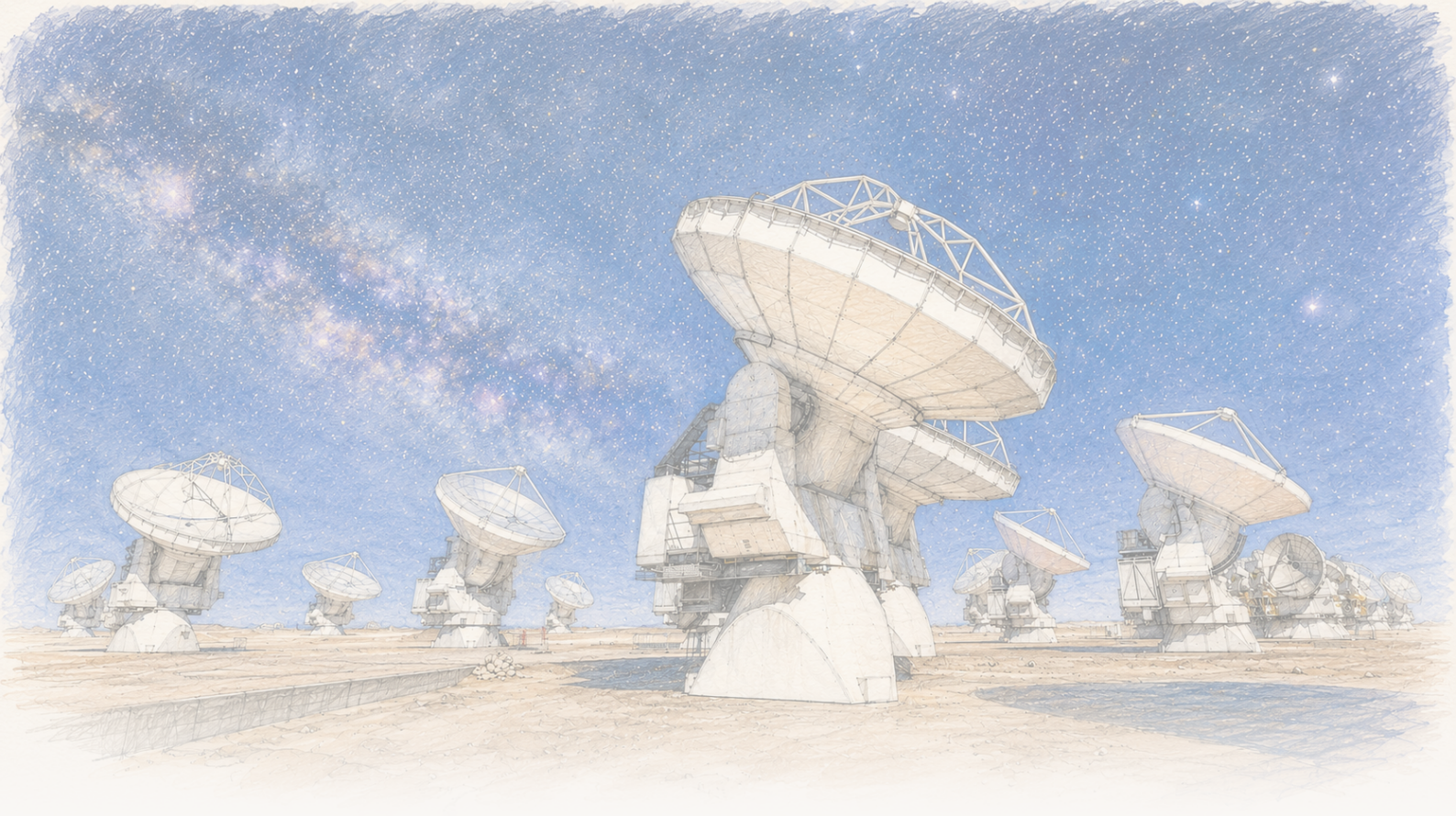




The CLEAN PAPER

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

성간 혜성 3I/ATLAS 의 물은 우리 혜성보다 더 차가운 곳에서 만들어졌다—다른 행성계의 첫 물 화학 지문

천문학자들은 ALMA 를 이용해 세 번째로 알려진 성간 천체 3I/ATLAS 의 물에서 ‘무거운’ 수소와 보통 수소의 비율을 제약했고, 중수소가 매우 풍부하다는 사실을 발견했다. 지구 바다보다 최소 약 40 배, 전형적인 태양계 혜성보다 30 배 높은 수준이다. 이는 우리 혜성보다 더 차가운 조건에서 만들어진 물을 가리킨다. 다만 결과는 하한이며 물 자체는 직접 검출되지 않고 간접적으로 추론됐다. 생명이나 기술에 관한 결과가 아니라 오직 화학과 추위에 관한 결과다.

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



앞쪽에는 DV-59 안테나가 있고, 여러 ALMA 안테나가 달빛이 비치는 밤하늘을 관측하고 있다. 출처: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

다른 별에서 온 혜성, 그리고 그 물에 남은 지문

가끔 태양계에는 애초부터 우리의 것이 아니었던 무언가가 떨어져 들어온다. 소행성대에서 튀어나온 돌도, 아주 긴 궤도를 따라 오르트 구름에서 돌아오는 혜성도 아니다. 열린 쌍곡선 궤도를 따라 성간공간에서 들어와 태양을 한 번 돌아보고는 영원히 떠나는 천체다. 지금까지 세 개를 보았다. 첫 번째는 2017 년의 ‘Oumuamua였다. 사람들이 그것이 무엇이었는지 합의하기도 전에 거의 사라져버렸다. 두 번째인 2019 년의 2I/Borisov는 누가 봐도 혜성이었다. 세 번째는 2025 년 7 월 발견된 3I/ATLAS다. 이 천체는 실제 화학 분석을 할 수 있을 만큼 활발한 코마에 둘러싸인 채 찾아왔다.

잡음이 끼어들기 전에 한 가지는 확실히 기억해둘 만하다. 성간 혜성은 말 그대로 다른 행성계의 조각이다. 다른 별 주변에서 응결한 얼음과 먼지가 아주 오래전 중력적 충격으로 그 계에서 튕겨나왔을 가능성이 크고, 은하를 떠돌다가 우연히 우리 태양 가까이 지나가게 됐다. 그리고 바로 우리의 망원경이 지켜보는 곳에서 얼음이 기화하기 시작했다. 이것이 진짜 놀라운 사실이다. 그 자체로 충분히 경이로워서 다른 이야기를 덧붙일 필요가 없다.

하지만 대개는 덧붙여진다. 성간 천체에는 유난히 숨 가쁜 보도가 따라붙는다. 조명을 어둡게 하고 혹시 누군가 만든 것이라면? 이라고 묻는 식이다. 3I/ATLAS도 예외가 아니었다. 그 질문에 대한 정직한 답은 재미 없어 보이는 쪽이고, 오히려 그 평범한 답이 더 흥미롭다. 이것은 혜성이다. 진짜 질문은 누가 만들었느냐

가 아니었다. 훨씬 조용한 질문이었다. 다른 별 주변에서 만들어진 물질의 화학을 읽을 수 있다면 그 별의 행성 가족에 대해 무엇을 알 수 있을까? 그리고 애초에 어떻게 읽을 수 있을까?

이번에 읽어내는 도구는 물이다. 물은 수소 두 개와 산소 하나로 이루어져 있지만, 수소의 일부는 중수소다. 보통 수소보다 무거운 쌍둥이로, 수소 원자에 중성자가 하나 더 들어 있다. 물 속의 중수소와 보통 수소의 비율, 즉 D/H 는 무작위가 아니다. 화학 반응에 의해 주로 그 물이 처음 만들어졌을 때 얼마나 추웠는지에 따라 정해진다. 더 차갑고 조용한 환경일수록 중수소가 더 많이 들어간다. 혜성은 본질적으로 거대한 냉동고다. 얼음을 수십억 년 동안 차갑게 보존할 수 있으므로, 혜성 물의 D/H 비율에는 그 물이 형성된 조건의 지문이 남을 수 있다.

우리 태양계의 지문은 비교적 잘 알고 있다. 지구의 바다와 여러 계열의 태양계 혜성들은 대체로 꽤 좁은 범위에 모여 있다. 하지만 다른 별 주변에서 만들어진 물의 같은 지문은 누구도 제대로 측정한 적이 없었다. 이 논문이 3I/ATLAS 에서 읽으려 한 것이 바로 그것이다.

연구진이 한 일

연구진은 2025 년 11 월 4 일, 혜성이 태양을 가장 가까이 돈 지 6 일 뒤, 칠레 사막에 펼쳐진 대형 전파망원경 배열 ALMA를 3I/ATLAS 로 향했다. 그리고 코마에서 세 분자가 내는 희미한 밀리미터파 복사를 잡도록 주파수를 맞췄다. 보통 물 (H_2O), 중수 (HDO , 수소 하나가 중수소인 물), 그리고 메탄올 (CH_3OH) 이다.

연구진이 원하는 D/H 비율은 사실상 중수와 보통 물의 비율이므로 둘 다 필요했다. 그런 다음 팽창하는 혜성 대기의 복사전달 모델 (SUBLIME 이라는 코드) 에 스펙트럼을 넣고, 외계행성 대기 조성을 추정할 때와 비슷한 통계적 방법으로 적합시켜 온도와 유출 속도, 그리고 혜성이 각 분자를 얼마나 방출하는지 추정했다.

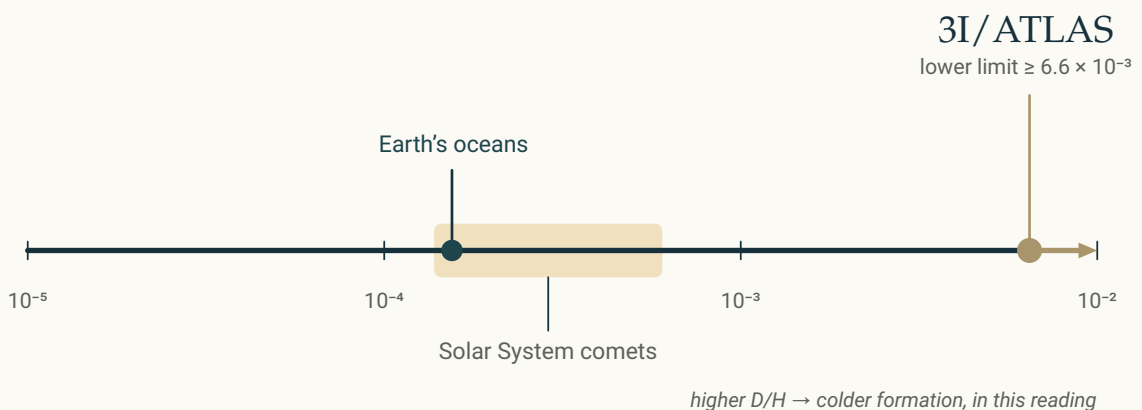
그런데 이후 모든 해석을 좌우하는 문제가 하나 있다. **연구진은 실제로 보통 물을 검출하지 못했다.** HDO 와 메탄올은 나타났지만 H_2O 자체는 잡음 아래에 머물렀다. 보통 물이 부족해서 그런 것은 아니다. 중수보다 훨씬 많다. 어떤 분자의 선이 보이느냐는 양만으로 결정되지 않고, 그 특정 선이 얼마나 관측하기 쉬운지에도 달려 있다. 여기서는 두 가지가 물 선에 불리하게 작용했다. 첫째는 지구 대기다. 관측할 수 있었던 약 183 GHz 의 H_2O 선은 지구 대기 중 수증기가 특히 강하게 흡수하는 곳에 놓여 있다. 지상에서 혜성의 물을 이 선으로 보는 것은 안개 너머 촛불을 보는 것과 비슷하다. 논문도 낮은 에너지의 이 물 밴드가 강한 대기 흡수를 받는다고 설명한다. 반면 약 241 GHz 의 중수 (HDO) 선은 더 깨끗한 창에 있다. 둘째는 감도다. 물 채널의 잡음은 훨씬 컸다. 빔당 약 500 mJy 로, HDO 의 21 mJy 와 비교하면 압도적으로 시끄러웠다. 그래서 풍부한 물 신호조차 그 아래에 묻힐 수 있었다. 대기의 “안개” 와 큰 잡음 때문에 흔한 보통 물은 검출 한계 아래에 남았고, 훨씬 희귀한 중수는 오히려 깨끗하고 조용한 관측 창에서 선명하게 보였다. 지구 대기 위 우주에서는 같은 물이 훨씬 보기 쉽다. 실제로 JWST 는 이후 근일점 통과 뒤 적외선에서 혜성의 물을 검출했다. 따라서 ALMA 의 미검출은 물이 없다는 뜻이 아니라, 지구 대기를 통과해 그 한 개의 선을 보기 어려웠다는 뜻이다. 결국 보통 물의 양은 간접적으로 추론해야 했다. 주로 메탄올 선의 여기 상태를 이용했는데, 이는 메탄올 분자들이 물 분자와 얼마나 자주 충돌하는지에 달려 있다. 실제 측정에 기반한 방법이지만 모델 의존적이며, 저자들도 이를 명확히 밝힌다.

무엇을 발견했나

- 중수는 검출됐지만 보통 물은 검출되지 않았다. HDO와 여러 메탄올 선은 분명하게 잡혔지만 H_2O 는 보이지 않았다. D/H 비율 계산은 보통 물 생성물의 상한에 의존한다. 물 선 자체가 잡음 아래였기 때문에 의도적으로 상한으로 취급한 것이다. 따라서 중수소 비율은 하나의 정확한 값이 아니라 **하한**으로 나온다.
- 중수소가 크게 농축되어 있다. 보수적인 시나리오에서 물의 D/H 비율은 6.6×10^{-3} **보다 크다**. 지구 바다의 값보다 약 **40 배 이상**, 전형적인 태양계 혜성보다 약 **30 배 이상** 높다. 두 가지 추정 방법 어느 쪽을 써도 3I/ATLAS는 지금까지 측정된 물 D/H 가운데 가장 높은 끝에 놓인다.
- 그날 밤만의 우연일 가능성은 낮아 보인다. 측정은 한 시점뿐이지만, 인접한 날짜의 ALMA 자료를 예비적으로 살펴보면 하루 사이 큰 변화가 없고, 한 달 넘게 뒤에 독립적으로 수행된 JWST 분석도 같은 방향, 즉 중수소가 풍부한 물을 가리킨다.

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

Water D/H ratio — logarithmic scale



중수소 척도에서 3I/ATLAS의 물이 어디에 놓이는지 보여준다. 지구의 바다와 태양계 혜성 전체의 대략적인 범위를 넘어, 중수소가 매우 풍부한 쪽에 있다. 화살표는 정확한 값이 아니라 하한임을 나타낸다. 실제 값은 더 높을 수 있다. 높은 D/H 비율은 차가운 형성 조건의 단서이지 출생지 주소가 아니다.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

이것이 아마 뜻하는 것

물의 D/H 비율이 높다는 것은 매우 추운 곳, 대략 30 K 이하에서 얼었고 이후 열에 의해 심하게 재가공되지 않은 물의 특징이다. 따라서 가장 자연스러운 해석은 3I/ATLAS의 물이 우리 태양계 혜성의 물보다 더 차갑고 온화한 조건에서 형성됐다는 것이다. 그 말은 이 혜성의 모행성계가 우리 태양계와는 다른 방식으로 얼음을 만들었다는 뜻이기도 하다.

저자들은 다음 단계에서 조심스럽고, 우리도 그래야 한다. 이렇게 중수소가 풍부한 물을 만드는 경로는 둘이고, 이번 측정만으로는 구분할 수 없다. 물이 그 행성계가 태어난 차가운 분자운에서부터 농축 상태를 물려받았을 수도 있고, 나중에 차가운 외곽 원반에서 혜성이 형성될 때 그 비율이 정해졌을 수도 있다. 어느 쪽이든 중요한 결론은 남는다. 3I/ATLAS 를 만든 조건은 우리 혜성을 만든 조건과 같지 않았다. 하지만 왜 그런지는 열려 있다.

그러므로 이번 결과의 핵심은 다른 행성계에서 온 물질의 물 형성 지문을 처음으로 읽었고, 그 지문이 우리의 것과 다르다는 점이다.

이것이 증명하지 않는 것

- 생명, 기술, 의도에 대해 **아무것도 말하지 않는다**. 누군가 만든 “그것”이 있는 것이 아니다. “성간”은 궤도를 설명하는 말이지 기원 서사를 뜻하지 않는다. 이것은 물의 화학 측정이다.
- 정확한 하나의 D/H 값을 얻은 것이 **아니다**. 이것은 하한이고, 그 비율에 쓰인 보통 물은 직접 검출되지 않았다. 물의 양은 다른 분자인 메탄올의 여기 상태에서 추론했으며, 물이 메탄올과 충돌하는 주된 분자라는 가정이 들어간다.
- 3I/ATLAS 가 어디에서 태어났는지 **알려주지 않는다**. 모항성을 신뢰성 있게 특정할 수 없고, 높은 D/H는 환경 조건의 단서이지 출생지 주소가 아니다.
- 물이 왜 중수소가 풍부한지 **결정하지 않는다**. “차가운 출생 분자운에서 물려받았다”와 “차가운 원반에서 형성될 때 정해졌다”는 설명 모두 데이터와 맞으며, 논문은 둘 중 하나를 고르지 않는다.
- 이것은 **하나의** 천체를 **한 시점**에서 측정한 결과다. 다른 관측이 같은 방향을 가리키는 것은 고무적이지만, 긴 시간에 걸친 연속 자료는 아니다.

근거는 얼마나 탄탄한가?

결과가 가리키는 방향과 정확한 수치를 따로 평가해야 한다.

- **방향은 견고하다**. 3I/ATLAS 의 물이 현저히 중수소가 풍부하다는 결론은 보수적으로 잡은 하한이며, 태양계 혜성 전체보다 훨씬 높고, 독립적인 JWST 분석도 같은 방향을 지지한다. 이 부분은 쉽게 무너지지 않는다.
- **정확한 수치는 모델링 사슬에 의존한다**. H_2O 를 검출하지 못했기 때문에 물의 양과 따라서 D/H 비율은 메탄올의 여기 상태에서 물을 간접 추론하는 데 기대고 있다. 이는 근일점 부근에서 물이 코마의 주요 충돌 상대라는 가정을 쓴다. 그럴듯한 가정이지만 CO_2 의 기여를 배제할 수 없고, 사용된 충돌률도 근사치이며 저자들이 인정하듯 제약이 좋지 않다. 연구진은 이 모든 점을 명시하고, 그래서 결과를 측정값이 아니라 의도적으로 한계값으로 제시한다.
- **해석은 충분한 근거가 있지만 유일하지 않다**. 높은 D/H 의 자연스러운 설명은 차가운 형성 환경이다. 다만 그 차가운 조건을 태어날 때부터 물려받았는지 나중에 원반에서 겪었는지는 해결되지 않았고, 모행성계도 특정할 수 없다.

짧게 말하면, 물이 차갑게 형성됐다는 결론은 탄탄하다. 정확히 얼마나 차가웠는지, 그리고 정확히 왜 그런지는 정직하게 열어두고 있다.

왜 중요한가

수십 년 동안 지구의 물이 어디에서 왔는지, 그리고 형성 중인 행성계에서 물의 중수소 지문이 무엇으로 정해지는지를 묻는 연구는 전부 우리 태양계 안에서 얻은 측정에 의존했다. 이번에는 처음으로 그 도표가 분명히 다른 별 주변에서 만들어진 물질까지 확장됐다.

그리고 답은 “어디나 우리 집과 같다”가 아니다. 정반대다. 다른 행성계는 우리 혜성에서는 볼 수 없는 지문을 남길 정도로 차가운 조건에서 얼음을 만들 수 있다. 행성을 만드는 고체 물질의 화학과 역사가 별마다 다를 수 있다는, 작지만 구체적인 증거다. 그것을 얻기 위해 광년을 건너 우주선을 보낸 것도 아니다. 다른 행성계에서 우연히 튀어나온 조각이 우리 옆을 지나갈 때 붙잡아, 사라지기 전에 그 물을 읽어낸 것이다.

핵심 요약

3I/ATLAS 는 세 번째로 알려진 성간 천체이자 두 번째로 확인된 활동성 성간 혜성으로, 다른 행성계의 한 조각이 우리 태양계를 한 번 지나가는 천체다. 천문학자들은 혜성이 태양에 가장 가까이 접근한 무렵 ALMA 로 코마의 중수 (HDO) 와 메탄올을 검출했지만 보통 물은 직접 검출하지 못했고, 이를 바탕으로 물의 중수소/수소 비율을 추론했다. 결과는 중수소가 매우 풍부하다. 하한이 6.6×10^{-3} 을 넘으며, 지구 바다보다 약 40 배, 전형적인 태양계 혜성보다 약 30 배 높다. 이는 태양계 혜성보다 더 차갑고 열적 재가공이 적은 환경에서 물이 형성됐음을 가리킨다. 하지만 이 수치는 직접 측정값이 아니라 모델을 통해 간접적으로 얻은 하한이며, 중수소 농축이 차가운 출생 분자운에서 물려받은 것인지 나중에 차가운 원반에서 정해진 것인지, 또는 혜성이 정확히 어느 별에서 왔는지는 말해주지 못한다. 그럼에도 다른 별에서 온 물에 대해 이 특정 화학 지문을 읽어낸 것은 처음이며, 그 지문은 우리의 것과 다르다.

과장 없이 보면

논문이 보여주는 것: 근일점 부근의 성간 혜성 3I/ATLAS 를 ALMA 로 관측해 물의 D/H 비율에 대해 보수적 시나리오에서 $>6.6 \times 10^{-3}$ 의 하한을 얻었다. 지구 바다의 약 40 배, 전형적인 태양계 혜성의 약 30 배로, 태양계 혜성보다 눈에 띄게 더 차갑고 열적 가공이 적은 조건에서 형성된 물을 가리킨다. 독립적인 JWST 분석도 같은 방향을 지지한다.

그렇듯하지만 입증되지 않은 것: 이 중수소 농축이 차가운 전별 분자운에서 직접 물려받은 것인지, 아니면 차가운 원시행성계 원반에서 혜성이 형성될 때 정해진 것인지. 두 시나리오 모두 데이터와 맞고 구분되지 않는다.

보여주지 않는 것: 생명·기술·인공 기원에 관한 어떤 증거, 정확한 D/H 값 (하한이다), 모항성의 정체나 위치, 높은 D/H 를 만든 구체적 메커니즘, 또는 한 시점의 결과가 코마 변화와 무관하다는 보장.

주요 한계: H₂O 가 직접 검출되지 않아 물의 양과 D/H 비율을 메탄올 여기 상태에서 간접 추론했다. 이때 물이 주된 충돌 상대라는 가정과, 저자들 스스로 제약이 좋지 않다고 설명하는 근사 충돌률을 사용한다. 결과는 한 시점에서 얻은 모델 의존적 하한이며, 모행성계는 특정할 수 없다.

일반 독자는 어느 정도 확신해도 되는가? 3I/ATLAS 의 물이 실제로 중수소가 풍부하고 우리 혜성의 물보

다 더 차가운 조건에서 형성됐으며, 이것이 외계인과는 아무 상관이 없다는 데에는 높은 확신을 가져도 된다. 정확한 농축 정도는 모델 의존적 하한이므로 중간 정도의 확신이 적절하다. 구체적인 원인과 출생지는 여전히 열려 있어 확신이 낮다. 가장 적절한 태도는 우주선 미스터리가 아니라, 다른 별에서 온 화학적 업서에 조용히 감탄하는 것이다.

출처

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/>