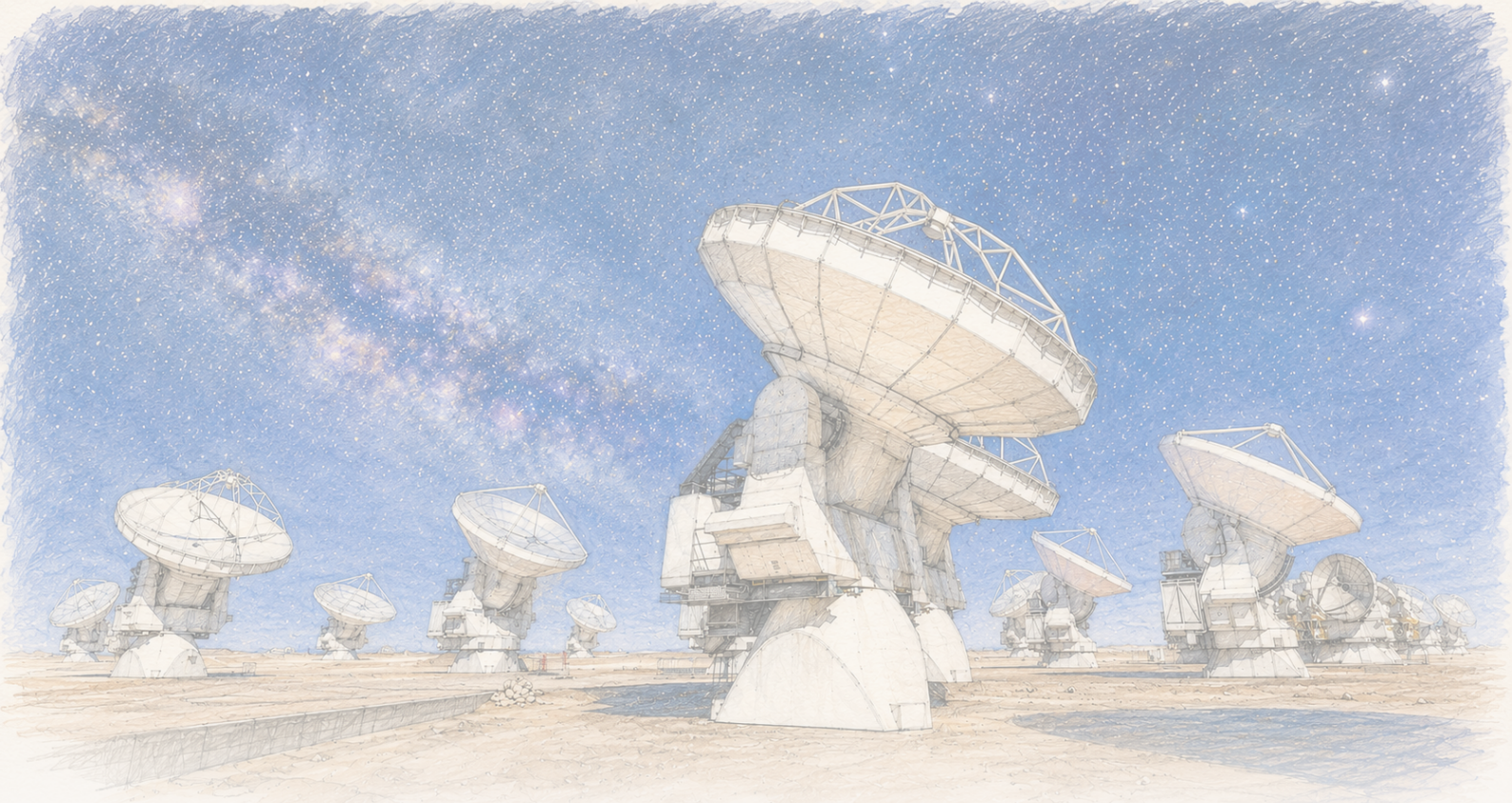




The CLEAN PAPER

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

Kometi 3I/ATLAS ya kutoka nyota nyingine ina maji yaliyoundwa katika baridi zaidi kuliko kometi zetu — usomaji wa kwanza wa kemia ya mfumo mwingine wa sayari

Kwa kutumia ALMA, wanaastronomia waliwekea mipaka uwiano wa hidrojeni “nzito” kwa hidrojeni ya kawaida katika maji ya 3I/ATLAS — kitu cha tatu kinachojulikana kutoka anga kati ya nyota — na wakapata ongezeko kubwa la deuterium: angalau karibu mara 40 ya bahari za Dunia na mara 30 ya kometi ya kawaida ya Mfumo wa Jua. Hilo linaelekeza kwenye maji yaliyoundwa katika hali baridi zaidi kuliko kometi zetu. Matokeo ni kikomo cha chini kilichotolewa kwa njia isiyo ya moja kwa moja (maji yenyewe hayakugunduliwa moja kwa moja), na hayasemi chochote kuhusu uhai au teknolojia — yanahusu kemia na baridi pekee.

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



Antena ya DV-59 ikiwa mbele, huku antena nyingi za ALMA zikitazama anga la usiku lenye mwanga wa mwezi. Picha: Alex Pérez / ALMA Observatory.

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Kometi kutoka nyota nyingine, na alama katika maji yake

Mara chache, kitu ambacho hakikuwa cha mfumo wetu hupita katika Mfumo wa Jua. Si mwamba uliopotoka kutoka ukanda wa asteroidi, wala kometi inayorudi kutoka wingu la Oort kwa mzunguko wake mrefu, bali kitu kinachofuata njia wazi ya haipabola — kilichotoka anga kati ya nyota, kitazunguka Jua mara moja na kuondoka milele. Sasa tumeona vitatu. Cha kwanza, ‘Oumuamua, mwaka 2017, kilikuwa kimeondoka karibu kabla ya watu kukubaliana kilikuwa nini. Cha pili, 2I/Borisov, mwaka 2019, bila shaka kilikuwa kometi. Cha tatu, kilichogunduliwa Julai 2025, ni 3I/ATLAS — na kilifika kikiwa kimezungukwa na coma yenye shughuli za kutosha kufanya uchanganuzi halisi wa kemia.

Hili ndilo jambo la kushika kabla kelele hazijaanza. Kometi ya kutoka mfumo mwingine wa nyota ni, kwa maana halisi, kipande cha mfumo mwingine wa sayari: barafu na vumbi vilivyoganda karibu na nyota nyingine, ambavyo huenda vilitupwa nje zamani na msukumo wa uvutano, vikazunguka Galaksi, kisha kwa bahati vikapita karibu vya kutosha na Jua letu ili barafu yake ianze kuvukiza mahali hasa darubini zetu zingeweza kutazama. Huo ndio ukweli wa ajabu, na unashangaza vya kutosha bila kuongezewa tamasha.

Hata hivyo, tamasha huongezwa. Vitu vya kutoka anga kati ya nyota huvutia aina fulani ya habari yenye msisimko kupita kiasi — mwanga hupunguzwa na kuulizwa *lakini vipi ikiwa mtu alikitengeneza* — na 3I/ATLAS ilipata sehemu yake. Jibu la kweli kwa swali hilo ni lile linaloonekana kuchosha, na ndilo lenye kuvutia zaidi: ni kometi. Swali halisi halikuwa kamwe kama mtu alikitengeneza. Lilikuwa tulivu zaidi — ukiweza kusoma kemia ya kitu kilichoundwa karibu na nyota nyingine, kingekuambia nini kuhusu familia ya nyota hiyo? Na ungesomaje kemia hiyo?

Kifaa cha kusomea safari hii ni maji. Maji yana hidrojeni mbili na oksijeni moja, lakini sehemu ndogo ya hidrojeni yake ni *deuterium* — pacha mzito zaidi, yaani atomu ya kawaida ya hidrojeni yenye nyutroni moja ya ziada. Uwiano wa hidrojeni nzito kwa hidrojeni ya kawaida katika maji, unaoandikwa D/H, si wa kubahatisha. Kwa kiasi kikubwa huwekwa na kemia kulingana na ubaridi wa mahali maji yalipoundwa mara ya kwanza: mahali pa mwanzo panapokuwa baridi na tulivu zaidi, deuterium nyingi zaidi hunaswa. Na kwa kuwa kometi kimsingi ni jokofu kubwa — linaloweza kuhifadhi barafu zake kwa mabilioni ya miaka — uwiano wa D/H wa maji yake unaweza kuhifadhi alama ya hali ambayo maji hayo yaliundwa.

Tunazijua kwa kiwango kizuri alama za mfumo wetu: bahari za Dunia na familia mbalimbali za kometi za Mfumo wa Jua hukusanyika katika safu nyembamba kiasi. Kile ambacho hakuna aliyewahi kupima kwa uhakika ni alama hiyo hiyo ya maji yaliyoundwa karibu na *nyota nyingine*. Hicho ndicho makala hii ililenga kusoma katika 3I/ATLAS.

Waandishi walifanya nini

Walielekeza ALMA — safu kubwa ya antena za redio katika jangwa la Chile — kwa 3I/ATLAS tarehe 4 Novemba 2025, siku sita baada ya kometi kuzunguka Jua. Waliirekebisha ili kunasa mwanga hafifu wa urefu wa mawimbi wa milimita kutoka molekuli tatu katika coma: maji ya kawaida (H_2O), maji mazito (HDO, ambapo hidrojeni moja ni deuterium), na methanoli (CH_3OH).

Uwiano wa D/H walioutafuta kwa vitendo ni uwiano wa maji mazito kwa maji ya kawaida. Kwa hiyo walihitaji yote mawili. Kisha walipitisha spektra kwenye modeli ya uhamishaji wa mionzi ya anga ya kometi inayopanuka (msimbo unaoitwa SUBLIME) na kuilinganisha kwa aina ileile ya mbinu za takwimu zinazotumiwa kubaini muundo wa anga za sayari nje ya Mfumo wa Jua, ili kupata halijoto, mtiririko unaotoka nje, na kiasi cha kila molekuli ambacho kometi ilikuwa ikitoa.

Lakini kuna tatizo moja linalounda kila kinachofuata: **kwa kweli hawakugundua maji**. HDO na methanoli zilionekana; H_2O yenyewe ilibaki chini ya kelele. Hii si kwa sababu maji ya kawaida yalikuwa machache — yapo mengi zaidi kuliko aina nzito. Kuonekana kwa mstari hakutegemei tu kiasi cha molekuli, bali pia urahisi wa kuonekana kwa mstari huo maalumu, na mambo mawili yaliupinga mstari wa maji hapa. La kwanza ni angahewa: mstari wa H_2O ambao waliweza kulenga (karibu 183 GHz) uko mahali ambapo hewa ya Dunia iliyojaa maji hufyonza kwa nguvu zaidi, hivyo kusoma maji ya kometi hapo kutoka ardhini ni kama kujaribu kuona mshumaa katika ukungu — makala inasema kanda hizi za maji zenye nishati ndogo huathiriwa sana na ufyonzaji wa angahewa, ilhali mstari wa maji mazito (HDO) karibu 241 GHz uko katika dirisha safi zaidi. La pili ni unyeti: njia ya maji ilikuwa na kelele nyingi zaidi — karibu 500 mJy kwa kila beam dhidi ya 21 kwa HDO — hivyo

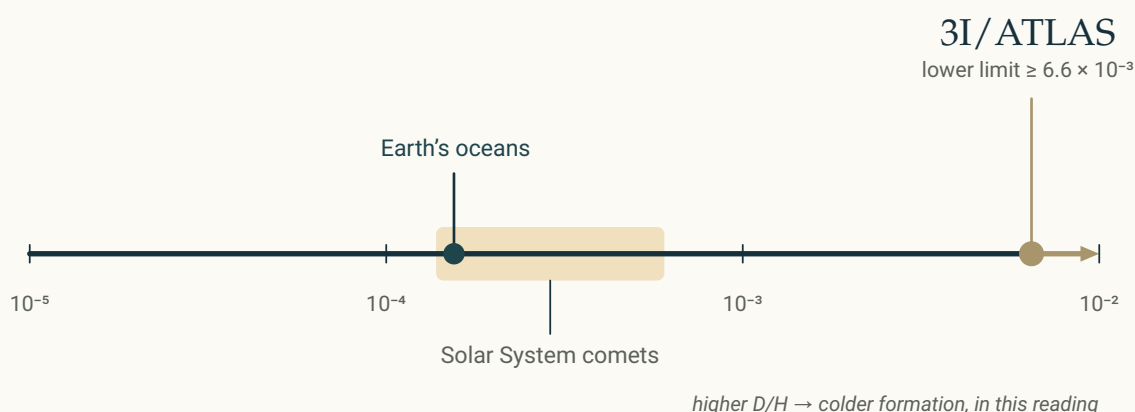
hata ishara nyingi ingeweza kujificha chini yake. Kati ya ukungu na kelele, maji mengi ya kawaida yalibaki chini ya kizingiti, ilhali maji mazito yaliyo machache sana yalionekana wazi katika dirisha safi na tulivu. (Kutoka angani, juu ya angahewa, maji hayo hayo ni rahisi zaidi kuonekana: baadaye JWST iligundua maji ya kometi katika infrared baada ya perihelion — hivyo kutogundua kwa ALMA kunahusu mstari huo mmoja kupitia hewa ya Dunia, si kutokuwepo kwa maji.) Kwa hiyo kiasi cha maji ya kawaida kilibidi kikadiriwe *kwa njia isiyo ya moja kwa moja* — hasa kutokana na namna mistari ya methanoli ilivyosisimuliwa, ambayo inategemea mara ngapi molekuli za methanoli hugongana na maji. Hicho ni kipimo halisi, lakini kinategemea modeli, na waandishi wanasema hivyo wazi.

Waligundua nini

- **Maji mazito, lakini hakuna maji ya kawaida yaliyoonekana.** HDO na mistari kadhaa ya methanoli iligunduliwa wazi; H_2O haikugunduliwa. Kwa sababu uwiano wa D/H unategemea *kikomo cha juu* cha kiwango cha uzalishaji wa maji ya kawaida — kilichotumiwa hivyo kwa makusudi kwa kuwa mstari wa maji ulibaki chini ya kelele — uwiano wa deuterium hutoka kama **kikomo cha chini**, si thamani moja.
- **Ongezeko kubwa la deuterium.** Katika hali yao ya tahadhari, uwiano wa D/H wa maji ni **zaidi ya** 6.6×10^{-3} — zaidi ya karibu **mara 40** ya thamani ya bahari za Dunia na zaidi ya karibu **mara 30** ya kometi ya kawaida ya Mfumo wa Jua. Kwa makisio yao yote mawili, 3I/ATLAS iko upande wa juu kabisa wa kila kipimo cha D/H ya maji kilichofanywa hadi sasa.
- **Huenda si tukio la bahati la usiku huo mmoja.** Kipimo ni cha kipindi kimoja, lakini mtazamo wa awali wa data ya karibu ya ALMA hauonyeshi mabadiliko makubwa kutoka siku moja hadi nyingine, na uchanganuzi huru wa JWST wa 3I/ATLAS uliofanywa zaidi ya mwezi mmoja baadaye unaelekea upande huo huo — maji yenye deuterium nyingi.

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

Water D/H ratio — logarithmic scale



Mahali maji ya 3I/ATLAS yalipo kwenye kipimo cha deuterium: mbali upande wenye deuterium nyingi, zaidi ya

bahari za Dunia na kundi lote la kometi za Mfumo wa Jua (lililoonyeshwa hapa kama safu ya kukadiria). Mshale unaonyesha *kikomo cha chini* — thamani halisi inaweza kuwa kubwa zaidi. Uwiano mkubwa wa D/H ni kidokezo cha *hali baridi ya kutengenezwa*, si anwani ya nyumbani.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Hili labda linamaanisha nini

Uwiano mkubwa wa D/H katika maji ni alama ya maji yaliyoganda mahali palipokuwa baridi sana (chini ya karibu 30 K) na ambayo hayakubadilishwa sana baadaye na joto. Kwa hiyo tafsiri safi zaidi ni kwamba maji ya 3I/ATLAS yaliundwa katika hali *baridi na tulivu zaidi* kuliko maji ya kometi za Mfumo wetu wa Jua — na hivyo mfumo wake wa asili wa sayari uliunda barafu zake kwa namna tofauti na wetu.

Waandishi wana tahadhari kuhusu hatua inayofuata, nasi tunapaswa kuwa nayo. Kuna njia mbili za kupata maji yenye deuterium nyingi kiasi hiki, na kipimo hiki hakiwezi kuzitofautisha: maji yanaweza kuwa *yalirithi* ongezeko hilo kutoka wingu baridi ambako mfumo ulizaliwa, au yanaweza kuwekwa baadaye wakati kometi ilipoundwa katika diski ya nje yenye baridi. Kwa njia yoyote, hitimisho muhimu linabaki — hali zilizounda 3I/ATLAS hazikuwa sawa na zilizounda kometi zetu — lakini sababu yake inabaki wazi.

Kwa hiyo hii ni mara ya kwanza mtu kusoma alama ya kutengenezwa kwa maji katika maada ya mfumo mwingine wa sayari na kugundua kwamba haifanani na yetu.

Hili *halithibitishi* nini

- **Halisemi chochote** kuhusu uhai, teknolojia au kusudi. Hakuna “kitu” kilichotengenezwa; “kutoka anga kati ya nyota” inaeleza njia, si hadithi ya asili. Hiki ni kipimo cha kemia ya maji.
- **Si** thamani sahihi ya D/H. Ni *kikomo cha chini*, na maji yanayozungumziwa hayakugunduliwa moja kwa moja — wingi wake ulikadiriwa kutokana na msisimko wa molekuli tofauti, methanoli, kwa kudhani kwamba maji ndiyo kitu kikuu ambacho methanoli inagongana nacho.
- **Halionyeshi** 3I/ATLAS ilizaliwa wapi. Nyota ya asili haiwezi kutambuliwa kwa uhakika, na uwiano mkubwa wa D/H ni kidokezo cha *hali*, si anwani ya nyumbani.
- **Halisuluhishi** sababu ya maji kuwa na deuterium nyingi. “Kurithi kutoka wingu baridi la kuza-liwa” na “kuwekwa wakati wa kutengenezwa kwa diski” zote zinakubaliana na data; makala haich-agui kati yake.
- Ni kitu **kimoja**, kilichopimwa katika kipindi **kimoja**. Ushahidi unaounga mkono unatia moyo, lakini si msingi wa muda mrefu.

Ushahidi una nguvu kiasi gani?

Mambo mawili yanapaswa kupimwa kando: mwelekeo wa matokeo na namba kamili.

- **Mwelekeo una nguvu.** Kwamba maji ya 3I/ATLAS yana deuterium nyingi ni kikomo cha chini cha tahadhari, kiko juu sana ya kundi lote la kometi za Mfumo wa Jua, na kinaungwa mkono na uchanganuzi huru wa JWST. Sehemu hii si dhaifu.
- **Namba inategemea msururu wa modeli.** Kwa sababu H_2O haikugunduliwa, wingi wa maji — na hivyo uwiano wa D/H — unategemea kukadiria maji kwa njia isiyo ya moja kwa moja kutokana na msisimko wa methanoli. Hilo linadhani maji ndiyo mshirika mkuu wa migongano katika coma (jambo linalowezekana karibu na perihelion, lakini mchango wa CO_2 hauwezi kuondolewa) na linatumia viwango vya kukadiria vya migongano ambavyo vinakubaliwa kuwa havijabanwa vizuri. Waandishi wanaeleza yote haya na kwa makusudi wanatoa matokeo kama kikomo badala ya kipimo kamili.
- **Tafsiri ina msingi mzuri lakini si ya pekee.** Kutengenezwa katika baridi ndiyo maelezo ya kawaida ya D/H kubwa; kama baridi hiyo ilirithiwa au iliwekwa baadaye bado haijatatuliwa, na mfumo wa asili hautambuliki.

Kwa ufupi: ushahidi kwamba maji yalitengenezwa kwenye baridi una nguvu; kiwango sahihi cha ubaridi na sababu kamili vinaachwa wazi kwa uaminifu.

Kwa nini ni muhimu

Kwa miongo kadhaa, swali la maji ya Dunia yalitoka wapi — na ni nini huweka alama ya deuterium ya maji katika mfumo wa sayari inayoundwa — limejibiwa kwa vipimo vilivyofanywa ndani ya Mfumo wetu wa Jua pekee. Hii ni mara ya kwanza ramani hiyo imepanuliwa hadi maada iliyotengenezwa kwa uthibitisho karibu na nyota nyingine.

Jibu si “kila mahali ni kama nyumbani.” Ni kinyume chake: mfumo mwingine unaweza kuweka barafu zake katika hali baridi vya kutosha kuacha alama ambayo kometi zetu hazikuwahi kubeba. Hicho ni kipande kidogo na mahususi cha ushahidi wa jambo kubwa kwa utulivu — kwamba kemia na historia ya vitu vigumu vinavyounda sayari vinaweza kutofautiana kutoka nyota moja hadi nyingine. Na hakikutoka kwa chombo cha anga kilichotumwa kuvuka miaka ya nuru, bali kwa kunasa kipande kilichopotea cha mfumo mwingine kilipopita na kusoma maji yake kabla hakijaondoka.

Muhtasari safi

3I/ATLAS ni kitu cha tatu kinachojulikana kutoka anga kati ya nyota na kometi ya pili hai ya aina hiyo — kipande cha mfumo mwingine wa sayari kinachopita mara moja katika wetu. Kwa kutumia ALMA karibu na wakati kometi ilipokaribia Jua zaidi, wanaastronomia waligundua maji mazito (HDO) na methanoli katika coma yake lakini si maji ya kawaida, na kutokana na hilo wakakadiria uwiano wa

deuterium kwa hidrojeni katika maji. Waligundua ongezeko kubwa la deuterium — kikomo cha chini cha zaidi ya 6.6×10^{-3} , karibu mara 40 ya bahari za Dunia na mara 30 ya kometi ya kawaida ya Mfumo wa Jua — linaloelekeza kwenye maji yaliyotengenezwa katika hali baridi zaidi na ambayo hayakubadilishwa sana kama maji ya kometi za Mfumo wa Jua. Namba hiyo ni kikomo cha chini kilichopatikana kwa njia isiyo ya moja kwa moja kupitia modeli, si kipimo cha moja kwa moja, na haiwezi kusema kama ongezeko lilirithiwa kutoka wingu baridi la kuzaliwa au liliwekwa baadaye katika diski baridi, wala kometi ilitoka wapi. Hata hivyo, ni usomaji wa kwanza wa alama hii mahususi ya kemia katika maji kutoka nyota nyingine — na alama hiyo haifanani na yetu.

Ukaguzi usio na upotoshaji

Makala inaonyesha nini: Kutokana na uchunguzi wa ALMA wa kometi ya kutoka anga kati ya nyota 3I/ATLAS karibu na perihelion, kikomo cha chini cha uwiano wa D/H katika maji yake cha $>6.6 \times 10^{-3}$ (hali ya tahadhari) — karibu $40\times$ ya bahari za Dunia na $30\times$ ya kometi ya kawaida ya Mfumo wa Jua — kikimaanisha maji yaliyoundwa katika hali baridi zaidi na ambayo hayakuchakatwa sana na joto kuliko kometi za Mfumo wa Jua. Uchanganuzi huru wa JWST unakubaliana na mwelekeo huo.

Kinachowezekana lakini hakijathibitishwa: Kwamba ongezeko lilirithiwa moja kwa moja kutoka wingu baridi kabla ya nyota kuundwa, badala ya kuwekwa wakati kometi ilipoundwa katika diski baridi ya protoplaneti. Hali zote mbili zinafaa; data haitofautishi.

Kisichoonyeshwa: Chochote kuhusu uhai, teknolojia au asili iliyotengenezwa; thamani sahihi ya D/H (ni kikomo cha chini); utambulisho au mahali pa nyota ya asili; njia mahususi iliyosababisha D/H kubwa; au kwamba matokeo haya ya kipindi kimoja hayawezi kuathiriwa na mabadiliko katika coma.

Mipaka mikuu: H_2O haikugunduliwa moja kwa moja, hivyo wingi wa maji — na kwa hiyo uwiano wa D/H — umekadiriwa kwa njia isiyo ya moja kwa moja kutokana na msisimko wa methanoli, kwa kudhani maji ndiyo mshirika mkuu wa migongano na kutumia viwango vya kukadiria vya migongano ambavyo waandishi wanasema havijabanwa vizuri; matokeo ni kikomo cha kipindi kimoja kinachotegemea modeli; mfumo wa asili hautambuliki.

Msomaji wa kawaida awe na uhakika kiasi gani? Uhakika mkubwa kwamba maji ya 3I/ATLAS kweli yana deuterium nyingi na yaliundwa katika baridi zaidi kuliko kometi zetu, na kwamba hili halisemi chochote kabisa kuhusu viumbe wa angani. Uhakika wa wastani kuhusu kiwango kamili cha ongezeko, ambacho ni kikomo cha chini kinachotegemea modeli. Uhakika mdogo kuhusu sababu mahususi na mahali yalipotoka, ambavyo bado viko wazi. Msimamo unaofaa: mshangao wa utulivu kwa ujumbe wa kemia kutoka mfumo mwingine wa nyota — si fumbo, wala si chombo cha angani.

Vyanzo

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/>