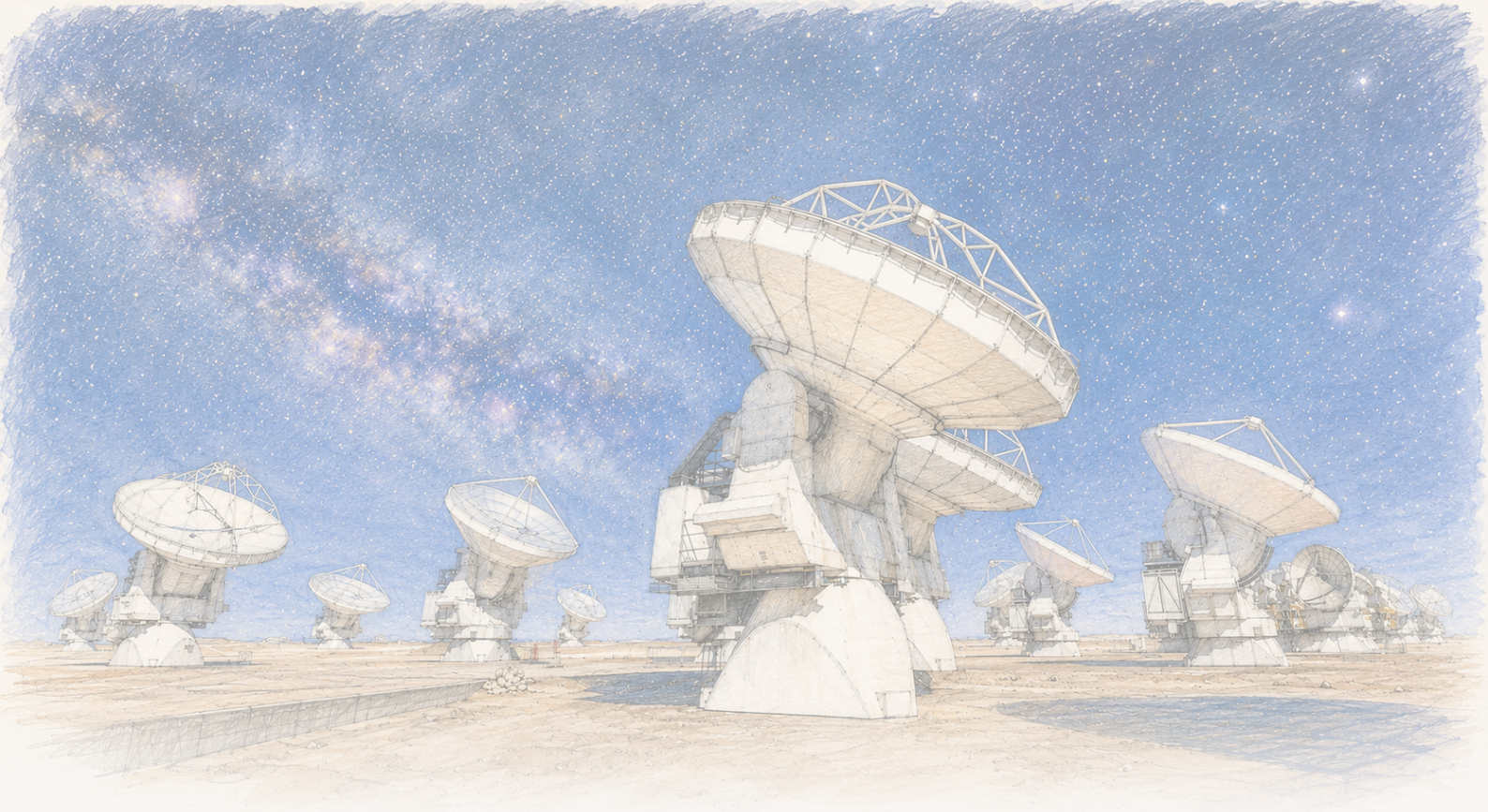




The CLEAN PAPER

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

El cometa interestelar 3I/ATLAS contiene agua que se formó más fría que la de nuestros propios cometas: una primera lectura química de otro sistema planetario

Usando ALMA, los astrónomos acotaron la proporción de hidrógeno "pesado" frente a ordinario en el agua de 3I/ATLAS, el tercer objeto interestelar conocido, y encontraron que está fuertemente enriquecida en deuterio: al menos unas 40 veces los océanos terrestres y 30 veces un cometa típico del Sistema Solar. Eso apunta a agua formada bajo condiciones más frías que las de nuestros propios cometas. El resultado es un límite inferior, derivado indirectamente (el agua misma nunca fue detectada directamente), y no dice nada sobre vida o tecnología: solo sobre química y frío.

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: 10.1038/s41550-026-02850-5



La antena DV-59 en primer plano, con varias antenas de ALMA observando el cielo nocturno iluminado por la Luna. Crédito: Alex Pérez / Observatorio ALMA.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Un cometa de otra estrella, y la huella en su agua

De vez en cuando algo atraviesa el Sistema Solar que nunca fue nuestro. No una roca perdida del cinturón de asteroides, no un cometa que vuelve desde la nube de Oort con su larga correa, sino un objeto en una trayectoria abierta e hiperbólica: uno que llegó desde el espacio interestelar, dará una sola vuelta alrededor del Sol y se irá para siempre. Ya hemos visto tres. El primero, 'Oumuamua, en 2017, se fue casi antes de que nadie se pusiera de acuerdo sobre qué había sido. El segundo, 2I/Borisov, en 2019, era inequívocamente un cometa. El tercero, descubierto en julio de 2025, es 3I/ATLAS, y llegó envuelto en una coma lo bastante activa como para hacer química real.

Esta es la parte que conviene retener antes de que empiece el ruido. Un cometa interestelar es, literalmente, una astilla de otro sistema planetario: hielo y polvo que se condensaron alrededor de otra estrella, que muy probablemente fueron expulsados hace mucho tiempo por una patada gravitatoria, que derivaron por la Galaxia y que por casualidad pasaron lo bastante cerca de nuestro Sol como para que sus hielos empezaran a hervir justo donde nuestros telescopios podían mirar. Ese es el hecho verdaderamente notable, y es lo bastante asombroso como para no necesitar ayuda.

Aun así, suele recibir ayuda. Los objetos interestelares atraen un tipo particular de cobertura exal-

tada: luces atenuadas, el *¿y si alguien lo construyó?*, y 3I/ATLAS tuvo su parte. La respuesta honesta a esa pregunta es la aburrida, y la aburrida es más interesante: es un cometa. La pregunta real nunca fue si alguien lo fabricó. Era la más discreta: si pudieras leer la química de algo ensamblado alrededor de otra estrella, ¿qué te diría sobre la familia de esa estrella? ¿Y cómo podrías siquiera leerla?

El instrumento de lectura, esta vez, es el agua. El agua tiene dos hidrógenos y un oxígeno, pero una pequeña fracción de su hidrógeno es *deuterio*: un gemelo más pesado, un átomo ordinario de hidrógeno que lleva un neutrón extra. La proporción entre hidrógeno pesado e hidrógeno ordinario en el agua, escrita D/H, no es aleatoria. La fija la química, en gran parte según lo frío que era el lugar donde se formó primero el agua: cuanto más fría y tranquila la cuna, más deuterio queda encerrado. Y como un cometa es, en esencia, un congelador profundo, uno que puede conservar sus hielos en almacenamiento frío durante miles de millones de años, la relación D/H de su agua puede preservar una huella de las condiciones bajo las cuales se formó esa agua.

Conocemos razonablemente bien las huellas de nuestro propio sistema: los océanos de la Tierra y las distintas familias de cometas del Sistema Solar se agrupan en una banda bastante estrecha. Lo que nadie había fijado nunca era esa misma huella para agua formada alrededor de *otra* estrella. Eso es lo que este artículo se propuso leer en 3I/ATLAS.

Qué hicieron los autores

Apuntaron ALMA, el gran conjunto de antenas de radio en el desierto chileno, hacia 3I/ATLAS el 4 de noviembre de 2025, seis días después de que el cometa rodeara el Sol. Lo sintonizaron para captar el tenue brillo de longitud de onda milimétrica de tres moléculas en la coma: agua ordinaria (H_2O), agua *pesada* (HDO, donde un hidrógeno es deuterio) y metanol (CH_3OH).

La relación D/H que buscaban es, en la práctica, la proporción de agua pesada respecto de agua ordinaria. Así que necesitaban ambas. Después hicieron pasar los espectros por un modelo de transferencia radiativa de una atmósfera cometaria en expansión (un código llamado SUBLIME) y lo ajustaron con el mismo tipo de maquinaria estadística usada para recuperar la composición de atmósferas de exoplanetas, para extraer la temperatura, el flujo de salida y cuánto producía el cometa de cada molécula.

Un detalle condiciona todo lo que sigue: **en realidad no detectaron el agua**. HDO y metanol aparecieron; la propia H_2O quedó por debajo del ruido. No es por falta de agua ordinaria: hay mucha más que de la clase pesada. Que una línea aparezca depende no solo de cuánta molécula haya, sino de lo observable que sea esa línea concreta, y aquí dos cosas juegan en contra de la línea del agua. La primera es la atmósfera: la línea de H_2O que podían observar (cerca de 183 GHz) cae justo donde el aire terrestre cargado de agua absorbe con más fuerza, así que leer el agua de un cometa desde tierra allí es un poco como intentar ver una vela a través de la niebla; el artículo señala que estas bandas de agua de baja energía sufren una fuerte absorción atmosférica, mientras que la línea de agua pesada (HDO) cerca de 241 GHz cae en una ventana más limpia. La segunda es la sensibilidad: el canal de agua era mucho más ruidoso, unos 500 mJy por haz frente a 21 para HDO, así que incluso una señal abundante podía quedar debajo. Entre la niebla y el ruido, el agua ordinaria abundante quedó

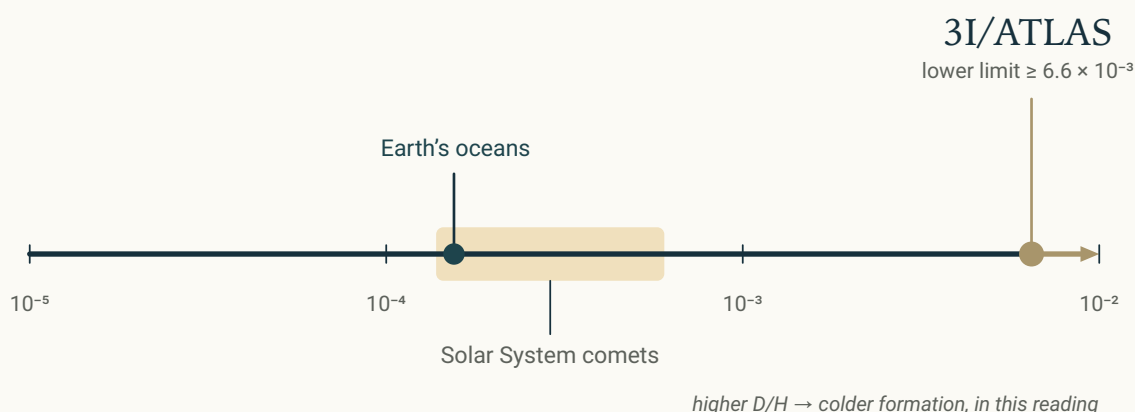
bajo el umbral, mientras que el agua pesada, mucho más rara, atrapada en una ventana limpia y silenciosa, apareció con claridad. (Desde el espacio, por encima de la atmósfera, esa misma agua es mucho más fácil de ver: JWST detectó después el agua del cometa en el infrarrojo, tras el perihelio, de modo que la no detección de ALMA trata de esa línea concreta a través del aire terrestre, no de que faltara agua.) Por eso la cantidad de agua ordinaria tuvo que inferirse *indirectamente*, sobre todo a partir de cómo se excitaban las líneas de metanol, lo que depende de cuántas veces las moléculas de metanol chocan con agua. Es una medición real, pero dependiente de un modelo, y los autores lo dicen explícitamente.

Qué encontraron

- **Agua pesada, pero no agua normal.** HDO y varias líneas de metanol se detectaron con claridad; H₂O no. Como la relación D/H descansa en un *límite superior* para la tasa de producción de agua ordinaria, tratada así deliberadamente porque la línea de agua quedó bajo el ruido, la proporción de deuterio sale como un **límite inferior**, no como un valor único.
- **Un fuerte enriquecimiento en deuterio.** En su escenario conservador, la relación D/H del agua es **mayor que $6,6 \times 10^{-3}$** : más de unas **40 veces** el valor de los océanos terrestres, y más de unas **30 veces** el de un cometa típico del Sistema Solar. Según cualquiera de sus dos estimaciones, 3I/ATLAS queda en el extremo muy alto de todas las mediciones de D/H en agua realizadas hasta ahora.
- **Probablemente no es una casualidad de esa noche.** La medición procede de una sola época, pero una mirada preliminar a datos cercanos de ALMA no muestra una gran oscilación de un día a otro, y un análisis independiente de JWST de 3I/ATLAS, tomado más de un mes después, apunta en la misma dirección: agua rica en deuterio.

Where 3I/ATLAS's water sits on the deuterium scale

Water D/H ratio – logarithmic scale



Dónde queda el agua de 3I/ATLAS en la escala del deuterio: muy hacia el extremo rico en deuterio, más allá de

los océanos terrestres y de toda la población de cometas del Sistema Solar (mostrada aquí como un rango aproximado). La flecha marca un *límite inferior*: el valor real podría ser más alto. Una relación D/H alta es una pista de *condiciones de formación frías*, no una dirección postal.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Qué significa probablemente

Una relación D/H alta en agua es la firma de agua que se congeló donde hacía mucho frío (por debajo de unos 30 K) y que no fue reelaborada intensamente después por calor. Así que la lectura más limpia es que el agua de 3I/ATLAS se formó bajo condiciones *más frías y suaves* que el agua de los cometas de nuestro propio Sistema Solar, y por tanto que su sistema planetario progenitor ensambló sus hielos de manera distinta al nuestro.

Los autores son cuidadosos con el siguiente paso, y nosotros también deberíamos serlo. Hay dos formas de obtener agua tan rica en deuterio, y esta medición no puede distinguirlas: el agua pudo haber *heredado* su enriquecimiento de la nube fría donde nació el sistema, o pudo haber quedado fijado más tarde, durante la formación del cometa en un disco exterior frío. De cualquier modo, la conclusión importante sobrevive: las condiciones que moldearon 3I/ATLAS no fueron las condiciones que moldearon nuestros cometas. Pero el *por qué* queda abierto.

Esto es, entonces, la primera vez que alguien lee la huella de formación del agua en material de otro sistema planetario, y encuentra que no coincide con la nuestra.

Lo que esto *no* demuestra

- No dice **nada** sobre vida, tecnología o intención. No hay un “eso” que haya sido construido; “interestelar” describe una trayectoria, no una historia de origen. Esta es una medición de química del agua.
- **No** es un valor D/H preciso. Es un *límite inferior*, y el agua a la que se refiere nunca fue detectada directamente: su abundancia se infirió a partir de la excitación de otra molécula, el metanol, bajo la suposición de que el agua es lo principal con lo que choca el metanol.
- **No** revela dónde nació 3I/ATLAS. La estrella progenitora no puede identificarse de forma fiable, y una relación D/H alta es una pista de *condiciones*, no una dirección postal.
- **No** resuelve *por qué* el agua es rica en deuterio. “Heredada de una nube natal fría” y “fijada durante la formación en el disco” encajan ambas con los datos; el artículo no elige entre ellas.
- Es **un** objeto, medido en **una** época. La corroboración es alentadora, no una línea de base larga.

¿Qué tan fuerte es la evidencia?

Hay que pesar dos cosas por separado: la dirección del resultado y el número exacto.

- **La dirección es robusta.** Que el agua de 3I/ATLAS sea marcadamente rica en deuterio es un límite inferior conservador, queda muy por encima de toda la población de cometas del Sistema Solar y está apoyado por un análisis independiente de JWST. Esta parte no es frágil.
- **El número descansa en una cadena de modelado.** Como no se detectó H_2O , la abundancia de agua, y por tanto la relación D/H, se apoya en inferir agua indirectamente a partir de la excitación del metanol. Eso supone que el agua es el socio de colisión dominante en la coma (plausible cerca del perihelio, pero no se puede descartar una contribución de CO_2) y usa tasas de colisión aproximadas y, como admiten los autores, mal restringidas. Los autores señalan todo esto y citan deliberadamente el resultado como un límite, no como una medición.
- **La interpretación está bien motivada, pero no es única.** La formación fría es la explicación natural de un D/H alto; si ese frío fue heredado o impuesto más tarde sigue sin resolverse, y el sistema progenitor no puede identificarse.

En resumen: que el agua se formó fría está sobre terreno sólido; exactamente *cuán* fría, y exactamente *por qué*, queda honestamente abierto.

Por qué importa

Durante décadas, la pregunta de dónde vino el agua de la Tierra, y qué fija la huella de deuterio del agua en sistemas planetarios en formación, se ha respondido por completo con mediciones hechas dentro de nuestro propio Sistema Solar. Esta es la primera vez que ese gráfico se extiende a material que demostrablemente se formó alrededor de otra estrella.

La respuesta que da no es “en todas partes es como en casa”. Es lo contrario: otro sistema puede depositar sus hielos bajo condiciones lo bastante frías como para dejar una huella que nuestros cometas nunca llevaron. Eso es una pieza pequeña y concreta de evidencia de algo silenciosamente grande: que la química y la historia de los sólidos que construyen planetas pueden diferir de una estrella a otra. Y no vino de una nave enviada a través de años luz, sino de atrapar un fragmento errante de otro sistema mientras pasaba cerca, y leer su agua antes de que se fuera.

Resumen limpio

3I/ATLAS es el tercer objeto interestelar conocido y el segundo cometa interestelar activo: una pieza de otro sistema planetario que pasa una vez por el nuestro. Usando ALMA cerca del máximo acercamiento del cometa al Sol, los astrónomos detectaron agua pesada (HDO) y metanol en su coma, pero no agua ordinaria, y a partir de eso infirieron la relación deuterio-hidrógeno del agua. Encuentran que está fuertemente enriquecida en deuterio: un límite inferior por encima de $6,6 \times 10^{-3}$,

aproximadamente 40 veces los océanos terrestres y 30 veces un cometa típico del Sistema Solar, lo que apunta a agua formada bajo condiciones más frías y menos procesadas que las de los cometas del Sistema Solar. La cifra es un límite inferior obtenido indirectamente mediante un modelo, no una medición directa, y no puede decir si el enriquecimiento fue heredado de una nube natal fría o fijado más tarde en un disco frío, ni de dónde vino el cometa. Aun así, es la primera lectura de esta huella química concreta para agua de otra estrella, y la huella no coincide con la nuestra.

Control sin bullshit

Lo que muestra el artículo: A partir de observaciones de ALMA del cometa interestelar 3I/ATLAS cerca del perihelio, un límite inferior para su relación D/H del agua de $>6,6 \times 10^{-3}$ (escenario conservador), unas 40× los océanos terrestres y 30× un cometa típico del Sistema Solar, lo que implica agua formada bajo condiciones notablemente más frías y menos procesadas térmicamente que los cometas del Sistema Solar. Un análisis independiente de JWST coincide en la dirección.

Lo que es plausible pero no está probado: Que el enriquecimiento se heredara directamente de una nube preestelar fría, frente a quedar fijado durante la formación del cometa en un disco protoplanetario frío. Ambos escenarios encajan; los datos no los distinguen.

Lo que no muestra: Nada sobre vida, tecnología u origen artificial; un valor D/H preciso (es un límite inferior); la identidad o ubicación de la estrella progenitora; el mecanismo específico detrás del D/H alto; ni que este resultado de una sola época sea inmune a variabilidad de la coma.

Limitaciones principales: H₂O no fue detectada directamente, así que la abundancia de agua, y por tanto la relación D/H, se infiere indirectamente desde la excitación del metanol, suponiendo que el agua es el colisionador dominante y usando tasas de colisión aproximadas que los autores llaman mal restringidas; el resultado es un límite dependiente del modelo y de una sola época; el sistema progenitor no puede identificarse.

¿Cuánta confianza debería tener un lector general? Alta en que el agua de 3I/ATLAS es genuinamente rica en deuterio y se formó más fría que la de nuestros cometas, y en que esto no dice absolutamente nada sobre alienígenas. Moderada sobre el grado exacto de enriquecimiento, que es un límite inferior dependiente del modelo. Baja sobre la causa específica y el lugar de nacimiento, que siguen abiertos. La postura adecuada: asombro tranquilo ante una postal química de otro sistema estelar, no un misterio y no una nave espacial.

Fuentes

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/>