学と冷たさについてのみ語る。

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



手前に DV-59 アンテナ、その奥では複数の ALMA アンテナが月明かりに照らされた夜空を観測している。クレジット：Alex Pérez / ALMA 天文台。

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

別の恒星からやってきた彗星、そしてその水に刻まれた指紋

ときおり、決して私たちのものではなかった何かが太陽系を通り抜けていく。小惑星帯からはぐれた岩でもなければ、長い綱の先からオールトの雲へと戻っていく彗星でもなく、開いた双曲線軌道を進む天体——恒星間空間からやってきて、太陽を一度だけ回り、そして永遠に去っていくものである。私たちはいまや、こうした天体を3つ見てきた。最初のものは2017年の‘オウムアムア’で、その正体について誰かが合意する前にほとんど姿を消してしまった。2つ目は2019年の2I/ボリソフで、まぎれもなく彗星だった。3つ目は2025年7月に発見された3I/ATLASであり——それは、本格的な化学分析を行えるほど活発なコマ（彗星の頭部を包むガスと塵）をまとって現れた。

騒ぎが始まる前に、心に留めておく価値のある点はここにある。恒星間彗星とは、文字どおり、別の惑星系のかげらである。すなわち、どこか別の恒星のまわりで凝縮した氷と塵が、はるか昔に重力による一撃でおそらく弾き出され、銀河を漂い、そしてたまたま私たちの太陽の十分近くを通り過ぎたために、その氷が——まさに私たちの望遠鏡が見守れる場所で——沸き立ち始めた、というものだ。これこそが本当に注目すべき事実であり、それだけで十分に驚くべきものであって、何の飾りも必要としない。

それでも、飾りはつきものだ。恒星間天体は、ある種の息もつかせぬ報道を引き寄せる——照明を落とした演出、でも、もし誰かがこれを造ったのだとしたら、という含み——そして 3I/ATLAS もその例に漏れなかった。その問いへの正直な答えは、退屈なほうの答えであり、そしてその退屈な答えのほうがより興味深い。すなわち、これは彗星である。本当の問いは、誰かがそれを造ったのかどうか、では決してなかった。それはもっと静かな問いだった——もし別の恒星のまわりで組み立てられた何かの化学を読み解けるとしたら、それはその恒星の一族について何を教えてくれるのか。そして、そもそもどうやってそれを読み解くのか。

今回、その読み取りの道具となるのは水である。水は2つの水素と1つの酸素からなるが、その水素のごく一部は重水素——重い双子、すなわち中性子を1つ余分に持つありふれた水素原子——である。水の中の重い水素と普通の水素の比、D/H と書かれるこの比は、でたらめではない。それは化学によって、主として水が最初に形成された場所がどれほど冷たかったかによって決まる。ゆりかごが冷たく穏やかであればあるほど、より多くの重水素が閉じ込められる。そして彗星とは本質的に深冷凍庫——何十億年ものあいだ水を冷凍保存できるもの——であるため、その水の D/H 比は、その水が形成された条件の指紋を保存しうるので。

私たち自身の太陽系の指紋については、そこそこよく分かっている。地球の海洋と、太陽系彗星のさまざまな一族は、かなり狭い帯のなかに集まっている。誰もこれまで突き止められなかったのは、別の恒星のまわりで形成された水についての、その同じ指紋だった。この論文が 3I/ATLAS のなかに読み取ろうとしたのは、まさにそれである。

著者たちが行ったこと

彼らはALMA——チリの砂漠にある電波望遠鏡の巨大なアンテナ群——を、2025年11月4日、彗星が太陽を回り込んでから6日後に、3I/ATLAS へと向けた。彼らはそれを、コマに含まれる3種の分子——普通の水 (H_2O)、重い水 (HDO、水素の1つが重水素になっているもの)、そしてメタノール (CH_3OH) ——のかすかなミリ波の輝きをとらえるように調整した。

彼らが求めていた D/H 比は、実質的には重い水と普通の水の比である。だから、その両方が必要だった。そこで彼らはスペクトルを、膨張する彗星大気を記述する放射輸送モデル (SUBLIME というコード) に通し、系外惑星の大気組成を割り出すために使われるのと同じ種類の統計的手法でフィッティングを行い、温度、流出、そして彗星が各分子をどれだけ生成していたかを引き出した。

以下に続くすべてを左右する落とし穴が1つある。彼らは実際には水 (H_2O) を検出しなかった。HDO とメタノールは現れたが、 H_2O そのものはノイズの下にとどまった。これは普通の水が足りないからではない——普通の水は重い水よりもはるかに多く存在する。ある輝線が現れるかどうかは、その分子がどれだけ存在するだけでなく、その特定の輝線がどれほど観測しやすいかにもよるのであり、ここでは2つの要因が水の輝線に不利に働く。1つ目は大気である。彼らが狙えた H_2O の輝線 (183 GHz 付近) は、地球自身の水を多く含む大気が最も激しく吸収する、まさにその場所にある。だから地上から彗星の水をそこで読み取るのは、霧越しにろうそくを見ようとするようなものである——論文は、これらの低エネルギーの水のバンドは強い大気吸収を受けるのに対し、重い水 (HDO) の輝線 (241 GHz 付近) はより澄んだ窓に落ちる、と述べている。2つ目は感度である。水のチャンネルははるかにノイズが多かった——HDO の 21 に対し、ビームあたり約 500 mJy——ため、たとえ豊富な信号であってもその下に埋もれてしまいうる。霧とノイズのあいだで、豊富に存

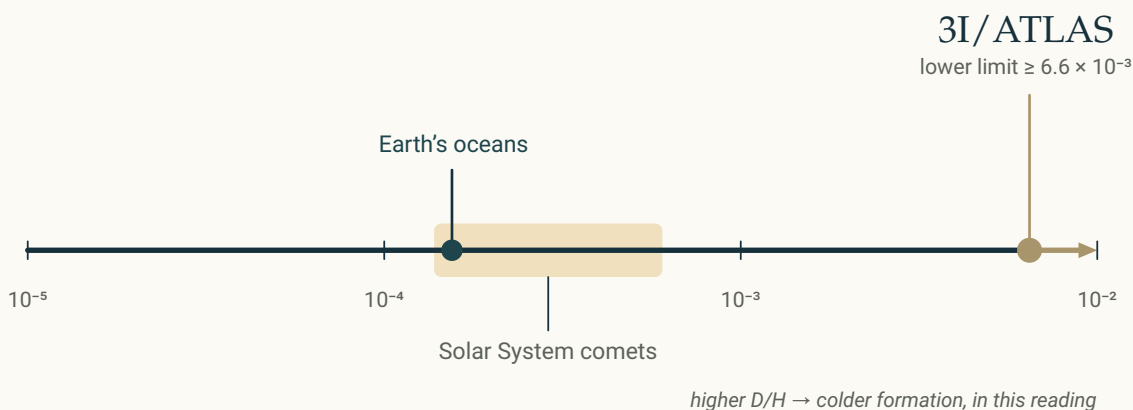
在する普通の水は閾値の下にとどまり、一方ではるかにまれな重い水は、澄んだ静かな窓のなかでとらえられて、はっきりと現れた。(大気の上の宇宙からなら、同じ水ははるかに見やすい。JWST はのちに、近日点通過後に、この彗星の水を赤外線で検出した——つまり ALMA の非検出は、地球の大気越しに見たあの 1 本の輝線についてのものであって、水が存在しないということではない。) そのため、普通の水の量は間接的に——主としてメタノールの輝線がどのように励起されているかから、そしてそれはメタノール分子が水とどれだけ頻繁に衝突するかに依存する——推定しなければならなかった。これは本物の測定ではあるが、モデルに依存した測定であり、著者たちはその点を明確に述べている。

彼らが見出したこと

- **重い水はあったが、普通の水はなかった。** HDO といくつかのメタノールの輝線ははっきりと検出されたが、 H_2O はされなかった。D/H 比は、普通の水の生成率の上限値に依拠している——水の輝線そのものがノイズの下にとどまったため、意図的にそのように扱われている——ので、得られる重水素比は単一の値ではなく**下限値**として出てくる。
- **強い重水素の濃縮。** 彼らの控えめなシナリオでは、水の D/H 比は 6.6×10^{-3} より**大きい**——地球の海洋の値の約 **40 倍**以上、そして典型的な太陽系彗星の値の約 **30 倍**以上である。2 つの推定のいずれによっても、3I/ATLAS は、これまでに行われたすべての水の D/H 測定のまさに最上端に位置する。
- **これはおそらく、この一夜だけのまぐれではない。** この測定は単一の観測時期 (エポック) からのものだが、近い時期の ALMA データを予備的に見たところ、日ごとの大きな変動は見られず、また 1 か月以上あとに取得された 3I/ATLAS の独立した JWST 解析も、同じ方向——重水素に富んだ水——を指し示している。

Where 3I/ATLAS's water sits on the deuterium scale

Water D/H ratio – logarithmic scale



3I/ATLAS の水が重水素のスケール上のどこに位置するか。すなわち、重水素に富んだ側のはるか遠く、地球の海洋や太陽系彗星の集団全体（ここではおよそその範囲として示されている）をも超えたところにある。

矢印は下限値を示す——真の値はこれより高いかもしれない。高い D/H 比は冷たい形成条件の手がかりであって、出身地の住所ではない。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

これがおそらく意味すること

高い水の D/H 比は、非常に冷たい場所（約 30 K 以下）で凍り、その後に熱によって大きく作り変えられることのなかった水の署名である。だから最も素直な読み取りは、3I/ATLAS の水が、私たち自身の太陽系の彗星の水よりもより冷たく、より穏やかな条件のもとで形成された——したがって、その母体となった惑星系は、私たちのものとは異なるやり方でその氷を組み立てた——というものだ。

著者たちは次の一步について慎重であり、私たちもそうあるべきだ。これほど重水素に富んだ水を得る方法は2つあり、この測定ではそれらを区別できない。すなわち、水はそのシステムが生まれた冷たい雲からその濃縮を受け継いだのかもしれないし、あるいはそれは後になって、冷たい外側の円盤における彗星の形成のあいだに決まったのかもしれない。いずれにせよ、重要な結論は生き残る——3I/ATLAS を形づくった条件は、私たちの彗星を形づくった条件ではなかった——のだが、その理由は未解決のまま残される。

つまりこれは、別の惑星系からやってきた物質の、水の形成の指紋を誰かが読み取り、それが私たち自身のものと一致しないと見出した、初めての事例なのである。

この研究からは言えないこと

- これは生命、技術、あるいは意図について**何も**語らない。「造られた」「それ」など存在しない。「恒星間」とは軌道を指す言葉であって、起源の物語ではない。これは水の化学の測定である。
- これは精密な D/H 値ではない。それは下限値であり、それが指す水は一度も直接検出されなかった——その存在量は、別の分子であるメタノールの励起から、水こそがメタノールが衝突している主な相手だという仮定のもとで推定されたものである。
- これは 3I/ATLAS がどこで生まれたのかを**明かさ**ない。母体となった恒星は信頼できる形では特定できず、高い D/H 比は条件の手がかりであって、出身地の住所ではない。
- これは水がなぜ重水素に富んでいるのかを**決着させ**ない。「冷たい生誕の雲から受け継いだ」も「円盤形成のあいだに決まった」も、どちらもデータに合致する。論文はこの両者のあいだで選択をしていない。
- これは**1**つの天体を、**1**つの観測時期に測定したものだ。裏づけは心強いものではあるが、長い基線ではない。

証拠をどう評価するか

2つのことを別々に秤にかけるべきである。すなわち、結果の方向と、正確な数値である。

- **方向は堅牢である。** 3I/ATLAS の水が著しく重水素に富んでいることは、控えめな下限値であり、太陽系彗星の集団全体をはるかに上回り、独立した JWST 解析によって支持されている。この部分はもろくない。
- **数値はモデリングの連鎖に依拠している。** H_2O が検出されなかったため、水の存在量——ひいては D/H 比——は、メタノールの励起から水を間接的に推定することに依存している。それは、水がコマにおける支配的な衝突相手であること（近日点付近では妥当だが、 CO_2 からの寄与を排除することはできない）を仮定し、また近似的で、著者たち自身が制約が乏しいと認める衝突率を用いている。著者たちはこれらすべてを明示し、この結果を測定ではなく限界値として意図的に述べている。
- **解釈はよく動機づけられているが、唯一のものではない。** 冷たい形成は高い D/H に対する自然な説明である。だが、その冷たさが受け継がれたものなのか、後から課されたものなのかは未解決であり、母体システムは特定できない。

要するに、水が冷たく形成されたことは確かな土台の上にある。だが、正確にどれほど冷たかったか、そして正確になぜかは、正直に未解決のまま残されている。

なぜこれが重要なのか

何十年ものあいだ、地球の水がどこから来たのか——そして、形成途上の惑星系全体にわたって水の重水素の指紋を何が決めるのか——という問いは、もっぱら私たち自身の太陽系の内部で行われた測定によって答えられてきた。今回は、別の恒星のまわりで形成されたと明確に言える物質へと、その図が拡張された初めての事例である。

それが与える答えは「どこも我が家と同じだ」ではない。むしろ逆である。別のシステムは、私たちの彗星が決して帯びなかった指紋を残すほど冷たい条件のもとで、その氷を敷き詰めることができる。これは、静かに巨大な何か——惑星を築く固体の化学と歴史が、恒星ごとに異なりうるということ——を裏づける、小さくて具体的な証拠の一片である。そしてそれは、光年の彼方へ送られた探査機からではなく、別のシステムのはぐれたかけらが通り過ぎるところをとらえ、それが消え去る前にその水を読み取ることから得られたのだ。

要点

3I/ATLAS は 3 番目に知られた恒星間天体であり、2 番目の活動的な恒星間彗星である——私たちの太陽系を一度だけ通り抜ける、別の惑星系のかけらだ。彗星が太陽に最も近づく時期の近くで ALMA を用い、天文学者たちはそのコマのなかに重い水（HDO）とメタノールを検出したが普通の水は検出せず、そこから水の重水素対水素比を推定した。彼らはそれが強く重水素に富んでいると見出す—— 6.6×10^{-3} を上回る下限値、およそ地球の海洋の 40 倍、典型的な太陽系彗星の 30 倍——のであり、これは太陽系の彗星よりも冷たく、あまり作り変えられていない条件のもとで形成された水を指し示す。この数値はモデルを通じて間接的に得られた下限値であって、直接測定ではなく、その濃縮が冷たい生誕の雲から受け継がれたものか、後に冷たい円盤で決まったものかを言うこともできず、彗星がどこから来たのかも分からない。それでもこれは、別の恒星からやって

きた水についての、この特定の化学的指紋を読み取った初めての事例である——そしてその指紋は、私たちのものと一致しない。

冷静に見ると

論文が示していること：近日点近くの恒星間彗星 3I/ATLAS の ALMA 観測から、その水の D/H 比の下限値が 6.6×10^{-3} より大きい（控えめなシナリオ）——地球の海洋の約 40 倍、典型的な太陽系彗星の約 30 倍——ということ。これは、太陽系彗星よりも著しく冷たく、熱的にあまり作り変えられていない条件のもとで形成された水を含意する。独立した JWST 解析も方向については一致している。

もっともらしいが証明されていないこと：その濃縮が、冷たい前恒星雲から直接受け継がれたものなのか、それとも彗星が冷たい原始惑星系円盤のなかで形成されるあいだに決まったものなのか。両方のシナリオが合致し、データはそれらを区別しない。

論文が示していないこと：生命、技術、あるいは人工的な起源についての何か。精密な D/H 値（それは下限値である）。母体となった恒星の正体や位置。高い D/H の背後にある具体的なメカニズム。あるいは、この単一時期の結果がコマの変動の影響を受けないということ。

主な限界： H_2O が直接検出されなかったため、水の存在量——したがって D/H 比——は、水が支配的な衝突相手だと仮定し、著者たちが制約が乏しいと呼ぶ近似的な衝突率を用いて、メタノールの励起から間接的に推定されている。この結果は単一時期の、モデルに依存した限界値である。母体システムは特定できない。

一般の読者はどれほどの確信を持つべきか？ 3I/ATLAS の水が本当に重水素に富み、私たちの彗星よりも冷たく形成されたこと、そしてこれが宇宙人については何一つ語らないことについては、高い確信を。濃縮の正確な度合いについては、それがモデルに依存する下限値であるため、ほどほどの確信を。その具体的な原因と生誕の地については、未解決のまま残されているため、低い確信を。ふさわしい姿勢は、別の恒星系から届いた化学の絵はがきに対する、静かな驚嘆である——謎でもなければ、宇宙船でもない。

出典

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/>