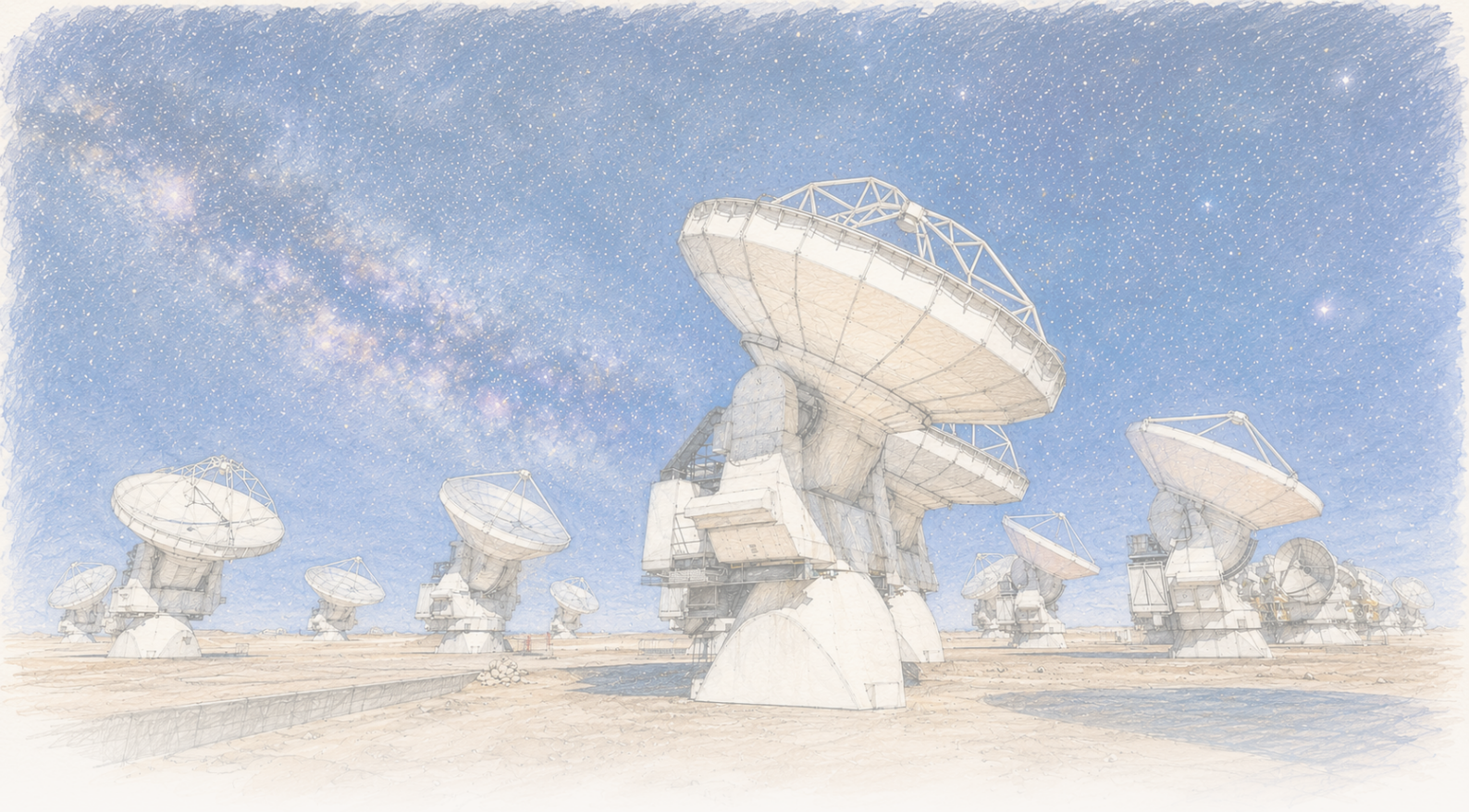


The Clean Paper

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

Komet antarbintang 3I/ATLAS membawa air yang terbentuk lebih dingin daripada komet kita — pembacaan kimia pertama dari sistem planet lain

Menggunakan ALMA, astronom membatasi rasio hidrogen 'berat' terhadap hidrogen biasa dalam air 3I/ATLAS — objek antarbintang ketiga yang diketahui — dan menemukan pengayaan deuterium yang kuat: setidaknya sekitar 40 kali samudra Bumi dan 30 kali komet Tata Surya tipikal. Itu menunjuk ke air yang terbentuk dalam kondisi lebih dingin daripada komet kita. Hasilnya adalah batas bawah yang diturunkan secara tidak langsung (air biasa sendiri tidak pernah terdeteksi langsung), dan tidak mengatakan apa pun tentang kehidupan atau teknologi — hanya tentang kimia dan kondisi dingin.

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 depan, dengan beberapa antena ALMA mengamati langit malam yang diterangi cahaya Bulan. Kredit: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Komet dari bintang lain, dan sidik jari di dalam airnya

Sesekali, sesuatu melintas melalui Tata Surya yang sejak awal bukan bagian dari sistem kita. Bukan batu tersesat dari sabuk asteroid, bukan komet yang kembali dari awan Oort pada orbit panjangnya, melainkan sebuah objek pada lintasan hiperbolik terbuka — datang dari ruang antarbintang, mengitari Matahari sekali, lalu pergi untuk selamanya. Kini kita telah melihat tiga. Yang pertama, ‘Oumuamua pada 2017, nyaris sudah pergi sebelum para astronom sepakat tentang apa sebenarnya objek itu. Yang kedua, 2I/Borisov pada 2019, jelas merupakan komet. Yang ketiga, ditemukan pada Juli 2025, adalah 3I/ATLAS — dan ia datang dengan koma yang cukup aktif sehingga kimianya benar-benar dapat dipelajari.

Ada satu hal yang layak dipegang sebelum kebisingan pemberitaan dimulai. Komet antarbintang, secara harfiah, adalah serpihan dari sistem planet lain: es dan debu yang mengembun di sekitar bintang lain, kemungkinan besar terlontar oleh tendangan gravitasi sejak lama, mengembara melintasi Galaksi, lalu kebetulan lewat cukup dekat dengan Matahari sehingga esnya mulai menguap tepat ketika teleskop kita dapat mengamatinya. Itulah fakta yang sungguh luar biasa, dan sudah cukup mengagumkan tanpa perlu dibantu sensasi.

Namun sensasi biasanya tetap datang. Objek antarbintang menarik jenis pemberitaan tertentu — lampu diredupkan, lalu muncul *tetapi bagaimana kalau ada yang membuatnya*. Jawaban jujurnya membosankan, dan justru jawaban membosankan itu lebih menarik: ini adalah komet. Pertanyaan sebenarnya tidak pernah apakah ada seseorang yang membuatnya. Pertanyaannya lebih tenang — jika kita dapat membaca kimia sesuatu yang terbentuk di sekitar bintang lain, apa yang bisa dikatakannya tentang keluarga planet bintang tersebut? Dan bagaimana cara membacanya?

Instrumen pembacanya kali ini adalah air. Air terdiri atas dua hidrogen dan satu oksigen, tetapi sebagian kecil hidrogennya berupa *deuterium* — saudara yang lebih berat, yaitu atom hidrogen biasa dengan satu neutron tambahan. Rasio hidrogen berat terhadap hidrogen biasa di dalam air, ditulis D/H, tidak acak. Kimia menetapkannya terutama berdasarkan seberapa dingin tempat air itu pertama kali terbentuk: semakin dingin dan tenang lingkungan kelahirannya, semakin banyak deuterium yang terkunci di dalamnya. Dan karena komet pada dasarnya adalah lemari pembeku raksasa — mampu menyimpan esnya dalam keadaan dingin selama miliaran tahun — rasio D/H airnya dapat mempertahankan sidik jari kondisi ketika air tersebut terbentuk.

Sidik jari sistem kita sendiri cukup dikenal: samudra Bumi dan berbagai keluarga komet Tata Surya berkumpul dalam rentang yang relatif sempit. Yang belum pernah berhasil diukur adalah sidik jari yang sama untuk air yang terbentuk di sekitar *bintang lain*. Itulah yang hendak dibaca makalah ini dari 3I/ATLAS.

Apa yang dilakukan para penulis

Mereka mengarahkan ALMA — susunan besar teleskop radio di gurun Chile — ke 3I/ATLAS pada 4 November 2025, enam hari setelah komet melewati titik terdekatnya dengan Matahari. Instrumen disetel untuk menangkap pancaran lemah pada panjang gelombang milimeter dari tiga molekul di dalam koma: air biasa (H_2O), air *berat* (HDO, dengan satu hidrogen digantikan deuterium), dan metanol (CH_3OH).

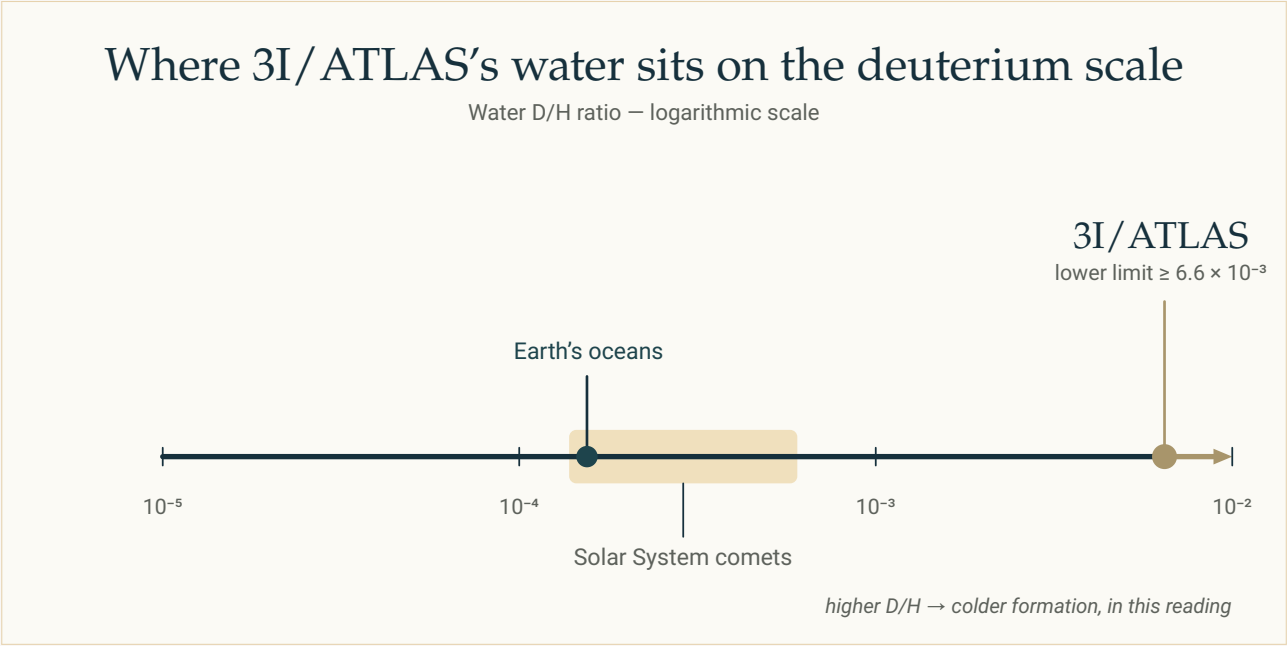
Rasio D/H yang mereka cari pada dasarnya adalah perbandingan air berat dengan air biasa. Jadi keduanya dibutuhkan. Spektrum kemudian dimasukkan ke model transfer radiasi atmosfer komet yang mengembang (kode bernama SUBLIME), lalu dicocokkan dengan perangkat statistik sejenis yang dipakai untuk mengambil komposisi atmosfer eksoplanet, guna memperkirakan suhu, aliran keluar, dan berapa banyak setiap molekul yang diproduksi komet.

Ada satu masalah yang membentuk seluruh hasil berikutnya: **mereka sebenarnya tidak mendeteksi air biasa itu.** HDO dan metanol terlihat; H_2O sendiri tetap berada di bawah derau. Bukan karena air biasa kekurangan jumlah — jumlahnya jauh lebih banyak daripada air berat. Apakah suatu garis spektrum terlihat tidak hanya bergantung pada berapa banyak molekulnya, tetapi juga seberapa mudah garis tertentu diamati, dan ada dua hal yang melawan garis air di sini. Pertama adalah atmosfer Bumi: garis H_2O yang dapat mereka targetkan (sekitar 183 GHz) berada tepat di wilayah tempat uap air atmosfer Bumi menyerap sangat kuat, sehingga membaca air komet dari permukaan Bumi di frekuensi tersebut sedikit seperti mencoba melihat lilin melalui kabut — makalah mencatat bahwa pita air berenergi rendah ini mengalami penyerapan atmosfer kuat, sedangkan garis air berat (HDO)

dekat 241 GHz jatuh di jendela yang lebih bersih. Kedua adalah sensitivitas: kanal air jauh lebih berisik — sekitar 500 mJy per beam dibanding 21 untuk HDO — sehingga sinyal yang berlimpah sekalipun bisa tenggelam di bawahnya. Di antara "kabut" dan derau itu, air biasa yang berlimpah tetap di bawah ambang, sementara air berat yang jauh lebih langka, kebetulan berada di jendela yang bersih dan tenang, terlihat jelas. (Dari ruang angkasa, di atas atmosfer, air yang sama jauh lebih mudah dilihat: JWST kemudian mendeteksi air komet tersebut dalam inframerah setelah perihelion — jadi non-deteksi ALMA berkaitan dengan satu garis itu melalui atmosfer Bumi, bukan karena komet tidak memiliki air.) Karena itu, jumlah air biasa harus disimpulkan *secara tidak langsung* — terutama dari bagaimana garis metanol tereksitasi, yang bergantung pada seberapa sering molekul metanol bertumbukan dengan air. Itu adalah pengukuran nyata, tetapi bergantung pada model, dan para penulis mengatakannya dengan jelas.

Apa yang mereka temukan

- **Air berat, tetapi tidak ada deteksi air biasa.** HDO dan beberapa garis metanol terdeteksi jelas; H_2O tidak. Karena rasio D/H bertumpu pada *batas atas* laju produksi air biasa — sengaja diperlakukan begitu karena garis air sendiri berada di bawah derau — rasio deuterium yang dihasilkan adalah **batas bawah**, bukan satu nilai tunggal.
- **Pengayaan deuterium yang kuat.** Dalam skenario konservatif mereka, rasio D/H air **lebih besar dari** 6.6×10^{-3} — lebih dari sekitar **40 kali** nilai samudra Bumi, dan lebih dari sekitar **30 kali** nilai komet Tata Surya tipikal. Dengan kedua cara estimasi mereka, 3I/ATLAS berada di ujung tertinggi dari seluruh pengukuran D/H air yang pernah dibuat sejauh ini.
- **Kemungkinan bukan kebetulan pada satu malam.** Pengukuran berasal dari satu epoch, tetapi pemeriksaan awal data ALMA di hari-hari berdekatan tidak menunjukkan perubahan besar dari hari ke hari, dan analisis JWST independen terhadap 3I/ATLAS lebih dari sebulan kemudian menunjuk ke arah yang sama — air yang kaya deuterium.



Posisi air 3I/ATLAS pada skala deuterium: jauh di sisi yang kaya deuterium, melampaui samudra Bumi dan seluruh populasi komet Tata Surya (ditampilkan di sini sebagai rentang perkiraan). Panah menandai *batas bawah* — nilai sebenarnya bisa lebih tinggi. Rasio D/H yang tinggi adalah petunjuk tentang *kondisi pembentukan yang dingin*, bukan alamat asal.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Apa arti yang paling mungkin

Rasio D/H air yang tinggi adalah ciri air yang membeku di tempat sangat dingin (di bawah sekitar 30 K) dan setelahnya tidak banyak diproses ulang oleh panas. Jadi pembacaan paling sederhana adalah bahwa air 3I/ATLAS terbentuk dalam kondisi yang *lebih dingin dan lebih tenang* daripada air pada komet Tata Surya kita — dan dengan demikian sistem planet induknya membentuk es secara berbeda dari sistem kita.

Para penulis berhati-hati pada langkah berikutnya, dan kita seharusnya demikian pula. Ada dua cara untuk menghasilkan air yang sekaya deuterium ini, dan pengukuran sekarang tidak dapat membedakannya: air tersebut bisa *mewarisi* pengayaan dari awan dingin tempat sistem itu lahir, atau nilai tersebut bisa ditetapkan kemudian, selama komet terbentuk di bagian luar cakram yang dingin. Dalam kedua skenario, kesimpulan yang penting tetap bertahan — kondisi yang membentuk 3I/ATLAS berbeda dari kondisi yang membentuk komet kita — tetapi *mengapa* demikian masih terbuka.

Jadi, inilah pertama kalinya siapa pun membaca sidik jari pembentukan air dari materi sistem planet lain, dan menemukan bahwa sidik jari tersebut tidak cocok dengan milik kita.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Hasil ini **tidak mengatakan apa pun** tentang kehidupan, teknologi, atau niat. Tidak ada "sesuatu" yang dibangun; "antarbintang" menggambarkan lintasan, bukan cerita asal. Ini adalah pengukuran kimia air.
- Ini **bukan** nilai D/H yang presisi. Hasilnya adalah *batas bawah*, dan air yang dirujuk bahkan tidak terdeteksi secara langsung — kelimpahannya disimpulkan dari eksitasi molekul lain, metanol, dengan asumsi bahwa air adalah pasangan tumbukan utama bagi metanol.
- Hasil ini **tidak** mengungkap di mana 3I/ATLAS lahir. Bintang induknya tidak dapat diidentifikasi dengan andal, dan rasio D/H tinggi adalah petunjuk tentang *kondisi*, bukan alamat asal.
- Hasil ini **tidak** menyelesaikan *mengapa* airnya kaya deuterium. "Diwarisi dari awan kelahiran yang dingin" dan "ditetapkan selama pembentukan cakram" sama-sama cocok dengan data; makalah tidak memilih salah satunya.
- Ini hanya **satu** objek, diukur pada **satu** epoch. Bukti pendukungnya menggembirakan, tetapi bukan deret pengamatan jangka panjang.

Seberapa kuat buktinya?

Dua hal perlu ditimbang secara terpisah: arah hasil dan angka tepatnya.

- **Arahnya kuat.** Bahwa air 3I/ATLAS sangat kaya deuterium merupakan batas bawah yang konservatif, berada jauh di atas seluruh populasi komet Tata Surya, dan didukung analisis JWST independen. Bagian ini tidak rapuh.
- **Angkanya bertumpu pada rantai pemodelan.** Karena H_2O tidak terdeteksi, kelimpahan air — dan karena itu rasio D/H — banyak bergantung pada inferensi tidak langsung dari eksitasi metanol. Ini mengasumsikan air sebagai pasangan tumbukan dominan di koma (masuk akal dekat perihelion, tetapi kontribusi CO_2 tidak dapat disingkirkan) dan memakai laju tumbukan pendekatan yang menurut para penulis sendiri masih dibatasi buruk. Semua ini dinyatakan oleh penulis, dan sebab itulah hasil sengaja dikutip sebagai batas, bukan pengukuran tunggal.
- **Interpretasinya beralasan kuat tetapi tidak unik.** Pembentukan dingin adalah penjelasan alami untuk D/H tinggi; apakah kondisi dingin itu diwarisi atau muncul kemudian masih belum terselesaikan, dan sistem induk tidak dapat diidentifikasi.

Singkatnya: bahwa air tersebut terbentuk dalam keadaan dingin memiliki dasar yang kuat; tepat *seberapa* dingin, dan tepat *mengapa*, secara jujur masih terbuka.

Mengapa ini penting

Selama puluhan tahun, pertanyaan tentang dari mana air Bumi berasal — dan apa yang menentukan sidik jari deuterium air di berbagai sistem planet yang sedang terbentuk — dijawab sepenuhnya dengan pengukuran dari dalam Tata Surya kita sendiri. Ini pertama kalinya grafik tersebut diperluas ke materi yang terbukti terbentuk di sekitar bintang lain.

Jawaban yang diberikannya bukan “semua tempat mirip rumah”. Justru sebaliknya: sistem lain dapat membentuk es dalam kondisi cukup dingin sehingga meninggalkan sidik jari yang tidak pernah dimiliki komet kita. Itu adalah bukti kecil dan konkret untuk sesuatu yang diam-diam besar — kimia dan sejarah bahan padat pembentuk planet dapat berbeda dari satu bintang ke bintang lain. Dan informasi itu tidak diperoleh dengan pesawat antariksa yang dikirim melintasi tahun cahaya, melainkan dengan menangkap serpihan liar sistem lain saat kebetulan melintas, lalu membaca airnya sebelum pergi.

Singkatnya

3I/ATLAS adalah objek antarbintang ketiga yang diketahui dan komet antarbintang aktif kedua — serpihan sistem planet lain yang hanya sekali melintasi sistem kita. Dengan ALMA dekat saat komet berada di sekitar perihelion, astronom mendeteksi air berat (HDO) dan metanol di komanya tetapi tidak air biasa, lalu dari sana menyimpulkan rasio deuterium terhadap hidrogen air. Airnya sangat

diperkaya deuterium — batas bawah di atas 6.6×10^{-3}, kira-kira 40 kali samudra Bumi dan 30 kali komet Tata Surya tipikal — yang menunjuk ke air yang terbentuk dalam kondisi lebih dingin dan lebih sedikit diproses daripada komet Tata Surya. Angka ini adalah batas bawah yang diperoleh secara tidak langsung melalui model, bukan pengukuran langsung, dan tidak dapat mengatakan apakah pengayaan diwarisi dari awan kelahiran dingin atau ditetapkan kemudian di cakram dingin, maupun dari bintang mana komet itu berasal. Meski begitu, ini adalah pembacaan pertama sidik jari kimia khusus ini pada air dari bintang lain — dan sidik jarinya tidak cocok dengan milik kita.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Dari pengamatan ALMA terhadap komet antarbintang 3I/ATLAS dekat perihelion, batas bawah rasio D/H air $>6.6 \times 10^{-3}$ (skenario konservatif) — sekitar 40× samudra Bumi dan 30× komet Tata Surya tipikal — yang menyiratkan air terbentuk dalam kondisi jauh lebih dingin dan lebih sedikit mengalami pemrosesan termal dibanding komet Tata Surya. Analisis JWST independen sepakat pada arah hasilnya.

Apa yang masuk akal tetapi belum terbukti: Bahwa pengayaan diwarisi langsung dari awan prestellar dingin, dibanding ditetapkan selama pembentukan komet di cakram protoplanet dingin. Kedua skenario cocok; data belum membedakannya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Apa pun tentang kehidupan, teknologi, atau asal buatan; nilai D/H yang presisi (ini batas bawah); identitas atau lokasi bintang induk; mekanisme khusus di balik D/H tinggi; atau bahwa hasil satu epoch ini kebal terhadap variasi koma.

Keterbatasan utama: H_2O tidak terdeteksi langsung, jadi kelimpahan air — dan dengan demikian rasio D/H — disimpulkan secara tidak langsung dari eksitasi metanol, dengan asumsi air adalah pasangan tumbukan dominan dan menggunakan laju tumbukan pendekatan yang menurut penulis sendiri dibatasi buruk; hasilnya merupakan batas satu epoch yang bergantung pada model; sistem induk tidak dapat diidentifikasi.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Keyakinan tinggi bahwa air 3I/ATLAS benar-benar kaya deuterium dan terbentuk lebih dingin daripada komet kita, serta bahwa hal ini sama sekali tidak mengatakan apa pun tentang alien. Keyakinan sedang pada tingkat pengayaan tepatnya, karena berupa batas bawah yang bergantung pada model. Keyakinan rendah pada penyebab dan tempat kelahiran spesifik, yang tetap terbuka. Sikap yang tepat: kekaguman tenang pada "kartu pos kimia" dari sistem bintang lain — bukan misteri, dan bukan pesawat antariksa.

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/