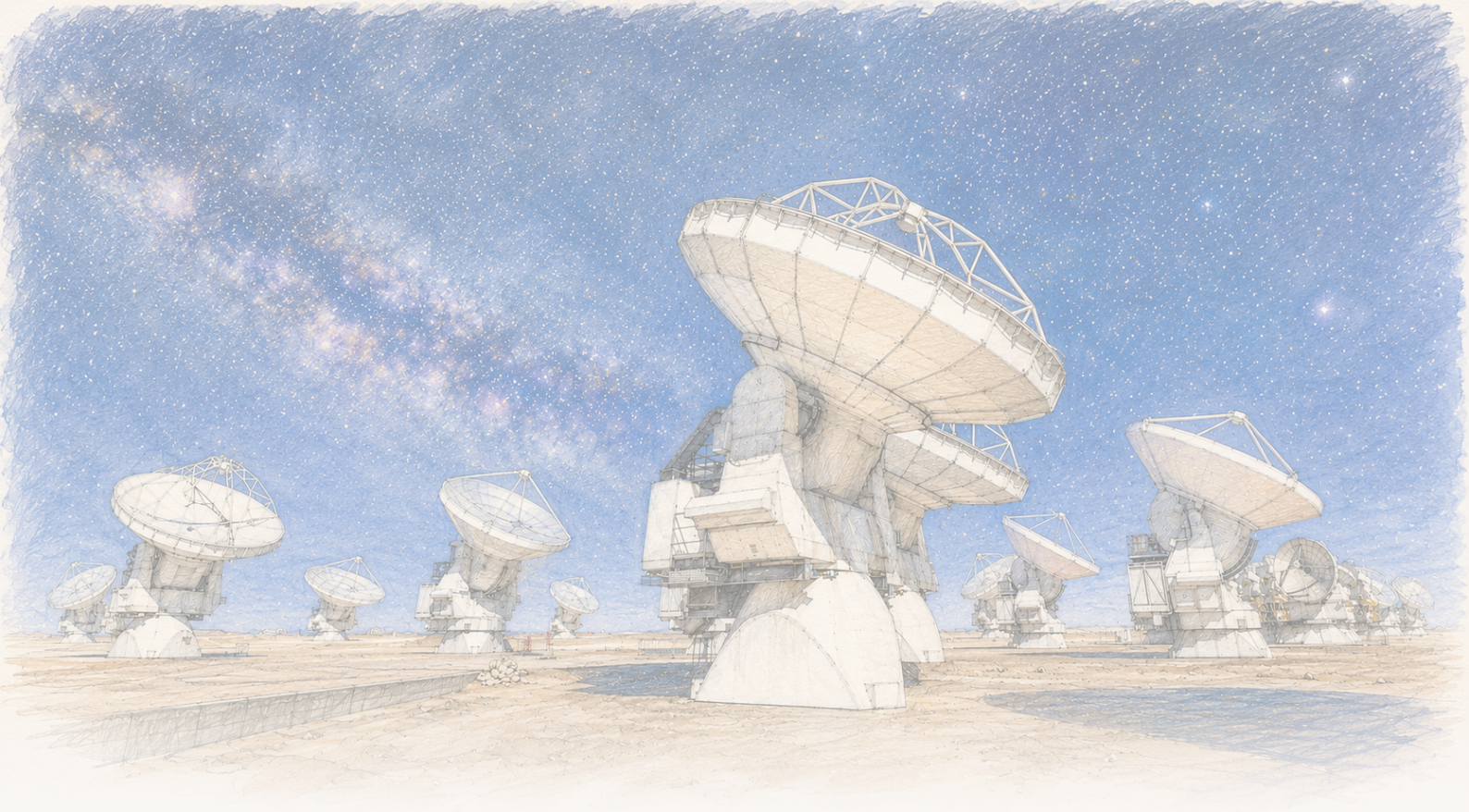


The Clean Paper

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

La cometa interstellare 3I/ATLAS porta acqua formatasi più al freddo delle nostre comete: una prima lettura chimica di un altro sistema planetario

Usando ALMA, gli astronomi hanno vincolato il rapporto tra idrogeno "pesante" e idrogeno ordinario nell'acqua di 3I/ATLAS, il terzo oggetto interstellare conosciuto, trovandolo fortemente arricchito in deuterio: almeno circa 40 volte gli oceani terrestri e 30 volte una tipica cometa del Sistema Solare. Questo punta ad acqua formatasi in condizioni più fredde rispetto alle nostre comete. Il risultato è un limite inferiore, derivato indirettamente (l'acqua stessa non è stata rilevata direttamente), e non dice nulla su vita o tecnologia: solo su chimica e freddo.

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

L'antenna DV-59 in primo piano, con diverse antenne ALMA che osservano il cielo notturno illuminato dalla Luna. Credito: Alex Perez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Una cometa venuta da un'altra stella, e l'impronta nella sua acqua

Ogni tanto qualcosa attraversa il Sistema Solare senza essere mai appartenuto a noi. Non una roccia sfuggita dalla fascia degli asteroidi, non una cometa che ritorna dalla nube di Oort al termine del suo lungo guinzaglio, ma un oggetto su una traiettoria aperta, iperbolica: qualcosa che arriva dallo spazio interstellare, gira una volta intorno al Sole e se ne va per sempre. Finora ne abbiamo visti tre. Il primo, 'Oumuamua, nel 2017, era già quasi sparito prima che ci fosse accordo su che cosa fosse stato. Il secondo, 2I/Borisov, nel 2019, era chiaramente una cometa. Il terzo, scoperto nel luglio 2025, è 3I/ATLAS: ed è arrivato avvolto in una chioma abbastanza attiva da permettere vera chimica osservativa.

La parte da tenere ferma, prima che inizi il rumore, è questa. Una cometa interstellare è, letteralmente, una scheggia di un altro sistema planetario: ghiaccio e polvere condensati intorno a un'altra stella, molto probabilmente espulsi da un calcio gravitazionale molto tempo fa, poi lasciati alla deriva attraverso la Galassia fino a passare abbastanza vicino al nostro Sole da far evaporare i suoi ghiacci proprio dove i nostri telescopi potevano guardarli. Questo è il fatto davvero notevole, ed è già abbas-

tanza sorprendente da non avere bisogno di aiuto.

Di solito, però, l'aiuto arriva lo stesso. Gli oggetti interstellari attirano un tipo particolare di copertura senza fiato: luci abbassate, *e se qualcuno lo avesse costruito?* Anche 3I/ATLAS ha avuto la sua dose. La risposta onesta a quella domanda è quella noiosa, e quella noiosa è più interessante: è una cometa. La vera domanda non è mai stata se qualcuno l'abbia costruita. Era quella più silenziosa: se potessi leggere la chimica di qualcosa assemblato intorno a un'altra stella, che cosa ti direbbe sulla famiglia di quella stella? E come faresti, concretamente, a leggerla?

Lo strumento di lettura, questa volta, è l'acqua. L'acqua è formata da due atomi di idrogeno e uno di ossigeno, ma una piccola frazione del suo idrogeno è *deuterio*: un gemello più pesante, un normale atomo di idrogeno con un neutrone in più. Il rapporto tra idrogeno pesante e idrogeno ordinario nell'acqua, scritto D/H, non è casuale. Viene impostato, dalla chimica, in larga parte dalla temperatura del luogo in cui quell'acqua si è formata: più la culla era fredda e tranquilla, più deuterio resta intrappolato. E poiché una cometa è in sostanza un congelatore profondo, capace di conservare i propri ghiacci per miliardi di anni, il rapporto D/H della sua acqua può preservare un'impronta delle condizioni in cui quell'acqua si è formata.

Le impronte del nostro sistema le conosciamo abbastanza bene: gli oceani terrestri e le varie famiglie di comete del Sistema Solare si concentrano in una fascia relativamente stretta. Quello che nessuno aveva mai fissato era la stessa impronta per acqua formatasi intorno a *un'altra* stella. Questo è ciò che il lavoro ha cercato di leggere in 3I/ATLAS.

Che cosa hanno fatto gli autori

Hanno puntato ALMA, il grande schieramento di radiotelescopi nel deserto cileno, verso 3I/ATLAS il 4 novembre 2025, sei giorni dopo il passaggio della cometa intorno al Sole. Lo hanno sintonizzato per catturare la debole emissione millimetrica di tre molecole nella chioma: acqua ordinaria (H2O), acqua *pesante* (HDO, in cui un idrogeno è deuterio) e metanolo (CH3OH).

Il rapporto D/H che cercavano è, in pratica, il rapporto tra acqua pesante e acqua ordinaria. Servivano quindi entrambe. Gli autori hanno poi fatto passare gli spettri attraverso un modello di trasferimento radiativo di un'atmosfera cometaria in espansione, un codice chiamato SUBLIME, e lo hanno adattato con lo stesso tipo di strumenti statistici usati per ricostruire la composizione delle atmosfere esoplanetarie, così da estrarre temperatura, flusso in uscita e quantità prodotta di ciascuna molecola.

C'è però un punto che condiziona tutto il resto: **non hanno in realtà rilevato l'acqua.** HDO e metanolo sono comparsi; H2O è rimasta sotto il rumore. Non perché mancasse acqua ordinaria: ce n'è molta di più della variante pesante. Il fatto che una riga sia visibile dipende non solo da quanta molecola è presente, ma anche da quanto è osservabile proprio quella riga, e qui due fattori lavorano contro la riga dell'acqua. Il primo è l'atmosfera: la riga H2O che potevano osservare da terra, vicino a 183 GHz, cade proprio dove l'aria terrestre carica di vapore acqueo assorbe con più forza, quindi leggere l'acqua di una cometa da lì è un po' come cercare di vedere una candela attraverso la nebbia. Il lavoro nota che queste bande dell'acqua a bassa energia soffrono forte assorbimento atmosferico, mentre la riga dell'acqua pesante, HDO, vicino a 241 GHz cade in una finestra più pulita. Il secondo

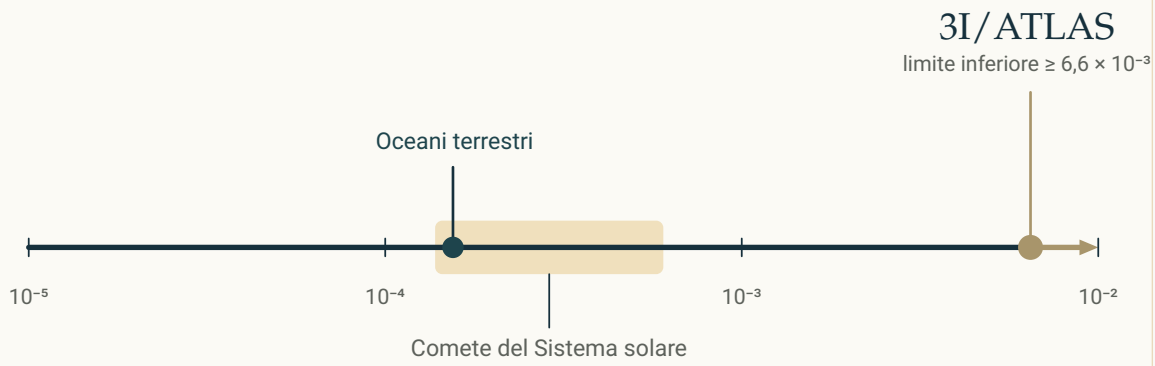
fattore è la sensibilità: il canale dell'acqua era molto più rumoroso, circa 500 mJy per beam contro 21 per HDO, quindi anche un segnale abbondante poteva restare sepolto sotto la soglia. Tra nebbia e rumore, l'acqua ordinaria abbondante è rimasta sotto il limite, mentre l'acqua pesante molto più rara, osservata in una finestra pulita e silenziosa, è emersa chiaramente. Dallo spazio, sopra l'atmosfera, la stessa acqua è molto più facile da vedere: JWST ha poi rilevato l'acqua della cometa nell'infrarosso, dopo il perielio. Quindi la mancata rilevazione di ALMA riguarda quella singola riga attraverso l'aria terrestre, non l'assenza di acqua. La quantità di acqua ordinaria ha dovuto dunque essere inferita *indirettamente*, soprattutto da come vengono eccitate le righe del metanolo, cosa che dipende da quanto spesso le molecole di metanolo urtano contro molecole d'acqua. È una misura reale, ma è una misura dipendente dal modello, e gli autori lo dicono esplicitamente.

Che cosa hanno trovato

- **Acqua pesante, ma niente acqua ordinaria.** HDO e diverse righe del metanolo sono state rilevate chiaramente; H2O no. Poiché il rapporto D/H si basa su un *limite superiore* alla produzione di acqua ordinaria, trattato così deliberatamente perché la riga dell'acqua è rimasta sotto il rumore, il rapporto di deuterio risultante è un **limite inferiore**, non un valore singolo.
- **Un forte arricchimento in deuterio.** Nello scenario conservativo il rapporto D/H dell'acqua è **maggiore di** $6{,}6 \times 10^{-3}$: più di circa **40 volte** il valore degli oceani terrestri e più di circa **30 volte** quello di una tipica cometa del Sistema Solare. Con entrambe le stime degli autori, 3I/ATLAS si colloca all'estremo alto di tutte le misure D/H dell'acqua ottenute finora.
- **Probabilmente non è un caso di quella singola notte.** La misura viene da una sola epoca osservativa, ma un primo controllo su dati ALMA vicini non mostra grandi oscillazioni giorno per giorno, e un'analisi JWST indipendente di 3I/ATLAS, ottenuta più di un mese dopo, punta nella stessa direzione: acqua ricca di deuterio.

Dove si colloca l'acqua di 3I/ATLAS sulla scala del deuterio

Rapporto D/H dell'acqua — scala logaritmica



D/H più alto → formazione più fredda, in questa lettura

Dove si colloca l'acqua di 3I/ATLAS sulla scala del deuterio: molto verso l'estremo ricco di deuterio, oltre gli oceani terrestri e l'intera popolazione delle comete del Sistema Solare, mostrata qui come intervallo approssimativo. La freccia indica un *limite inferiore*: il valore reale potrebbe essere più alto. Un rapporto D/H elevato è un indizio di *condizioni di formazione fredde*, non un indirizzo di casa.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Che cosa probabilmente significa

Un rapporto D/H elevato nell'acqua è la firma di acqua congelata in un ambiente molto freddo, sotto circa 30 K, e non rielaborata pesantemente in seguito dal calore. La lettura più pulita, quindi, è che l'acqua di 3I/ATLAS si sia formata in condizioni *più fredde e più tranquille* rispetto all'acqua delle comete del nostro Sistema Solare, e dunque che il sistema planetario di origine abbia assemblato i propri ghiacci in modo diverso dal nostro.

Gli autori sono cauti sul passo successivo, e dovremmo esserlo anche noi. Ci sono due modi per ottenere acqua così ricca di deuterio, e questa misura non può distinguerli: l'acqua potrebbe avere *ereditato* il suo arricchimento dalla nube fredda in cui il sistema è nato, oppure il rapporto potrebbe essersi fissato più tardi, durante la formazione della cometa in un disco esterno freddo. In entrambi i casi la conclusione che conta resta in piedi: le condizioni che hanno plasmato 3I/ATLAS non erano quelle che hanno plasmato le nostre comete. Ma il *perché* resta aperto.

Questa è, quindi, la prima volta in cui qualcuno ha letto l'impronta di formazione dell'acqua in materiale proveniente da un altro sistema planetario, e ha trovato che non coincide con la nostra.

Che cosa *non* dimostra

- Non dice **nulla** su vita, tecnologia o intenzione. Non c'è nessun "oggetto" costruito; "interstellare" descrive una traiettoria, non una storia d'origine. Questa è una misura di chimica dell'acqua.
- Non è un valore D/H preciso. È un *limite inferiore*, e l'acqua a cui si riferisce non è mai stata rilevata direttamente: la sua abbondanza è stata inferita dall'eccitazione di un'altra molecola, il metanolo, assumendo che l'acqua sia il principale bersaglio degli urti del metanolo.
- Non rivela dove sia nata 3I/ATLAS. La stella madre non può essere identificata in modo affidabile, e un rapporto D/H elevato è un indizio sulle *condizioni*, non un indirizzo di casa.
- Non risolve *perché* l'acqua sia ricca di deuterio. "Ereditata da una nube di nascita fredda" e "impostata durante la formazione nel disco" sono entrambe compatibili con i dati; il lavoro non sceglie tra le due.
- È **un** oggetto, misurato in **una** epoca osservativa. La corroborazione è incoraggiante, non una lunga baseline.

Quanto sono solide le prove?

Vanno pesate separatamente due cose: la direzione del risultato e il numero esatto.

- **La direzione è robusta.** Che l'acqua di 3I/ATLAS sia marcatamente ricca di deuterio è un limite inferiore conservativo, sta ben sopra l'intera popolazione cometaria del Sistema Solare ed è sostenuto da un'analisi JWST indipendente. Questa parte non è fragile.
- **Il numero poggia su una catena modellistica.** Poiché H2O non è stata rilevata, l'abbondanza d'acqua, e quindi il rapporto D/H, dipende dall'inferire l'acqua indirettamente dall'eccitazione del metanolo. Questo assume che l'acqua sia il principale partner collisionale nella chioma, cosa plausibile vicino al perielio, ma un contributo della CO2 non può essere escluso, e usa tassi di collisione approssimati e dichiaratamente poco vincolati. Gli autori segnalano tutto questo e citano deliberatamente il risultato come limite, non come misura.
- **L'interpretazione è ben motivata, ma non unica.** La formazione a freddo è la spiegazione naturale per un D/H elevato; se quel freddo sia stato ereditato o imposto più tardi resta irrisolto, e il sistema di origine non è identificabile.

In breve: che l'acqua si sia formata al freddo poggia su basi solide; esattamente *quanto* freddo, ed esattamente *perché*, restano correttamente aperti.

Perché conta

Per decenni, la domanda sull'origine dell'acqua terrestre, e su cosa imposti l'impronta di deuterio dell'acqua nei sistemi planetari in formazione, ha ricevuto risposte basate interamente su misure fatte dentro il nostro Sistema Solare. Questa è la prima volta che quella mappa viene estesa a materiale formatosi dimostrabilmente intorno a un'altra stella.

La risposta che offre non è "ovunque è come casa". È il contrario: un altro sistema può depositare i propri ghiacci in condizioni abbastanza fredde da lasciare un'impronta che le nostre comete non hanno mai portato. È un piccolo, concreto pezzo di evidenza per qualcosa di silenziosamente grande: la chimica e la storia dei solidi che costruiscono pianeti possono cambiare da una stella all'altra. E non è arrivato da una sonda spedita attraverso anni luce, ma dall'aver catturato un frammento errante di un altro sistema mentre passava vicino a noi, e dall'averne letto l'acqua prima che se ne andasse.

In breve

3I/ATLAS è il terzo oggetto interstellare conosciuto e la seconda cometa interstellare attiva: un pezzo di un altro sistema planetario che attraversa il nostro una sola volta. Usando ALMA vicino al passaggio della cometa al Sole, gli astronomi hanno rilevato acqua pesante (HDO) e metanolo nella sua chioma, ma non acqua ordinaria, e da questo hanno inferito il rapporto deuterio/idrogeno dell'acqua. Lo trovano fortemente arricchito in deuterio: un limite inferiore superiore a $6{,}6 \times 10^{-3}$, circa 40 volte

gli oceani terrestri e 30 volte una tipica cometa del Sistema Solare. Questo punta ad acqua formatasi in condizioni più fredde e meno rielaborate rispetto alle comete del Sistema Solare. La cifra è un limite inferiore ottenuto indirettamente tramite un modello, non una misura diretta, e non può dire se l'arricchimento sia stato ereditato da una nube di nascita fredda o fissato più tardi in un disco freddo, né da dove venga la cometa. Resta comunque la prima lettura di questa specifica impronta chimica per acqua proveniente da un'altra stella, e l'impronta non coincide con la nostra.

Valutazione critica

Che cosa mostra il lavoro: Da osservazioni ALMA della cometa interstellare 3I/ATLAS vicino al perielio, un limite inferiore al rapporto D/H della sua acqua di $>6{,}6\times10^{-3}$ nello scenario conservativo: circa 40 volte gli oceani terrestri e 30 volte una tipica cometa del Sistema Solare. Questo implica acqua formatasi in condizioni decisamente più fredde e meno processate termicamente rispetto alle comete del Sistema Solare. Un'analisi JWST indipendente conferma la direzione.

Che cosa è plausibile ma non dimostrato: Che l'arricchimento sia stato ereditato direttamente da una nube prestellare fredda, invece di essere stato fissato durante la formazione della cometa in un disco protoplanetario freddo. Entrambi gli scenari sono compatibili; i dati non li distinguono.

Che cosa non mostra: Nulla su vita, tecnologia o origine artificiale; un valore D/H preciso, perché è un limite inferiore; l'identità o la posizione della stella madre; il meccanismo specifico dietro il D/H elevato; o che questo risultato a epoca singola sia immune alla variabilità della chioma.

Limiti principali: H2O non è stata rilevata direttamente, quindi l'abbondanza d'acqua, e quindi il rapporto D/H, è inferita indirettamente dall'eccitazione del metanolo, assumendo che l'acqua sia il principale partner collisionale e usando tassi di collisione approssimati che gli autori definiscono poco vincolati; il risultato è un limite a epoca singola e dipendente dal modello; il sistema di origine non è identificabile.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore generale? Alta sul fatto che l'acqua di 3I/ATLAS sia davvero ricca di deuterio e si sia formata più al freddo rispetto a quella delle nostre comete, e sul fatto che questo non dica assolutamente nulla sugli alieni. Moderata sul grado esatto di arricchimento, che è un limite inferiore dipendente dal modello. Bassa sulla causa specifica e sul luogo di nascita, che restano aperti. Atteggiamento corretto: meraviglia sobria davanti a una cartolina chimica da un altro sistema stellare; non un mistero, e non una nave spaziale.

Fonti

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/