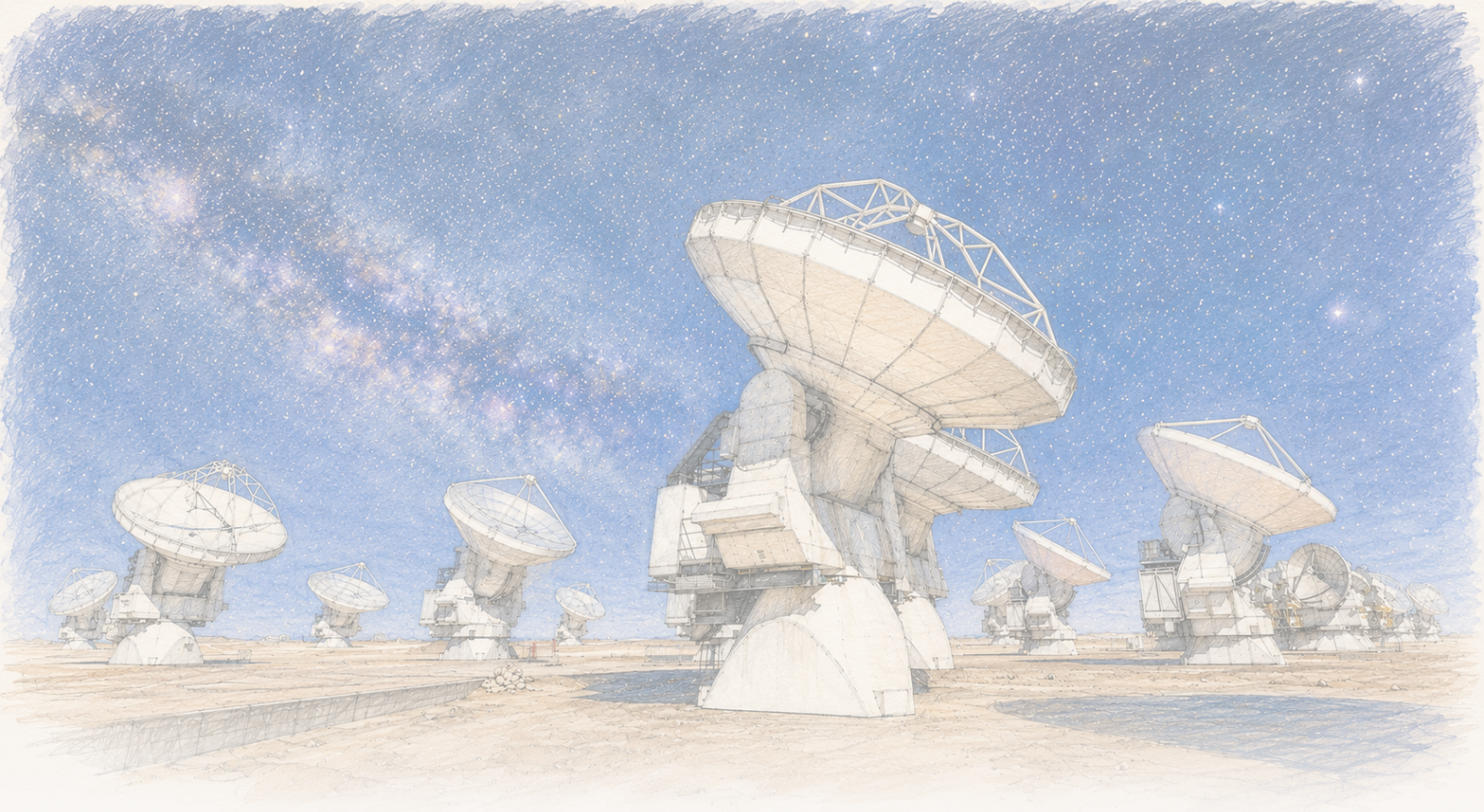


The Clean Paper

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

المذنب بين النجوم 3I/ATLAS يحمل ماءً تكوّن أبرد من مذنباتنا – أول قراءة كيميائية لنظام كوكبي آخر

باستخدام *ALMA*، قيّد الفلكيون نسبة الهيدروجين «الثقيل» إلى العادي في ماء *3I/ATLAS* – ثالث جسم معروف بين النجوم – ووجدوه غنياً جداً بالديوتيريوم: على الأقل نحو 40 مرة محيطات الأرض و30 مرة مذنباً نموذجياً في النظام الشمسي. يشير ذلك إلى ماء تكوّن في ظروف أبرد من مذنباتنا. النتيجة حد أدنى، مشتق بشكل غير مباشر (الماء نفسه لم يُرصد مباشرة)، ولا تقول شيئاً عن الحياة أو التكنولوجيا – بل عن الكيمياء والبرد فقط.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso · 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: 5-02850-026-s41550/1038.10

هوائي DV-59 في المقدمة، مع عدة هوائيات ALMA ترصد سماء الليل المقمرة. Credit: ALMA / Pérez Alex Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 0.4

مذنب من نجم آخر، وبصمة في مائه

بين حين وآخر يمر عبر النظام الشمسي شيء لم يكن لنا قط. ليس صخرة ضالة من حزام الكويكبات، ولا مذنبًا عائدًا من سحابة أورت في رباطه الطويل، بل جسم على مسار مفتوح، زائد القطع — جاء من الفضاء بين النجوم، سيدور مرة واحدة حول الشمس، ثم يغادر إلى الأبد. رأينا الآن ثلاثة. الأول، Oumuamua‘ في 2017، اختفى تقريبًا قبل أن يتفق أحد على ماهيته. الثاني، 2I/Borisov في 2019، كان مذنبًا بلا لبس. الثالث، المكتشف في يوليو 2025، هو 3I/ATLAS — وقد وصل ملفوفًا بذؤابة نشطة بما يكفي لإجراء كيمياء حقيقية عليها.

هذا هو الجزء الذي يستحق التمسك به قبل أن يبدأ الضجيج. المذنب بين النجوم هو، حرفيًا، شظية من نظام كوكبي آخر: جليد وغبار تكثفا حول نجم آخر، وقُذفا على الأرجح منذ زمن بعيد بدفعة جاذبية، ثم انجرفا عبر المجرة وصدف أن مرا قريبين بما يكفي من شمسنا كي تبدأ جليداتهما بالتبخر حيث تستطيع تلسكوباتنا أن تراقب. هذه هي الحقيقة المدهشة فعلًا، وهي مدهشة بما يكفي ولا تحتاج إلى مساعدة.

ومع ذلك تميل إلى الحصول على المساعدة. تجذب الأجسام بين النجوم نوعًا خاصًا من التغطية اللاهثة — الأضواء الخافتة، وعبارة لكن ماذا لو بناه أحد — وحصل 3I/ATLAS على نصيبه. الجواب الصادق على ذلك السؤال هو الممل، والممل أكثر إثارة للاهتمام: إنه مذنب. السؤال الحقيقي لم يكن يومًا هل صنعه أحد. بل كان السؤال الأهدأ — إذا استطعت قراءة كيمياء شيء تكوّن حول نجم آخر، فماذا سيخبرك عن عائلة ذلك النجم؟ وكيف تقرؤه أصلًا؟

أداة القراءة هذه المرة هي الماء. الماء هيدروجينان وأكسجين، لكن جزءًا صغيرًا من هيدروجينه هو ديوتيريوم — توأم أثقل، ذرة هيدروجين عادية تحمل نيوترونًا إضافيًا. نسبة الهيدروجين الثقيل إلى الهيدروجين العادي في الماء، وتكتب D/H، ليست عشوائية. تحددها الكيمياء، إلى حد كبير، بحسب مدى برودة المكان الذي تكوّن فيه الماء أولًا: كلما كان المهد أبرد وأهدأ، حُبس مزيد من الديوتيريوم. ولأن المذنب في جوهره مجمد عميق — يستطيع حفظ جليداته في مخزن بارد لمليارات السنين — يمكن لنسبة D/H في مائه أن تحفظ بصمة الظروف التي تكوّن فيها ذلك الماء.

نعرف بصمات نظامنا جيدًا إلى حد معقول: محيطات الأرض وعائلات مذنبات النظام الشمسي المختلفة تتجمع ضمن نطاق ضيق نسبيًا. ما لم يثبته أحد من قبل هو البصمة نفسها لماء تكوّن حول نجم آخر. هذا ما سعت الورقة إلى قراءته في 3I/ATLAS.

ماذا فعل المؤلفون

وجهوا ALMA — المصفوفة الكبيرة من أطباق الراديو في صحراء تشيلي — نحو 3I/ATLAS في 4 نوفمبر 2025، بعد ستة أيام من دوران المذنب حول الشمس. ضبطوه لالتقاط التوهج الخافت عند أطوال موجية مليمترية لثلاث جزيئات في الذؤابة: الماء العادي (H_2O)، والماء الثقيل (HDO، حيث يكون أحد الهيدروجينين ديوتيريومًا)، والميثانول (CH_3OH).

نسبة D/H التي أرادوها هي، عمليًا، نسبة الماء الثقيل إلى الماء العادي. لذلك كانوا بحاجة إلى الاثنين. ثم أدخلوا الأطياف في نموذج انتقال إشعاعي لغلاف مذنبي متمدد (كود اسمه SUBLIME، وملائموه بآلية إحصائية من النوع المستخدم لاسترجاع مكونات أجواء الكواكب الخارجية، لاستخراج الحرارة، والتدفق الخارج، ومقدار ما كان المذنب ينتجه من كل جزيء.

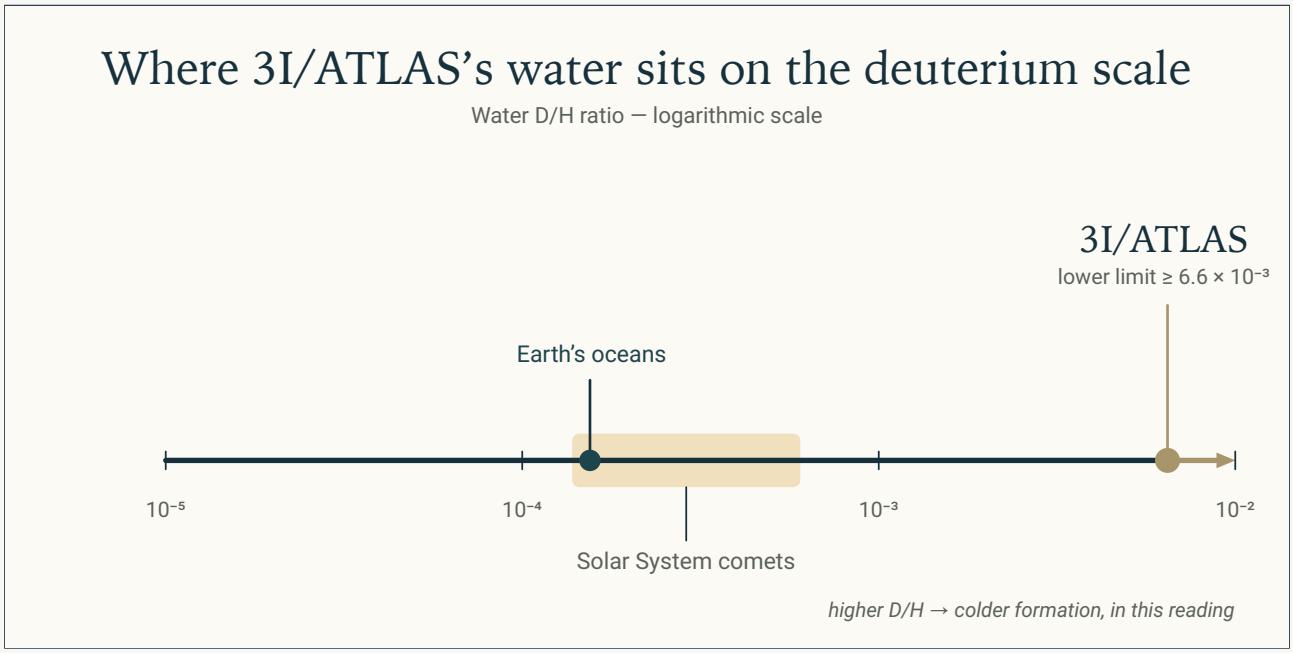
لكن عقبة واحدة تشكل كل ما يأتي: **هم لم يرصدوا الماء فعليًا.** ظهر HDO والميثانول؛ أما H_2O نفسه فبقي دون مستوى الضجيج. ليس ذلك بسبب نقص الماء العادي — فهو أكثر بكثير من النوع الثقيل. ظهور خط طيفي يعتمد لا على كمية الجزيء وحدها، بل على مدى قابلية ذلك الخط المحدد للرصد، وهنا يعمل شيئان ضد خط الماء. الأول هو الغلاف الجوي: خط H_2O الذي كان يمكن استهدافه (قرب 183 GHz) يقع حيث يمتص هواء الأرض المشبع بالماء بقوة، ولذلك تكون قراءة ماء مذنب من الأرض هناك أشبه بمحاولة رؤية شمعة عبر ضباب — تذكر الورقة أن نطاقات الماء منخفضة الطاقة هذه تعاني امتصاصًا جويًا قويًا، بينما يقع خط الماء الثقيل (HDO) قرب 241 GHz في نافذة أنظف. الثاني هو الحساسية: قناة الماء كانت أعلى ضجيجًا بكثير — نحو 500 mJy لكل حزمة مقابل 21 لـ HDO — لذلك يمكن حتى لإشارة وفيرة أن تبقى تحتها. بين الضباب والضجيج بقي الماء العادي الوفير تحت العتبة، بينما ظهر الماء الثقيل الأندر بكثير بوضوح في نافذة نظيفة وهادئة. (من الفضاء، فوق الغلاف الجوي، يسهل رؤية الماء نفسه أكثر بكثير: رصد JWST لاحقًا ماء المذنب في تحت الأحمر، بعد الحضيض — لذلك فإن عدم رصد ALMA يتعلق بذلك الخط الواحد عبر هواء الأرض، لا بغياب الماء.) لذلك كان لا بد من استنتاج كمية الماء العادي بشكل غير مباشر — أساسًا من طريقة إثارة خطوط الميثانول، التي تعتمد على عدد مرات اصطدام جزيئات الميثانول بالماء. هذا قياس حقيقي، لكنه يعتمد على نموذج، والمؤلفون صريحون في ذلك.

ماذا وجدوا

- **ماء ثقيل، لكن لا ماء عادي مرصود.** رُصد HDO وعدة خطوط ميثانول بوضوح؛ ولم يُرصد H_2O. ولأن نسبة D/H تعتمد على حد أعلى لمعدل إنتاج الماء العادي — عومل هكذا عمدًا لأن خط الماء نفسه بقي دون الضجيج — تخرج نسبة الديوتيريوم **حدًا أدنى**، لا قيمة واحدة.
- **إثراء قوي بالديوتيريوم.** في السيناريو المحافظ لديهم، نسبة D/H في الماء **أكبر من 6.6×10^{-3}** — أكثر من نحو **40 مرة** قيمة محيطات الأرض، وأكثر من نحو **30 مرة** قيمة مذنب نموذجي في النظام الشمسي. وبأي من تقديريهم، يقع 3I/ATLAS عند الطرف العالي جدًا

لكل قياسات D/H في الماء حتى الآن.

- **على الأرجح ليست صدفة ليلة واحدة.** القياس من حقبة واحدة، لكن نظرة أولية إلى بيانات ALMA قريبة لا تظهر تغيرًا كبيرًا من يوم إلى يوم، كما أن تحليل JWST مستقل لـ 3I/ATLAS، مأخوذ بعد أكثر من شهر، يشير في الاتجاه نفسه — ماء غني بالديوتيريوم.



مكان ماء 3I/ATLAS على سلم الديوتيريوم: بعيدًا عند الطرف الغني بالديوتيريوم، وراء محيطات الأرض وكل جماعة مذنبات النظام الشمسي (المبينة هنا كنطاق تقريبي). يشير السهم إلى حد أدنى — قد تكون القيمة الحقيقية أعلى. نسبة D/H العالية دليل على ظروف تكوّن باردة، لا عنوان منزل.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 0.4

ماذا يعني هذا على الأرجح

نسبة D/H العالية في الماء هي توقيع ماء تجمد حيث كان الجو باردًا جدًا (دون نحو 30 K ولم يُعاد تشكيله كثيرًا لاحقًا بالحرارة. لذلك فإن القراءة الأنظف هي أن ماء 3I/ATLAS تكوّن في ظروف أبرد وألطف من الماء في مذنبات نظامنا الشمسي — وبالتالي فإن نظامه الكوكبي الأصلي جمع جليداته بطريقة مختلفة عن نظامنا.

المؤلفون حذرون في الخطوة التالية، وينبغي أن نكون كذلك. هناك طريقتان للوصول إلى ماء غني بهذا القدر بالديوتيريوم، وهذا القياس لا يميز بينهما: ربما ورث الماء إثراءه من السحابة الباردة التي وُلد فيها النظام، أو ربما تحدد لاحقًا أثناء تكوّن المذنب في قرص خارجي بارد. في الحالتين تبقى الخلاصة المهمة — الظروف التي شكلت 3I/ATLAS لم تكن ظروف مذنباتنا — لكن السبب يبقى مفتوحًا.

ما لدينا إذن هو أول مرة يقرأ فيها أحد بصمة تكوّن الماء في مادة من نظام كوكبي آخر، ويجد أنها لا تطابق بصمتنا.

ما الذي لا تثبته الورقة

- لا تقول **شيئًا** عن الحياة أو التكنولوجيا أو القصد. لا يوجد "شيء" بُني، "بين نجمي" يصف مسارًا، لا قصة أصل. هذا قياس لكيمياء الماء.
- ليست **قيمة D/H دقيقة.** إنها حد أدنى، والماء المقصود لم يُرصد مباشرة قط — استُنتجت وفرته من إثارة جزيء آخر، الميثانول، بافتراض أن الماء هو الشيء الرئيسي الذي يصطدم به الميثانول.
- لا تكشف أين وُلد 3I/ATLAS. لا يمكن تحديد النجم الأم بثقة، ونسبة D/H العالية دليل على ظروف، لا عنوان منزل.
- لا تحسم لماذا الماء غني بالديوتيريوم. "موروث من سحابة ولادة باردة" و"تحدد أثناء تكوّن القرص" كلاهما يوافق البيانات؛ الورقة لا تختار بينهما.
- إنه **جسم واحد، قيس في حقبة واحدة.** التعضيد مشجع، لا خط أساس طويل.

ما مدى قوة الدليل؟

ينبغي وزن شيئين على حدة: اتجاه النتيجة، والرقم الدقيق.

- **الاتجاه متين.** كون ماء 3I/ATLAS غنيًا بوضوح بالديوتيريوم هو حد أدنى محافظ، يقع أعلى بكثير من كل جماعة مذنبات النظام الشمسي، ويدعمه تحليل JWST مستقل. هذا الجزء ليس هشًا.
- **الرقم يرتكز على سلسلة نمذجة.** لأن O_2H لم يُرصد، فإن وفرة الماء — ومن ثم نسبة D/H — تعتمد على استنتاج الماء بشكل غير مباشر من إثارة الميثانول. يفترض ذلك أن الماء هو الشريك المسيطر في التصادم داخل الذؤابة (معقول قرب الحضيض، لكن مساهمة $_2CO$ لا يمكن استبعادها) ويستخدم معدلات تصادم تقريبية وسيئة التقييد باعترافهم. يذكر المؤلفون كل ذلك ويعرضون النتيجة عمدًا كحد لا كقياس.
- **التفسير مدعوم جيدًا لكنه غير وحيد.** التكوّن البارد هو التفسير الطبيعي لـ D/H عالية؛ هل كانت البرودة موروثة أم مفروضة لاحقًا يبقى غير محسوم، والنظام الأم غير قابل للتحديد.

باختصار: أن الماء تكوّن باردًا أمر ثابت؛ أما كم كان باردًا بالضبط، ولماذا بالضبط، فتروكان بصراحة مفتوحين.

لماذا يهم

على مدى عقود، كان سؤال من أين جاءت مياه الأرض — وما الذي يحدد بصمة الديوتيريوم للماء عبر الأنظمة الكوكبية المتكوّنة — يُجاب عنه كله بقياسات داخل نظامنا الشمسي. هذه أول مرة يُمد فيها ذلك المخطط إلى مادة ثبت أنها تكوّنت حول نجم آخر.

والجواب الذي يعطيه ليس "كل مكان مثل البيت". بل العكس: يستطيع نظام آخر أن يضع جليداته في ظروف باردة بما يكفي لترك بصمة لم تحملها مذنباتنا قط. هذه قطعة صغيرة وملموسة من الدليل على شيء كبير بهدوء — أن كيمياء وتاريخ المواد الصلبة التي تبني الكواكب يمكن أن يختلفا من نجم إلى آخر. وقد جاء ذلك لا من مركبة أُرسلت عبر سنوات ضوئية، بل من التقاط شظية تائهة من نظام آخر أثناء مرورها، وقراءة مائها قبل أن تختفي.

ملخص صافٍ

3I/ATLAS هو ثالث جسم معروف بين النجوم وثاني مذنب نشط بين النجوم — قطعة من نظام كوكبي آخر تمر مرة واحدة عبر نظامنا. باستخدام ALMA قرب أقرب اقتراب للمذنب من الشمس، رصد الفلكيون الماء الثقيل (HDO) والميثانول في ذؤابته لكنهم لم يرصدوا الماء العادي، ومن ذلك استنتجوا نسبة الديوتيريوم إلى الهيدروجين في الماء. وجدوا أنها غنية جدًا بالديوتيريوم — حد أدنى فوق 6.6×10^{-3}، نحو 40 مرة محيطات الأرض و30 مرة مذنبًا نموذجيًا في النظام الشمسي — ما يشير إلى ماء تكوّن في ظروف أبرد وأقل معالجة من مذنبات النظام الشمسي. الرقم حد أدنى حُصل عليه بشكل غير مباشر عبر نموذج، لا قياس مباشر، ولا يستطيع أن يقول هل وُرث الإثراء من سحابة ولادة باردة أم تحدد لاحقًا في قرص بارد، ولا أين جاء المذنب. ومع ذلك فهو أول قراءة لهذه البصمة الكيميائية الخاصة لماء من نجم آخر — والبصمة لا تطابق بصمتنا.

فحص بلا تجميل

ما تظهره الورقة: من رصد ALMA للمذنب بين النجوم 3I/ATLAS قرب الحضيض، حد أدنى لنسبة D/H في مائه قدره $>6.6 \times 10^{-3}$ (في السيناريو المحافظ) — نحو 40× محيطات الأرض و30× مذنب نموذجي في النظام الشمسي — ما يعني ماء تكوّن في ظروف أبرد وأقل معالجة حراريًا من مذنبات النظام الشمسي. تحليل JWST مستقل يوافق الاتجاه.

ما هو معقول لكنه غير مثبت: أن الإثراء وُرث مباشرة من سحابة قبل نجمية باردة، مقابل أن يكون قد تحدد أثناء تكوّن المذنب في قرص كوكبي أولي بارد. كلا السيناريوهين صالح؛ البيانات لا تميز بينهما.

ما لا تظهره: أي شيء عن الحياة أو التكنولوجيا أو أصل اصطناعي؛ قيمة D/H دقيقة (إنها حد أدنى)؛ هوية أو موقع النجم الأم؛ الآلية المحددة وراء D/H العالية؛ أو أن نتيجة حقبة واحدة منيعة من تغير الذؤابة.

القيود الرئيسية: لم يُرصد O_2H مباشرة، لذلك تُستنتج وفرة الماء — ومن ثم نسبة D/H — بشكل غير مباشر من إثارة الميثانول، مع افتراض أن الماء هو المصادم المسيطر واستخدام معدلات تصادم تقريبية يسميها المؤلفون سيئة التقييد؛ النتيجة حد يعتمد على نموذج وحقبة واحدة؛ والنظام الأم غير قابل للتحديد.

ما مقدار الثقة المناسب للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن ماء 3I/ATLAS غني فعلًا بالديوتيريوم وتكوّن أبرد من مذنباتنا، وأن هذا لا يقول شيئًا إطلاقًا عن الكائنات الفضائية. ثقة متوسطة بالدرجة الدقيقة للإثراء، لأنها حد أدنى يعتمد على نموذج. ثقة منخفضة بالسبب المحدد ومكان الولادة، وهما مفتوحان. الموقف المناسب: دهشة هادئة ببطاقة بريد كيميائية من نظام نجمي آخر — لا لغز، ولا سفينة فضاء.

المصادر

(2026) Astronomy Nature
https://doi.org/10.1038/s41550-5-02850-026

07026.2603 arXiv
https://arxiv.org/abs/2603.07026

(06911.2603 arXiv al., et (Cordiner corroboration JWST Independent

https://arxiv.org/abs/2603.06911

2025.A.00002.T) (project archive data ALMA
https://almascience.nrao.edu/aq/