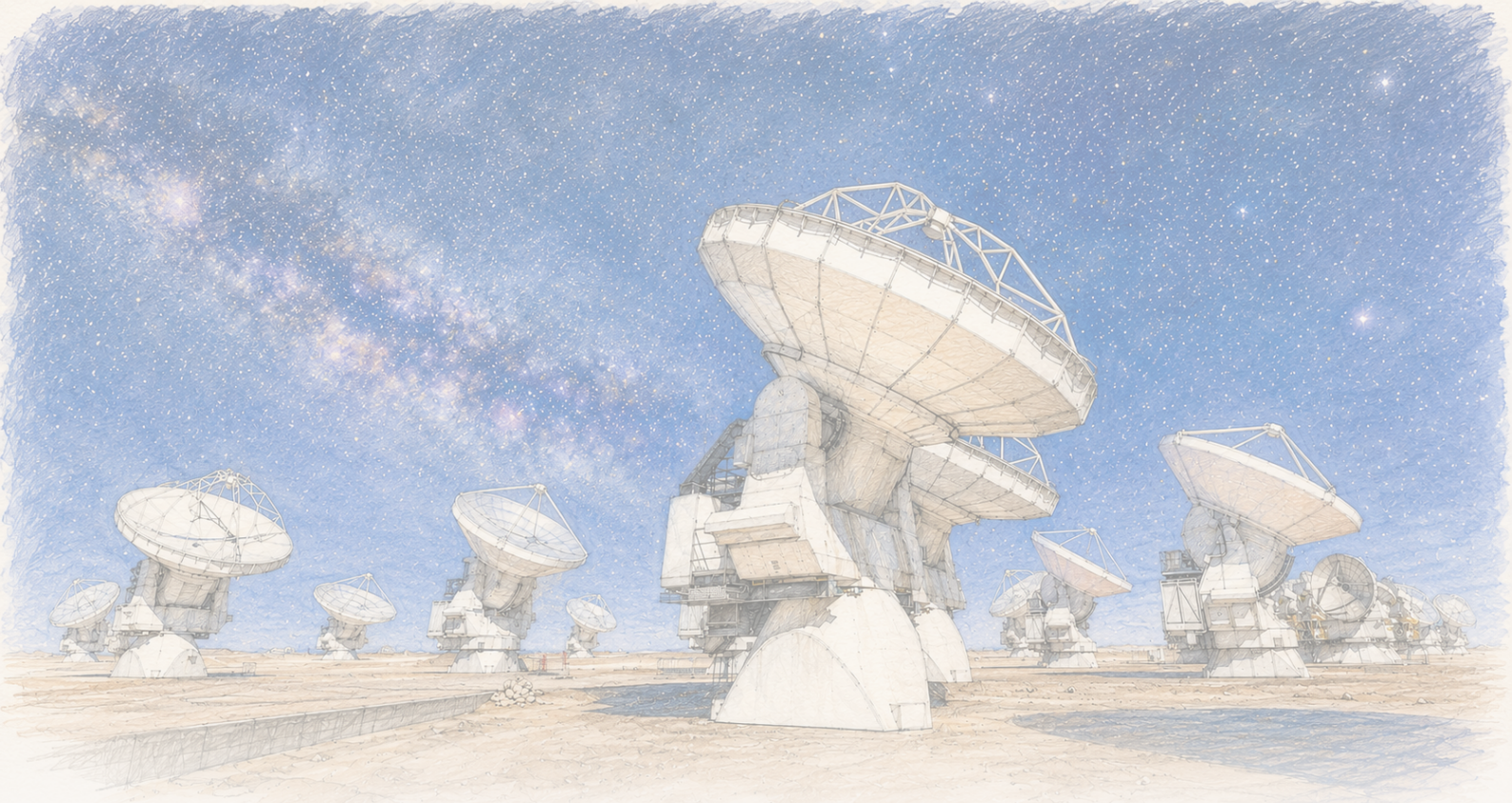




## The CLEAN PAPER

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

Den interstellare komet 3I/ATLAS bærer vand, der blev dannet under koldere forhold end vandet i vores kometer — en første kemisk aflæsning af et andet planetsystem

*Med ALMA afgrænsede astronomer forholdet mellem »tungt« og almindeligt hydrogen i vandet hos 3I/ATLAS — det tredje kendte interstellare objekt — og fandt, at det var kraftigt anriget med deuterium: mindst omkring 40 gange Jordens oceaner og 30 gange en typisk komet i solsystemet. Det peger på vand, der blev dannet under koldere forhold end vandet i vores kometer. Resultatet er en nedre grænse, som er udledt indirekte (selve vandet blev aldrig detekteret direkte), og det siger intet om liv eller teknologi — kun om kemi og kulde.*

---

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



DV-59-antennen i forgrunden, med flere ALMA-antenner, der observerer den månebelyste nattehimmel. Foto: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

## En komet fra en anden stjerne og fingeraftrykket i dens vand

En gang imellem falder noget gennem solsystemet, som aldrig har tilhørt os. Ikke en omstrejfende sten fra asteroidebæltet, ikke en komet, der svinger tilbage fra Oortskyen i sin lange snor, men et objekt på en åben, hyperbolsk bane — et, der kom fra det interstellare rum, tager én tur rundt om Solen og forsvinder for altid. Vi har nu set tre. Den første, 'Oumuamua i 2017, var næsten væk, før nogen var enige om, hvad den havde været. Den anden, 2I/Borisov i 2019, var umiskendeligt en komet. Den tredje, der blev opdaget i juli 2025, er 3I/ATLAS — og den ankom indhyllet i en koma, der var aktiv nok til, at man kunne bedrive reel kemi på den.

Her er den del, der er værd at holde fast i, før støjen begynder. En interstellar komet er bogstaveligt talt en flig af et andet planetsystem: is og støv, der kondenserede omkring en anden stjerne, højst sandsynligt blev slynget ud af et tyngdekraftsspark for længe siden, drev gennem galaksen og tilfældigvis passerede tæt nok på vores sol til, at dens is begyndte at koge væk netop dér, hvor vores teleskoper kunne følge med. Det er det virkelig bemærkelsesværdige faktum, og det er forbløffende nok uden hjælp.

Alligevel plejer det at få hjælp. Interstellare objekter tiltrækker en særlig form for forpustet dækning

— dæmpet belysning, et *men hvad nu, hvis nogen byggede det* — og 3I/ATLAS fik sin del. Det ærlige svar på det spørgsmål er det kedelige, og det kedelige er mere interessant: Det er en komet. Det virkelige spørgsmål var aldrig, om nogen havde fremstillet den. Det var det mere stille spørgsmål — hvis man kunne aflæse kemien i noget, der var samlet omkring en anden stjerne, hvad ville den så fortælle om denne stjernes familie? Og hvordan skulle man overhovedet aflæse den?

Aflæsningsinstrumentet er denne gang vand. Vand består af to hydrogenatomer og et oxygenatom, men en lille del af dets hydrogen er *deuterium* — en tungere tvilling, et almindeligt hydrogenatom med en ekstra neutron. Forholdet mellem tungt og almindeligt hydrogen i vand, skrevet D/H, er ikke tilfældigt. Det bestemmes gennem kemien i høj grad af, hvor koldt det var, da vandet først blev dannet: Jo koldere og roligere vuggen var, desto mere deuterium bliver låst fast. Og fordi en komet i bund og grund er en dybfryser — en, der kan opbevare sin is koldt i milliarder af år — kan D/H-forholdet i dens vand bevare et fingeraftryk af de forhold, vandet blev dannet under.

Vi kender fingeraftrykkene i vores eget system rimelig godt: Jordens oceaner og de forskellige kometfamilier i solsystemet samler sig i et forholdsvis smalt interval. Det, ingen nogensinde havde fastslået, var det samme fingeraftryk for vand, der var dannet omkring *en anden* stjerne. Det var dét, forskningsartiklen satte sig for at aflæse i 3I/ATLAS.

## Hvad forfatterne gjorde

De rettede ALMA — det store anlæg af radioteleskoper i den chilenske ørken — mod 3I/ATLAS den 4. november 2025, seks dage efter at kometen havde rundet Solen. De indstillede det til at opfange den svage glød ved millimeterbølgelængder fra tre molekyler i komaen: almindeligt vand ( $\text{H}_2\text{O}$ ), *tungt* vand (HDO, hvor et af hydrogenatomerne er deuterium) og methanol ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ).

D/H-forholdet, de søgte, er i praksis forholdet mellem tungt og almindeligt vand. De havde altså brug for begge dele. Derefter sendte de spektrene gennem en strålingsoverførselsmodel for en ekspanderende kometatmosfære (en kode kaldet SUBLIME) og tilpassede den med samme slags statistiske maskineri, som bruges til at bestemme sammensætningen af exoplaneters atmosfærer, for at udlede temperaturen, udstrømningen og hvor meget kometen producerede af hvert molekyle.

En hage præger alt det følgende: **De opdagede faktisk ikke vandet.** HDO og methanol dukkede op;  $\text{H}_2\text{O}$  selv forblev under støjen. Det skyldes ikke mangel på almindeligt vand — der er langt mere af det end af den tunge slags. Om en spektrallinje viser sig, afhænger ikke kun af, hvor meget af molekylet der er til stede, men også af, hvor observerbar netop den linje tilfældigvis er, og her modarbejder to ting vandlinjen. Den første er atmosfæren: Den  $\text{H}_2\text{O}$ -linje, de kunne sigte efter (nær 183 GHz), ligger netop dér, hvor Jordens egen vandholdige luft absorberer kraftigst, så at aflæse vandet i en komet dér fra jorden er lidt som at prøve at se et stearinlys gennem tåge — artiklen bemærker, at disse lavenergibånd for vand udsættes for stærk atmosfærisk absorption, mens linjen for tungt vand (HDO) nær 241 GHz ligger i et renere vindue. Den anden er følsomheden: Vandkanalen var langt mere støjende — omkring 500 mJy pr. stråle mod 21 for HDO — så selv et kraftigt signal kunne ligge skjult under den. Mellem tågen og støjen forblev det rigelige almindelige vand under tærsklen, mens det langt sjældnere tunge vand, fanget i et rent og stille vindue, dukkede tydeligt op. (Fra rummet,

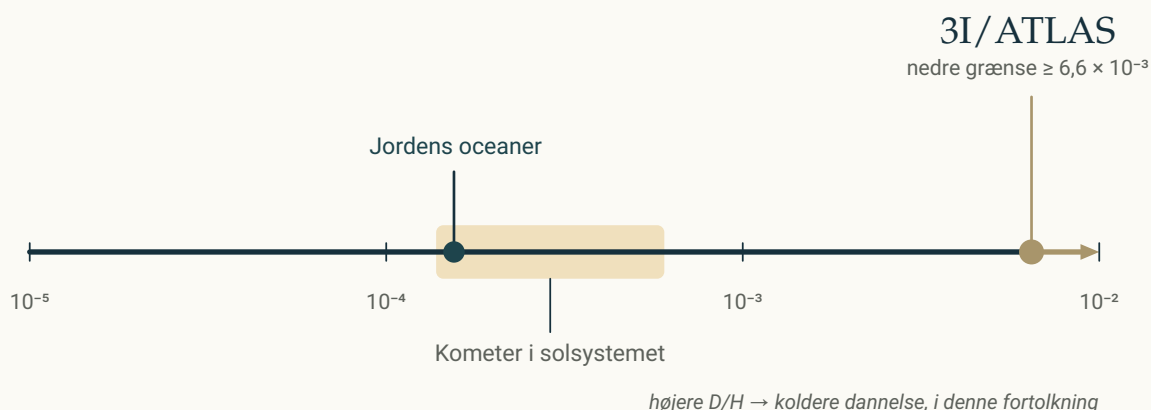
over atmosfæren, er det samme vand langt lettere at se: JWST opdagede senere kometens vand i infrarødt, efter perihelium — så ALMA's manglende detektion handler om denne ene linje gennem Jordens luft, ikke om, at vand var fraværende.) Mængden af almindeligt vand måtte derfor udledes *indirekte* — hovedsageligt ud fra, hvordan methanollinjerne blev exciteret, hvilket afhænger af, hvor ofte methanolmolekyler kolliderer med vand. Det er en reel måling, men en modelafhængig måling, og forfatterne gør udtrykkeligt opmærksom på det.

## Hvad de fandt

- **Tungt vand, men intet almindeligt vand.** HDO og flere methanollinjer blev tydeligt detekteret; H<sub>2</sub>O blev ikke. Fordi D/H-forholdet hviler på en *øvre grænse* for produktionsraten af almindeligt vand — bevidst behandlet sådan, fordi selve vandlinjen forblev under støjen — bliver deuterium-forholdet en **nedre grænse**, ikke en enkelt værdi.
- **En kraftig deuteriumanrigelse.** I deres konservative scenarie er vandets D/H-forhold **større end**  $6,6 \times 10^{-3}$  — mere end omkring **40 gange** værdien i Jordens oceaner og mere end omkring **30 gange** værdien i en typisk komet i solsystemet. Med begge deres estimater ligger 3I/ATLAS helt i den øvre ende af alle D/H-målinger i vand, der hidtil er foretaget.
- **Det er sandsynligvis ikke et tilfældigt udsving fra denne ene nat.** Målingen stammer fra en enkelt epoke, men en foreløbig gennemgang af nærliggende ALMA-data viser ingen store udsving fra dag til dag, og en uafhængig JWST-analyse af 3I/ATLAS, udført mere end en måned senere, peger i samme retning — deuteriumrigt vand.

### Hvor vandet i 3I/ATLAS ligger på deuteriumskalaen

D/H-forhold i vand — logaritmisk skala



Hvor vandet i 3I/ATLAS ligger på deuteriumskalaen: langt mod den deuteriumrige ende, forbi Jordens oceaner og hele kometpopulationen i solsystemet (her vist som et omtrentligt interval). Pilen markerer en *nedre grænse* — den sande værdi kan være højere. Et højt D/H-forhold er et spor efter *kolde dannelsesforhold*, ikke en hjemmeadresse.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

## Hvad dette sandsynligvis betyder

Et højt D/H-forhold i vand er kendetegnet på vand, der frøs, hvor det var meget koldt (under omkring 30 K), og som ikke senere blev kraftigt omdannet af varme. Den enkleste fortolkning er derfor, at vandet i 3I/ATLAS blev dannet under *koldere og mere skånsomme* forhold end vandet i kometerne i vores eget solsystem — og dermed at dets oprindelige planetsystem opbyggede sin is på en anden måde end vores.

Forfatterne er forsigtige med det næste skridt, og det bør vi også være. Der er to måder at få vand, der er så rigt på deuterium, og denne måling kan ikke skelne mellem dem: Vandet kan have *arvet* sin anrigelse fra den kolde sky, systemet blev født i, eller den kan være blevet fastlagt senere, mens kometen blev dannet i en kold ydre skive. Uanset hvad består den konklusion, der betyder noget — de forhold, der formede 3I/ATLAS, var ikke dem, der formede vores komet — men spørgsmålet om *hvorfor* står åbent.

Dette er altså første gang, nogen har aflæst fingeraftrykket fra vanddannelse i materiale fra et andet planetsystem og fundet, at det ikke stemmer overens med vores eget.

## Hvad dette *ikke* beviser

- Det siger **intet** om liv, teknologi eller hensigt. Der findes ikke noget »det«, som blev bygget; »interstellar« beskriver en bane, ikke en oprindelseshistorie. Dette er en måling af vandkemi.
- Det er **ikke** en præcis D/H-værdi. Det er en *nedre grænse*, og det vand, den gælder, blev aldrig detekteret direkte — forekomsten blev udledt fra excitationen af et andet molekyle, methanol, under antagelsen om, at vand er det, methanolen hovedsageligt støder ind i.
- Det afslører **ikke**, hvor 3I/ATLAS blev født. Moderstjernen kan ikke identificeres pålideligt, og et højt D/H-forhold er et spor efter *forhold*, ikke en hjemmeadresse.
- Det afgør **ikke**, *hvorfor* vandet er rigt på deuterium. »Arvet fra en kold fødselssky« og »fastlagt under skivedannelsen« passer begge med dataene; artiklen vælger ikke mellem dem.
- Det er **ét** objekt, målt ved **én** epoke. Bekræftelsen er opmuntrende, ikke en lang tidsserie.

## Hvor stærk er evidensen?

To ting bør afvejes hver for sig: resultatets retning og det nøjagtige tal.

- **Retningen er robust.** At vandet i 3I/ATLAS er markant deuteriumrigt, er en konservativ nedre grænse, ligger langt over hele kometpopulationen i solsystemet og understøttes af en uafhængig

JWST-analyse. Denne del er ikke skrøbelig.

- **Tallet hviler på en modelleringskæde.** Fordi  $\text{H}_2\text{O}$  ikke blev detekteret, bygger vandmængden — og dermed D/H-forholdet — på, at vand udledes indirekte fra methanolexcitation. Det forudsætter, at vand er den dominerende kollisionspartner i komaen (rimeligt nær perihelium, men et bidrag fra  $\text{CO}_2$  kan ikke udelukkes), og bruger omtrentlige og efter eget udsagn dårligt begrænsede kollisionsrater. Forfatterne fremhæver alt dette og angiver bevidst resultatet som en grænse frem for en måling.
- **Fortolkningen er velbegrunder, men ikke entydig.** Kold dannelse er den naturlige forklaring på et højt D/H; om denne kulde blev arvet eller påført senere, er uafklaret, og oprindelsessystemet kan ikke identificeres.

Kort sagt: At vandet blev dannet koldt, står på et solidt grundlag; præcis *hvor* koldt og præcis *hvorfor* holdes ærligt åbent.

## Hvorfor det er vigtigt

I årtier er spørgsmålet om, hvor Jordens vand kom fra — og hvad der bestemmer vandets deuteriumfingeraftryk på tværs af planetsystemer under dannelse — blevet besvaret udelukkende med målinger foretaget i vores eget solsystem. Dette er første gang, det kort er blevet udvidet til materiale, der beviseligt blev dannet omkring en anden stjerne.

Svaret er ikke »overalt er som hjemme«. Det er det modsatte: Et andet system kan aflejre sin is under forhold, der er kolde nok til at efterlade et fingeraftryk, som vores kometer aldrig bar. Det er et lille, konkret bevis for noget stille og stort — at kemien og historien bag de faste stoffer, som bygger planeter, kan variere fra én stjerne til den næste. Og det kom ikke fra et rumfartøj sendt over lysår, men ved at fange et omstrejfende fragment af et andet system, mens det faldt forbi, og aflæse dets vand, før det var væk.

## Kort fortalt

3I/ATLAS er det tredje kendte interstellare objekt og den anden aktive interstellare komet — et stykke af et andet planetsystem, der passerer gennem vores én eneste gang. Ved hjælp af ALMA nær kometens nærmeste passage af Solen detekterede astronomer tungt vand ( $\text{HDO}$ ) og methanol i dens koma, men ikke almindeligt vand, og ud fra dette udledte de vandets forhold mellem deuterium og hydrogen. De finder det kraftigt anriget med deuterium — en nedre grænse over  $6,6 \times 10^{-3}$ , omtrent 40 gange Jordens oceaner og 30 gange en typisk komet i solsystemet — hvilket peger på vand, der blev dannet under koldere, mindre bearbejdede forhold end kometerne i solsystemet. Tallet er en nedre grænse, der er udledt indirekte gennem en model, ikke en direkte måling, og det kan ikke sige, om anrigelsen blev arvet fra en kold fødselssky eller fastlagt senere i en kold skive, og heller ikke hvor kometen kom fra. Det er alligevel den første aflæsning af netop dette kemiske fingeraftryk for vand fra en anden stjerne — og fingeraftrykket stemmer ikke overens med vores.

# Tjek uden omsvøb

**Hvad forskningsartiklen viser:** Fra ALMA-observationer af den interstellare komet 3I/ATLAS nær perihelium, en nedre grænse for vandets D/H-forhold på  $>6,6 \times 10^{-3}$  (konservativt scenarie) — omkring  $40\times$  Jordens oceaner og  $30\times$  en typisk komet i solsystemet — hvilket indebærer vand, der blev dannet under væsentligt koldere, mindre termisk bearbejdede forhold end kometerne i solsystemet. En uafhængig JWST-analyse stemmer overens om retningen.

**Hvad der er plausibelt, men ikke bevist:** At anrigelsen blev arvet direkte fra en kold præstellar sky, i modsætning til at den blev fastlagt, mens kometen blev dannet i en kold protoplanetarisk skive. Begge scenarier passer; dataene skelner ikke mellem dem.

**Hvad den ikke viser:** Noget om liv, teknologi eller kunstig oprindelse; en præcis D/H-værdi (det er en nedre grænse); moderstjernens identitet eller placering; den specifikke mekanisme bag det høje D/H; eller at dette resultat fra en enkelt epoke er immunt over for variationer i komaen.

**Vigtigste begrænsninger:**  $\text{H}_2\text{O}$  blev ikke detekteret direkte, så vandmængden — og dermed D/H-forholdet — udledes indirekte fra methanolexcitation under antagelsen om, at vand er den dominerende kollisionspartner, og med omtrentlige kollisionsrater, som forfatterne kalder dårligt begrænsede; resultatet er en modelafhængig grænse fra en enkelt epoke; oprindelsessystemet kan ikke identificeres.

**Hvor stor tillid bør en almindelig læser have?** Stor tillid til, at vandet i 3I/ATLAS virkelig er deuteriumrigt og blev dannet koldere end vandet i vores komet, og til, at dette overhovedet intet siger om rumvæsener. Moderat tillid til den præcise grad af anrigelse, som er en modelafhængig nedre grænse. Lav tillid til den specifikke årsag og fødestedet, som fortsat er åbne spørgsmål. Passende holdning: stille undren over et kemisk postkort fra et andet stjernesystem — ikke et mysterium og ikke et rumskib.

---

## Kilder

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/>