The Clean Paper

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

Interstellar comet 3I/ATLAS-ի ջուրը ձևավորվել է մեր գիսաստղերից ավելի ցուրտ պայմաններում — ուրիշ մոլորակային համակարգի առաջին քիմիական ընթերցումներից մեկը

ALMA-ի միջոցով աստղագետները սահմանափակել են 3I/ATLAS-ի ջրում ծանր և սովորական ջրածնի հարաբերակցությունը և գտել ուժեղ դեյտերիումային հարստացում՝ առնվազն մոտ 40 անգամ Երկրի օվկիանոսներից և 30 անգամ սովորական Արեգակնային համակարգի գիսաստղից բարձր: Դա մատնանշում է ավելի ցուրտ ձևավորման պայմաններ: Արդյունքը ստորին սահման է՝ անուղղակի մոդելից, որովհետև սովորական ջրի գիծը ուղղակիորեն չի հայտնաբերվել, և կյանքի կամ տեխնոլոգիայի մասին ոչինչ չի ասում:

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

Առաջին պլանում DV-59 ալեհավաքն է, իսկ հետևում՝ լուսնալույսով ողողված գիշերային երկինքը դիտող ALMA-ի մի քանի ալեհավաքներ: Լուսանկարը՝ Alex Pérez / ALMA Observatory:

Alex Pérez / ALMA Observatory CC BY 4.0

Ուրիշ աստղից եկած գիսաստղը և նրա ջրի քիմիական հետքը

Ժամանակ առ ժամանակ Արեգակնային համակարգով անցնում է մի բան, որը երբեք մեր համակարգի մասը չի եղել: Ոչ աստերոիդների գոտուց շեղված քար, ոչ Օորտի ամպից երկար ուղեծրով վերադարձող գիսաստղ, այլ բաց՝ հիպերբոլական հետագծով մարմին, որը եկել է միջաստղային տարածությունից, մեկ անգամ կանցնի Արեգակի մոտով և կհեռանա ընդմիշտ: Մինչ այժմ տեսել ենք երեքը: Առաջինը՝ ‘Oumuamua-ն 2017-ին, գրեթե հեռացել էր, մինչև գիտնականները համաձայնեցին, թե ինչ էին տեսել: Երկրորդը՝ 2I/Borisov-ը 2019-ին, ակնհայտ գիսաստղ էր: Երրորդը՝ 3I/ATLAS-ը, հայտնաբերվեց 2025-ի հուլիսին և մեզ մոտ եկավ բավական ակտիվ կոմայով, որպեսզի հնարավոր լինի իրական քիմիական չափումներ անել:

Մինչ աղմկոտ մեկնաբանությունները սկսելը արժե պահել ամենակարևոր փաստը: Միջաստղային գիսաստղը բառացիորեն ուրիշ մոլորակային համակարգի բեկոր է՝ սառույց և փոշի, որոնք խտացել են մեկ այլ աստղի շուրջ, հավանաբար վաղուց դուրս

են նետվել գրավիտացիոն փոխազդեցությամբ, ճանապարհորդել Գալակտիկայով և պատահաբար այնքան մոտ են անցել Արեգակից, որ սառույցները սկսել են գոլորշիանալ հենց մեր աստղադիտակների աչքի առաջ: Սա ինքնին բացառիկ փաստ է և լրացուցիչ առեղծվածայնացման կարիք չունի:

Այնուամենայնիվ միջաստղային մարմինները հաճախ ստանում են չափազանցված լուսաբանում՝ «իսկ եթե սա ինչոր մեկի կառուցածն է» ենթատեքստով: 3I/ATLAS-ն էլ բացառություն չէր: Այդ հարցի ազնիվ պատասխանը պարզ է՝ սա գիսաստղ է: Ավելի հետաքրքիր հարցն ուրիշ է. եթե կարողանանք կարդալ մեկ այլ աստղի շուրջ ձևավորված նյութի քիմիան, ի՞նչ կարող ենք իմանալ այդ համակարգի մասին: Եվ ինչպե՞ս ընդհանրապես կարդալ այդ քիմիական պատմությունը:

Այս անգամ «ընթերցման գործիքը» ջուրն է: Ջրի մոլեկուլը երկու ջրածին և մեկ թթվածին ունի, բայց ջրածնի փոքր մասն իրականում *դեյտերիում* է՝ սովորական ջրածնի ավելի ծանր տարբերակը, որն ունի լրացուցիչ նեյտրոն: Ջրում դեյտերիումի և սովորական ջրածնի հարաբերակցությունը՝ D/H-ը, պատահական չէ: Քիմիական գործընթացների պատճառով այն մեծ մասամբ կախված է այն ջերմաստիճանից, որտեղ ջուրը սկզբում ձևավորվել է. որքան ավելի սառն ու հանգիստ է եղել միջավայրը, այնքան ավելի շատ դեյտերիում կարող է պահպանվել ջրում: Իսկ գիսաստղը մի տեսակ երկարաժամկետ սառցարան է, որը միլիարդավոր տարիներ կարող է իր սառույցները պահել ցուրտ վիճակում: Ուստի նրա ջրի D/H հարաբերակցությունը կարող է պահպանել այն պայմանների քիմիական հետքը, որոնցում այդ ջուրը ձևավորվել է:

Մեր Արեգակնային համակարգի «հետքերը» համեմատաբար լավ գիտենք. Երկրի օվկիանոսներն ու գիսաստղերի տարբեր ընտանիքները գտնվում են բավական նեղ տիրույթում: Մինչ այս ոչ ոք հուսալիորեն չէր որոշել նույն ցուցանիշը մեկ այլ աստղի շուրջ ձևավորված ջրի համար: Հենց դա է այս աշխատանքը փորձում չափել 3I/ATLAS-ում:

Ի՞նչ արեցին հեղինակները

2025 թվականի նոյեմբերի 4-ին՝ գիսաստղի Արեգակին ամենամոտ անցումից վեց օր անց, հետազոտողները ALMA ռադիոաստղադիտակային համալիրն ուղղեցին 3I/ATLAS-ի վրա: Նրանք որոնեցին կոմայում երեք մոլեկուլի թույլ միլիմետրային ճառագայթումը՝ սովորական ջուր (H_2O), *ծանր* ջուր (HDO, որտեղ ջրածիններից մեկը դեյտերիում է) և մեթանոլ (CH_3OH):

Փնտրվող D/H հարաբերակցությունը, պարզեցված ասած, կապված է ծանր և սովորական ջրի հարաբերակցության հետ, ուստի ցանկալի էր չափել երկուսն էլ: Ստացված սպեկտրները հետո մշակվել են ընդարձակվող գիսաստղային մթնոլորտի ճառագայթային փոխանցման SUBLIME մոդելով և վիճակագրական մեթոդներով, որոնք նման են էկզոմոլորակների մթնոլորտների կազմը վերականգնելու համար օգտագործվող մեթոդներին: Այդպես գնահատվել են ջերմաստիճանը, արտահոսքի

արագությունը և յուրաքանչյուր մոլեկուլի արտադրության հաճախականությունը։

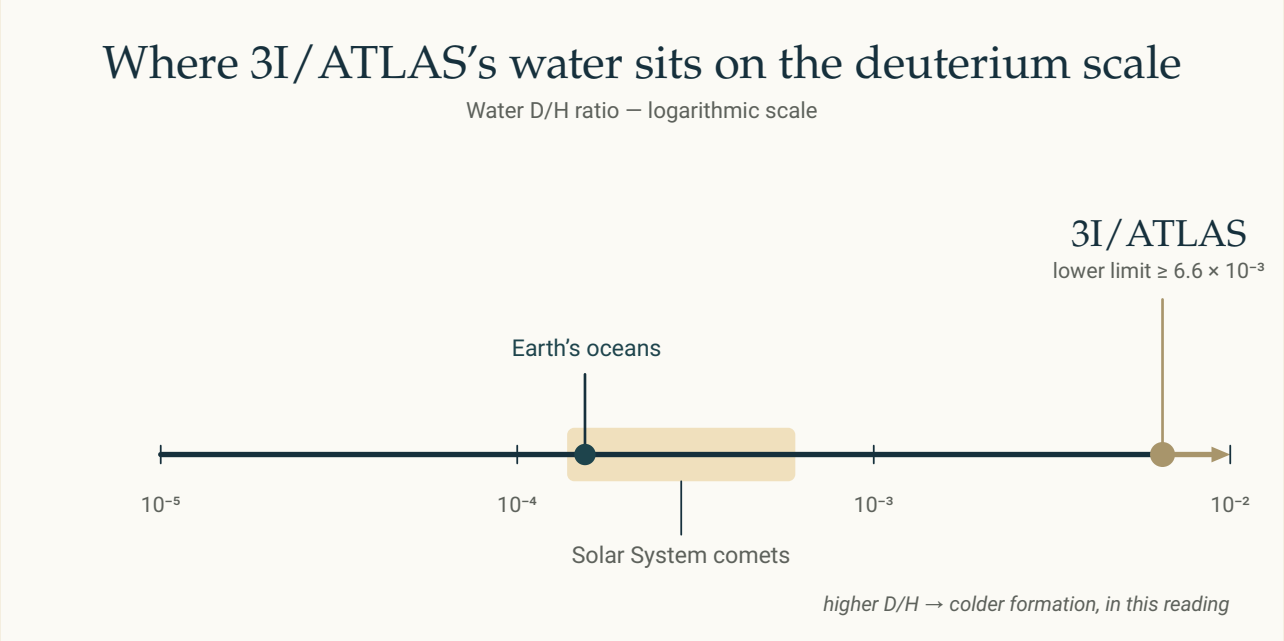
Բայց հետագա ամբողջ մեկնաբանությունը ձևավորող մի կարևոր հանգամանք կա. **սովորական ջուրը ALMA-ն իրականում չի հայտնաբերել**։ HDO-ն և մեթանոլը տեսանելի էին, իսկ H_2O-ի գիծը մնաց աղմուկի մակարդակից ցածր։ Դա չի նշանակում, որ սովորական ջուրը քիչ էր. այն իրականում շատ ավելի առատ է, քան ծանր ջուրը։ Սպեկտրային գիծը տեսնելը կախված է ոչ միայն նյութի քանակից, այլ նաև տվյալ գծի դիտելիությունից։ Այստեղ H_2O-ի դեմ երկու գործոն էր աշխատում։ Առաջինը Երկրի մթնոլորտն է. մոտ 183 GHz հաճախականության ջրի գիծը ընկնում է այն հատվածում, որտեղ մեր մթնոլորտի ջրային գոլորշին ինքն է շատ ուժեղ կլանում ճառագայթումը։ Գետնից գիսաստղի ջուրը այդ հաճախականությամբ դիտելը մի փոքր նման է մառախուղի միջով մոմ տեսնելուն։ Հոդվածը նշում է, որ ջրի այս ցածր էներգիայի գծերը ենթարկվում են ուժեղ մթնոլորտային կլանման, մինչդեռ HDO-ի մոտ 241 GHz գիծը գտնվում է ավելի «մաքուր» պատուհանում։ Երկրորդ գործոնը զգայունությունն է. ջրի ալիքում աղմուկը մոտ 500 mJy էր մեկ ճառագայթի համար, մինչ HDO-ի դեպքում՝ մոտ 21։ Այսպիսով նույնիսկ առատ սովորական ջրի ազդանշանը կարող էր մնալ աղմուկի տակ, մինչ ավելի հազվադեպ ծանր ջուրը, ավելի բարենպաստ սպեկտրային պատուհանում, հստակ երևաց։ Տիեզերքից՝ մթնոլորտից վեր, նույն ջուրը շատ ավելի հեշտ է հայտնաբերել. JWST-ն ավելի ուշ, Արեգակին մոտ անցումից հետո, գիսաստղի ջուրը հայտնաբերեց ինֆրակարմիրում։ Ուստի ALMA-ի չհայտնաբերումը վերաբերում է կոնկրետ գծի ցամաքային դիտմանը, ոչ թե ջրի բացակայությանը։

Այդ պատճառով սովորական ջրի քանակը պետք էր գնահատել *անուղղակիորեն*՝ հիմնականում մեթանոլի գծերի գրգռվածության վիճակից, որը կախված է ջրի մոլեկուլների հետ բախումների հաճախականությունից։ Սա իրական չափումների վրա հիմնված եզրակացություն է, բայց այն կախված է մոդելից, և հեղինակները դա բացահայտ նշում են։

Ի՞նչ գտան

- **Ծանր ջուր՝ այո, սովորական ջուր՝ ոչ**։ HDO-ն և մեթանոլի մի քանի գծեր հստակ հայտնաբերվել են, իսկ H_2O-ն՝ ոչ։ Քանի որ D/H հարաբերակցության հաշվարկը հիմնվում է սովորական ջրի արտադրության հաճախականության *վերին սահմանի* վրա, դեյտերիումի հարաբերակցության արդյունքը ստացվում է որպես **ստորին սահման**, ոչ մեկ ճշգրիտ թիվ։
- **Դեյտերիումի ուժեղ հարստացում**։ Պահպանողական սցենարում ջրի D/H հարաբերակցությունը **մեծ է** 6.6×10^{-3}**-ից**՝ ավելի քան մոտ **40 անգամ** Երկրի օվկիանոսների և մոտ **30 անգամ** տիպիկ Արեգակնային համակարգի գիսաստղի արժեքից։ Երկու գնահատման եղանակով էլ 3I/ATLAS-ը ջրի D/H-ի մինչ այժմ չափված ամենաբարձր արժեքների ծայրում է։
- **Հավանաբար մեկ գիշերվա պատահականություն չէ**։ Չափումը կատարվել է մեկ ժամանակային կետում, բայց մոտակա օրերի ALMA տվյալների նախնական դիտարկումը մեծ օրական փոփոխություն չի ցույց տալիս։ Բացի այդ, ավելի քան

մեկ ամիս անց ստացված JWST-ի անկախ վերլուծությունն էլ նույն ուղղությունն է մատնանշում՝ դեյտերիումով հարուստ ջուր։



3I/ATLAS-ի ջրի դիրքը դեյտերիումի սանդղակում՝ դեյտերիումով հարուստ ծայրում, Երկրի օվկիանոսներից և Արեգակնային համակարգի գիսաստղերի ամբողջ հայտնի տիրույթից վեր։ Սլաքը նշում է *ստորին սահման*. իրական արժեքը կարող է ավելի բարձր լինել։ Բարձր D/H-ը սառը ձևավորման պայմանների հուշում է, ոչ ծննդավայրի հասցե։

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ի՞նչ է սա հավանաբար նշանակում

Ջրի բարձր D/H հարաբերակցությունը բնորոշ է ջրի, որը սառել է շատ ցուրտ պայմաններում՝ մոտ 30 K-ից ցածր, և հետո ուժեղ ջերմային վերամշակման չի ենթարկվել։ Ամենապարզ մեկնաբանությունն այն է, որ 3I/ATLAS-ի ջուրը ձևավորվել է *ավելի սառը և ավելի մեղմ* պայմաններում, քան մեր Արեգակնային համակարգի գիսաստղերի ջուրը։ Հետևաբար նրա ծնող մոլորակային համակարգում սառույցների ձևավորման պատմությունը տարբերվել է մերից։

Հաջորդ քայլում հեղինակները զգույշ են, և մենք էլ պետք է լինենք։ Այսքան դեյտերիումով հարուստ ջուր ստանալու երկու հիմնական ճանապարհ կա, և այս չափումը չի տարբերակում դրանք։ Ջուրը կարող էր իր հարստացումը *ժառանգել* այն սառը մոլեկուլային ամպից, որտեղ ծնվել է աստղային համակարգը, կամ այդ հարաբերակցությունը կարող էր ձևավորվել ավելի ուշ՝ գիսաստղի առաջացման ընթացքում սառը արտաքին նախամոլորակային սկավառակում։ Երկու դեպքում էլ հիմնական եզրակացությունը պահպանվում է՝ 3I/ATLAS-ը ձևավորած պայմանները նույնը չեն, ինչ մեր գիսաստղերինը։ Բայց *ինչու* է տարբերությունը առաջացել՝ բաց

հարց է:

Այսպիսով սա առաջին դեպքն է, երբ մեկ այլ մոլորակային համակարգից եկած նյութի ջրի ձևավորման քիմիական հետքը չափվել է և պարզվել է, որ այն չի համընկնում մեր համակարգի հետ:

Ի՞նչ սա *չի* ապացուցում

- Սա **ոչինչ չի ասում կյանքի, տեխնոլոգիայի կամ մտադրության մասին**: «Միջաստղային» բառը նկարագրում է հետագիծը, ոչ ստեղծման պատմությունը: Սա ջրի քիմիայի չափում է:
- Սա **ճշգրիտ D/H արժեք չէ**: Արդյունքը *ստորին սահման* է, իսկ սովորական ջուրը ALMA-ով ուղղակիորեն չի հայտնաբերվել: Նրա քանակը գնահատվել է մեթանոլի գրգռվածությունից՝ ենթադրելով, որ մեթանոլի հիմնական բախման գործընկերը ջուրն է:
- Սա **չի բացահայտում, թե որտեղ է ծնվել 3I/ATLAS-ը**: Ծնող աստղը հուսալիորեն նույնականացնել հնարավոր չէ, իսկ բարձր D/H-ը ձևավորման պայմանների հուշում է, ոչ «տան հասցե»:
- Սա **չի որոշում, թե ինչու է ջուրը դեյտերիումով հարուստ**: Սառը նախաստղային ամպից ժառանգումը և սառը սկավառակում հետագա ձևավորումը երկուսն էլ համապատասխանում են տվյալներին:
- Սա **մեկ մարմին է՝ չափված մեկ ժամանակային կետում**: Անկախ հաստատումը խրախուսող է, բայց դա երկար ժամանակային շարք չէ:

Որքա՞ն ուժեղ է ապացույցը

Պետք է առանձին գնահատել արդյունքի ուղղությունը և ճշգրիտ թիվը:

- **Ուղղությունը բավական կայուն է**: 3I/ATLAS-ի ջրի դեյտերիումով ուժեղ հարստացումը պահպանողական ստորին սահման է, որը զգալիորեն բարձր է Արեգակնային համակարգի գիսաստղերի ամբողջ հայտնի տիրույթից և աջակցվում է JWST-ի անկախ վերլուծությամբ: Այս մասը փխրուն չէ:
- **Ճշգրիտ թիվը հենվում է մոդելավորման շղթայի վրա**: Քանի որ H_2O-ն ուղղակիորեն չի հայտնաբերվել, ջրի քանակը և դրանից D/H հարաբերակցությունը գնահատվում են մեթանոլի գրգռվածությունից: Դա ենթադրում է, որ կոմայում ջուրը մեթանոլի հիմնական բախման գործընկերն է՝ Արեգակին մոտ անցման ժամանակ դա հավանական է, բայց CO_2-ի ներդրումը ամբողջությամբ բացառել չի կարելի: Օգտագործվող բախումների հաճախականություններն էլ մոտավոր են և վատ սահմանափակված: Հեղինակներն այս ամենը նշում են և դիտավորյալ ներկայացնում արդյունքը որպես սահման, ոչ ճշգրիտ չափում:
- **Մեկնաբանությունը լավ հիմնավորված է, բայց միակ հնարավոր տարբերակը**

չէ: Բարձր D/H-ի բնական բացատրությունը սառը ձևավորումն է: Սակայն դեռ անհայտ է՝ այդ «սառնությունը» ժառանգվել է նախաստղային ամպից, թե ձևավորվել ավելի ուշ, և ծնող համակարգն էլ նույնականացված չէ:

Կարճ ասած՝ այն, որ ջուրը ձևավորվել է ցուրտ պայմաններում, բավական ամուր եզրակացություն է: Իսկ *որքան* ցուրտ և *ինչու*՝ ազնվորեն բաց է մնում:

Ինչո՞ւ է սա կարևոր

Տասնամյակներ շարունակ Երկրի ջրի ծագման և ձևավորվող մոլորակային համակարգերում ջրի դեյտերիումային «ստորագրության» մասին հարցերը ուսումնասիրել ենք միայն մեր Արեգակնային համակարգի ներսում կատարված չափումներով: Սա առաջին դեպքն է, երբ այդ համեմատական պատկերը տարածվում է նյութի վրա, որը հաստատ ձևավորվել է մեկ այլ աստղի շուրջ:

Պատասխանը «ամեն տեղ մեր տան նման է» չէ: Ընդհակառակը՝ ուրիշ համակարգը կարող է իր սառույցները ձևավորել այնքան սառը պայմաններում, որ դրանք պահպանեն մի քիմիական հետք, որը մեր գիսաստղերը չունեն: Սա փոքր, կոնկրետ ապացույց է ավելի մեծ գաղափարի համար՝ մոլորակներ կառուցող պինդ նյութերի քիմիան ու պատմությունը կարող են տարբեր լինել աստղից աստղ: Եվ այս տեղեկությունը ստացել ենք ոչ թե լուսատարիներ անցած տիեզերանավից, այլ ուրիշ համակարգի պատահաբար մեր կողքով անցնող մի բեկորի ջուրը կարդալով՝ մինչև այն նորից հեռանա:

Կարճ ամփոփում

3I/ATLAS-ը երրորդ հայտնի միջաստղային մարմինն է և երկրորդ ակտիվ միջաստղային գիսաստղը՝ մեկ այլ մոլորակային համակարգի բեկոր, որը մեկ անգամ անցնում է մեր համակարգով: Արեգակին մոտ անցման շրջանում ALMA-ի դիտարկումներով աստղագետները նրա կոմայում հայտնաբերել են ծանր ջուր (HDO) և մեթանոլ, բայց ոչ սովորական ջուր, և այդ տվյալներից գնահատել են ջրի դեյտերիում/ջրածին հարաբերակցությունը: Արդյունքը ցույց է տալիս ուժեղ դեյտերիումային հարստացում՝ պահպանողական ստորին սահման 6.6×10^{-3}**-ից բարձր**, մոտ 40 անգամ Երկրի օվկիանոսների և 30 անգամ տիպիկ Արեգակնային համակարգի գիսաստղի արժեքից բարձր: Սա մատնանշում է ավելի սառը և ավելի քիչ ջերմային վերամշակված ձևավորման պայմաններ: Թիվը մոդելի միջոցով անուղղակիորեն ստացված ստորին սահման է, ոչ ուղղակի չափում, և չի ասում՝ հարստացումը ժառանգվել է սառը ծննդյան ամպից, թե ձևավորվել ավելի ուշ սառը սկավառակում, ոչ էլ որտեղից է գիսաստղը եկել: Այնուամենայնիվ սա մեկ այլ աստղի շուրջ ձևավորված ջրի այս կոնկրետ քիմիական հետքի առաջին ընթերցումն է, և այն մեր համակարգի հետ չի համընկնում:

Առանց չափազանցության

Ի՞նչ է ցույց տալիս աշխատանքը: 3I/ATLAS-ի՝ Արեգակին մոտ անցման ժամանակ ALMA-ի դիտարկումներից ստացված ջրի D/H հարաբերակցության պահպանողական ստորին սահման՝ $>6.6 \times 10^{-3}$, մոտ 40 անգամ Երկրի օվկիանոսների և 30 անգամ տիպիկ Արեգակնային համակարգի գիսաստղի արժեքից բարձր: Սա նշանակում է, որ ջուրը ձևավորվել է մեր գիսաստղերի համեմատ զգալիորեն ավելի սառը և ավելի քիչ ջերմային վերամշակված պայմաններում: JWST-ի անկախ վերլուծությունն աջակցում է նույն ուղղությանը:

Ի՞նչն է հավանական, բայց ապացուցված չէ: Որ հարստացումը ուղղակիորեն ժառանգվել է սառը նախաստղային ամպից, այլ ոչ ձևավորվել գիսաստղի սառը նախամոլորակային սկավառակում: Երկու սցենարն էլ համապատասխանում է տվյալներին:

Ի՞նչ չի ցույց տալիս: Որևէ բան կյանքի, տեխնոլոգիայի կամ արհեստական ծագման մասին, D/H-ի ճշգրիտ արժեք, ծնող աստղի ինքնությունն ու տեղադրությունը, բարձր D/H-ի կոնկրետ պատճառը կամ այն, որ մեկ ժամանակային կետի արդյունքը լիովին անկախ է կոմայի փոփոխականությունից:

Հիմնական սահմանափակումները: H_2O-ն ուղղակիորեն չի հայտնաբերվել, ուստի ջրի քանակը և D/H հարաբերակցությունը անուղղակիորեն գնահատվում են մեթանոլի գրգռվածությունից՝ ենթադրելով, որ ջուրը հիմնական բախման գործընկերն է և օգտագործելով մոտավոր, վատ սահմանափակված բախման հաճախականություններ: Արդյունքը մեկ ժամանակային կետի, մոդելից կախված սահման է, իսկ ծնող համակարգը նույնականացնել հնարավոր չէ:

Որքա՞ն վստահություն պետք է ունենա ընդհանուր ընթերցողը: Բարձր՝ որ 3I/ATLAS-ի ջուրը իսկապես դեյտերիումով հարուստ է և ձևավորվել է մեր գիսաստղերից ավելի սառը պայմաններում, և որ սա ոչինչ չի ասում այլմոլորակայինների մասին: Միջին՝ հարստացման ճշգրիտ չափի նկատմամբ, քանի որ այն մոդելից կախված ստորին սահման է: Ցածր՝ կոնկրետ պատճառի և ծննդավայրի նկատմամբ, որոնք բաց են մնում: Ճիշտ արձագանքը՝ հանգիստ հիացմունք մեկ այլ աստղային համակարգից եկած քիմիական «բացիկի» հանդեպ, ոչ առեղծված և ոչ տիեզերանավ:

Աղբյուրներ

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/