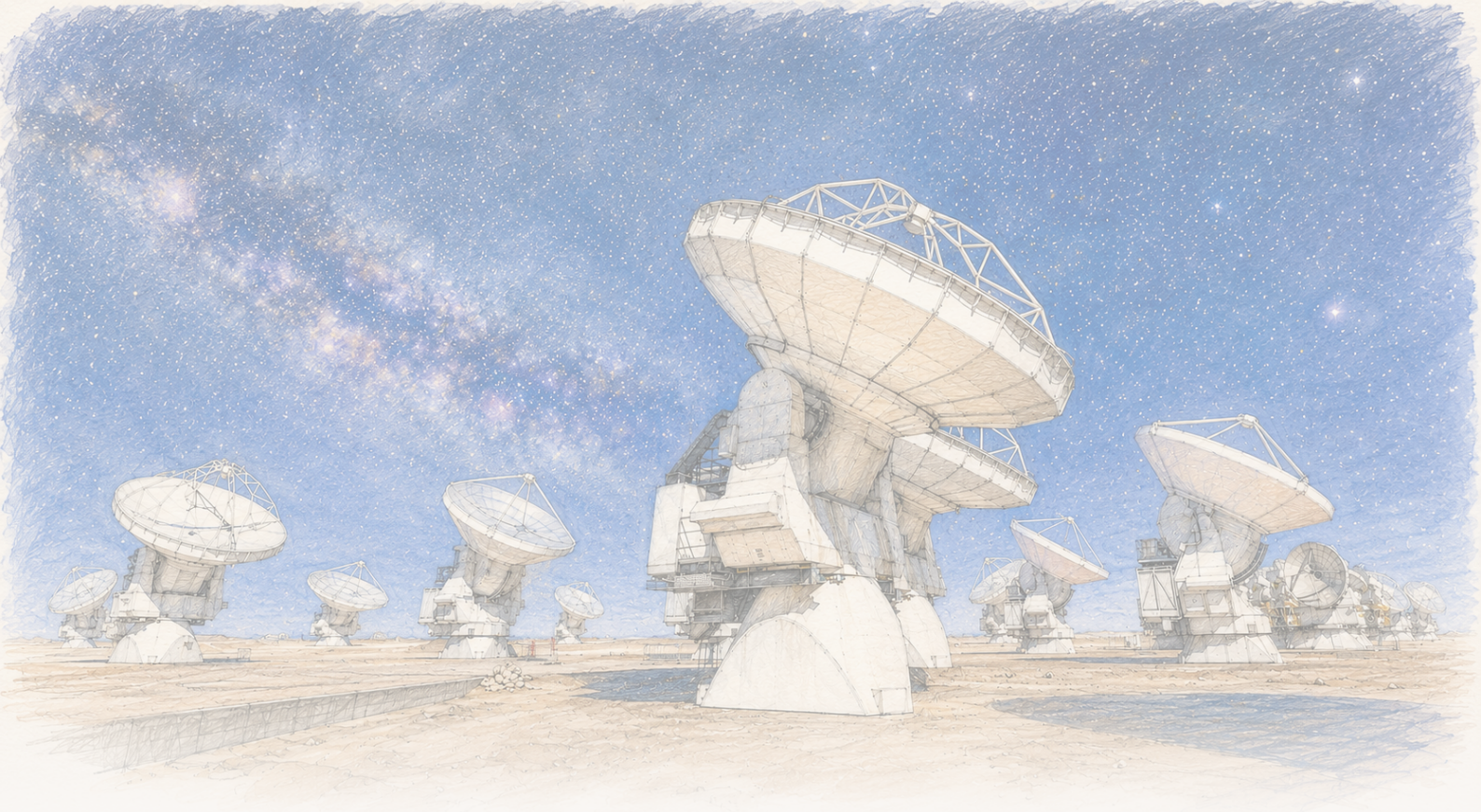


The Clean Paper

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

अंतरतारकीय धूमकेतु 3I/ATLAS का पानी हमारे धूमकेतुओं से अधिक ठंडी परिस्थितियों में बना — दूसरे planetary system की पहली ऐसी chemical reading

ALMA से खगोलविदों ने तीसरी ज्ञात अंतरतारकीय वस्तु 3I/ATLAS के पानी में भारी hydrogen (deuterium) और सामान्य hydrogen का अनुपात मापा। पानी deuterium से बहुत समृद्ध निकला कम-से-कम पृथ्वी के महासागरों से लगभग 40 गुना और सामान्य Solar System comet से 30 गुना। यह हमारे धूमकेतुओं की तुलना में अधिक ठंडी निर्माण-परिस्थितियों की ओर इशारा करता है। परिणाम एक lower limit है और अप्रत्यक्ष रूप से निकाला गया है — सामान्य पानी की line सीधे detect नहीं हुई — और यह जीवन या technology के बारे में कुछ नहीं कहता, केवल chemistry और तारीय इतिहास के बारे में।

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

Foreground में DV-59 antenna और पीछे चाँदनी रात के आकाश को देखती कई ALMA antennas। Credit: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

दूसरे तारे से आया धूमकेतु, और उसके पानी में छिपा रसायन कि नशिन

कभी-कभी सौर मंडल से कोई ऐसी वस्तु गुजरती है जो कभी हमारी थी ही नहीं। न asteroid belt से भटका कोई पत्थर, न Oort cloud से लंबी कक्षा पर लौटता धूमकेतु, बल्कि खुली hyperbolic trajectory पर चलती वस्तु — जो interstellar space से आई, सूर्य के पास से एक बार गुज़रेगी और फिर हमेशा के लिए निकल जाएगी। अब तक हम ऐसी तीन वस्तुएँ देख चुके हैं। पहली ‘Oumuamua, 2017 में लगभग तब तक निकल चुकी थी जब तक लोग यह तय कर पाए कि वह थी क्या। दूसरी 2I/Borisov, 2019 में साफ़ तौर पर धूमकेतु थी। तीसरी July 2025 में खोजी गई 3I/ATLAS, इतनी सक्रिय coma के साथ आई कि उसकी वास्तविक chemistry माप ली जा सकी।

शोर-शराबे से पहले असली अद्भुत बात यही है। Interstellar comet सचमुच दूसरे planetary system का टुकड़ा है: बर्फ और धूल जो किसी दूसरे तारे के आस पास बनी, शायद बहुत पहले किसी gravitational kick से बाहर फेंक दी गई, Galaxy में भटकती रही और संयोग से हमारे सूर्य के इतना पास आ गई कि उसकी बर्फ़ ऊर्ध्वपातित होने लगी — ठीक उस समय जब हमारे telescopes उसे देख सकते थे। यह तथ्य अपने आप में इतना असाधारण है कि उसे किसी अतिरिक्त रहस्य की ज़रूरत नहीं।

फिर भी ऐसे पिंडों के साथ अक्सर सनसनी जुड़ जाती है — रोशनी धीमी कीजिए और पूछिए, *लेकिन क्या इसे किसी ने बनाया हो सकता है?* 3I/ATLAS के साथ भी ऐसा हुआ। उस सवाल का ईमानदार जवाब उबाऊ है, और वही अधिक रोचक भी है: यह धूमकेतु

है। असली वैज्ञानिक सवाल कभी यह नहीं था कि इसे किसने बनाया। सवाल यह था यदि हम किसी दूसरे तारे के आसपास बनी सामग्री की chemistry पढ़ सकें, तो उससे उस planetary system के बारे में क्या जान सकते हैं? और वह chemistry पढ़ेंगे कैसे?

इस बार पढ़ने का माध्यम **पानी** है। पानी में दो hydrogen और एक oxygen atom होते हैं, लेकिन hydrogen का एक छोटा हिस्सा *deuterium* होता है — hydrogen का भारी isotope, जिसके nucleus में एक अतिरिक्त neutron है। पानी में भारी hydrogen और सामान्य hydrogen का अनुपात, D/H, यदृच्छ कि नहीं होता। Chemistry के कारण यह काफ़ी हद तक उस तापमान पर निर्भर करता है जहाँ पानी पहली बार बना जितना ठंडा और शांत वातावरण, उतना अधिक deuterium पानी में बंद हो सकता है। और क्योंकि धूमकेतु अरबों वर्षों तक अपनी बर्फ़ को बेहद ठंडे वातावरण में सुरक्षित रख सकता है, उसके पानी का D/H अनुपात उन परिस्थितियों का रासायनिक निशान बचाए रख सकता है जिनमें वह पानी बना था।

अपने सौर मंडल के ऐसे निशान हमें काफ़ी अच्छी तरह ज्ञात हैं: पृथ्वी के महासागर और अलग-अलग Solar System comet families एक अपेक्षाकृत संकरी range में आते हैं। जो कभी ठीक से नहीं मापा गया था, वह दूसरे तारे के आसपास बने पानी का यही fingerprint था। यह शोध 3I/ATLAS में उसी निशान को पढ़ने की कोशिश है।

शोधकर्ताओं ने क्या किया

उन्होंने ALMA — Chile के रेगिस्तान में स्थित विशाल radio-dish array — को 4 November 2025 को 3I/ATLAS की ओर मोड़ा, सूर्य के सबसे करीब से गुजरने के छह दिन बाद। उपकरण को coma में तीन molecules की हल्की millimetre-wavelength emission पकड़ने के लिए tune किया गया: सामान्य पानी (H_2O), *heavy water* (HDO, जिसमें एक hydrogen की जगह deuterium होता है) और methanol (CH_3OH)।

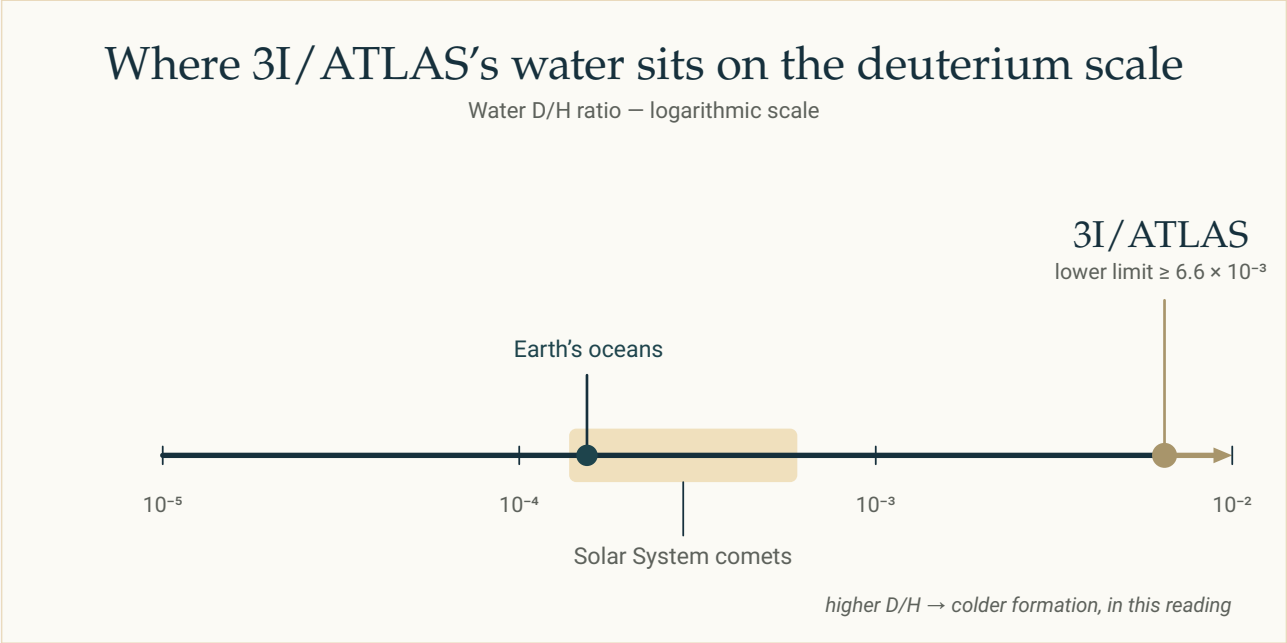
वे जिस D/H ratio को जानना चाहते थे, वह व्यवहार कि रूप से heavy water और ordinary water के अनुपात से निकलता है। इसलिए दोनों की मात्रा चाहिए थी। Spectra को फैलते हुए cometary atmosphere के radiative-transfer model — SUBLIME code — से गुजारा गया, और exoplanet atmospheres की composition निकालने जैसी statistical fitting से temperature, outflow और प्रत्येक molecule की production rate अनुमानित की गई।

इसके बाद आने वाले हर निष्कर्ष पर एक महत्वपूर्ण सीमा लागू होती है: **सामान्य पानी (H_2O) सीधे detect नहीं हुआ।** HDO और methanol साफ़ दिखे, लेकिन H_2O signal noise के नीचे रहा। इसका अर्थ यह नहीं कि सामान्य पानी कम था — वह heavy water से बहुत अधिक होना चाहिए। किसी spectral line का दिखना केवल molecule की abundance पर नहीं, उस खास line को observe करना कितना आसान है, इस पर भी निर्भर करता है। यहाँ दो बातें H_2O line के खिलाफ़ थीं। पहली, पृथ्वी का atmosphere: करीब 183 GHz की target H_2O line ठीक उस क्षेत्र में है जहाँ हमारे atmosphere का अपना water vapour बहुत तेज absorption करता है। जमीन से वहाँ cometary water देखना कोहरे के पीछे मोमबत्ती देखने जैसा है। HDO की करीब 241 GHz line अधिक साफ़ atmospheric window में पड़ती है। दूसरी, sensitivity: H_2O channel का noise बहुत अधिक था — लगभग 500 mJy per beam, जबकि HDO के लिए करीब 21। इसलिए सामान्य पानी की abundance ज़्यादा होने पर भी उसकी line threshold के नीचे रह सकती थी। दूसरी ओर दुर्लभ HDO साफ़ window में स्पष्ट दिख गया।

Space से, पृथ्वी के atmosphere के ऊपर, वही पानी देखना आसान है: perihelion के बाद JWST ने infrared में 3I/ATLAS का पानी detect किया। इसलिए ALMA की non-detection पानी की अनुपस्थिति नहीं बताती, वह उस खास ground-based spectral line की सीमा बताती है। परिणामस्वरूप ordinary water की मात्रा को *अप्रत्यक्ष रूप से* अनुमानित करना पड़ा — मुख्यतः methanol lines की excitation से, जो इस पर निर्भर करती है कि methanol molecules कितनी बार पानी से टकराते हैं। यह वास्तविक measurement है, लेकिन model-dependent है, और लेखक इसे साफ़ तौर पर स्वीकार करते हैं।

क्यामिला

- **Heavy water मिला, ordinary water की line नहीं।** HDO और methanol की कई lines साफ़ detect हुईं; H_2O नहीं। क्योंकि D/H ratio ordinary-water production rate की *upper limit* पर आधारित है — जानबूझकर upper limit, क्योंकि H_2O line noise के नीचे रही— इसलिए deuterium ratio एक **lower limit** निकलता है, कोई एक सटीक value नहीं।
- **Deuterium enrichment बहुत अधिक है।** सबसे conservative scenario में पानी का D/H ratio 6.6×10^{-3} **से अधिक** है — पृथ्वी के महासागरों की तुलना में करीब **40 गुना** और एक सामान्य Solar System comet की तुलना में करीब **30 गुना**। दोनों estimation methods में 3I/ATLAS अब तक मापे गए water D/H ratios के बहुत ऊपरी छोर पर आता है।
- **यह शायद केवल एक रात की fluctuation नहीं है।** मुख्य measurement एक epoch का है, लेकिन पास के ALMA data की शुरुआती जाँच में बड़ा day-to-day बदलाव नहीं दिखा। एक महीने से अधिक बाद किया गया स्वतंत्र JWST analysis भी उसी दिशा में इशारा करता है: deuterium-rich water।



Deuterium scale पर 3I/ATLAS का पानी बहुत deuterium-rich छोर पर बैठता है — पृथ्वी के महासागरों और पूरे Solar System comet population से ऊपर। Arrow एक *lower limit* दिखाता है: वास्तविक value इससे अधिक हो सकती है। ऊँचा D/H ratio ठंडी formation conditions का संकेत है, किसी खास birthplace का पता नहीं।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

इसका सबसे संभावित अर्थ क्या है

पानी का ऊँचा D/H ratio आम तौर पर ऐसे पानी का संकेत है जो बहुत ठंडे वातावरण — लगभग 30 K से नीचे — में जमा और बना, और बाद में गर्मी से बहुत ज़्यादा reprocess नहीं हुआ। इसलिए सबसे सीधी व्याख्या यह है कि 3I/ATLAS का पानी हमारे Solar System के comets के पानी की तुलना में **अधिक ठंडी और कम परिवर्तित परिस्थितियों** में बना। इसका अर्थ है कि उसके parent planetary system में बर्फ बनने का इतिहास हमारे system से अलग था।

अगले कदम पर लेखक सावधान हैं, और हमें भी होना चाहिए। इतना deuterium-rich पानी बनने के कम-से-कम दो रास्ते हैं

और यह measurement उनमें अंतर नहीं कर सकता। Enrichment उस ठंडे molecular cloud से *विरासत में* मिला हो सकता है जिसमें planetary system जन्मा, या बाद में ठंडी outer protoplanetary disk में comet बनते समय तय हुआ हो सकता है। दोनों स्थितियों में मुख्य निष्कर्ष वही रहता है — 3I/ATLAS को आकार देने वाली परिस्थितियाँ हमारे comets जैसी नहीं थीं — लेकिन *क्यों* नहीं थीं, यह अभी खुला सवाल है।

इस अर्थ में यह पहली बार है जब किसी दूसरे planetary system की सामग्री में पानी के formation fingerprint को पढ़ा गया है — और वह हमारे अपने system के fingerprint से मेल नहीं खाता।

यह क्या *साबित नहीं* करता

- इसका life, technology या intent से **कोई संबंध नहीं** है। "Interstellar" trajectory बताता है, artificial origin नहीं। यह पानी की chemistry का measurement है।
- यह कोई **सटीक D/H value नहीं** देता। परिणाम *lower limit* है, और जिस ordinary water abundance पर यह निर्भर करता है उसे सीधे detect नहीं किया गया, उसे methanol excitation से model के ज़रिए infer किया गया है।
- यह यह **नहीं बताता कि 3I/ATLAS कहाँ जन्मा**। Parent star भरोसे से पहचाना नासंभव नहीं है, और ऊँचा D/H formation conditions का संकेत है, घर का पता नहीं।
- यह यह **नहीं तय करता कि पानी इतना deuterium-rich क्यों है**। Cold birth-cloud से inheritance और cold disk में बाद की formation — दोनों data से मेल खाते हैं।
- यह **एक object का एक epoch** का measurement है। दूसरी observations का समर्थन उत्साहजनक है, लेकिन यह लंबा time series नहीं।

प्रमाण कितना मज़बूत है?

दो बातों को अलग-अलग तौलना चाहिए: परिणाम की दिशा और उसकी exact संख्या।

- **दिशा मज़बूत है।** 3I/ATLAS का पानी बहुत deuterium-rich है — conservative lower limit भी पूरे Solar System comet population से ऊपर बैठती है, और स्वतंत्र JWST analysis भी इसी दिशा में है। यह निष्कर्ष नाज़ुक नहीं दिखता।
- **Exact संख्या modelling chain पर निर्भर करती है।** H_2O detect नहीं होने के कारण water abundance — और इसलिए D/H ratio — methanol excitation से अप्रत्यक्ष रूप से निकाला गया। इसमें यह assumption शामिल है कि coma में methanol का मुख्य collision partner पानी है; perihelion के पास यह reasonable है, लेकिन CO_2 का योगदान पूरी तरह खारिज नहीं किया जा सकता। Collision rates भी approximate और कमज़ोर रूप से constrained हैं। लेखक इन सीमाओं को स्पष्ट करते हैं और इसी कारण result को measurement की जगह limit के रूप में देते हैं।
- **व्याख्या अच्छी तरह motivated है, लेकिन unique नहीं।** Cold formation ऊँचे D/H की स्वाभाविक व्याख्या है; वह ठंडा parent cloud से विरासत में मिली या बाद की disk formation में बनी, यह अनसुलझा है। Parent system की पहचान भी संभव नहीं।

संक्षेप में: पानी बहुत ठंडी परिस्थितियों में बना था, इस पर भरोसा अच्छा है; ठीक कितना ठंडा और किस evolutionary path से, यह अभी खुला है।

यह क्योंमहत्वपूर्ण है

दशकोंसे पृथ्वीके पानीकीउत्पत्तिऔर developing planetary systems में water D/H fingerprint कैसे तय होताहै, इन सवालोंके उत्तर केवल हमारे Solar System के measurements से आते रहे हैं। पहलीबार यह chart उस समग्रीतक बढ़ाहै जिसके बारे में हम जानते हैं कि वह किसीदूसरे तारे के आसपास बनीथी।

और उसकाउत्तर “हर जगह घर जैसाहै” नहींहै। उलटाहै: कोई दूसराsystem अपनीबर्फ़ें इतनीठंडीपरिस्थितियोंमें बना सकताहै कि उनमें ऐसाchemical fingerprint रह जाए जोहमारे comets में कभीनहींदिखा। यह छोटे आकार कालेकिन ठोस प्रमाण है कि ग्रह बनाने वालीठोस समग्रीकीchemistry और history एक तारे से दूसरे तारे तक अलग होसकतीहै। इसके लिए हमें spacecraft कोlight-years दूर भेजने कीजरूरत नहींपड़ी; दूसरे system काएक भटकाटुकड़ाहमारे पास से गुज़राऔर हमने उसके चले जाने से पहले उसके पानीकोपढ़ लिया।

संक्षिप्त सार

3I/ATLAS तीसरीज्ञात interstellar object और दूसरीसक्रिय interstellar comet है — दूसरे planetary system काएक टुकड़ाजोहमारे system से केवल एक बार गुजर रहाहै। सूर्य के निकट आने के आसपास ALMA observations में astronomers ने coma में heavy water (HDO) और methanol detect किया, लेकिन ordinary water कीtarget line नहीं। इससे model की मदद से water D/H ratio कालower limit निकालागया। Conservative scenario में यह 6.6×10^{-3} **से अधिक** है — पृथ्वी के महासागरोंसे करीब 40 गुनाऔर एक सामान्य Solar System comet से करीब 30 गुना। यह ऐसे पानीकीओर इशाराकरताहै जो हमारे comets कीतुलनामें अधिक ठंडीऔर कम thermally processed परिस्थितियोंमें बना। संख्याएक model-dependent lower limit है, सीधा H_2O measurement नहीं, और यह नहींबतातीकि enrichment cold birth-cloud से आयाया बाद में cold disk में बना, न हीparent star कीपहचान करतीहै। फिर भीयह किसीदूसरे तारे के system से आए पानीकाइस तरह कापहला chemical fingerprint है — और वह हमारे fingerprint से अलग है।

बिनाबढ़ा-चढ़ाकर जाँच

शोधपत्र क्यादिखाताहै: Perihelion के आसपास interstellar comet 3I/ATLAS के ALMA observations से उसके पानीके D/H ratio काconservative lower limit $>6.6 \times 10^{-3}$ मिला— पृथ्वीके महासागरोंसे लगभग 40 गुनाऔर सामान्य Solar System comet से लगभग 30 गुना। इससे संकेत मिलताहै कि पानीहमारे comets कीतुलनामें काफ़ीठंडीऔर कम thermally processed परिस्थितियोंमें बना। स्वतंत्र JWST analysis भीदिशाकासमर्थन करताहै।

क्यासंभव है लेकिन सिद्ध नहीं Enrichment सीधे ठंडे prestellar cloud से विरासत में मिलाया comet के cold protoplanetary disk में बनने के दौरान तय हुआ। दोनोंscenarios data से मेल खाते हैं।

यह क्यानहींदिखाता Life, technology याartificial origin के बारे में कुछ भी; कोई precise D/H value; parent star कीपहचान यास्थान; ऊँचे D/H काविशिष्ट mechanism; यायह कि single-epoch result coma variability से पूरीतरह मुक्त है।

मुख्य सीमाएँ: H_2O सीधे detect नहींहुआ। इसलिए ordinary water abundance और D/H ratio methanol excitation से अप्रत्यक्ष रूप से infer किए गए, यह मानते हुए कि पानीमुख्य collider है और approximate collision rates काउपयोग करते हुए। परिणाम single-epoch, model-dependent lower limit है; parent system अज्ञात है।

सामान्य पाठक कितनाभरोसाकरे? अधिक कि 3I/ATLAS कापानीसचमुच deuterium-rich है और हमारे comets कीतुलना

में अधिक ठंडी परिस्थितियों में बना— और उतना ही अधिक कि इससे aliens के बारे में कुछ नहीं कहा जा सकता। Exact enrichment पर मध्यम भरोसा, क्योंकि वह model-dependent lower limit है। Specific cause और birthplace पर कम भरोसा। सही प्रतिक्रिया: दूसरे star system से मिला एक शांत, अद्भुत chemical postcard — न रहस्य, न spaceship।

स्रोत

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/