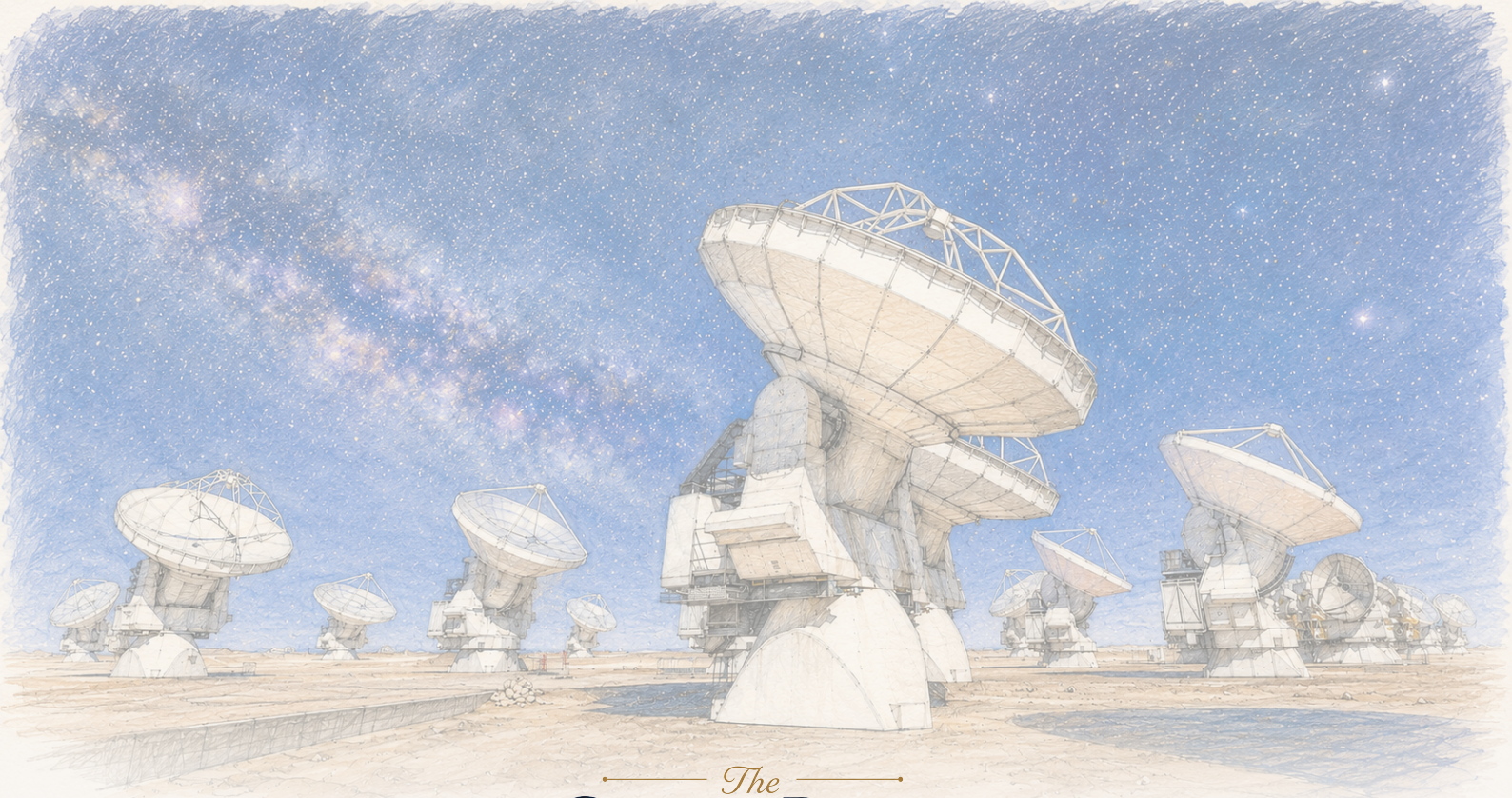


The
CLEAN PAPER

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

Межзвёздная комета 3I/ATLAS несёт воду, сформировавшуюся холоднее воды наших комет — первое химическое чтение другой планетной системы

С помощью ALMA астрономы ограничили соотношение «тяжёлого» и обычного водорода в воде 3I/ATLAS — третьего известного межзвёздного объекта — и обнаружили сильное обогащение дейтерием: как минимум примерно в 40 раз выше земных океанов и в 30 раз выше типичной кометы Солнечной системы. Это указывает на воду, сформировавшуюся в более холодных условиях, чем вода наших комет. Результат является нижней границей, полученной косвенно — саму обычную воду ALMA непосредственно не обнаружила, — и ничего не говорит о жизни или технологиях: только о химии и холоде.

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

Антенна DV-59 на переднем плане и несколько антенн ALMA, наблюдающих ночное небо, освещённое Луной. Фото: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Комета от другой звезды — и отпечаток в её воде

Время от времени сквозь Солнечную систему пролетает что-то, что никогда ей не принадлежало. Не камень, случайно вырвавшийся из пояса астероидов, и не комета, возвращающаяся из облака Оорта на своём длинном гравитационном «поводке», а объект на открытой гиперболической траектории: он прилетел из межзвёздного пространства, один раз обогнёт Солнце и уйдёт навсегда. Мы уже видели три таких объекта. Первый, ‘Oumuamua в 2017 году, исчез почти раньше, чем все успели договориться, чем он был. Второй, 2I/Borisov в 2019-м, несомненно был кометой. Третий, открытый в июле 2025 года, — 3I/ATLAS, и он прибыл с настолько активной комой, что в ней можно было всерьёз изучать химию.

Вот факт, который стоит удержать до того, как начнётся шум. Межзвёздная комета — буквально обломок другой планетной системы: лёд и пыль, конденсировавшиеся возле какой-то другой звезды, вероятно, давным-давно были выброшены гравитационным толчком, дрейфовали по Галактике и случайно прошли достаточно близко к нашему Солнцу, чтобы их льды начали испаряться именно там, где телескопы могли смотреть.

Это и есть по-настоящему удивительный факт — настолько удивительный, что ему не нужна помощь.

Но помощь он обычно получает. Межзвёздные объекты притягивают особый тип придыхательных сюжетов — приглушённый свет, *а что, если его кто-то построил?* — и 3I/ATLAS этого не избежал. Честный ответ на такой вопрос скучен, а скучный ответ здесь интереснее: это комета. Настоящий вопрос никогда не заключался в том, сделал ли её кто-то. Он тише: если прочитать химию вещества, собранного возле другой звезды, что она расскажет о семье той звезды? И как вообще её прочитать?

На этот раз инструментом чтения стала вода. Вода — это два атома водорода и один кислорода, но небольшая часть водорода является *дейтерием* — более тяжёлым близнецом обычного водорода, атомом с дополнительным нейтроном. Соотношение тяжёлого водорода к обычному в воде, D/H, не случайно. Химия в значительной степени фиксирует его в зависимости от того, насколько холодными были условия первоначального образования воды: чем холоднее и спокойнее «колыбель», тем больше дейтерия закрепляется в молекулах. А поскольку комета по сути является глубокой морозильной камерой, способной хранить лёд в холоде миллиарды лет, D/H её воды может сохранять отпечаток условий, в которых эта вода образовалась.

Отпечатки собственной системы мы знаем довольно хорошо: океаны Земли и разные семейства комет Солнечной системы лежат в сравнительно узком диапазоне. Но никто ещё не определял такой же отпечаток для воды, сформировавшейся возле *другой* звезды. Именно это авторы попытались прочитать в 3I/ATLAS.

Что сделали авторы

4 ноября 2025 года, через шесть дней после прохождения кометы вблизи Солнца, они направили на 3I/ATLAS ALMA — большой массив радиоантенн в чилийской пустыне. Телескоп настроили на слабое миллиметровое излучение трёх молекул в коме: обычной воды (H_2O), *тяжёлой* воды (HDO, где один атом водорода заменён дейтерием) и метанола (CH_3OH).

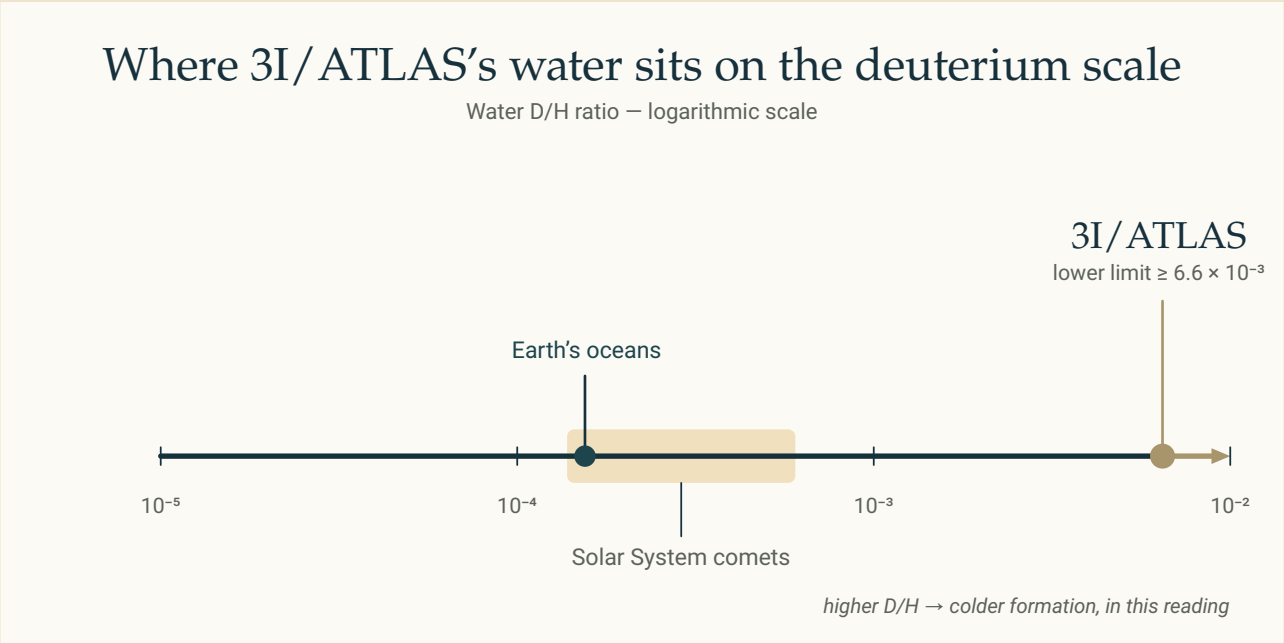
Искомое D/H фактически определяется из соотношения тяжёлой и обычной воды, поэтому нужны обе. Спектры пропустили через модель переноса излучения в расширяющейся атмосфере кометы — код SUBLIME — и подогнали статистическими методами, похожими на те, которыми восстанавливают состав атмосфер экзопланет, чтобы получить температуру, скорость истечения и темп образования каждой молекулы.

Одна проблема определяет всё, что идёт дальше: **саму обычную воду они фактически не обнаружили.** HDO и метанол были видны, а H_2O осталась ниже шума. Это не потому, что обычной воды мало — её намного больше, чем тяжёлой. Видимость спектральной линии зависит не только от количества молекул, но и от того, насколько удобно наблюдать именно эту линию, и здесь против воды работали два фактора. Первый — атмосфера Земли: доступная линия H_2O около 183 GHz лежит именно там, где водяной

пар нашей атмосферы поглощает сильнее всего. Смотреть с поверхности Земли на кометную воду в этом диапазоне немного похоже на попытку увидеть свечу сквозь туман. В статье отмечено, что эти низкоэнергетические водяные полосы сильно поглощаются атмосферой, тогда как линия тяжёлой воды HDO около 241 GHz попадает в более чистое окно. Второй фактор — чувствительность: канал воды был намного шумнее — около 500 mJy на луч против 21 для HDO, — поэтому даже богатый сигнал мог спрятаться под шумом. Между атмосферным «туманом» и шумом обильная обычная вода осталась ниже порога, тогда как гораздо более редкая тяжёлая вода, пойманная в чистом и тихом окне, проявилась отчётливо. (Из космоса, над атмосферой, ту же воду видеть намного легче: JWST позднее обнаружил воду кометы в инфракрасном диапазоне после перигелия. Поэтому недетекция ALMA относится к одной конкретной линии сквозь земную атмосферу, а не к отсутствию воды.) Количество обычной воды пришлось оценивать *косвенно* — прежде всего по возбуждению линий метанола, которое зависит от частоты столкновений молекул метанола с водой. Это реальное измерение, но зависящее от модели, и авторы говорят об этом прямо.

Что они обнаружили

- **Тяжёлая вода есть, обычной линии воды нет.** HDO и несколько линий метанола чётко обнаружены; H_2O — нет. Поскольку D/H опирается на *верхнюю границу* темпа образования обычной воды — её намеренно трактуют именно так, потому что сама линия воды осталась ниже шума, — соотношение дейтерия получается **нижней границей**, а не одним точным значением.
- **Сильное обогащение дейтерием.** В консервативном сценарии D/H воды **больше** 6.6×10^{-3} — более чем примерно **в 40 раз** выше океанов Земли и более чем примерно **в 30 раз** выше типичной кометы Солнечной системы. По обеим оценкам авторов 3I/ATLAS лежит на самом богатом дейтерием краю всех измерений D/H воды, сделанных до сих пор.
- **Вероятно, это не случайность одной ночи.** Измерение происходит из одной эпохи, но предварительный просмотр соседних данных ALMA не показывает большого колебания день ото дня, а независимый анализ JWST для 3I/ATLAS, выполненный более чем месяц спустя, указывает в ту же сторону — вода богата дейтерием.



Положение воды 3I/ATLAS на шкале дейтерия: далеко на богатом дейтерием конце, выше океанов Земли и всего диапазона комет Солнечной системы, приблизительно показанного здесь. Стрелка обозначает *нижнюю границу* — истинное значение может быть ещё выше. Высокое D/H — подсказка о *холодных условиях формирования*, а не домашний адрес.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Что это, вероятно, означает

Высокое D/H воды — признак воды, замёрзшей при очень низких температурах, ниже примерно 30 K, а затем не подвергшейся сильной тепловой переработке. Поэтому наиболее прямой вывод таков: вода 3I/ATLAS образовалась в *более холодных и спокойных* условиях, чем вода комет нашей Солнечной системы, а значит, родительская планетная система собирала свои льды иначе, чем наша.

Авторы осторожны со следующим шагом, и мы тоже должны быть. Есть два способа получить настолько богатую дейтерием воду, и это измерение не различает их: вода могла *унаследовать* обогащение от холодного облака, из которого родилась система, или значение могло установиться позднее, во время формирования кометы в холодном внешнем диске. В любом случае важный вывод сохраняется — условия, сформировавшие 3I/ATLAS, были не такими, как условия формирования наших комет, — но *почему именно* так произошло, остаётся открытым.

Итак, это первое чтение отпечатка условий формирования воды в материале из другой планетной системы — и этот отпечаток не совпадает с нашим.

Чего эта работа *не* доказывает

- Она **ничего** не говорит о жизни, технологиях или намерении. Здесь нет «объекта, который кто-то построил»; «межзвёздный» описывает траекторию, а не историю искусственного происхождения. Это измерение химии воды.
- Это **не** точное значение D/H. Это *нижняя граница*, а обычная вода, к которой она относится, не была непосредственно обнаружена: её количество вывели из возбуждения другой молекулы, метанола, предполагая, что вода является главным партнёром столкновений для метанола.
- Результат **не** показывает, где родился 3I/ATLAS. Родительскую звезду невозможно надёжно определить, а высокое D/H — подсказка об *условиях*, а не адрес.
- Он **не** устанавливает, *почему* вода богата дейтерием. «Унаследовано от холодного облака рождения» и «установилось во время формирования диска» одинаково совместимы с данными; статья между ними не выбирает.
- Это **один** объект, измеренный в **одну** эпоху. Подтверждающие наблюдения обнадёживают, но не дают длинной временной базы.

Насколько убедительны доказательства?

Отдельно нужно взвешивать два аспекта: направление результата и точное число.

- **Направление устойчиво.** То, что вода 3I/ATLAS заметно обогащена дейтерием, является консервативной нижней границей, лежащей выше всей популяции комет Солнечной системы, и это поддерживает независимый анализ JWST. Эта часть результата не хрупкая.
- **Число опирается на цепочку моделирования.** Поскольку H_2O не была обнаружена, количество воды — а значит, и D/H — зависит от косвенного вывода по возбуждению метанола. Это предполагает, что вода является доминирующим партнёром столкновений в коме (правдоподобно вблизи перигелия, но вклад CO_2 нельзя исключить), и использует приблизительные коэффициенты столкновений, которые, по признанию авторов, плохо ограничены. Авторы отмечают все эти проблемы и намеренно представляют результат как границу, а не точное измерение.
- **Интерпретация хорошо мотивирована, но не уникальна.** Холодное формирование — естественное объяснение высокого D/H; был ли этот холод унаследован или возник позднее, неизвестно, и родительскую систему идентифицировать нельзя.

Коротко: утверждение, что вода формировалась в холоде, имеет прочную основу; *насколько* именно холодно и *почему* именно — честно остаётся открытым.

Почему это важно

Десятилетиями вопрос происхождения земной воды — и того, что задаёт дейтериевый отпечаток воды в формирующихся планетных системах, — можно было исследовать только по измерениям внутри нашей Солнечной системы. Это первый случай, когда эту карту расширили материалом, который несомненно сформировался возле другой звезды.

Ответ не таков: «везде как дома». Напротив: другая система может сформировать свои льды в условиях, достаточно холодных, чтобы оставить отпечаток, которого наши кометы не имеют. Это маленькое и конкретное доказательство чего-то тихо большого: химия и история твёрдых тел, из которых строятся планеты, могут различаться от звезды к звезде. И мы узнали это не от аппарата, отправленного на много световых лет, а потому, что поймали случайный обломок другой системы во время его пролёта и прочитали его воду, прежде чем он исчез.

Краткий итог

3I/ATLAS — третий известный межзвёздный объект и вторая активная межзвёздная комета: кусок другой планетной системы, один раз проходящий через нашу. С помощью ALMA возле ближайшего прохождения у Солнца астрономы обнаружили в её коме тяжёлую воду HDO и метанол, но не обычную H_2O, и из этого вывели соотношение дейтерия к водороду в воде. Оно сильно обогащено дейтерием: нижняя граница превышает 6.6×10^{-3} — примерно в 40 раз больше, чем в земных океанах, и в 30 раз больше, чем в типичной комете Солнечной системы. Это указывает на воду, сформировавшуюся в более холодных и менее термически переработанных условиях, чем вода наших комет. Число является зависимой от модели нижней границей, полученной косвенно, а не прямым измерением, и не может сказать, унаследовано ли обогащение от холодного облака рождения или установилось позднее в холодном диске, а также не определяет происхождение кометы. Несмотря на это, это первое чтение именно такого химического отпечатка воды от другой звезды — и он не совпадает с нашим.

Проверка без прикрас

Что показывает статья: По наблюдениям ALMA межзвёздной кометы 3I/ATLAS вблизи перигелия получена нижняя граница D/H воды >6.6×10^{-3} в консервативном сценарии — примерно 40$\times$ земных океанов и 30$\times$ типичной кометы Солнечной системы. Это означает воду, сформировавшуюся в заметно более холодных и менее термически переработанных условиях, чем вода комет Солнечной системы. Независимый анализ

JWST согласуется с направлением результата.

Что правдоподобно, но не доказано: Что обогащение было непосредственно унаследовано от холодного дозвёздного облака, а не установилось во время формирования кометы в холодном протопланетном диске. Оба сценария подходят; данные их не различают.

Чего она не показывает: Ничего о жизни, технологиях или искусственном происхождении; точного значения D/H — это нижняя граница; идентичности или места родительской звезды; конкретного механизма высокого D/H; или того, что результат одной эпохи полностью нечувствителен к изменчивости комы.

Главные ограничения: H_2O непосредственно не обнаружили, поэтому количество воды и D/H выводят косвенно из возбуждения метанола, предполагая воду главным партнёром столкновений и используя приблизительные коэффициенты столкновений, которые сами авторы называют плохо ограниченными; результат является зависимой от модели границей из одной эпохи; родительская система не идентифицирована.

Какой уверенности заслуживает вывод для широкого читателя? Высокой в том, что вода 3I/ATLAS действительно богата дейтерием и формировалась холоднее, чем вода наших комет, и что это вообще ничего не говорит об инопланетянах. Умеренной относительно точной степени обогащения — это зависимая от модели нижняя граница. Низкой относительно конкретной причины и места рождения, которые остаются открытыми. Правильная реакция — тихое восхищение химической открыткой из другой звёздной системы, а не тайна и не космический корабль.

Источники

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/