



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 քան, 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՝ ‘Օստամսա-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:

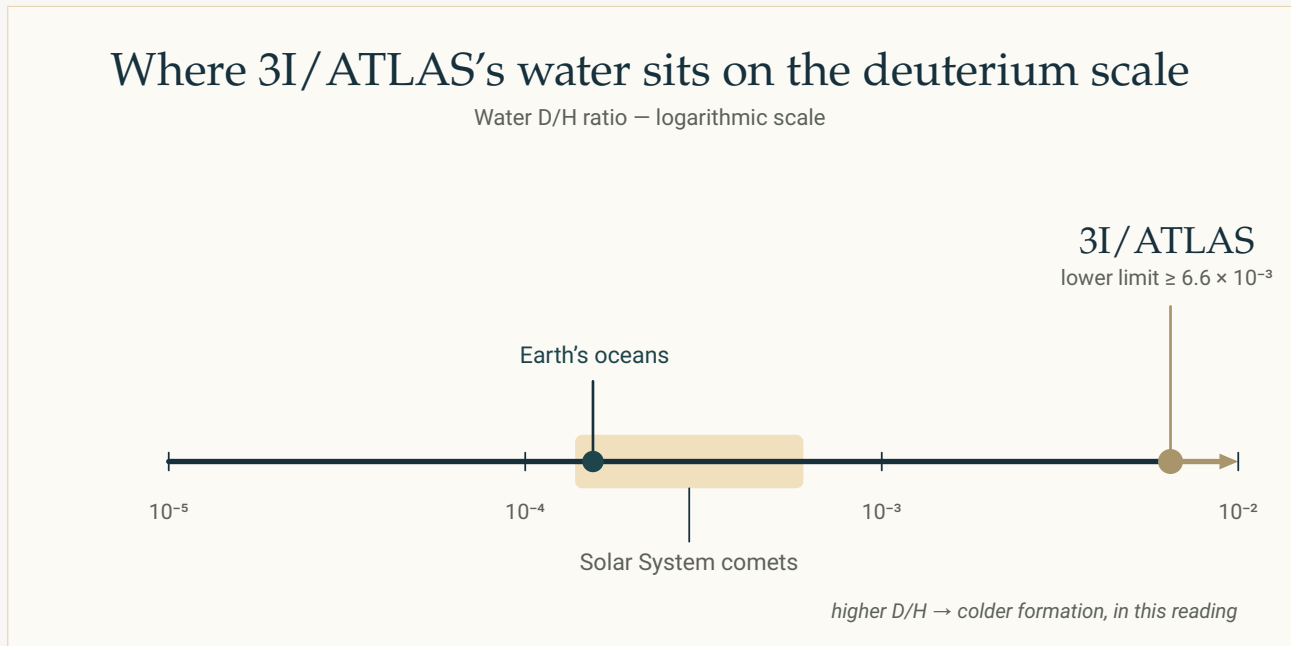
Բայց հետագա ամբողջ մեկնաբանությունը ձևավորող մի կարևոր հանգամանք կա. **սովորական ջուրը ALMA-ն իրականում չի հայտնաբերել**: HDO-ն և մեթանոլը տեսանելի էին, իսկ H_2O -ի գիծը մնաց աղմուկի մակարդակից ցածր: Դա չի նշանակում, որ սովորական ջուրը քիչ էր. այն իրականում շատ ավելի առատ է, քան ծանր ջուրը: Սպեկտրային 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 ավիքում 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: Այսպես 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 գիսաստղերին: 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: H₂O-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 քնդհանուր քնթեքցողը: 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/>