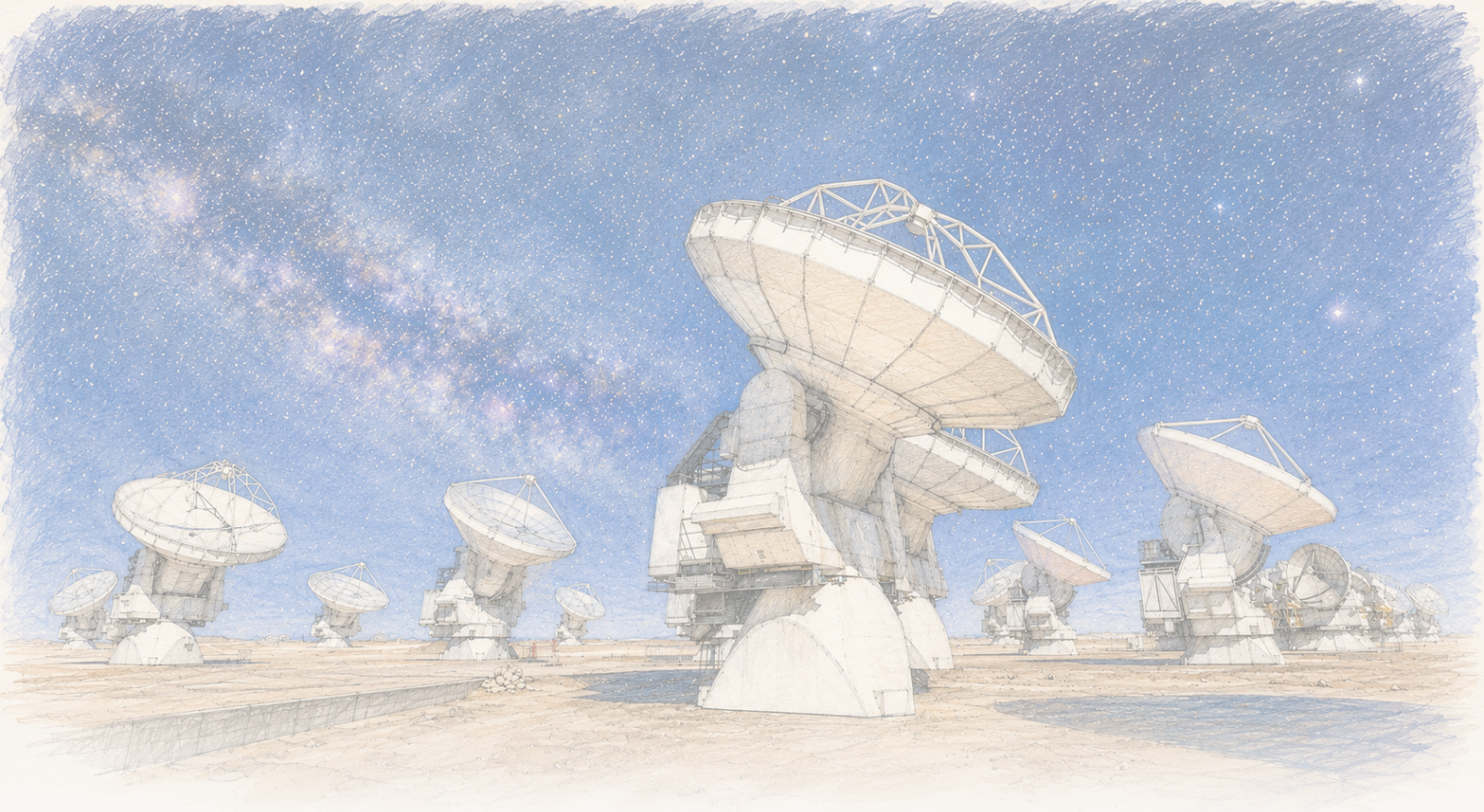


The CLEAN PAPER

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

Interstellar comet 3I/ATLAS-এর জল আমাদরে comet-এর তুলনায় আরও ঠান্ডা পরবিশেে তরৈি হয়ছেলি — অন্য planetary system-এর প্রথম chemical reading-গুলো র একটি

ALMA interstellar comet 3I/ATLAS-এ HDO detect করছে, কন্তিু H2O সরাসরি detect করনেি। ফলে paper exact D/H ratio নয়, model-dependent lower limit দয়ে; limit Solar System-এর সাধারণ comet-এর তুলনায় high এবং very cold ice-formation chemistry-এর সঙ্গে consistent। Result অন্য planetary system-এর volatile chemistry সম্পর্কে real clue, কন্তিু precise water isotope ratio, parent system বা habitability নর্িধারণ করে না।

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

অগ্রপটে ALMA-র DV-59 অ্যান্টেনা; পেছনে moonlit আকাশ পর্যবেক্ষণ করছে অন্য অ্যান্টেনাগুলো। কৃতিত্ব: Alex Pérez / ALMA Observatory।

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

অন্য একটি নক্ষত্র ব্যবস্থা থেকে আসা ধূমকেতু, আর তার জলের রাসায়নিক স্বাক্ষর

মাঝে মাঝে সৌরজগৎ দিয়ে এমন বস্তু যায়, যা কখনোই আমাদের ব্যবস্থার অংশ ছিল না। এগুলো গ্রহাণুপুঞ্জ থেকে ছিটকে আসা শিলা নয়, Oort মেঘ থেকে ফিরে আসা বাঁধা ধূমকেতুও নয়; উন্মুক্ত অতিবৃত্তাকার কক্ষপথে আন্তঃনাক্ষত্রিক মহাকাশ থেকে ঢুকে সূর্যকে ঘুরে আবার চিরতরে বেরিয়ে যায়। এখন পর্যন্ত এমন তিনটি বস্তু দেখা গেছে। 2017-এর ‘Oumuamua এত দ্রুত চলে গিয়েছিল যে তার প্রকৃতি নিয়ে বিতর্ক মেটার আগেই নাগালের বাইরে চলে যায়। 2019-এর 2I/Borisov নিঃসন্দেহে ধূমকেতু। জুলাই 2025-এ আবিষ্কৃত তৃতীয়টি 3I/ATLAS—একটি সক্রিয় coma-যুক্ত আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূমকেতু, যার রসায়ন দূরবীক্ষণযন্ত্র দিয়ে মাপা যায়।

আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূমকেতু মূলত অন্য গ্রহীয় ব্যবস্থার একটি খণ্ড: অন্য নক্ষত্রের চারপাশে তৈরি বরফ ও ধূলি, সম্ভবত বহু আগে মহাকর্ষীয় মিথস্ক্রিয়ায় ব্যবস্থা থেকে ছিটকে বেরিয়ে গ্যালাক্সি পার হয়ে এসেছে, আর আমাদের Sun-এর কাছে এসে বরফ sublimation শুরু করেছে। এই তথ্যটাই অসাধারণ; “কেউ বানিয়েছে কি?” ধরনের speculation দরকার নেই। 3I/ATLAS নিয়ে বাস্তব বৈজ্ঞানিক প্রশ্ন ছিল: অন্য নক্ষত্রের চারপাশে তৈরি উপাদানের রসায়ন পড়ে সেই ব্যবস্থার গঠন শর্ত সম্পর্কে কী জানা যায়?

এবার স্বাক্ষর হলো **পানি**। H_2O-র হাইড্রোজেনের ছোট ভগ্নাংশ হলো **ডিউটেরিয়াম**—অতিরিক্ত নিউট্রন-সহ ভারী হাইড্রোজেন। পানিতে ডিউটেরিয়াম-to-হাইড্রোজেন অনুপাত, **D/H**, এলোমেলো নয়; পানি কোথায় ও কত ঠান্ডায় তৈরি হয়েছে তার রাসায়নিক ইতিহাস বহন করে। খুব ঠান্ডা পরিবেশে ডিউটেরিয়াম সমৃদ্ধকরণ বেশি হতে পারে। ধূমকেতু বিলিয়ন-বছর গভীর-freezer-এর মতো বরফ সংরক্ষণ করতে পারে, তাই

D/H গঠন শর্তরে সূত্র হয়ে থাকে। পৃথবী মহাসাগর ও সৌরজগৎ ধূমকতুের D/H মোটামুটি পরিচিতি পরসিরে; অন্য নক্ষত্ররে উপাদানরে পানি স্বাক্ষর আগে নর্িভরযোগ্যভাবে মাপা হয়নি।

গবষেকরো কী করছেনে

4 নভম্বের 2025—ধূমকতুে Sun-এর কাছরে বন্দিু পার হওয়ার ছয় দনি পর—Chile-র ALMA দয়িে 3I/ATLAS observe করা হয়। মলিমিটিার তরঙ্গদর্ৈঘ্যে coma-র তনি অণু লক্ষ্য করা হয়: সাধারণ পানি (H_2O), ভারী পানি **HDO**—এক হাইড্রোজনেরে জায়গায় ডউিটরেয়িাম—এবং মথিানল (CH_3OH)।

D/H মূলত ভারী পানি বনিাম সাধারণ পানি অনুপাত, তাই দুটরি প্রাচুর্য দরকার। বর্ণালি প্রসারতি cometary বায়ুমণ্ডলরে বকিরিণ-সঞ্চালন মডলে **SUBLIME**-এ মানানসই করে তাপমাত্রা, outflow ও অণু উৎপাদন অনুমান করা হয়। Exoplanet বায়ুমণ্ডল retrieval-এর মতো পরসিংখ্যানগত মডলেংি ব্যবহার করা হয়।

সবচয়েে গুরুত্বপূর্ণ জটলিতা: **ALMA সাধারণ H_2O সরাসরি শনাক্ত করনেি।** HDO ও মথিানল রখো দখো গছে; H_2O রখো শব্দদূষণরে নচিে ছলি। সাধারণ পানি কম ছলি—তা নয়। Detectability প্রাচুর্য ছাড়াও রখো পদার্থবদি্যা ও observing শর্তরে ওপর নর্িভর করে। Targetable H_2O রখো ছলি প্রায় **183 GHz**, যখোনে পৃথবী’s পানি-সমৃদ্ধ বায়ুমণ্ডল প্রবল শোষণ করে। HDO রখো প্রায় **241 GHz**-এ তুলনামূলক পরষ্কিার বায়ুমণ্ডলীয় সময়সীমায়। উপরন্তু পানি চ্যানলে অনকে বশেি শব্দযুক্ত—প্রায় **500 mJy/রশ্মি**, HDO-তে প্রায় **21 mJy/রশ্মি**। ফলে প্রচুর H_2O-ও কুয়াশা ও শব্দদূষণরে নচিে থাকতে পারে। পরে বায়ুমণ্ডলরে ওপরে JWST ইনফ্রারডেে ধূমকতুের পানি শনাক্ত করছে—ALMA অ-শনাক্তকরণ পানি অনুপস্থতিি নয়; নর্িদষ্টি ভূমভিত্তিকি রখোর সীমাবদ্ধতা।

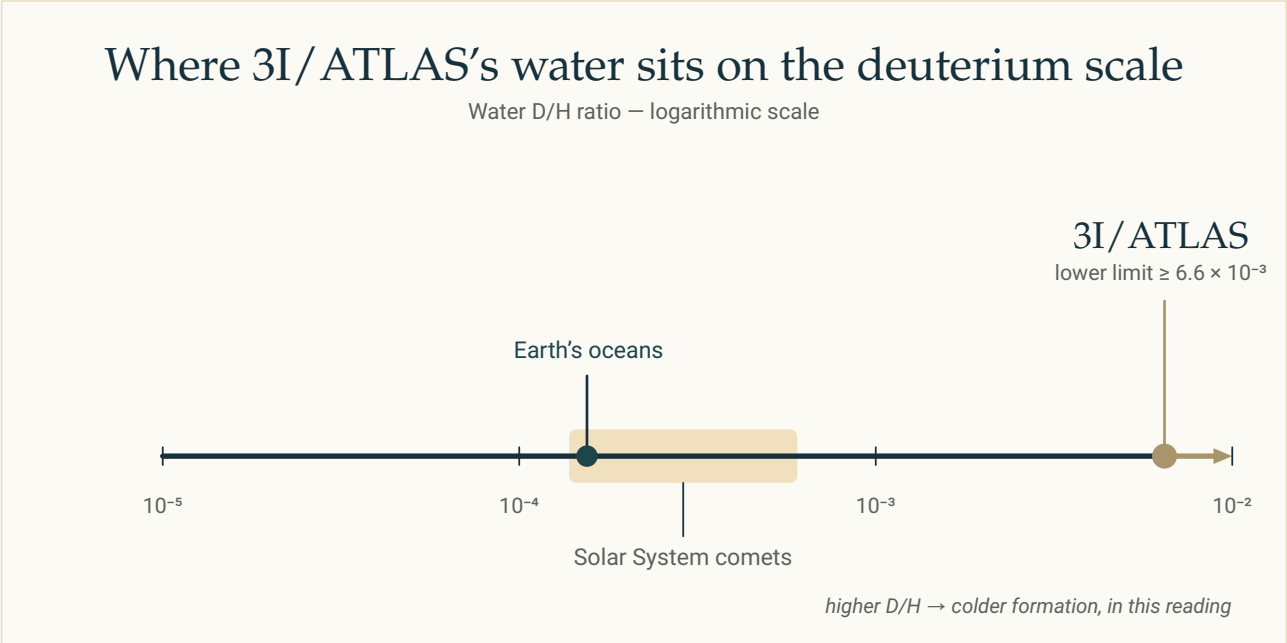
তাই সাধারণ-পানি প্রাচুর্য **indirectly** অনুমান করতে হয়ছে, প্রধানত মথিানল রখো উত্তজেনা থকেে। মথিানল অণু কতবার পানরি সঙ্গে collide করে তা উত্তজেনাকে বদলায়। এটি বাস্তব পরমিাপ শৃঙ্খল, কন্তিু মডলে-নর্িভরশীল; লখেকরো তা স্পষ্ট বলনে।

তারা কী পয়েছেনে

ভারী পানি শনাক্ত করা হয়ছে, সরল পানি নয়। HDO ও কয়কেটি মথিানল রখো পরষ্কিার; H_2O নয়। সাধারণ-পানি উৎপাদন হাররে জন্য উপররে সীমা ব্যবহার করা হওয়ায় D/H ফলও **নচিরে সীমা**, একক নর্িভুল মান নয়।

ডউিটরেয়িাম সমৃদ্ধকরণ খুব বশেি। রক্ষণশীল পরস্থিতিি-তে পানি D/H 6.6×10^{-3}**-এর বশেি**। এটি পৃথবী মহাসাগররে প্রায় **40 গুণরেও বশেি**, সাধারণ সৌরজগৎ ধূমকতুের প্রায় **30 গুণরেও বশেি**। লখেকদরে দুই অনুমানইে 3I/ATLAS পরচিতি পানি D/H বণ্টনরে ডউিটরেয়িাম-সমৃদ্ধ চরমে।

এক রাতরে এলোমলেো ওঠানামা হওয়ার সম্ভাবনা কম মনে হয়। প্রধান ফল একক যুগ হলওে কাছরে ALMA তথ্যরে প্রাথমকি যাচাই বড় দনি-to-দনি swing দখোয় না; এক মাসরে বশেি পরে স্বাধীন JWST বশি্লষেণ-ও ডউিটরেয়িাম-সমৃদ্ধ পানরি একই দকি দখোয়।



ডউিটরেয়িাম পরসিরে 3I/ATLAS-এর পানি সৌরজগৎ ধূমকতেু ও পৃথবিী মহাসাগররে অনকে ওপর। তীরটি **নচিরে সীমা**—সত্য মান আরও বশেি হতে পার। উচ্চ D/H ঠান্ডা গঠন শর্তরে সূত্র, কোনো নর্দিষ্টি "বাড়ি উত্তর দওেয়া" নয়।

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

এর সম্ভাব্য অর্থ কী

উচ্চ পানি D/H সাধারণত খুব ঠান্ডা পরবিশে—প্রায় **30 K-এর নচিে**—বরফ গঠন এবং পরে কম তাপীয় reprocessing-এর চহ্নি। সবচয়েে সোজা ব্যাখ্যা: 3I/ATLAS-এর পানি আমাদরে সৌরজগৎ ধূমকতেুর পানরি চয়েে **আরও ঠান্ডা, কম তাপ-processed শর্ত**-এ গঠতি হয়ছে। অর্থাৎ তার অভভিাবক গ্রহীয় ব্যবস্থার বরফ সমাবশে আমাদরে ব্যবস্থার মতো ছলি না।

কন্তিু সমৃদ্ধকরণ কীভাবে তরৈি হয়ছে তা পরমিাপ আলাদা করতে পার না। পানি অভভিাবক নক্ষত্র ব্যবস্থার জন্মরে ঠান্ডা আণবকি মঘে থকেইে উচ্চ D/H **উত্তরাধকিার পাওয়া** করতে পার; অথবা পরে ঠান্ডা বাইররে protoplanetary ডস্কিে ধূমকতেু তরৈরি সময় অনুপাত সটে হতে পার। দুই পরস্থিতি-িই তথ্যরে সঙ্গে সামঞ্জস্যপূর্ণ। তাই দৃঢ় উপসংহার হলো শর্ত আলাদা; কারণ কোনটি তা অমীমাংসতি।

এটি অন্য গ্রহীয় ব্যবস্থার উপাদানে পানি-গঠন স্বাক্ষর পড়ার প্রথম সুযোগগুলো র একটি, এবং স্বাক্ষর আমাদরে ধূমকতেুর মতো নয়।

এই গবষেণা কী প্রমাণ করে না

- জীবন, প্রযুক্তি বা intent সম্পর্কে **কছিুই বলে না**। আন্তঃনাক্ষত্রকি গতপিথ রসায়নর বস্তুকে কৃত্রমি বানায় না।
- এটি **নর্ভিুল D/H মান নয়**; নচিরে সীমা। H_2O সরাসরি শনাক্ত করা হয়নি; মথিানল উত্তজেনা ও পানি-প্রধান সংঘর্ষ অনুমান থকেে প্রাচুর্য অনুমান করা হয়ছে।
- অভভিাবক নক্ষত্র কোথায়—তা বলে না। উচ্চ D/H গঠন শর্তরে সূত্র, birthplace-এর লক্ষ্যবন্দিু নয়।
- উচ্চ D/H **কনে** হয়ছে মীমাংসা করে না; ঠান্ডা birth-মঘে উত্তরাধকিার এবং ঠান্ডা ডস্কি গঠন—দুটইি সম্ভব।
- এটি এক বস্তু, **এক প্রধান যুগ**-এর পরমিাপ। Corroboration আশাব্যঞ্জক, দীর্ঘ প্রারম্ভকি মান নয়।

প্রমাণ কতটা শক্ত?

দুটি বিষয় আলাদা: দাবি এবং সুনির্দিষ্ট সংখ্যা।

দাবি দৃঢ়। 3I/ATLAS-এর পানি জোরালোভাবে ডিউটেরিয়াম-সমৃদ্ধ—এটি রক্ষণশীল নিচের সীমা, সৌরজগৎ ধূমকেতুর জনসংখ্যার ওপর, স্বাধীন JWST বিশ্লেষণ একই দাবি দেখায়। এই দাবি তুলনামূলক শক্ত।

সুনির্দিষ্ট মাত্রাটি মডেলিংয়ের পুরো শৃঙ্খলের ওপর নির্ভরশীল। H_2O সরাসরি শনাক্ত না হওয়ায় পানির প্রাচুর্য মাথিনলের উত্তেজনা থেকে অনুমান করা হয়েছে। মডেল ধরে যে coma-তে পানিই প্রধান সংঘর্ষ-সঙ্গী; perihelion-এর কাছে এটি যুক্তিসঙ্গত, তবে CO_2-এর অবদান পুরোপুরি বাদ দেওয়া যায় না। সংঘর্ষের হারও আনুমানিক এবং দুর্বলভাবে সীমাবদ্ধ—লেখকেরা নিজেরাই তা বলেছেন। তাই ফলটিকে ইচ্ছাকৃতভাবে একটি সীমা হিসেবে দেওয়া হয়েছে, নির্দিষ্ট পরিমাপবিন্দু হিসেবে নয়।

ব্যাখ্যা ভালোভাবে motivated কিন্তু unique নয়। উচ্চ D/H ঠান্ডা গঠনের স্বাভাবিক ব্যাখ্যা; ঠান্ডা মেঘ উত্তরাধিকার বনাম পরে ডিস্কে বিন্যাস অমীমাংসিত; অভিভাবক ব্যবস্থা শনাক্ত করা যায় না।

কেন এটি গুরুত্বপূর্ণ

পৃথিবীর পানি কোথা থেকে এসেছে এবং forming গ্রহীয় ব্যবস্থায় পানি D/H কীভাবে সেটে হয়—এই প্রশ্নগুলো এতদিন সৌরজগতের তথ্য দিয়েই দেখা হয়েছে। 3I/ATLAS সেই চার্টকে প্রথমবার অন্য নক্ষত্রের উপাদান পর্যন্ত প্রসারিত করে।

ফল বলে না "সব ব্যবস্থা আমাদের মতো।" বরং অন্য ব্যবস্থার বরফ এমন ঠান্ডা শর্তে তৈরি হতে পারে যার স্বাক্ষর আমাদের ধূমকেতুর জনসংখ্যা বহন করে না। গ্রহ-তৈরি কঠিনের রসায়ন ও ইতিহাস নক্ষত্র-to-নক্ষত্র বদলাতে পারে—এর ছোট কিন্তু নির্দিষ্ট প্রমাণ। আলো-বছর দূরে মহাকাশযান পাঠানো ছাড়াই, অন্য ব্যবস্থা থেকে accidental visitor এসে যাওয়ার সময় তার পানি রসায়ন পড়ে এটি জানা গেছে।

সংক্ষিপ্ত সারাংশ

3I/ATLAS তৃতীয় পরিচিত আন্তঃনাক্ষত্রিক বস্তু এবং দ্বিতীয় স্পষ্ট সক্রিয় আন্তঃনাক্ষত্রিক ধূমকেতু। Perihelion-এর কাছে ALMA পর্যবেক্ষণে HDO ও মাথিনল ধরা পড়ে, কিন্তু সাধারণ H_2O রেখা ধরা পড়েনি। মাথিনলের উত্তেজনা মডেল করে সাধারণ পানির প্রাচুর্য অনুমান করে লেখকেরা পানি D/H-এর রক্ষণশীল **নিম্নসীমা** $> 6.6 \times 10^{-3}$ পান—পৃথিবীর মহাসাগরের প্রায় 40 গুণ এবং সাধারণ সৌরজগতীয় ধূমকেতুর প্রায় 30 গুণ। এটি অপেক্ষাকৃত ঠান্ডা ও কম তাপীয়ভাবে প্রক্রিয়াজাত গঠন-পরিবেশের দিকে ইঙ্গিত করে। তবে এটি সরাসরি D/H পরিমাপ নয়: H_2O না ধরা পড়ায় ফলটি মডেল-নির্ভর নিম্নসীমা; ঠান্ডা জন্ম-মেঘ থেকে উত্তরাধিকার আর ঠান্ডা ডিস্কে গঠনের মধ্যে পার্থক্য করা যায় না; মাতৃনক্ষত্রও অজানা। এটি অন্য নক্ষত্রব্যবস্থার পানি-রসায়নের অসাধারণ স্বাক্ষর, ভিনগ্রহী প্রযুক্তির গল্প নয়।

সরাসরি যাচাই

পেপার যা দেখায়: ALMA তথ্য থেকে 3I/ATLAS পানি D/H-এর রক্ষণশীল নিচের সীমা $> 6.6 \times 10^{-3}$; জোরালোভাবে ডিউটেরিয়াম-সমৃদ্ধ পানি; স্বাধীন JWST কাজ একই দিকে সমর্থন করে।

যা সম্ভব, কিন্তু প্রমাণিত নয়: সমৃদ্ধকরণ ঠান্ডা prestellar মেঘ থেকে উত্তরাধিকারসূত্রে পাওয়া, নাকি ঠান্ডা protoplanetary ডিস্কে সেটে—দুটিই সম্ভাব্য।

যা দখোয় না: জীবন/প্রযুক্তি/কৃত্রমি উৎপত্তি; নর্িভুল D/H মান; অভভিাবক নক্ষত্র; উচ্চ D/H-এর unique প্রক্রয়িা; দীর্ঘ-পরভিাষা পরবির্তনশীলতা-মুক্ত ফল।

প্রধান সীমাবদ্ধতা: H_2O সরাসরি শনাক্ত করা হয়নি; মথিানল উত্তজেনা ও সংঘর্ষ মডলে থকেে পানি অনুমান করা; সংঘর্ষ হার অনশ্চিতি; একক প্রধান যুগ; অভভিাবক ব্যবস্থা অজানা।

সাধারণ পাঠকরে আস্থা কতটা হওয়া উচতি? পানি সত্যহি ডউিটরেয়িাম-সমৃদ্ধ এবং আমাদরে ধূমকতেুর তুলনায় colder গঠন ইতহিাস নর্িদশে করে—উচ্চ। সুনর্িদষ্টি সমৃদ্ধকরণ—মাঝারি, কারণ এটি মডলে-নর্িভরশীল নচিরে সীমা। নর্িদষ্টি birthplace/কারণ—কম।

উৎস

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/