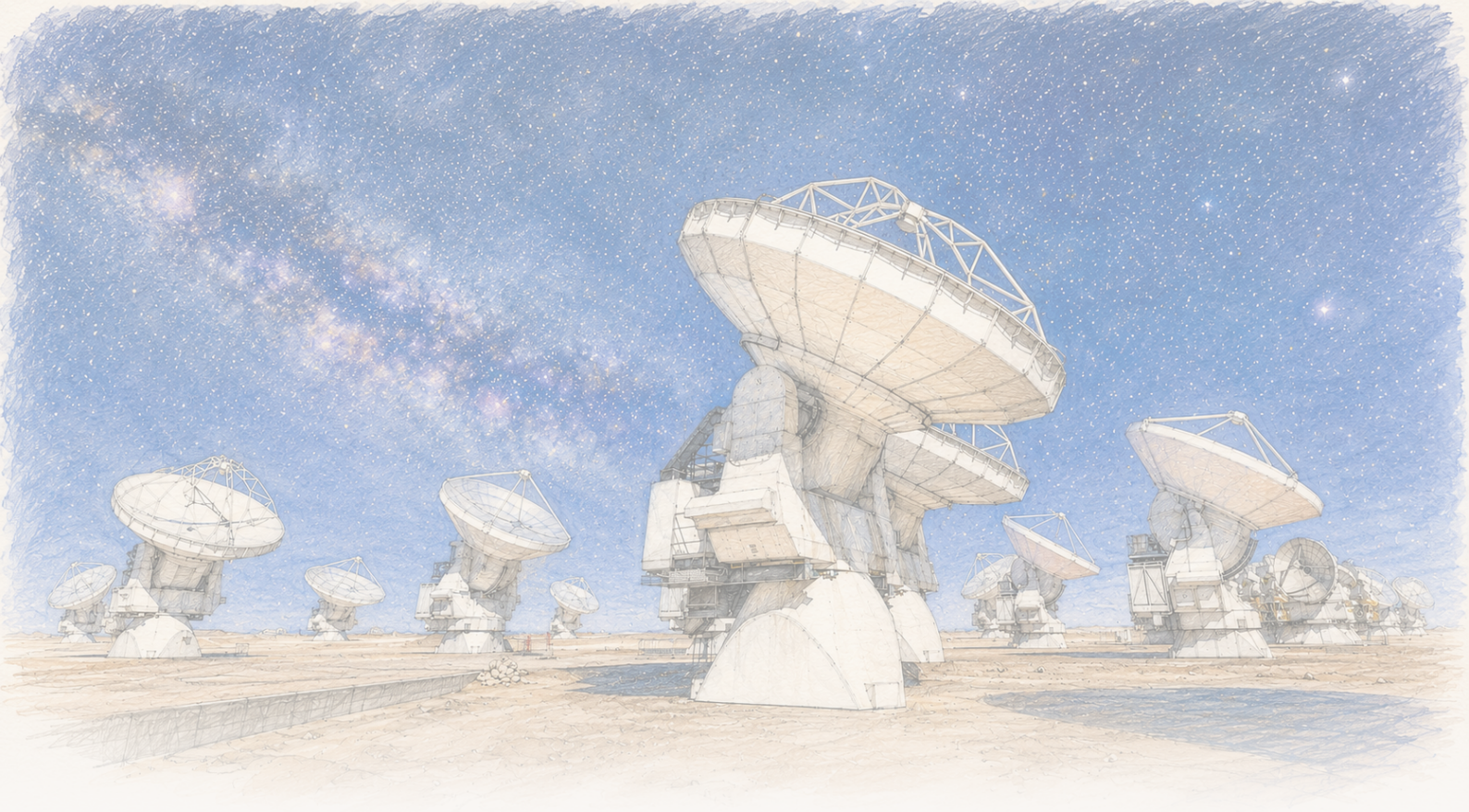


The Clean Paper

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

Komet antara bintang 3I/ATLAS membawa air yang terbentuk lebih sejuk daripada komet kita — bacaan kimia pertama sistem planet lain

Menggunakan ALMA, ahli astronomi mengehadkan nisbah hidrogen 'berat' kepada hidrogen biasa dalam air 3I/ATLAS — objek antara bintang ketiga yang diketahui — dan mendapati ia sangat kaya deuterium: sekurang-kurangnya kira-kira 40 kali lautan Bumi dan 30 kali komet Sistem Suria biasa. Itu menunjuk kepada air yang terbentuk dalam keadaan lebih sejuk daripada komet kita. Hasilnya ialah had bawah yang diperoleh secara tidak langsung (air biasa itu sendiri tidak pernah dikesan secara langsung), dan ia tidak mengatakan apa-apa tentang kehidupan atau teknologi — hanya tentang kimia dan kesejukan.

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

Antena DV-59 di latar hadapan, dengan beberapa antena ALMA memerhati langit malam yang diterangi cahaya bulan. Kredit: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Komet dari bintang lain, dan cap jari dalam airnya

Sesekali sesuatu melintasi Sistem Suria yang tidak pernah menjadi milik kita. Bukan batu sesat dari jalur asteroid, bukan komet yang kembali dari awan Oort pada orbit panjangnya, tetapi objek pada laluan hiperbola terbuka — datang dari ruang antara bintang, mengelilingi Matahari sekali, kemudian pergi untuk selama-lamanya. Kini kita telah melihat tiga. Yang pertama, ʻOumuamua pada 2017, hampir sudah pergi sebelum semua orang bersetuju tentang apa sebenarnya objek itu. Yang kedua, 2I/Borisov pada 2019, jelas sebuah komet. Yang ketiga, ditemui pada Julai 2025, ialah 3I/ATLAS — dan ia tiba dengan koma yang cukup aktif untuk membolehkan kimianya dibaca secara nyata.

Inilah bahagian yang patut dipegang sebelum kebisingan bermula. Komet antara bintang secara harfiah ialah serpihan sistem planet lain: ais dan debu yang memeluwap di sekitar bintang lain, kemungkinan besar terpelanting keluar akibat tendangan graviti lama dahulu, hanyut merentasi Galaksi, dan kebetulan lalu cukup dekat dengan Matahari sehingga aisnya mula mengewap tepat di tempat teleskop kita boleh memerhatikannya. Itulah fakta yang benar-benar luar biasa, dan ia sudah cukup menakjubkan tanpa perlu dibantu.

Namun ia biasanya tetap “dibantu”. Objek antara bintang menarik liputan jenis tertentu yang

teruja berlebihan — cahaya dimalapkan, lalu *tetapi bagaimana kalau ada seseorang yang membinanya* — dan 3I/ATLAS mendapat bahagiannya. Jawapan jujur kepada soalan itu ialah jawapan yang membosankan, dan jawapan membosankan itu sebenarnya lebih menarik: ia sebuah komet. Soalan sebenar tidak pernah tentang siapa yang mungkin membinanya. Soalannya lebih tenang — jika kita boleh membaca kimia sesuatu yang terbentuk di sekitar bintang lain, apakah yang akan diceritakannya tentang keluarga bintang itu? Dan bagaimana caranya kita membaca?

Alat bacaan kali ini ialah air. Air terdiri daripada dua hidrogen dan satu oksigen, tetapi sebahagian kecil hidrogennya ialah *deuterium* — kembar yang lebih berat, atom hidrogen biasa dengan satu neutron tambahan. Nisbah hidrogen berat kepada hidrogen biasa dalam air, ditulis D/H, bukan rawak. Ia ditetapkan oleh kimia, sebahagian besarnya berdasarkan betapa sejuk tempat air mula-mula terbentuk: semakin sejuk dan tenang persekitarannya, semakin banyak deuterium terkunci di dalamnya. Dan kerana komet pada asasnya ialah peti sejuk beku dalam — mampu menyimpan ais sejuk selama berbilion tahun — nisbah D/H airnya boleh memelihara cap jari keadaan ketika air itu terbentuk.

Kita mengenali cap jari sistem sendiri dengan agak baik: lautan Bumi dan pelbagai keluarga komet Sistem Suria berkumpul dalam julat yang agak sempit. Yang belum pernah ditentukan ialah cap jari yang sama untuk air yang terbentuk di sekitar *bintang lain*. Itulah yang cuba dibaca oleh makalah ini dalam 3I/ATLAS.

Apa yang dilakukan oleh para penulis

Mereka menghalakan ALMA — susunan besar piring radio di gurun Chile — ke arah 3I/ATLAS pada 4 November 2025, enam hari selepas komet melepasi Matahari. Mereka menalanya untuk menangkap pancaran samar pada panjang gelombang milimeter daripada tiga molekul dalam koma: air biasa (H_2O), air *berat* (HDO, dengan satu hidrogen diganti deuterium), dan metanol (CH_3OH).

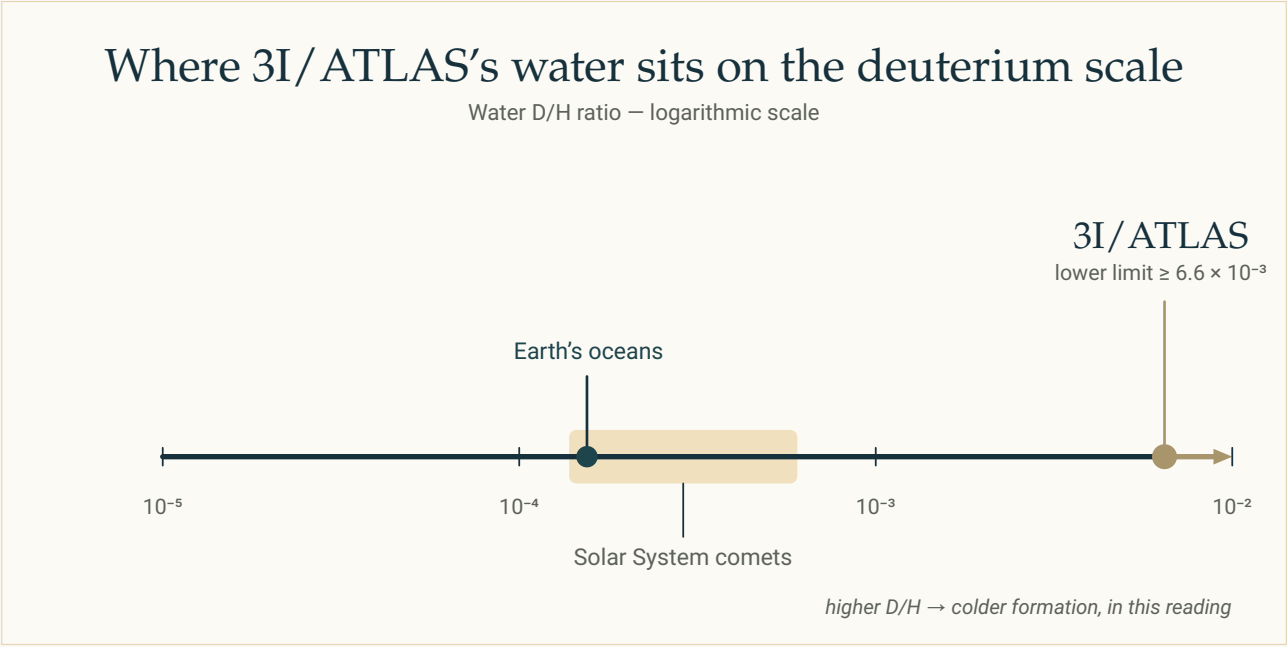
Nisbah D/H yang dicari pada asasnya ialah nisbah air berat kepada air biasa. Jadi mereka memerlukan kedua-duanya. Spektrum itu kemudian dimasukkan ke dalam model pemindahan radiatif atmosfera komet yang mengembang (kod bernama SUBLIME) dan dipadankan menggunakan jenis kaedah statistik yang sama seperti yang digunakan untuk mendapatkan komposisi atmosfera eksoplanet, bagi menganggarkan suhu, aliran keluar dan berapa banyak setiap molekul yang dihasilkan oleh komet.

Satu masalah membentuk segala yang menyusul: **mereka sebenarnya tidak mengesan air biasa.** HDO dan metanol muncul; H_2O sendiri kekal di bawah hingar. Itu bukan kerana kekurangan air biasa — jumlahnya jauh lebih banyak daripada jenis berat. Sama ada satu garis spektrum kelihatan bergantung bukan hanya pada berapa banyak molekul hadir, tetapi juga sejauh mana garis tertentu boleh diperhatikan, dan dua perkara menentang garis air di sini. Pertama ialah atmosfera: garis H_2O yang boleh disasarkan (berhampiran 183 GHz) berada tepat di tempat udara Bumi yang penuh wap air menyerap paling kuat, jadi cuba membaca air komet dari tanah di situ sedikit seperti cuba melihat lilin melalui kabus — makalah menyatakan jalur air bertenaga rendah ini mengalami penyerapan atmosfera yang kuat, manakala garis air berat (HDO) berhampiran 241 GHz berada dalam tetingkap

yang lebih bersih. Kedua ialah sensitiviti: saluran air jauh lebih bising — sekitar 500 mJy per beam berbanding 21 untuk HDO — jadi walaupun isyaratnya banyak, ia masih boleh tenggelam. Antara kabus dan hingar, air biasa yang banyak kekal di bawah ambang, manakala air berat yang jauh lebih jarang, kebetulan berada dalam tetingkap bersih dan senyap, muncul dengan jelas. (Dari angkasa, di atas atmosfera, air yang sama jauh lebih mudah dilihat: JWST kemudian mengesan air komet dalam inframerah selepas perihelion — jadi kegagalan ALMA mengesan bukan bermaksud air tiada, tetapi hanya garis tertentu itu sukar dilihat melalui atmosfera Bumi.) Oleh itu jumlah air biasa perlu disimpulkan *secara tidak langsung* — terutamanya daripada cara garis metanol teruja, yang bergantung pada berapa kerap molekul metanol berlanggar dengan air. Itu ialah pengukuran nyata, tetapi bergantung pada model, dan para penulis menyatakannya dengan jelas.

Apa yang mereka temui

- **Air berat, tetapi tiada pengesanan air biasa.** HDO dan beberapa garis metanol dikesan dengan jelas; H_2O tidak. Oleh sebab nisbah D/H bergantung pada *had atas* kadar pengeluaran air biasa — sengaja diperlakukan begitu kerana garis air sendiri kekal di bawah hingar — nisbah deuterium yang terhasil ialah **had bawah**, bukan satu nilai tepat.
- **Pengayaan deuterium yang kuat.** Dalam senario konservatif mereka, nisbah D/H air adalah **lebih besar daripada** 6.6×10^{-3} — lebih daripada kira-kira **40 kali** nilai lautan Bumi, dan lebih daripada kira-kira **30 kali** nilai komet Sistem Suria biasa. Dalam kedua-dua anggaran mereka, 3I/ATLAS berada di hujung paling tinggi daripada semua pengukuran D/H air setakat ini.
- **Ia mungkin bukan kebetulan satu malam itu.** Pengukuran datang daripada satu epok, tetapi pemeriksaan awal data ALMA berdekatan tidak menunjukkan perubahan besar dari hari ke hari, dan analisis JWST bebas terhadap 3I/ATLAS yang diambil lebih sebulan kemudian menunjuk ke arah sama — air kaya deuterium.



Kedudukan air 3I/ATLAS pada skala deuterium: jauh di hujung kaya deuterium, melepasi lautan Bumi dan keseluruhan populasi komet Sistem Suria (ditunjukkan di sini sebagai julat anggaran). Anak panah menandakan *had bawah* — nilai sebenar mungkin lebih tinggi. Nisbah D/H tinggi ialah petunjuk kepada *keadaan pembentukan sejuk*, bukan alamat asal.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Apa yang mungkin dimaksudkan oleh hasil ini

Nisbah D/H air yang tinggi ialah tanda air yang membeku di tempat yang sangat sejuk (di bawah kira-kira 30 K) dan selepas itu tidak banyak diproses semula oleh haba. Jadi bacaan paling bersih ialah air 3I/ATLAS terbentuk dalam keadaan *lebih sejuk dan lebih lembut* daripada air dalam komet Sistem Suria kita — dan oleh itu sistem planet induknya menyusun ais dengan cara yang berbeza daripada sistem kita.

Para penulis berhati-hati untuk langkah seterusnya, dan kita juga patut begitu. Ada dua cara menghasilkan air sekaya deuterium ini, dan pengukuran ini tidak boleh membezakannya: air itu mungkin *mewarisi* pengayaannya daripada awan sejuk tempat sistem itu lahir, atau nisbah itu ditetapkan kemudian semasa pembentukan komet dalam cakera luar yang sejuk. Dalam kedua-dua kes, kesimpulan penting tetap bertahan — keadaan yang membentuk 3I/ATLAS tidak sama dengan keadaan yang membentuk komet kita — tetapi *mengapa* masih terbuka.

Jadi, inilah kali pertama sesiapa membaca cap jari pembentukan air pada bahan daripada sistem planet lain, dan mendapati ia tidak sepadan dengan sistem kita.

Apa yang tidak dibuktikan oleh kajian ini

- Ia **tidak mengatakan apa-apa** tentang kehidupan, teknologi atau niat. Tiada “sesuatu” yang dibina; “antara bintang” menerangkan trajektori, bukan kisah asal buatan. Ini pengukuran kimia air.
- Ia **bukan** nilai D/H yang tepat. Ia ialah *had bawah*, dan air biasa yang dirujuk tidak pernah dikesan secara langsung — kelimpahannya disimpulkan daripada pengujaan molekul lain, metanol, dengan andaian bahawa air ialah bahan utama yang dilanggar oleh metanol.
- Ia **tidak** menunjukkan di mana 3I/ATLAS dilahirkan. Bintang induk tidak boleh dikenal pasti dengan boleh dipercayai, dan nisbah D/H tinggi ialah petunjuk kepada *keadaan*, bukan alamat rumah.
- Ia **tidak** memutuskan *mengapa* air kaya deuterium. “Diwarisi daripada awan kelahiran sejuk” dan “ditetapkan semasa pembentukan cakera” kedua-duanya sesuai dengan data; makalah tidak memilih salah satu.
- Ia ialah **satu** objek, diukur pada **satu** epok. Pengesahan tambahan menggalakkan, tetapi bukan siri masa panjang.

Sejauh mana kukuh buktinya?

Dua perkara perlu ditimbang secara berasingan: arah hasil, dan angka tepat.

- **Arahnya kukuh.** Bahawa air 3I/ATLAS jelas kaya deuterium ialah had bawah konservatif, berada jauh di atas seluruh populasi komet Sistem Suria, dan disokong oleh analisis JWST bebas. Bahagian ini tidak rapuh.
- **Angkanya bergantung pada rantaian pemodelan.** Oleh sebab H_2O tidak dikesan, kelimpahan air — dan seterusnya nisbah D/H — bergantung pada inferens air secara tidak langsung daripada pengujaan metanol. Ini mengandaikan air ialah pasangan perlanggaran dominan dalam koma (munasabah dekat perihelion, tetapi sumbangan CO_2 tidak boleh diketepikan) dan menggunakan kadar perlanggaran anggaran yang diakui kurang terkawal. Para penulis menandakan semua ini dan sengaja melaporkan hasil sebagai had, bukannya pengukuran tepat.
- **Tafsirannya berasas baik tetapi tidak unik.** Pembentukan sejuk ialah penjelasan semula jadi untuk D/H tinggi; sama ada kesejukan itu diwarisi atau dikenakan kemudian masih belum selesai, dan sistem induk tidak dapat dikenal pasti.

Ringkasnya: bahawa air itu terbentuk sejuk mempunyai asas kukuh; *sejauh mana* sejuk dan *mengapa* tepatnya sengaja dibiarkan terbuka.

Mengapa ia penting

Selama beberapa dekad, persoalan dari mana air Bumi berasal — dan apa yang menetapkan cap jari deuterium air merentasi sistem planet yang sedang terbentuk — dijawab sepenuhnya dengan pengukuran dari dalam Sistem Suria sendiri. Ini kali pertama carta itu dilanjutkan kepada bahan yang terbukti terbentuk di sekitar bintang lain.

Jawapannya bukan “semua tempat seperti rumah”. Sebaliknya: sistem lain boleh membentuk ais dalam keadaan cukup sejuk untuk meninggalkan cap jari yang tidak pernah dibawa oleh komet kita. Itu bukti kecil dan konkrit bagi sesuatu yang diam-diam besar — bahawa kimia dan sejarah pepejal yang membina planet boleh berbeza dari satu bintang ke bintang lain. Dan ia bukan datang daripada kapal angkasa yang dihantar merentasi tahun cahaya, tetapi daripada menangkap serpihan sesat sistem lain ketika ia lalu, lalu membaca airnya sebelum ia pergi.

Ringkasan utama

3I/ATLAS ialah objek antara bintang ketiga yang diketahui dan komet antara bintang aktif kedua — serpihan sistem planet lain yang melintas sekali melalui sistem kita. Menggunakan ALMA berhampiran pendekatan terdekat komet kepada Matahari, ahli astronomi mengesan air berat (HDO) dan metanol dalam komanya tetapi bukan air biasa, lalu daripada itu menyimpulkan nisbah deuterium kepada hidrogen dalam air. Mereka mendapati pengayaan deuterium yang sangat kuat — had bawah

melebihi 6.6×10^{-3}, kira-kira 40 kali lautan Bumi dan 30 kali komet Sistem Suria biasa — yang menunjuk kepada air yang terbentuk dalam keadaan lebih sejuk dan kurang diproses berbanding komet Sistem Suria. Angka itu ialah had bawah yang diperoleh secara tidak langsung melalui model, bukan pengukuran langsung, dan ia tidak boleh menentukan sama ada pengayaan diwarisi daripada awan kelahiran sejuk atau ditetapkan kemudian dalam cakera sejuk, mahupun dari mana tepatnya komet berasal. Namun begitu, inilah bacaan pertama cap jari kimia khusus ini bagi air dari bintang lain — dan cap jarinya tidak sepadan dengan kita.

Semakan tanpa gembar-gembur

Apa yang ditunjukkan oleh makalah: Daripada pemerhatian ALMA terhadap komet antara bintang 3I/ATLAS berhampiran perihelion, satu had bawah nisbah D/H air sebanyak $>6.6 \times 10^{-3}$ (senario konservatif) — kira-kira 40× lautan Bumi dan 30× komet Sistem Suria biasa — yang menyiratkan air terbentuk dalam keadaan jauh lebih sejuk dan kurang diproses secara terma berbanding komet Sistem Suria. Analisis JWST bebas bersetuju tentang arahnya.

Apa yang munasabah tetapi belum dibuktikan: Bahawa pengayaan diwarisi terus daripada awan prabintang yang sejuk, berbanding ditetapkan semasa pembentukan komet dalam cakera protoplanet sejuk. Kedua-dua senario sesuai; data tidak membezakannya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Apa-apa tentang kehidupan, teknologi atau asal buatan; nilai D/H tepat (ia ialah had bawah); identiti atau lokasi bintang induk; mekanisme khusus di sebalik D/H tinggi; atau bahawa hasil satu epok ini kebal daripada variasi koma.

Had utama: H_2O tidak dikesan secara langsung, jadi kelimpahan air — dan dengan itu nisbah D/H — disimpulkan secara tidak langsung daripada pengujaan metanol, dengan menganggap air ialah pasangan perlanggaran dominan dan menggunakan kadar perlanggaran anggaran yang para penulis sendiri sebut kurang terkawal; hasil ialah had satu epok yang bergantung pada model; sistem induk tidak dapat dikenal pasti.

Berapa banyak keyakinan patut diberikan pembaca umum? Tinggi bahawa air 3I/ATLAS memang kaya deuterium dan terbentuk lebih sejuk daripada komet kita, serta bahawa hasil ini langsung tidak mengatakan apa-apa tentang makhluk asing. Sederhana pada darjah tepat pengayaan, kerana ia had bawah yang bergantung pada model. Rendah pada punca khusus dan tempat kelahiran, yang kekal terbuka. Sikap yang wajar: rasa kagum tenang terhadap poskad kimia dari sistem bintang lain — bukan misteri, dan bukan kapal angkasa.

Sumber

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/