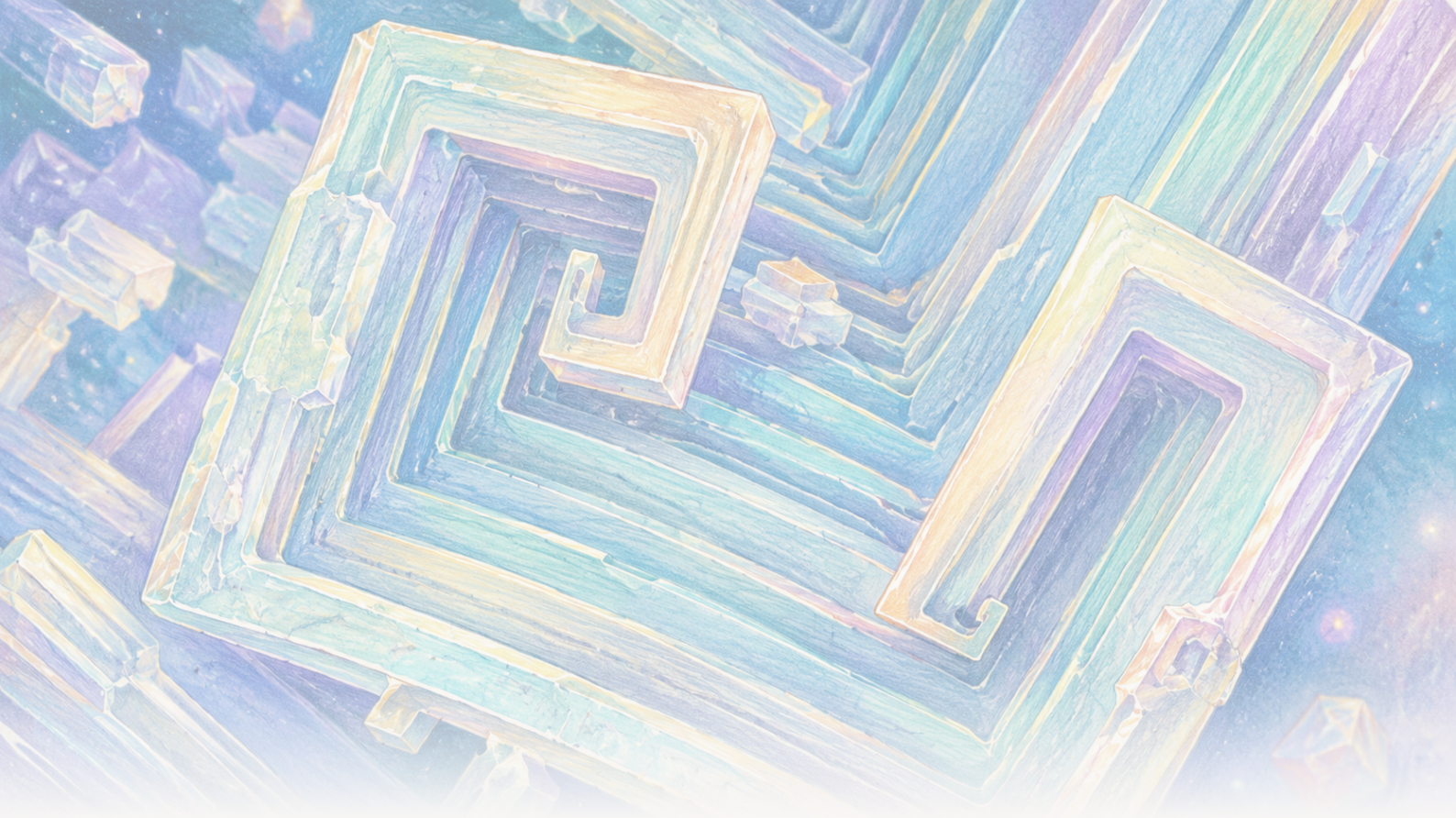


The Clean Paper

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

Kiertoradalla ruokasuola kasvoi ontoiksi kuutioiksi. Gravitaatio muutti suolaliuosta, ei suolaa

Kansainvälisellä avaruusasemalla kasvatettuihin natriumkloridikiteisiin kuului 2–8 millimetrin kokoisia onttoja, porrastettuja kuutioita. Artikkelit tukevat kuljetusselitystä: tavallinen laskeutuminen ja nostevoiman ajama virtaus olivat voimakkaasti vaimentuneet, kun taas diffuusio hallitsi varhaista kasvua. Hila ei muuttunut uudeksi suolamuodoksi, eivätkä kokeet osoita teollista prosessia.

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

Kiertoradalla tavallinen ruokasuola kasvoi ontoiksi, porrastetuiksi kuutioiksi

Kiteet näyttivät arkkitehtonisilta: neliömäisiä kehyksiä sisäkkäin, ja niiden pinnat olivat painuneet porrastetuiksi syvennyksiksi.

Ne koostuivat tavallisesta natriumkloridista, samasta yhdisteestä kuin ruokasuola. Epätavallista ei ollut materiaali vaan sitä ympäröivä suolaliuos.

Maassa senttimetriluokan nestetilavuudessa kasvava kide voi vajota, osua seinämään tai pintaan ja edesauttaa liuosta kierrättäviä tiheyseroja. Kansainvälisellä avaruusasemalla tavallinen laskeutuminen ja nostevoiman ajama virtaus olivat voimakkaasti vaimennettuja. Osa suolakiteistä pysyi leijumassa riittävän pitkään kasvaakseen hitaasti ja symmetrisemmin **hopper-kuutioiksi**, joiden särmät olivat 2–8 millimetriä.

Kolme artikkelia, julkaistu vuosina 2011, 2015 ja 2019, kuvaavat näitä kokeita. Yhdessä ne tarjoavat selkeän oppitunnin kuljetusfysiikasta: liuenneen aineen kulkeutumistavan muuttaminen kiteen pinnalle voi muuttaa sen näkyvää muotoa muuttamatta atomirakennetta.

Ne eivät osoita, että avaruus tekee täydellisiä kiteitä, vakiinnuta teollista prosessia tai paljasta uutta suolan muotoa.

Miten kuutiosta tulee hopper-kide

Tavallisella natriumkloridikiteellä on kuutiollinen atomijärjestys. **Hopper-kide** on edelleen kuutiollinen, mutta sen kulmat ja särmät kasvavat pintojen keskiosia nopeammin. Tuloksena on ontto, porrastettu painauma kullakin pinnalla, aivan kuin kuutio rakentaisi ensin kehyksensä ja täyttäisi seinät vasta myöhemmin.

Myöhempi ISS-esimerkki tekee kasvutavan näkyväksi, mutta se on taustaa eikä näyttöä näistä kolmesta natriumkloridiartikkelista. Donald Pettitin alla olevassa kuvassa ja aikaviivevideossa **kaliumkloridi**, eri suola, muodostaa mikrogravitaatiossa porrastettuja hopper- ja kierremorfologioita.

[figure_pair pending]

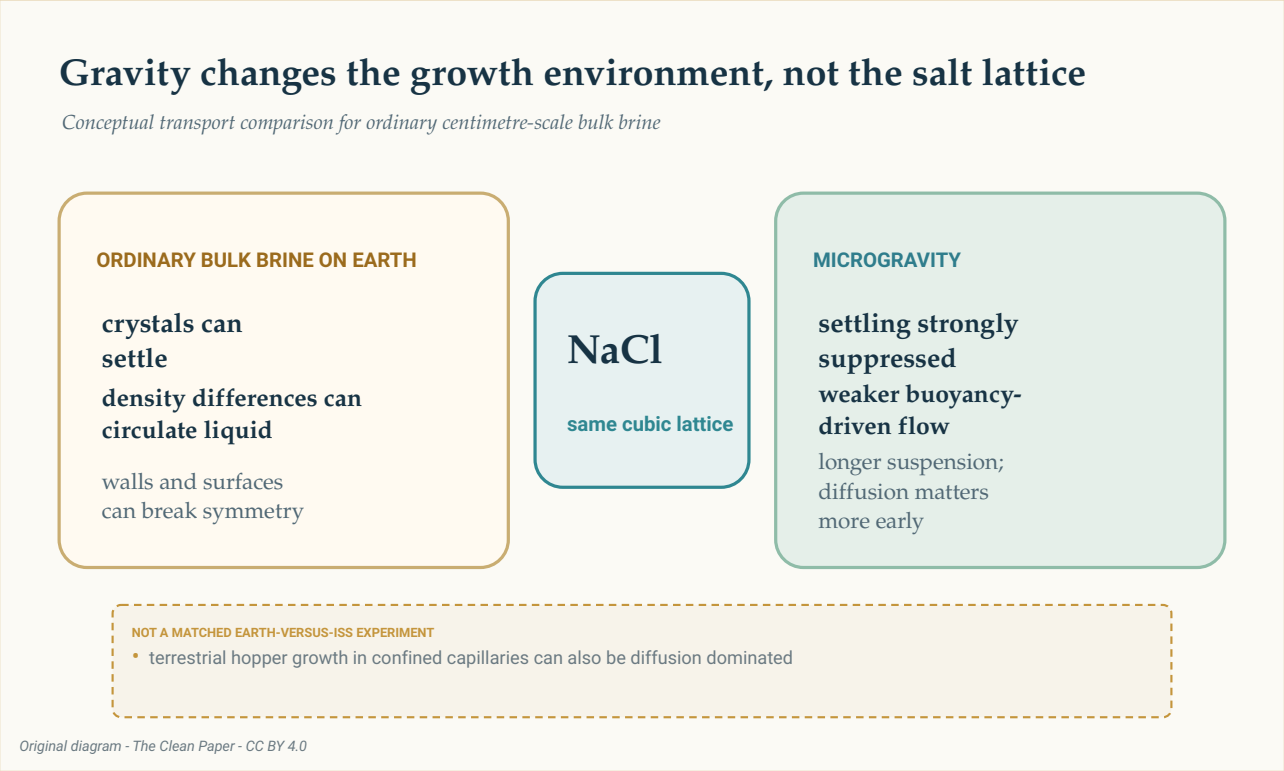
Kaksi pyyhkäisyelektronimikroskooppikuvaa ISS:llä kasvatetuista kaliumkloridin kierremäisistä hopper-kiteistä. Nämä myöhemmät kuvat ovat morfologian taustaesimerkkejä, eivät tässä käsiteltyjen vuosien 2011, 2015 tai 2019 tutkimusten natriumkloridinäytteitä tai mittauksia.

[video pending]

Myöhempi aikaviivevideo kaliumkloridin hopper-kasvusta ohuessa vesikalvossa mikrogravitaatiossa. Se havainnollistaa särmien ja kulmien kasvua, ei tässä artikkelissa analysoituja natriumkloridikokeita tai -dataa.

Kiteet kasvavat **ylikylläisestä suolaliuoksesta**: suolavedestä, jossa on enemmän liuennutta natriumkloridia kuin tasapainossa kyseisissä olosuhteissa pysyisi liuenneena. Natrium- ja kloridi-ionien täytyy kulkea nesteen läpi ja liittyä kiteen pintaan.

Niitä voidaan kuljettaa karkeasti kahdella tavalla. **Diffuusio** on satunnaista molekyyliliikettä, joka kuljettaa liuennutta ainetta pitoisuuseroa pitkin ilman nesteen kokonaisvirtausta. **Konvektio** on itse nesteen liikettä. Tavallisessa painovoimassa pienet lämpötila- tai pitoisuuserot voivat muuttaa tiheyttä ja ajaa nostevirtauksia. Kiteet voivat myös **sedimentoitua** eli laskeutua nesteessä.



Käsitteellinen vertailu näyttää saman natriumkloridihilan molemmissa ympäristöissä. Tavallisessa Maan irtosuolaliuoksessa voi esiintyä laskeutumista, nostevoiman ajamaa kiertoa ja pintakosketuksia; mikrogravitaatio vaimentaa voimakkaasti kahta ensimmäistä, mahdollistaa pidemmän leijunnan ja tekee diffuusiosta tärkeämmän kasvun alkuvaiheessa. Kyse ei ollut vastaavaksi paritetusta Maa–ISS-kokeesta.

The Clean Paper CC BY 4.0

Koe tehtiin Kansainvälisellä avaruusasemalla, kiertoradalla olevassa mikrogravitaatiolaboratoriossa. Sana **mikrogravitaatio** ei tarkoita gravitaation puuttumista. Vuoden 2019 artikkeli raportoi jäännöskiihtyvyydeksi noin 1,2 miljoonasosaa Maan pintapainovoimasta eli 1,2 mikro-g:tä sekä hidasta syklistä nesteen liikettä. Ympäristö muutti kuljetusmekanismien tasapainoa; se ei tehnyt suolaliuoksesta täysin liikkumatonta.

Hidas reitti millimetrikokoisiin kuutioihin

Vuoden 2019 tutkimus keskittyi hopper-kuutioihin, jotka kasvoivat veden haihtuessa suolaliuoksesta ISS:llä. Raportoidut kuution särmät olivat **2–8 millimetriä**. Kasvunopeudet olivat **0,34–1,0 mikrometriä minuutissa** (noin **0,49–1,44 millimetriä päivässä**), keskiarvo **0,68 mikrometriä minuutissa** ja keskihajonta 0,23.

Tällä keskimääräisellä nopeudella 8 millimetrin särmän muodostuminen kestäisi karkeasti viikon. Laskelma on arvio, ei yhden kiteen kaikkien kasvuvaiheiden aikaviivemittaus.

Kirjoittajat arvioivat ylikylläisyyden olevan alle **1,002**. Heidän käyttämänsä maanpäällinen vertailukirjallisuus kuvasi hopper-kasvua paljon suuremmalla, yli 1,45:n ylikylläisyydellä ja 10–110 mikrometrin sekuntinopeuksilla sekuntien tai minuuttien ajan, tyypillisesti alle 250 mikrometrin kuutioita tuottaen.

Vertailu on informatiivinen mutta ei vastaavaksi paritettu. ISS-kiteet ja maanpäällinen kirjallisuus eivät olleet saman ryhmän samanaikaisia, identtisiä Maa- ja kiertoratahaaroja. Eri astiat, rajapinnat ja menetelmät voivat vaikuttaa gravitaation ohella.

Vahvin kontrasti on siksi kuvaileva: näissä ISS-havainnoissa hopper-kuutiot kasvoivat hitaasti, pienellä ylikylläisyydellä, päivien tai viikkojen ajan ja saavuttivat millimetrikoon.

Diffuusio hallitsi alussa; myöhemmin virtaus saattoi vaikuttaa

Vuoden 2019 artikkeli käytti **Péclet'n lukua** vertaamaan nesteen liikkeen ja diffuusion kuljetusta. Alle yhden oleva arvo tarkoittaa, että diffuusio on tärkeämpi; yli yhden oleva arvo kertoo, että kokonaisvirtaus voi hallita.

> **Suhdeluku, ei kytkin**
>
> Péclet'n luku vertaa kahta kuljetusnopeutta. Se ei jaa maailmaa täydellisen liikkumattomaan nesteeseen alle yhden ja puhtaaseen konvektioon yli yhden. Tässä arvo muuttui kiteen koon ja ympäröivän suolaliuoksen nopeusarvion mukaan. Pienimmät kiteet olivat selvästi diffuusion hallitsemassa tilassa; suuremman astian suurin kide saattoi siirtyä alueelle, jossa hidas nesteen liike vaikutti.

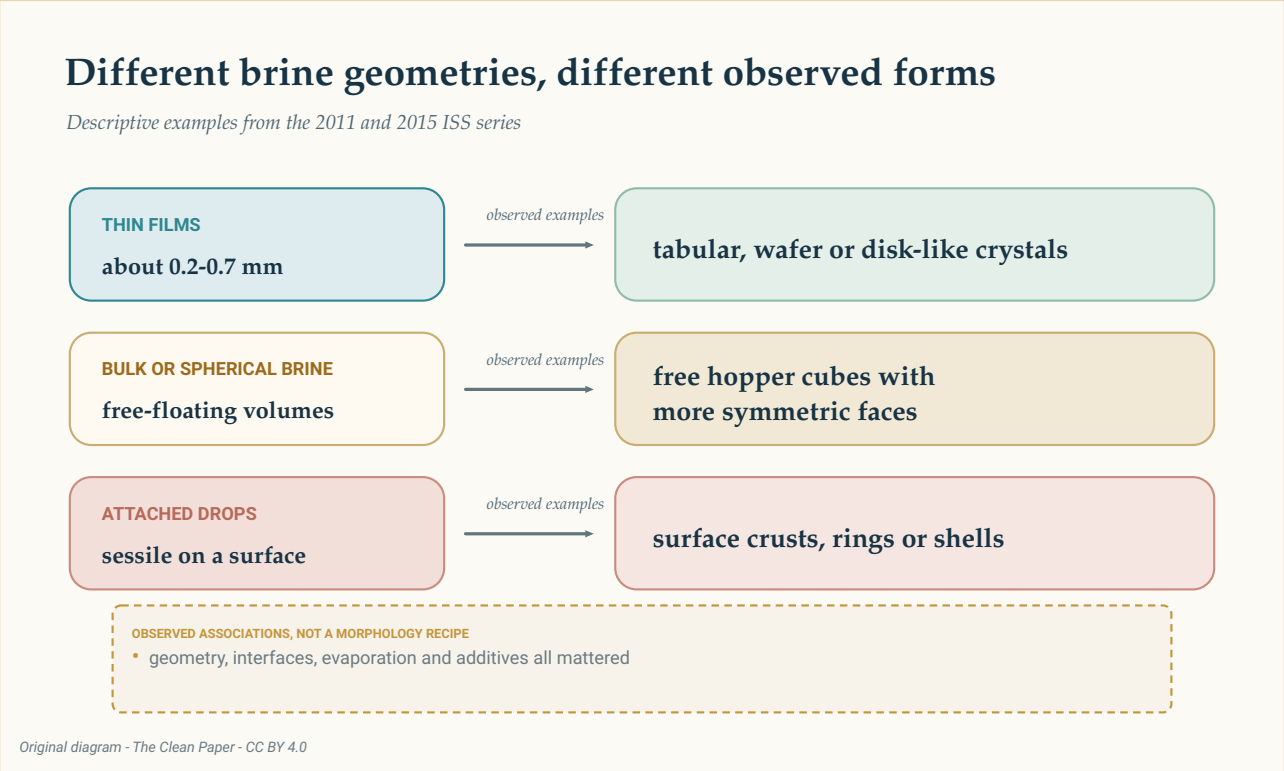
Pienemmissä, noin 0,8 senttimetrin pisaroissa arvioidut Péclet'n luvut nousivat noin **0,0004:stä** ydintymisen lähellä noin **0,03:een** lopullisessa mitatussa koossa. Diffuusio pysyi hallitsevana.

2–3 senttimetrin kiteytysastioissa arvio nousi noin **0,05:stä** 50 mikrometrin alkuytimelle noin **4:ään** 4 millimetrin särmällä. Varhainen kasvu oli yhä diffuusiovetoista, mutta hidas syklinen liike saattoi vaikuttaa myöhemmin.

Siksi ”mikrogravitaatio poisti konvektion” olisi väärin. Tavallinen nostevoiman ajama kierto ja laskeutuminen vähenivät voimakkaasti. Jäännöskiihtyvyyttä ja mitattavaa liikettä jäi.

Myös nesteen muoto vaikutti

Vuoden 2011 artikkeli ja vuoden 2015 artikkeli laajensivat kuvaa. Niissä raportoitiin suolan kiteytymistä ohuissa kalvoissa, paksummissa nestekerroksissa, likimain pallomaisissa suolaliuostilavuuksissa ja pintaan kiinnittyneissä pisaroissa.



Kolme riviä tiivistävät aineiston havaintoja: ohuet kalvot ja levy- tai kiekkomainen muoto, irto- tai pallomainen suolaliuos ja vapaat hopper-kuutiot sekä kiinnittyneet pisarat, joissa muodostuu kuoria, renkaita tai kuorikerroksia. Nämä ovat kuvailevia yhteyksiä, eivät resepti tai takuu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Vuoden 2011 tutkimuksessa noin 0,2–0,7 millimetrin ohuet kalvot tuottivat ohuita kiekkoja ja levymäisiä kiteitä. Vapaasti leijuvat suolaliuostilavuudet sallivat symmetrisemmät sivupinnat ja hopper-kuutiot.

Vuoden 2015 havainnoissa oli 0,2–0,7 millimetrin ohuita kerroksia, noin 4–6 millimetrin paksumpia kerroksia ja pintaan kiinnittyneitä puolipallon muotoisia pisaroita, joiden läpimitta oli noin 20–32 millimetriä. Raportoituja muotoja olivat levymäiset hopper-kiteet, kuutiot, kiekkokiteet, dendriitit, renkaat ja kuoret. Polyetyleeniglykolin lisääminen vaimensi hopper-kasvua yhdessä havaintosarjassa.

Kirjoittajat kuvasivat vuoden 2015 työn miehistön vapaa-ajalla inventoimattomilla tarvikkeilla tehdyiksi havainnoiksi, eivät tiukaksi ohjelmalliseksi tutkimukseksi. Esimerkit osoittavat, että nestegeometria, rajapinnat, haihtuminen ja lisäaineet kaikki vaikuttivat. Ne eivät anna determinististä reseptiä, jossa yksi astiageometria takaisi yhden kidemuodon.

Hila ei muuttunut uudeksi suolamuodoksi

Kiderakenteen ja **morfologian** ero on olennainen.

Rakenne on toistuva atomijärjestys. Morfologia on näkyvä ulkomuoto. Vuoden 2011 neutronidiffraktio ei osoittanut natriumkloridin rakenteen tai hilakennon parametrien muuttuneen maanpäällisiin näytteisiin verrattuna. Kiertoratanäytteissä oli myös **suolaliuosinklusiota**, pieniä kiteen sisään jääneitä liuospusseja.

Suuri ja symmetrinen ulkonäkö ei siis ole näyttöä puhtaammasta tai virheettömästä materiaalista. Yksikään aineiston artikkeli ei raportoi suurempaa kemiallista puhtautta, parempaa mekaanista suorituskykyä tai soveltuvuutta tiettyyn laitteeseen.

Gravitaatio vaikutti epäsuorasti. Se muutti laskeutumista, nesteen kiertoa, orientaatiota ja pintakosketusta. Se ei muuttanut natrium–kloridisidosten lujuutta eikä luonut uutta atomifaasia.

Mitä kokeet voivat ja eivät voi opettaa

Artikkelit tukevat kuljetusfysiikan selitystä: tavallisen laskeutumisen ja nostevirtauksen voimakas vaimentaminen antoi joidenkin kiteiden pysyä leijumassa ja kasvaa hitaasti symmetrisemmissä olosuhteissa. Mitatut koot, nopeudet ja muodot ovat suoria havaintoja; ylikylläisyys, kasvuhistoria ja Péclet'n luvut sisältävät arvioita; Maa-vertailu perustuu osittain muihin julkaistuihin kokeisiin.

Aineistolla ei ole yhtä selkeää yhteistä nimittäjää. Se yhdistää yksittäisiä kiteitä, kiteytysastioita ja valittuja esimerkkejä kolmesta artikkelista. Niiden summaaminen yhdeksi kokonaismääräksi antaisi harhaanjohtavasti vaikutelman yhtenäisestä kokeesta, jota ei ollut.

Tutkimukset eivät myöskään raportoi mitään valmistusväitteen edellyttämää näyttöä. Ne eivät mittaa läpimenoa, tuotantokustannuksia, energiankulutusta, saantoa, luotettavuutta tai hyödyllistä materiaalitehoa. Vuoden 2015 sarja oli eksploratiivinen. Maanpäälliset vertailut eivät olleet vastaavia kontrolleja. Suuri tai visuaalisesti näyttävä ei myöskään tarkoita parempaa tiettyyn sovellukseen.

Luonnollisissa suolaesiintymissä voi olla senttimetriluokan hopper-kuutioita, joskus suolaliuoksen kyllästämässä mudassa leijuvina. Vuoden 2019 artikkeli ehdottaa mahdollista analogiaa hitaan, diffuusiovetoisen kasvun kanssa. Vertailu on kiinnostava, ei todiste siitä, että luonnollisilla ja kiertoradalla kasvaneilla hopper-kiteillä olisi yksi yhteinen mekanismi.

Tiivistelmä ilman turhaa koristelua

Kansainvälisellä avaruusasemalla haihtuvasta suolaliuoksesta kasvatettuihin suolakiteisiin kuului 2–8 millimetrin kokoisia onttoja, porrastettuja hopper-kuutioita. Artikkelit tukevat kuljetusselitystä: mikrogravitaatio vaimensi voimakkaasti tavallista laskeutumista ja nostevirtausta, mikä mahdollisti hitaan kasvun ja pidemmän leijunnan diffuusion hallitessa kasvun alkua. Nestegeometria, rajapinnat, haihtuminen ja lisäaineet vaikuttivat myös morfologiaan. Neutronidiffraktio ei osoittanut uutta natriumkloridirakennetta, ja suolaliuosinklusiota jäi. Työ on rajattu materiaalitieteen tapaustutkimus, ei todiste siitä, että avaruus tuottaisi täydellisiä kiteitä tai mahdollistaisi teollisen prosessin.

Realistinen arvio

Mitä artikkelit osoittavat: Millimetrikokoisia natriumkloridin hopper-kuutioita ja muita morfologioita kasvoi useissa ISS:n suolaliuosgeometrioissa. Vuoden 2019 hopper-kuutiot kasvoivat hitaasti pienellä arvioidulla ylikylläisyydellä, diffuusion hallitessa alkuvaihetta.

Mikä on tulkintaa: Tavallisen laskeutumisen ja nostevirtausten voimakas väheneminen mahdollisti pidemmän leijunnan ja symmetrisemmän kasvun. Hidas nesteen liike saattoi vaikuttaa myöhemmin suuremmassa kiteytysastiassa.

Mitä ne eivät osoita: Uutta suolan atomimuotoa, puhtaampia tai virheettömiä kiteitä, vastaavaksi paritettua Maa–ISS-koetta, mikrogravitaation yleistä etua tai kaupallista valmistusreittiä.

Tärkeimmät rajoitukset: Kolme erillistä tutkimusta eri geometrioilla ja valituilla esimerkeillä; tutkimusten väliset Maa-vertailut; arvioidut kuljetussuureet; aineiston eksploratiiviset, ei-ohjelmalliset osat; ja prosessitalouden tai materiaalitehon testien puuttuminen.

Kuinka paljon luottamusta yleislukijan kannattaa antaa? Suuri luottamus siihen, että raportoidut kiertoradan morfologiat ja hidas kasvu ovat todellisia. Kohtalainen luottamus kuljetusselitykseen parhaana yhteisenä kuvauksena havainnoille. Hyvin pieni luottamus väitteisiin, jotka muuttavat nämä suolakokeet yleiseksi lupaukseksi avaruusvalmistuksesta.

Lähteet

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