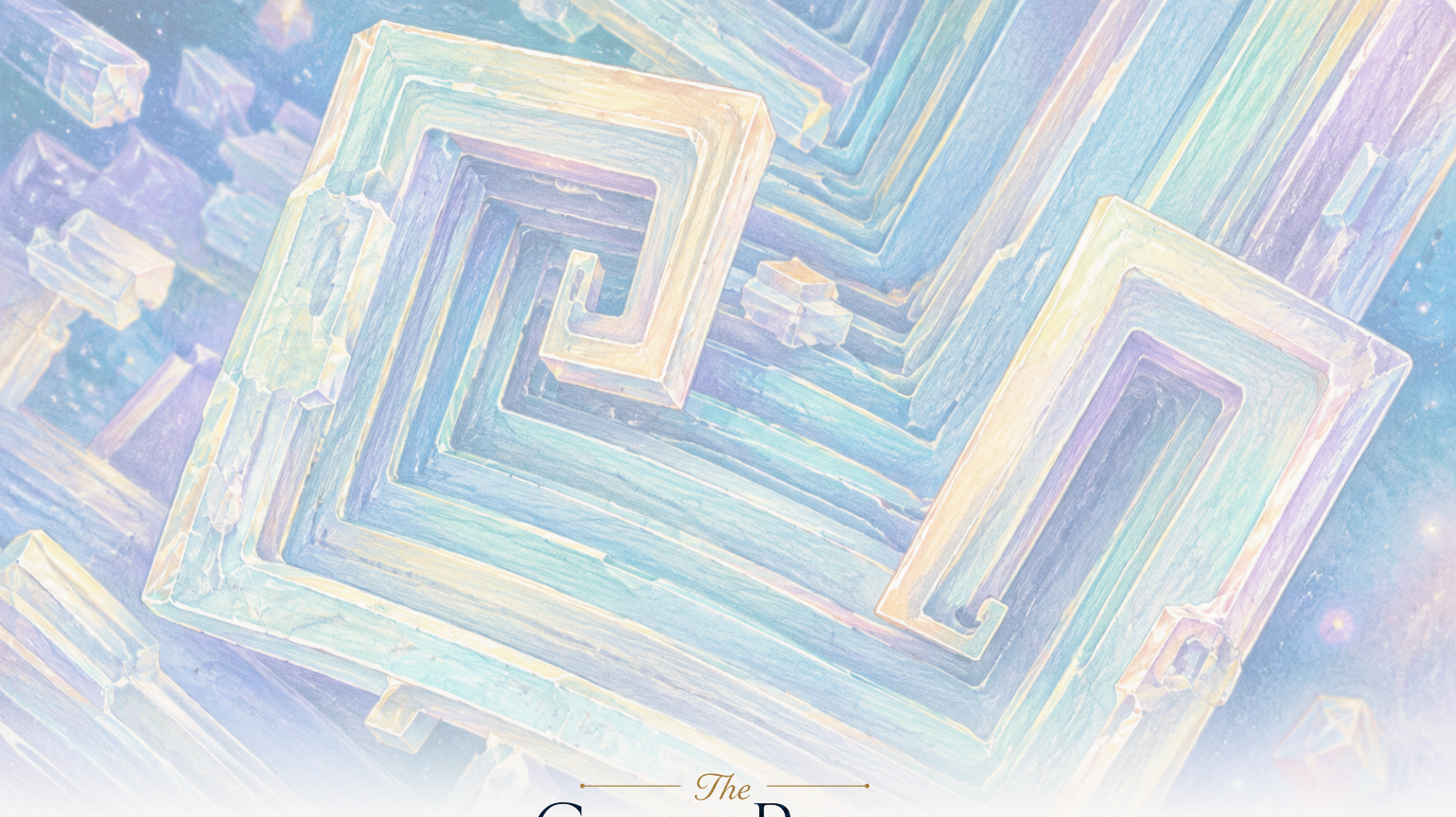


The Clean Paper

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

Ուղեծրում կերակրի աղը աճեց դատարկ խորանարդների տեսքով. ձգողականությունը փոխեց աղաջուրը, ոչ աղը

Միջազգային տիեզերակայանում աճեցված նատրիումի քլորիդի բյուրեղների մեջ կային 2–8 միլիմետր չափով դատարկ, աստիճանաձև խորանարդներ: Հոդվածները աջակցում են նյութափոխադրման բացատրությանը. սովորական նստեցումն ու լողունակությամբ պայմանավորված հոսքը խիստ թուլացած էին, իսկ աճի վաղ փուլում գերիշխում էր դիֆուզիան: Բյուրեղային ցանցը աղի նոր ձև չի դարձել, և փորձերը արդյունաբերական գործընթաց չեն հաստատում:

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Matteo and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions*, Donald Pettit and Pietro Fontana, npj Microgravity 5, 25 (2019) · DOI: 10.1038/s41526-019-0085-0

Ուղեծրում սովորական կերակրի աղը աճեց դատարկ, աստիճանաձև խորանարդների տեսքով

Բյուրեղները ճարտարապետական տեսք ունեին. քառակուսի շրջանակներ՝ ներսում նոր քառակուսի շրջանակներով, իսկ երեսները՝ ներս ընկած աստիճանաձև խոռոչների նման։

Դրանք սովորական նատրիումի քլորիդից էին՝ նույն միացությունից, ինչ կերակրի աղը։ Անսովորը նյութը չէր։ Անսովորը նրա շուրջ եղած աղաջուրն էր։

Երկրի վրա սանտիմետրային ծավալի հեղուկում աճող բյուրեղը կարող է սուզվել, դիպչել պատին կամ մակերևույթին և նպաստել խտության տարբերությունների առաջացմանը, որոնք շրջանառում են լուծույթը։ Միջազգային տիեզերակայանում սովորական նստեցումը և լողունակությամբ պայմանավորված հոսքը խիստ թուլացած էին։ Որոշ աղային բյուրեղներ բավական երկար կախված էին մնում, որպեսզի դանդաղ և ավելի համաչափ աճեն՝ ձևավորելով **hopper խորանարդներ**՝ 2-ից 8 միլիմետր կողերով։

2011, 2015 և 2019 թվականներին հրապարակված երեք հոդված նկարագրում են այս փորձերը։ Միասին դրանք նյութափոխադրման ֆիզիկայի պարզ դաս են տալիս. լուծված նյութի՝ բյուրեղին հասնելու եղանակը փոխելը կարող է փոխել նրա տեսանելի ձևը՝ առանց ատոմային կառուցվածքը փոխելու։

Դրանք չեն ցույց տալիս, որ տիեզերքը «կատարյալ» բյուրեղներ է ստեղծում, չեն հաստատում արդյունաբերական գործընթաց և չեն բացահայտում աղի նոր տեսակ։

Ինչն է խորանարդը դարձնում hopper բյուրեղ

Նատրիումի քլորիդի սովորական բյուրեղը խորանարդային ատոմային դասավորություն ունի։ **Hopper բյուրեղը** նույնպես խորանարդային է, բայց նրա անկյուններն ու եզրերը աճում են երեսների կենտրոններից ավելի արագ։ Արդյունքում յուրաքանչյուր երեսի մեջ առաջանում է դատարկ, աստիճանաձև խորացում՝ կարծես խորանարդը սկզբում կառուցում է իր շրջանակը, հետո միայն փորձում լրացնել պատերը։

ISS-ի ավելի ուշ օրինակը այս աճի պատկերը տեսանելի է դարձնում, բայց այստեղ այն համատեքստ է, ոչ երեք նատրիումքլորիդային հոդվածների ապացույց։ Ստորև Donald Pettit-ի պատկերը և ժամանակ-lapse-ը ցույց են տալիս **կալիումի քլորիդ**՝ այլ աղ, որը միկրոգրավիտացիայում ձևավորում է աստիճանաձև hopper և ոլորուն կառուցվածքներ։

[figure_pair pending]

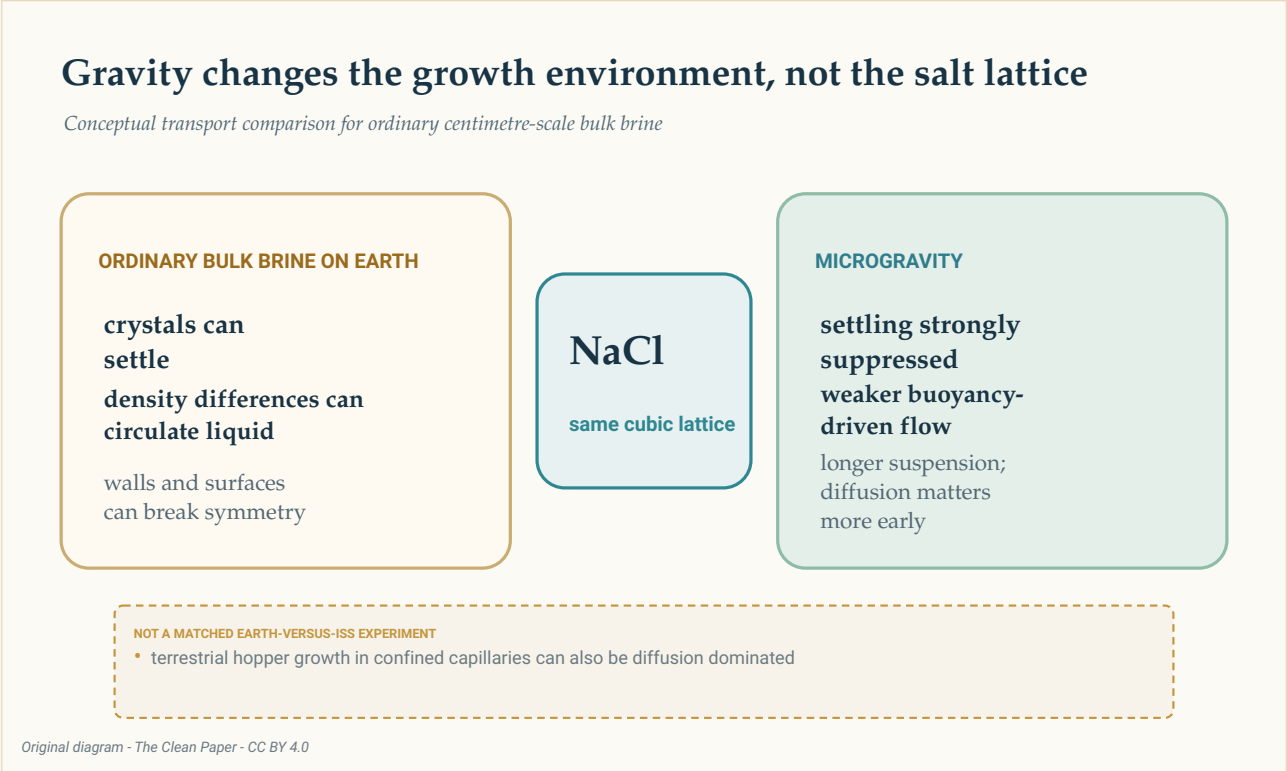
ISS-ում աճեցված կալիումի քլորիդի ոլորուն hopper բյուրեղների երկու սկանավորող էլեկտրոնային մանրադիտակային պատկեր: Այս ավելի ուշ պատկերները ձևաբանության համատեքստային օրինակներ են, ոչ նատրիումի քլորիդի նմուշներ կամ չափումներ 2011, 2015 կամ 2019 թթ. ուսումնասիրություններից, որոնք քննարկվում են այս հոդվածում:

[video pending]

Միկրոգրավիտացիայում բարակ ջրային թաղանթի մեջ կալիումի քլորիդի hopper աճի ավելի ուշ ժամանակ-lapse: Այն ցույց է տալիս եզրերի և անկյունների աճը, ոչ այս հոդվածում վերլուծված նատրիումի քլորիդի փորձերը կամ տվյալները:

Բյուրեղներն աճում են **գերհագեցած աղաջրից**՝ աղաջրից, որը տվյալ պայմաններում հավասարակշռության վիճակում լուծված նատրիումի քլորիդից ավելի շատ աղ է պարունակում: Նատրիումի և քլորիդի իոնները պետք է անցնեն հեղուկով և միանան բյուրեղի մակերևույթին:

Դրանք տեղափոխելու երկու հիմնական եղանակ կա: **Դիֆուզիան** մոլեկուլների պատահական շարժումն է, որը լուծված նյութը տեղափոխում է կոնցենտրացիայի տարբերության ուղղությամբ՝ առանց ամբողջ հեղուկի շրջանառության: **Կոնվեկցիան** հենց հեղուկի շարժումն է: Սովորական ձգողականության պայմաններում ջերմաստիճանի կամ կոնցենտրացիայի փոքր տարբերությունները կարող են փոխել խտությունը և առաջացնել լողունակությամբ պայմանավորված շրջանառություն: Բյուրեղները կարող են նաև **նստել**՝ իջնել հեղուկի միջով:



Հայեցակարգային համեմատությունը երկու միջավայրերում ցույց է տալիս նույն նատրիումի քլորիդի ցանցը: Երկրի վրա սովորական ծավալային աղաջրում կարող են գործել նստեցումը, լողունակային շրջանառությունն ու մակերևույթի հետ շփումը, մինչդեռ

միկրոգրավիտացիան խիստ թուլացնում է առաջին երկուսը՝ թույլ տալով ավելի երկար կախված մնալ և աճի սկզբում դիֆուզիան դարձնելով ավելի կարևոր։ Սա զույգացված Երկիր–ISS փորձ չէր։

The Clean Paper CC BY 4.0

Փորձը կատարվել է Միջազգային տիեզերականում՝ ուղեծրային միկրոգրավիտացիոն լաբորատորիայում։ **Միկրոգրավիտացիա** բառը չի նշանակում ձգողականության բացակայություն։ 2019 թ. հոդվածը հաղորդում է մոտ Երկրի մակերևութային ձգողականության 1.2 միլիոներորդականին, այսինքն՝ 1.2 micro-g-ին համարժեք մնացորդային արագացում, ինչպես նաև հեղուկի դանդաղ ցիկլային շարժում։ Միջավայրը փոխել է նյութափոխադրման հավասարակշռությունը. այն աղաջուրը լրիվ անշարժ չի դարձրել։

Դանդաղ ճանապարհ դեպի միլիմետրային խորանարդներ

2019 թ. ուսումնասիրությունը կենտրոնացել է ISS-ում աղաջրի ջրի գոլորշիացման ընթացքում աճած hopper խորանարդների վրա։ Հաղորդված կողերի երկարությունները եղել են **2–8 միլիմետր**։ Աճի արագությունը եղել է **0.34–1.0 միկրոմետր րոպեում** (մոտ **0.49–1.44 միլիմետր օրական**)՝ միջինը **0.68 միկրոմետր րոպեում** և 0.23 ստանդարտ շեղումով։

Այդ միջին արագությամբ 8 միլիմետրանոց կողի ձևավորումը մոտ մեկ շաբաթ կպահանջեր։ Սա գնահատական է, ոչ մեկ բյուրեղի յուրաքանչյուր փուլի ժամանակ-lapse չափում։

Հեղինակները գերհագեցվածությունը գնահատել են **1.002-ից ցածր**։ Նրանց մեջբերած Երկրի վրա կատարված համեմատական աշխատանքներում hopper աճը նկարագրվում էր շատ ավելի բարձր՝ 1.45-ից մեծ գերհագեցվածության պայմաններում՝ 10–110 միկրոմետր/վրկ արագությամբ վայրկյաններից մինչև րոպեներ, սովորաբար 250 միկրոմետրից փոքր խորանարդներ ստանալով։

Այս համեմատությունը տեղեկատու է, բայց զույգացված չէ։ ISS-ի բյուրեղներն ու Երկրի մասին գրականության տվյալները չեն առաջացել նույն խմբի՝ միաժամանակ և նույնական պայմաններով վարած Երկիր–ուղեծիր երկու թևերից։ Ձգողականությունից բացի կարող են կարևոր լինել տարբեր տարաները, միջերեսները և մեթոդները։

Ուստի ամենաուժեղ հակադրությունը նկարագրական է. ISS-ի այս դիտարկումներում hopper խորանարդները դանդաղ են աճել, ցածր գերհագեցվածության պայմաններում, օրերից շաբաթների ընթացքում և հասել միլիմետրային չափերի։

Վաղ շրջանում գերիշխում էր դիֆուզիան, բայց ավելի ուշ հոսքը դեռ հնարավոր էր

2019 թ. հոդվածը օգտագործել է **Peclet թիվը**՝ հեղուկի շարժումով և դիֆուզիայով նյութափոխադրումը համեմատելու համար։ Մեկից փոքր արժեքը նշանակում է, որ դիֆուզիան ավելի կարևոր է, մեկից մեծը՝ որ ծավալային շարժումը կարող է գերակշռել։

> **Հարաբերություն է, ոչ անջատիչ**
>
> Peclet թիվը երկու նյութափոխադրման արագությունների համեմատություն է։ Այն աշխարհը չի բաժանում մեկից ցածր՝ կատարելապես անշարժ հեղուկի և մեկից բարձր՝ մաքուր կոնվեկցիայի։ Այստեղ արժեքը փոխվել է բյուրեղի չափով և շրջապատող աղաջրի համար օգտագործված արագության գնահատականով։ Ամենափոքր բյուրեղները հստակ դիֆուզիոն գերիշխող ռեժիմում էին, մինչդեռ ավելի մեծ տարայի ամենամեծ բյուրեղը կարող էր անցնել մի ռեժիմի, որտեղ դանդաղ հեղուկային շարժումն արդեն կարևոր էր։

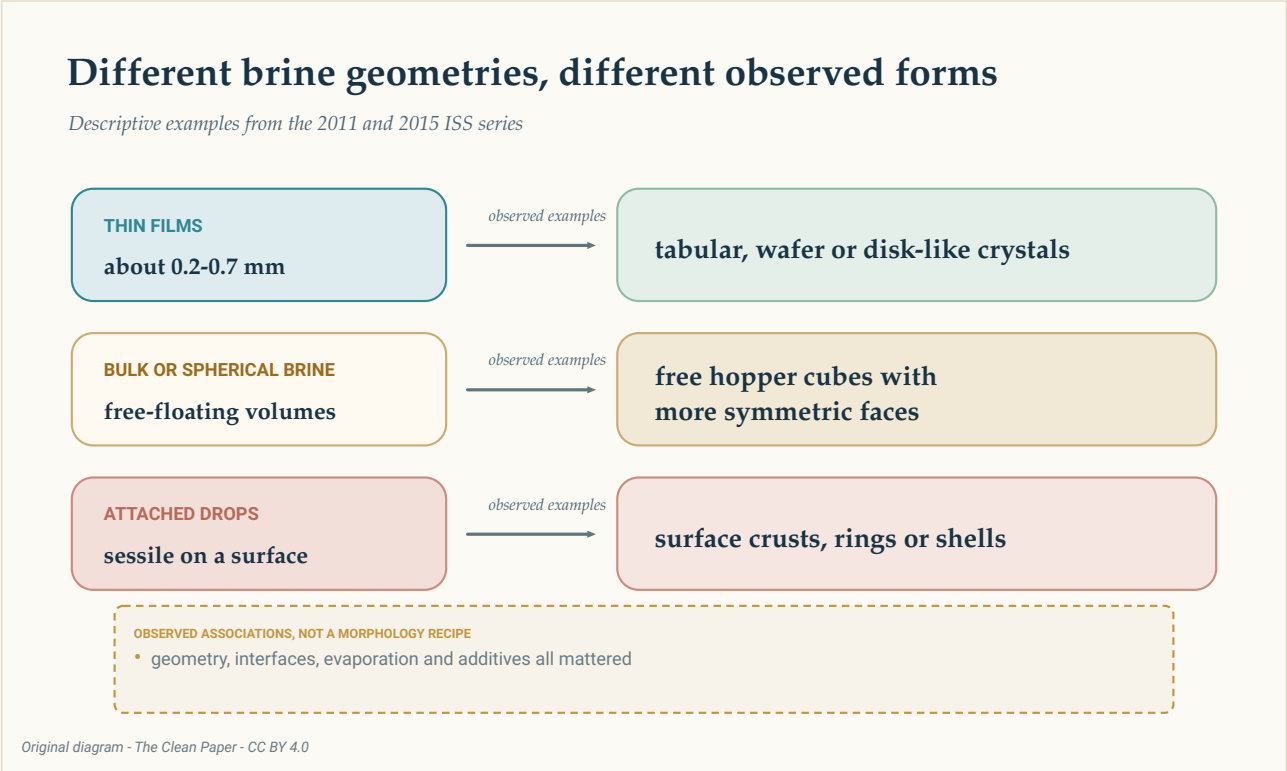
Փոքր՝ մոտ 0.8 սանտիմետրանոց կաթիլներում Peclet-ի գնահատված արժեքները միջուկավորման մոտ **0.0004**-ից բարձրացել են մինչև վերջնական չափի մոտ **0.03**։ Դիֆուզիան մնացել է գերիշխող։

2–3 սանտիմետրանոց բյուրեղացուցիչներում գնահատականը 50 միկրոմետրանոց միջուկի համար մոտ **0.05**-ից բարձրացել է մինչև 4 միլիմետրանոց կողի համար մոտ **4**։ Վաղ աճը դեռ դիֆուզիոն գերիշխող էր, բայց ավելի ուշ դանդաղ ցիկլային շարժումը կարող էր նպաստել։

Ահա թե ինչու «միկրոգրավիտացիան վերացրեց կոնվեկցիան» պնդումը սխալ կլիներ։ Սովորական լողունակությամբ պայմանավորված շրջանառությունն ու նստեցումը խիստ նվազել էին։ Բայց մնացորդային արագացումն ու չափելի շարժումը պահպանվել էին։

Հեղուկի ձևն էլ կարևոր էր

2011 թ. հոդվածը և 2015 թ. հոդվածը ընդլայնում են պատկերը։ Դրանք հաղորդում են աղի բյուրեղացում բարակ թաղանթներում, ավելի հաստ հեղուկային շերտերում, մոտ գնդաձև աղաջրային ծավալներում և մակերևույթին ամրացված կաթիլներում։



Երեք շարքը ամփոփում են դոսյեռում դիտված օրինակները. բարակ թաղանթներ՝ թիթեղաձև կամ սկավառակաձև ձևերով, ծավալային կամ գնդաձև աղաջուր՝ ազատ hopper խորանարդներով, և ամրացված կաթիլներ՝ կեղևներով, օղակներով կամ պատյաններով: Սրանք նկարագրական կապեր են, ոչ բաղադրատոմս կամ երաշխիք:

The Clean Paper CC BY 4.0

2011 թ. ուսումնասիրությունում մոտ 0.2–0.7 միլիմետր հաստությամբ բարակ թաղանթները տվել են բարակ թիթեղներ և թիթեղաձև բյուրեղներ: Ազատ լողացող աղաջրային ծավալները թույլ են տվել ավելի համաչափ կողային երեսներ և hopper խորանարդներ:

2015 թ. դիտարկումները ներառել են 0.2–0.7 միլիմետր հաստությամբ բարակ շերտեր, մոտ 4–6 միլիմետր ավելի հաստ շերտեր և մոտ 20–32 միլիմետր լայնությամբ մակերևույթին կպած կիսագնդաձև կաթիլներ: Հաղորդված ձևերի թվում եղել են թիթեղաձև hopper-ներ, խորանարդներ, սկավառակաձև բյուրեղներ, դենդրիտներ, օղակներ և պատյաններ: Պոլիէթիլեն գլիկոլի ավելացումը դիտարկումների մի շարքում ճնշել է hopper աճը:

Հեղինակները 2015 թ. աշխատանքը նկարագրել են որպես անձնակազմի ազատ ժամանակում՝ չհաշվառված պաշարներով արված դիտարկումներ, ոչ խիստ ծրագրային հետազոտություն: Օրինակները ցույց են տալիս, որ հեղուկի երկրաչափությունը, միջերեսները, գոլորշիացումը և հավելումները բոլորը կարևոր էին: Դրանք չեն տալիս դետերմինիստական բաղադրատոմս, որտեղ մեկ տարայի ձևը երաշխավորում է մեկ բյուրեղային ձև:

Բյուրեղային ցանցը աղի նոր ձև չդարձավ

Բյուրեղային կառուցվածքի և **մորֆոլոգիայի** տարբերությունը այստեղ էական է։

Կառուցվածքը ատոմների կրկնվող դասավորությունն է։ Մորֆոլոգիան արտաքին տեսանելի ձևն է։ 2011 թ. հոդվածի նեյտրոնային դիֆրակցիան Երկրի վրա ստացված նմուշների համեմատ չի հայտնաբերել նատրիումի քլորիդի կառուցվածքի կամ բյուրեղային բջջի պարամետրերի փոփոխություն։ Ուղեծրային նմուշները նաև պարունակել են **աղաջրային ներառումներ**՝ լուծույթի փոքր գրպաններ, որոնք փակված են բյուրեղի ներսում։

Այսպիսով, մեծ և համաչափ արտաքին տեսքը ավելի մաքուր կամ առանց արատների նյութի ապացույց չէ։ Դոսյեի ոչ մի հոդված չի հաղորդում ավելի բարձր քիմիական մաքրություն, ավելի լավ մեխանիկական հատկություններ կամ կոնկրետ սարքի համար պիտանիություն։

Ձգողականությունը գործել է անուղղակիորեն։ Այն փոխել է նստեցումը, հեղուկի շրջանառությունը, կողմնորոշումը և մակերևույթների հետ շփումը։ Այն չի փոխել նատրիում–քլորիդ կապերի ուժը և չի ստեղծել նոր ատոմային փուլ։

Ինչ կարող են և ինչ չեն կարող սովորեցնել այս փորձերը

Հոդվածները աջակցում են նյութափոխադրման բացատրությանը. սովորական նստեցման և լողունակությամբ պայմանավորված հոսքի ուժեղ ճնշումը թույլ է տվել որոշ բյուրեղների ավելի երկար կախված մնալ և ավելի համաչափ պայմաններում դանդաղ աճել։ Չափված չափերը, արագություններն ու ձևերը ուղղակի դիտարկումներ են։ Գերհագեցվածությունը, աճի պատմությունը և Peclet թվերը պարունակում են գնահատականներ։ Երկրի հետ համեմատությունը մասամբ հիմնված է այլ հրապարակված փորձերի վրա։

Դոսյեի համար մեկ միասնական հայտարար գոյություն չունի։ Այն միավորում է առանձին բյուրեղներ, բյուրեղացուցիչներ և ընտրված օրինակներ երեք հոդվածներից։ Դրանք մեկ ընդհանուր թվի մեջ գումարելը կստեղծեր միատարր փորձի պատրանք, որը երբեք չի եղել։

Ուսումնասիրությունները նաև չեն հաղորդում արտադրական պնդման համար անհրաժեշտ ապացույցներից որևէ մեկը։ Չեն չափվում արտադրողականությունը, արտադրության արժեքը, էներգիայի ծախսը, ելքը, հուսալիությունը կամ օգտակար նյութական հատկությունները։ 2015 թ. շարքը հետախուզական էր։ Երկրի հետ համեմատությունները զույգացված վերահսկիչ փորձեր չէին։ Եվ մեծ կամ տեսողականորեն տպավորիչ լինելը նույնը չէ, ինչ կոնկրետ կիրառության համար ավելի լավ լինելը։

Բնական աղային հանքավայրերը կարող են պարունակել սանտիմետրերով չափվող hopper խորանարդներ, երբեմն կախված աղաջրով ներծծված ցեխի մեջ։ 2019 թ. հոդվածը առաջարկում է հնարավոր նմանություն դանդաղ, դիֆուզիոն գերիշխող աճի հետ։ Սա հետաքրքիր համեմատություն է, ոչ ապացույց, որ բնական և ուղեծրային hopper-ները նույն մեխանիզմն ունեն։

Կարճ ամփոփում

Միջազգային տիեզերակայանում գոլորշիացող աղաջրից աճեցված աղային բյուրեղների թվում կային 2–8 միլիմետր չափով դատարկ, աստիճանաձև hopper խորանարդներ։ Հոդվածները աջակցում են նյութափոխադրման վրա հիմնված բացատրությանը. միկրոգրավիտացիան խիստ թուլացրել է սովորական նստեցումն ու լողունակային հոսքը՝ թույլ տալով դանդաղ աճ և ավելի երկար կախված մնալ, մինչ աճի վաղ փուլում գերիշխել է դիֆուզիան։ Հեղուկի երկրաչափությունը, միջերեսները, գոլորշիացումն ու հավելումները նույնպես ազդել են մորֆոլոգիայի վրա։ Նեյտրոնային դիֆրակցիան նատրիումի քլորիդի նոր կառուցվածք չի ցույց տվել, իսկ աղաջրային ներառումները պահպանվել են։ Սա սահմանափակ նյութագիտական դեպք է, ոչ ապացույց, որ տիեզերքը կատարյալ բյուրեղներ է ստեղծում կամ արդյունաբերական գործընթաց է հնարավոր դարձնում։

Առանց չափազանցության

Ինչ են ցույց տալիս հոդվածները. Միլիմետրային նատրիումի քլորիդի hopper խորանարդներ և այլ մորֆոլոգիաներ աճել են ISS-ի մի քանի աղաջրային երկրաչափություններում։ 2019 թ. hopper խորանարդները դանդաղ են աճել ցածր գնահատված գերհագեցվածության պայմաններում, և վաղ փուլում գերիշխել է դիֆուզիան։

Ինչն է մեկնաբանություն. Խիստ նվազեցված նստեցումն ու լողունակությամբ պայմանավորված հոսքը թույլ են տվել ավելի երկար կախված մնալ և ավելի համաչափ աճ։ Մեծ բյուրեղացուցիչում ուշ փուլում դանդաղ հեղուկային շարժումը կարող էր կարևոր լինել։

Ինչ չեն ցույց տալիս. Աղի նոր ատոմային ձև, ավելի մաքուր կամ արատազերծ բյուրեղներ, զույգացված Երկիր–ISS փորձ, միկրոգրավիտացիայի համընդհանուր առավելություն կամ առևտրային արտադրական ուղի։

Հիմնական սահմանափակումները. Երեք առանձին ուսումնասիրություն՝ տարբեր երկրաչափություններով և ընտրված օրինակներով, միջուսումնասիրական համեմատություններ Երկրի տվյալների հետ, գնահատված նյութափոխադրման մեծություններ, դոպեի հետախուզական ու ոչ ծրագրային հատվածներ, և գործընթացի տնտեսագիտության կամ օգտակար հատկությունների փորձերի բացակայություն։

Որքան վստահություն պետք է ունենա սովորական ընթերցողը. Բարձր վստահություն, որ հաղորդված ուղեծրային ձևաբանություններն ու դանդաղ աճը իրական են: Միջին վստահություն նյութափոխադրման բացատրության նկատմամբ՝ որպես դիտարկումները լավագույնս միավորող մեկնաբանություն: Շատ ցածր վստահություն ցանկացած պնդման նկատմամբ, որը այս աղային փորձերը վերածում է տիեզերական արտադրության մասին ընդհանուր խոստման:

Աղբյուրներ

Pettit and Fontana, Comparison of sodium chloride hopper cubes grown under microgravity and terrestrial conditions, npj Microgravity 5, 25 (2019)
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Fontana, Schefer and Pettit, Characterization of sodium chloride crystals grown in microgravity, Journal of Crystal Growth 324, 207-211 (2011)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

Fontana, Pettit and Cristoforetti, Sodium chloride crystallization from thin liquid sheets, thick layers, and sessile drops in microgravity, Journal of Crystal Growth 428, 80-85 (2015)
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026