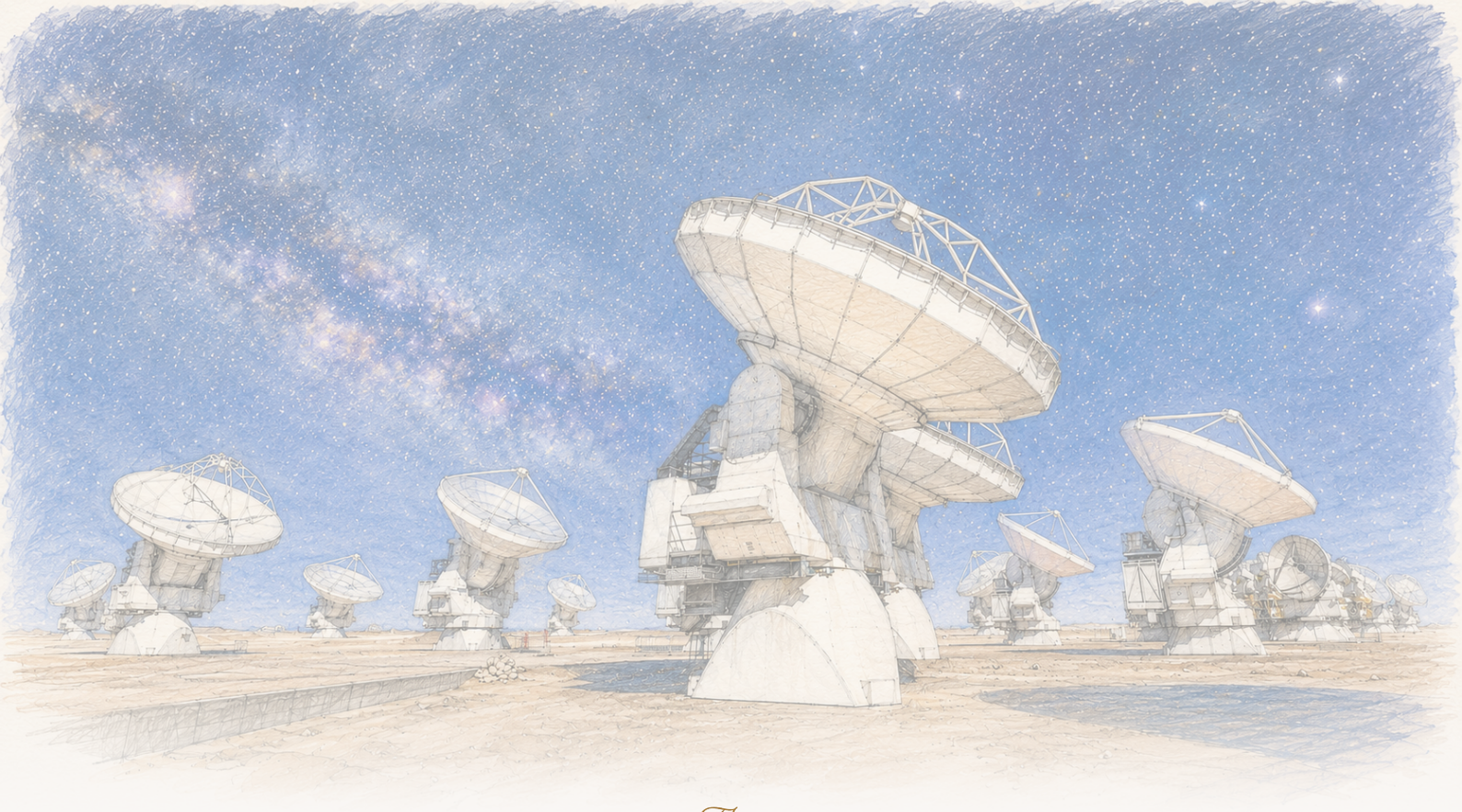


The Clean Paper

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

Міжзоряна комета 3I/ATLAS несе воду, що сформувалася холодніше за воду наших комет — перше хімічне читання іншої планетної системи

За допомогою ALMA астрономи обмежили співвідношення «важкого» та звичайного водню у воді 3I/ATLAS — третього відомого міжзоряного об'єкта — і виявили сильне збагачення дейтерієм: щонайменше приблизно у 40 разів вище за земні океани й у 30 разів вище за типову комету Сонячної системи. Це вказує на воду, яка сформувалася за холодніших умов, ніж вода наших комет. Результат є нижньою межею, отриманою непрямо — саму звичайну воду ALMA безпосередньо не виявила, — і нічого не говорить про життя чи технології: лише про хімію та холод.

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

Антена DV-59 на передньому плані та кілька антен ALMA, що спостерігають нічне небо, освітлене Місяцем. Фото: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Комета від іншої зорі — і відбиток у її воді

Час від часу крізь Сонячну систему пролітає щось, що ніколи їй не належало. Не камінь, який випадково вирвався з поясу астероїдів, і не комета, що повертається з хмари Оорта на своєму довгому гравітаційному «повідку», а об'єкт на відкритій гіперболічній траєкторії: він прилетів із міжзоряного простору, один раз обігне Сонце й піде назавжди. Ми вже бачили три такі об'єкти. Перший, 'Oumuamua у 2017 році, зник майже раніше, ніж усі встигли домовитися, чим він був. Другий, 2I/Borisov у 2019-му, безсумнівно був кометою. Третій, відкритий у липні 2025 року, — 3I/ATLAS, і він прибув з настільки активною комою, що в ній можна було серйозно досліджувати хімію.

Ось факт, який варто втримати до того, як почнеться шум. Міжзоряна комета — буквально уламок іншої планетної системи: лід і пил, що конденсувалися біля якоїсь іншої зорі, найімовірніше давно були викинуті гравітаційним поштовхом, дрейфували Галактикою й випадково пройшли досить близько до нашого Сонця, щоб їхні льоди почали випаровуватися саме там, де телескопи могли дивитися. Це й є

справді дивовижний факт — настільки дивовижний, що йому не потрібна допомога.

Але допомогу він зазвичай отримує. Міжзоряні об'єкти притягують особливий тип задиханих сюжетів — приглушене світло, *а що, як його хтось побудував?* — і 3I/ATLAS не уникнув цього. Чесна відповідь на таке запитання нудна, а нудна відповідь тут цікавіша: це комета. Справжнє питання ніколи не полягало в тому, чи хтось її зробив. Воно тихіше: якщо прочитати хімію речовини, зібраної біля іншої зорі, що вона розповість про родину тієї зорі? І як узагалі її прочитати?

Цього разу інструментом читання стала вода. Вода — це два атоми водню й один кисню, але невелика частина водню є *дейтерієм* — важчим близнюком звичайного водню, атомом із додатковим нейтроном. Співвідношення важкого водню до звичайного у воді, D/H, не випадкове. Хімія значною мірою фіксує його залежно від того, наскільки холодними були умови першого формування води: що холодніша й спокійніша «колиска», то більше дейтерію закріплюється в молекулах. А оскільки комета по суті є глибокою морозильною камерою, здатною тримати лід у холоді мільярди років, D/H її води може зберігати відбиток умов, у яких ця вода утворилася.

Відбитки власної системи ми знаємо досить добре: океани Землі та різні сімейства комет Сонячної системи лежать у порівняно вузькому діапазоні. Але ніхто ще не визначав такий самий відбиток для води, що сформувалася біля *іншої* зорі. Саме це автори спробували прочитати в 3I/ATLAS.

Що зробили автори

4 листопада 2025 року, через шість днів після проходження комети поблизу Сонця, вони спрямували на 3I/ATLAS ALMA — великий масив радіоантен у чилійській пустелі. Телескоп налаштували на слабке міліметрове випромінювання трьох молекул у комі: звичайної води (H_2O), *важкої* води (HDO, де один атом водню замінений дейтерієм) і метанолу (CH_3OH).

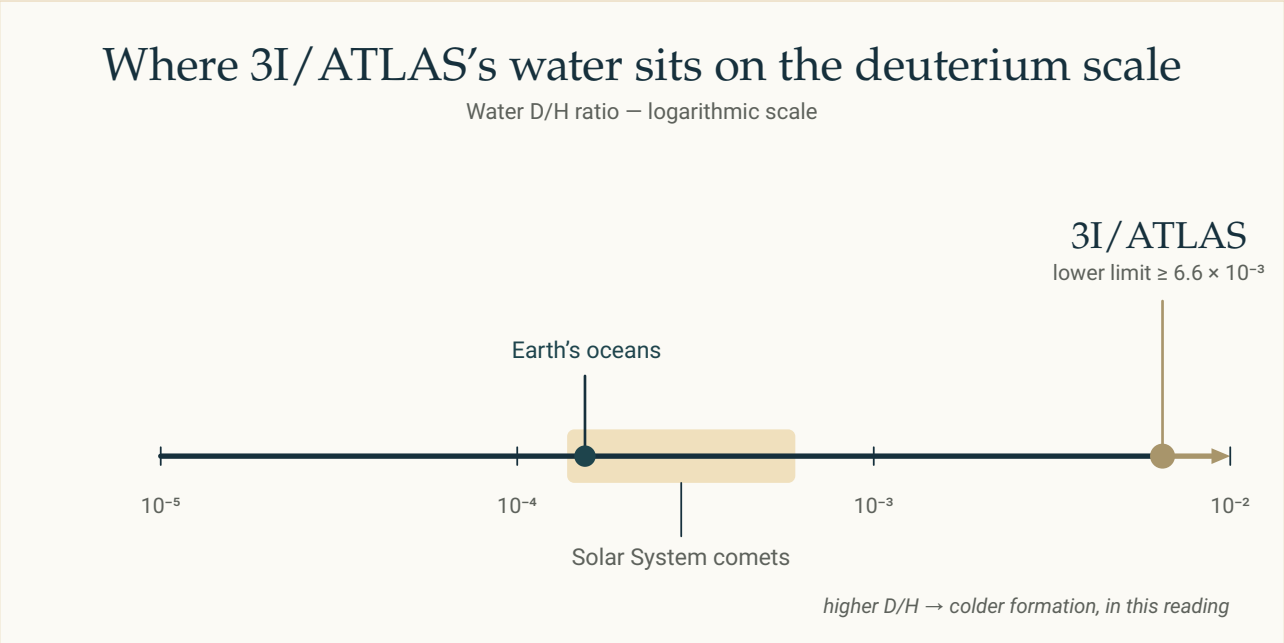
Шукане D/H фактично визначається зі співвідношення важкої та звичайної води, тож потрібні обидві. Спектри пропустили через модель перенесення випромінювання в розширюваній атмосфері комети — код SUBLIME — і підігнали статистичними методами, подібними до тих, якими відновлюють склад атмосфер екзопланет, щоб отримати температуру, швидкість витікання й темп утворення кожної молекули.

Одна проблема визначає все, що йде далі: **саму звичайну воду вони фактично не виявили.** HDO й метанол було видно, а H_2O залишилася нижче шуму. Це не тому, що звичайної води мало — її набагато більше, ніж важкої. Видимість спектральної лінії залежить не лише від кількості молекул, а й від того, наскільки зручно спостерігати саме цю лінію, і тут проти води працювали два чинники. Перший — атмосфера Землі: доступна лінія H_2O поблизу 183 GHz лежить саме там, де водяна пара нашої атмосфери поглинає найсильніше. Дивитися з поверхні Землі на кометну воду в цьому діапазоні трохи схоже на спробу побачити свічку крізь туман. У статті зазначено,

що ці низькоенергетичні водяні смуги сильно поглинаються атмосферою, тоді як лінія важкої води HDO біля 241 GHz потрапляє в чистіше вікно. Другий чинник — чутливість: канал води був набагато шумнішим — близько 500 mJy на промінь проти 21 для HDO, — тому навіть багатий сигнал міг сховатися під шумом. Між атмосферним «туманом» і шумом рясна звичайна вода лишилася нижче порога, тоді як значно рідкісніша важка вода, спіймана в чистому й тихому вікні, проявилася чітко. (З космосу, над атмосферою, ту саму воду бачити набагато легше: JWST пізніше виявив воду комети в інфрачервоному діапазоні після перигелію. Отже, недетекція ALMA стосується однієї конкретної лінії крізь земну атмосферу, а не відсутності води.) Тому кількість звичайної води довелося оцінювати *непрямо* — насамперед за збудженням ліній метанолу, яке залежить від частоти зіткнень молекул метанолу з водою. Це реальне вимірювання, але модельно залежне, і автори говорять про це прямо.

Що вони знайшли

- **Важка вода є, звичайної лінії води немає.** HDO та кілька ліній метанолу чітко виявлено; H_2O — ні. Оскільки D/H спирається на *верхню межу* темпу утворення звичайної води — її навмисно трактують саме так, бо сама лінія води лишилася нижче шуму, — співвідношення дейтерію виходить **нижньою межею**, а не одним точним значенням.
- **Сильне збагачення дейтерієм.** У консервативному сценарії D/H води **більше за** 6.6×10^{-3} — понад приблизно **40 разів** вище за океани Землі й понад приблизно **30 разів** вище за типову комету Сонячної системи. За обома оцінками авторів 3I/ATLAS лежить на самому багатому на дейтерій краю всіх вимірювань D/H води, зроблених дотепер.
- **Імовірно, це не випадковість однієї ночі.** Вимірювання походить з однієї епохи, але попередній перегляд сусідніх даних ALMA не показує великого коливання від дня до дня, а незалежний аналіз JWST для 3I/ATLAS, виконаний більш ніж місяць по тому, вказує в той самий бік — вода багата на дейтерій.



Положення води 3I/ATLAS на шкалі дейтерію: далеко на багатому на дейтерій кінці, вище океанів Землі й усього діапазону комет Сонячної системи, приблизно показаного тут. Стрілка позначає *нижню межу* — справжнє значення може бути ще вищим. Високе D/H — підказка про *холодні умови формування*, а не домашня адреса.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Що це, ймовірно, означає

Високе D/H води — ознака води, яка замерзла за дуже низьких температур, нижче приблизно 30 K, і потім не зазнала сильного теплового перероблення. Тому найчистіше прочитання таке: вода 3I/ATLAS утворилася за *холодніших і спокійніших* умов, ніж вода комет нашої Сонячної системи, а отже батьківська планетна система збирала свої льоди інакше, ніж наша.

Автори обережні з наступним кроком, і ми теж маємо бути. Є два способи отримати настільки багату на дейтерій воду, і це вимірювання не розрізняє їх: вода могла *успадкувати* збагачення від холодної хмари, з якої народилася система, або значення могло встановитися пізніше, під час формування комети в холодному зовнішньому диску. У будь-якому випадку важливий висновок зберігається — умови, що сформували 3I/ATLAS, не були тими самими, що сформували наші комети, — але *чому саме* так сталося, лишається відкритим.

Отже, це перше читання відбитка умов формування води в матеріалі з іншої планетної системи — і цей відбиток не збігається з нашим.

Чого ця робота *не* доводить

- Вона **нічого** не говорить про життя, технології чи намір. Тут немає «об'єкта, який хтось побудував»; «міжзоряний» описує траєкторію, а не історію штучного походження. Це вимірювання хімії води.
- Це **не** точне значення D/H. Це *нижня межа*, а звичайна вода, до якої вона відноситься, не була безпосередньо виявлена: її кількість вивели зі збудження іншої молекули, метанолу, припустивши, що вода є головним партнером зіткнень для метанолу.
- Результат **не** показує, де народився 3I/ATLAS. Батьківську зорю неможливо надійно визначити, а високе D/H — підказка про *умови*, а не адреса.
- Він **не** встановлює, *чому* вода багата на дейтерій. «Успадковано від холодної хмари народження» і «встановлено під час формування диска» однаково сумісні з даними; стаття між ними не обирає.
- Це **один** об'єкт, виміряний в **одну** епоху. Підтверджувальні спостереження обнадіюють, але не дають довгої часової бази.

Наскільки переконливі докази?

Окремо треба зважувати два аспекти: напрямок результату й точне число.

- **Напрямок стійкий.** Те, що вода 3I/ATLAS помітно збагачена дейтерієм, є консервативною нижньою межею, яка лежить вище всієї популяції комет Сонячної системи, і це підтримує незалежний аналіз JWST. Ця частина результату не крихка.
- **Число спирається на ланцюжок моделювання.** Оскільки H_2O не було виявлено, кількість води — а отже й D/H — залежить від непрямого виведення за збудженням метанолу. Це передбачає, що вода є домінантним партнером зіткнень у комі (правдоподібно поблизу перигелію, але внесок CO_2 не можна виключити), і використовує приблизні коефіцієнти зіткнень, які, за визнанням авторів, погано обмежені. Автори позначають усі ці проблеми й навмисно подають результат як межу, а не точне вимірювання.
- **Інтерпретація добре мотивована, але не унікальна.** Холодне формування — природне пояснення високого D/H; чи цей холод був успадкований, чи виник пізніше, невідомо, і батьківську систему не можна ідентифікувати.

Коротко: твердження, що вода формувалася в холоді, має міцну основу; *наскільки* саме холодно й *чому* саме — чесно лишається відкритим.

Чому це важливо

Десятиліттями питання походження земної води — і того, що задає дейтерієвий відбиток води в планетних системах, що формуються, — можна було досліджувати лише за вимірюваннями всередині нашої Сонячної системи. Це перший випадок, коли цю карту розширили матеріалом, який безсумнівно сформувався біля іншої зорі.

Відповідь не така: «скрізь як удома». Навпаки: інша система може сформувати свої льоди за умов, достатньо холодних, щоб залишити відбиток, якого наші комети не мають. Це маленький і конкретний доказ чогось тихо великого: хімія та історія твердих тіл, із яких будуються планети, можуть відрізнятися від зорі до зорі. І ми дізналися це не від апарата, відправленого на багато світлових років, а тому, що спіймали випадковий уламок іншої системи під час його прольоту й прочитали його воду, перш ніж він зник.

Короткий підсумок

3I/ATLAS — третій відомий міжзоряний об'єкт і друга активна міжзоряна комета: шматок іншої планетної системи, що один раз проходить крізь нашу. За допомогою ALMA поблизу найближчого проходження біля Сонця астрономи виявили в її комі важку воду HDO та метанол, але не звичайну H_2O, і з цього вивели співвідношення дейтерію до водню у воді. Воно сильно збагачене дейтерієм: нижня межа перевищує 6.6×10^{-3} — приблизно у 40 разів більше, ніж у земних океанах, і в 30 разів більше, ніж у типовій кометі Сонячної системи. Це вказує на воду, яка сформувалася за холодніших і менш термічно перероблених умов, ніж вода наших комет. Число є модельно залежною нижньою межею, отриманою непрямо, а не прямим вимірюванням, і не може сказати, чи збагачення успадковано від холодної хмари народження, чи встановилося пізніше в холодному диску, а також не визначає походження комети. Попри це, це перше читання саме такого хімічного відбитка води від іншої зорі — і він не збігається з нашим.

Твереза оцінка

Що показує стаття: За спостереженнями ALMA міжзоряної комети 3I/ATLAS поблизу перигелію отримано нижню межу D/H води $>6.6 \times 10^{-3}$ у консервативному сценарії — приблизно 40× земних океанів і 30× типової комети Сонячної системи. Це означає воду, що сформувалася за помітно холодніших і менш термічно перероблених умов, ніж вода комет Сонячної системи. Незалежний аналіз JWST узгоджується з напрямком результату.

Що правдоподібно, але не доведено: Що збагачення було безпосередньо успадковане від холодної дозоряної хмари, а не встановилося під час формування комети в

холодному протопланетному диску. Обидва сценарії підходять; дані їх не розрізняють.

Чого вона не показує: Нічого про життя, технології чи штучне походження; точного значення D/H — це нижня межа; ідентичності або місця батьківської зорі; конкретного механізму високого D/H; або того, що одноепоховий результат повністю нечутливий до мінливості коми.

Головні обмеження: H_2O безпосередньо не виявили, тому кількість води й D/H виводять непрямо зі збудження метанолу, припускаючи воду головним партнером зіткнень і використовуючи приблизні коефіцієнти зіткнень, які самі автори називають погано обмеженими; результат є модельно залежною межею з однієї епохи; батьківська система неідентифікована.

Якої впевненості заслуговує висновок для загального читача? Високої, що вода 3I/ATLAS справді багата на дейтерій і формувалася холодніше, ніж вода наших комет, і що це взагалі нічого не говорить про прибульців. Помірної щодо точного ступеня збагачення — це модельно залежна нижня межа. Низької щодо конкретної причини й місця народження, які лишаються відкритими. Правильна реакція — тихе захоплення хімічною листівкою з іншої зоряної системи, а не таємниця й не космічний корабель.

Джерела

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/