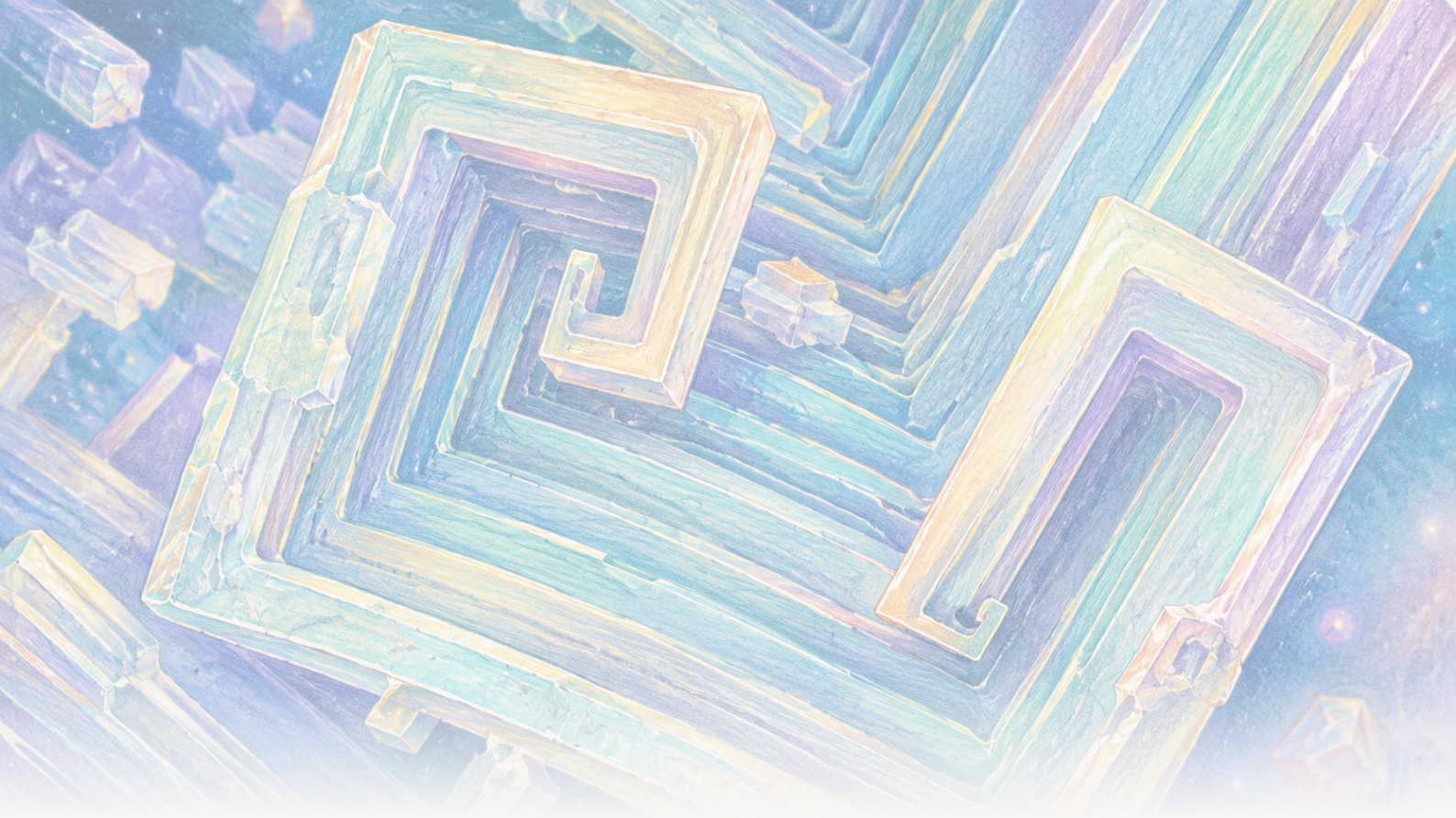


The Clean Paper

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

Orbiidil kasvas lauasool õõnsateks kuupideks. Gravitatsioon muutis soolvett, mitte soola

Rahvusvahelises kosmosejaamas kasvatatud naatriumkloriidi kristallide hulgas olid 2 kuni 8 millimeetri suurused õõnsad, astmelised kuubid. Artiklid toetavad transpordipõhist seletust: tavaline settimine ja ujuvusest põhjustatud vool olid tugevalt alla surutud, samal ajal kui kasvu alguses domineeris difusioon. Võre ei muutunud uueks soolavormiks ning katsed ei tõesta tööstuslikku protsessi.

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

Orbiidil kasvas tavalisest lauasoolast õõnsaid astmelisi kuupe

Kristallid nägid välja arhitektuursed: ruudukujulised raamid üksteise sees, nende tahud astmeliselt sissepoole õõnestunud.

Need olid valmistatud tavalisest naatriumkloriidist, samast ühendist nagu lauasool. Ebatavaline polnud materjal. Ebatavaline oli seda ümbritsev soolvesi.

Maal võib sentimeetrimõõdus vedelikukogumis kasvav kristall vajuda, puudutada seina või pinda ning aidata tekitada tiheduse erinevusi, mis panevad lahuse ringlema. Rahvusvahelises kosmosejaamas olid tavaline settimine ja ujuvusest põhjustatud vool tugevasti alla surutud. Mõned soolakristallid jäid piisavalt kauaks hõljuma, et kasvada aeglaselt ja sümmeetrilisemalt **õõneskuupideks ehk hopper-kristallideks**, mille servad olid 2 kuni 8 millimeetrit.

Kolm artiklit, mis avaldati 2011, 2015 ja 2019, kirjeldavad neid katseid. Koos annavad need selge õppetunni transpordifüüsikast: kui muuta seda, kuidas lahustunud aine kristallini jõuab, võib muuta kristalli nähtavat kuju ilma selle aatomstruktuuri muutmata.

Need ei näita, et kosmos teeb täiuslikke kristalle, ei kehtesta tööstuslikku protsessi ega paljasta uut liiki soola.

Kuidas kuubist saab õõneskuup

Tavalisel naatriumkloriidi kristallil on kuubiline aatomvõre. **Hopper-kristall** on samuti kuubiline, kuid selle nurgad ja servad kasvavad tahkude keskosadest ette. Tulemuseks on iga tahu õõnes, astmeline süvend, justkui püüaks kuup enne seinte täitmist valmis ehitada raami.

Hilisem ISS-i näide muudab selle kasvumustri hästi nähtavaks, kuid on siin kontekst, mitte tõend kolmest naatriumkloriidi artiklist. Donald Pettiti allolev pilt ja aegvõte näitavad **kaaliumkloriidi**, teistsugust soola, mis moodustab mikrogravitatsioonis astmelisi hopper- ja rullitaolisi morfoloogiaid.

[figure_pair pending]

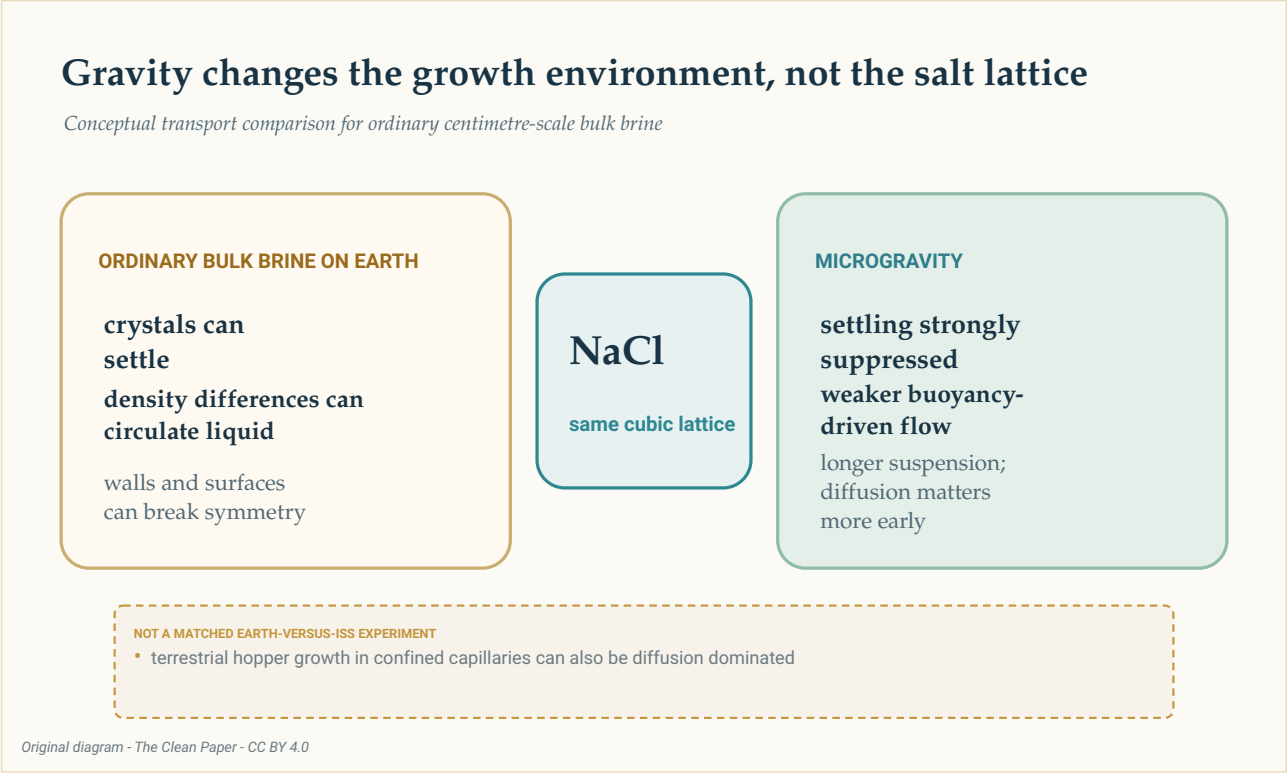
Kaks skaneeriva elektronmikroskoobi pilti ISS-i pardal kasvatatud kaaliumkloriidi rullitaolistest hopper-kristallidest. Need hilisemad pildid on morfoloogia kontekstuaalsed näited, mitte selles artiklis käsitletud 2011., 2015. või 2019. aasta uuringute naatriumkloriidiproovid või mõõtmised.

[video pending]

Hilisem aegvõte kaaliumkloriidi hopper-kristalli kasvust õhukeses veekihis mikrogravitatsioonis. See illustreerib servade ja nurkade kasvu, mitte selles artiklis analüüsitud naatriumkloriidi katseid või andmeid.

Kristallid kasvavad **üleküllastunud soolveest**: soolveest, milles on lahustunud rohkem naatriumkloriidi, kui see antud tingimustes tasakaaluolekus mahutaks. Naatriumi- ja kloriidioonid peavad liikuma läbi vedeliku ja liituma kristallipinnaga.

Neid saab liigutada kahel üldisel viisil. **Difusioon** on juhuslik molekulaarne liikumine, mis kannab lahustunud ainet kontsentratsioonierinevuse suunas ilma vedeliku kui terviku ringlemiseta. **Konvektsioon** on vedeliku enda liikumine. Tavagravitatsioonis võivad väikesed temperatuuri või kontsentratsiooni erinevused muuta tihedust ja käivitada ujuvusest põhjustatud ringvoolu. Kristallid võivad ka **settimise** tõttu läbi vedeliku allapoole liikuda.



Kontseptuaalne võrdlus näitab mõlemas keskkonnas sama naatriumkloriidi võret. Tavapärases mahulises soolvees Maal võivad esineda settimine, ujuvusest põhjustatud ringvool ja kokkupuude pinnaga; mikrogravitatsioon surub kaks esimest tugevalt alla, võimaldades pikemat hõljumist ja muutes difusiooni kasvu alguses olulisemaks. See ei olnud sobitatud Maa-versus-ISS katse.

The Clean Paper CC BY 4.0

Katse toimus Rahvusvahelise kosmosejaama pardal, mis on orbiidil asuv mikrogravitatsioonilabor. Sõna **mikrogravitatsioon** ei tähenda gravitatsiooni puudumist. 2019. aasta artikkel teatas jääkkiirendusest umbes 1,2 miljondikku Maa pinnagravitatsioonist ehk 1,2 mikro-g ning aeglasest tsüklilisest vedelikuliikumisest. Keskkond muutis transpordiprotsesside tasakaalu; see ei muutnud soolvett täiesti liikumatuks.

Aeglane tee millimeetrimõõdus kuupideni

2019. aasta uuring keskendus hopper-kuupidele, mis kasvasid ISS-is soolveest vee aurustumise käigus. Teatatud kuubiservad olid **2 kuni 8 millimeetrit**. Kasvukiirus oli **0,34 kuni 1,0 mikromeetrit minutis** (umbes **0,49 kuni 1,44 millimeetrit päevas**), keskmiselt **0,68 mikromeetrit minutis** standardhälbega 0,23.

Selle keskmise kiiruse juures kuluks 8-millimeetrise serva kujunemiseks ligikaudu nädal. See arvutus on hinnang, mitte ühe kristalli iga kasvuetapi aegvõtteline mõõtmine.

Autorid hindasid ülekküllastuse väärtuseks alla **1,002**. Nende kasutatud maapealsete võrdlusuuringute kirjandus kirjeldas hopper-kasvu palju suurema ülekküllastuse, üle 1,45, juures kiirustega 10 kuni 110 mikromeetrit sekundis sekundite või minutite jooksul, mille tulemuseks olid tavaliselt alla 250 mikromeetrised kuubid.

See võrdlus on informatiivne, kuid mitte sobitatud. ISS-i kristallid ja maapealsed kirjandusandmed ei pärinenud sama töörühma samaaegsetest ja identsetest Maa- ja orbiidikatsetest. Lisaks gravitatsioonile võivad rolli mängida erinevad anumad, piirpinnad ja meetodid.

Seega on tugevaim kontrast kirjeldav: nendes ISS-i vaatlustes kasvasid hopper-kuubid aeglaselt, madala ülekküllastuse juures, päevade kuni nädalate jooksul ning saavutasid millimeetrise mõõtkava.

Alguses domineeris difusioon; hiljem võis vool siiski tähtsaks saada

2019. aasta artikkel kasutas **Peclet' arvu**, et võrrelda vedeliku liikumisega toimuvat transporti difusiooniga. Väärtus alla ühe tähendab, et difusioon on olulisem; väärtus üle ühe tähendab, et mahuline liikumine võib domineerida.

> **Suhe, mitte lüliti**
>
> Peclet' arv on kahe transpordikiiruse võrdlus. See ei jaga maailma täiesti liikumatuks vedelikuks alla ühe ja puhtaks konvektsiooniks üle ühe. Siin muutus väärtus kristalli suuruse ja ümbritseva soolvee jaoks kasutatud kiirushinnangu järgi. Väikseimad kristallid olid selgelt difusioonidomineerivas režiimis; suurema anuma suurim kristall võis jõuda režiimi, kus aeglane vedelikuliikumine muutus oluliseks.

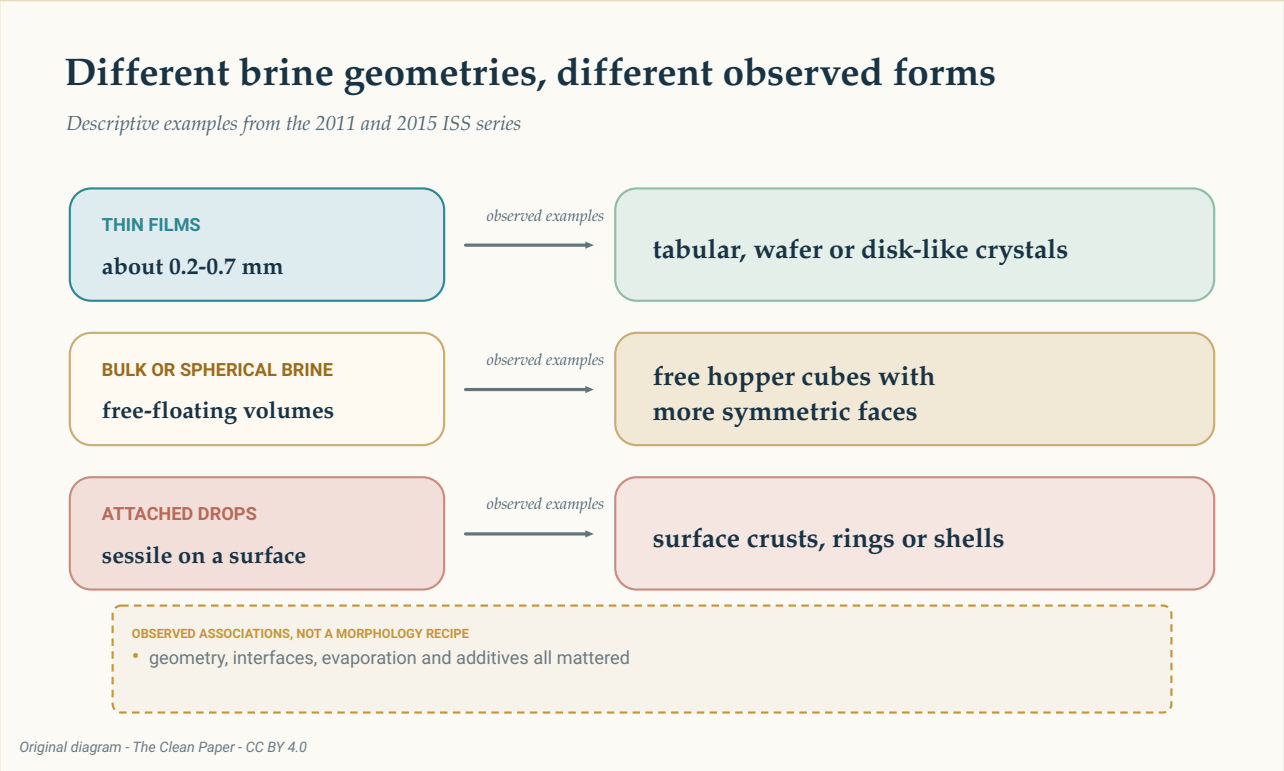
Väiksemates, umbes 0,8-sentimeetristes tilkades tõusid hinnangulised Peclet' arvud umbes **0,0004-lt** nukleatsiooni lähedal umbes **0,03-ni** lõplikus mõõdetud suuruses. Difusioon jäi domineerivaks.

2–3-sentimeetristes kristallisaatorites tõusis hinnang umbes **0,05-lt** 50-mikromeetrise tuuma puhul umbes **4-ni** 4-millimeetrise serva puhul. Algne kasv oli endiselt difusioonidomineeriv, kuid aeglane tsükliline liikumine võis hiljem kaasa aidata.

Seetõttu oleks vale öelda, et „mikrogravitatsioon eemaldas konvektsiooni". Tavaline ujuvusest põhjustatud ringvool ja settimine olid tugevasti vähendatud. Jääkkiirendus ja mõõdetav liikumine jäid alles.

Ka vedeliku kuju oli oluline

2011. aasta artikkel ja 2015. aasta artikkel avardasid pilti. Neis kirjeldati soola kristalliseerumist õhukestes kiledes, paksemates vedelikukihtides, ligikaudu sfäärilistes soolveekogumites ja pinnale kinnitunud tilkades.



Kolm rida võtavad toimikus vaadeldud näited kokku: õhukesed kiled lamedate või kettakujuliste vormidega, mahuline või sfääriline soolvesi vabalt hõljuvate hopper-kuupidega ning kinnitunud tilgad koorikute, rõngaste või kestadega. Need on kirjeldavad seosed, mitte retsept ega garantii.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011. aasta uuringus andsid ligikaudu 0,2 kuni 0,7 millimeetri paksused õhukesed kiled õhukesi plaate ja lamedaid kristalle. Vabalt hõljuvad soolveekogumid võimaldasid sümmeetrilisemaid külgtahke ja hopper-kuupe.

2015. aasta vaatlustes oli 0,2 kuni 0,7 millimeetri paksuseid õhukesi kihte, paksemaid umbes 4 kuni 6 millimeetri kihte ning pinnale kinnitunud poolkerakujulisi tilku läbimõõduga ligikaudu 20 kuni 32 millimeetrit. Teatatud vormide hulgas olid lamedad hopper-kristallid, kuubid, kettakujulised kristallid, dendriidid, rõngad ja kestad. Polüetüleenglükooli lisamine surus ühes vaatluskomplektis hopper-kasvu alla.

Autorid kirjeldasid 2015. aasta tööd kui meeskonnaliikmete vabast ajast ja inventeerimata tarvikutega tehtud vaatlusi, mitte ranget programmipõhist uurimist. Näited näitavad, et olulised olid vedeliku geomeetria, piirpinnad, aurustumine ja lisandid. Need ei anna deterministlikku retsepti, kus üks anuma kuju tagab ühe kristallikuju.

Võre ei muutunud uueks soolavormiks

Kristallstruktuuri ja **morfoloogia** eristus on siin hädavajalik.

Struktuur on korduv aatomite paigutus. Morfoloogia on nähtav väline vorm. 2011. aasta artikli neutronidifraktsioon ei tuvastanud maapealsete proovidega võrreldes muutunud naatriumkloriidi struktuuri ega võreraku parameetreid. Orbiidiproovides leidus ka **soolvee inklusioone**, väikseid kristalli sisse jäänud lahusetaskuid.

Seega ei ole suur ja sümmeetriline välimus tõend puhtamast või defektivabast materjalist. Ükski toimikus olev artikkel ei teata suuremast keemilisest puhtusest, paremast mehaanilisest jõudlusest ega sobivusest kindla seadme jaoks.

Gravitatsioon mõjus kaudselt. See muutis settimist, vedeliku ringlust, orientatsiooni ja kokkupuudet pindadega. See ei muutnud naatriumkloriidi sidemete tugevust ega loonud uut aatomifaasi.

Mida neist katsetest saab ja ei saa õppida

Artiklid toetavad transpordipõhist seletust: tavalise settimise ja ujuvusest põhjustatud voolu tugev allasurumine võimaldas mõnel kristallil kauem hõljuda ja kasvada aeglaselt sümmeetrilisemates tingimustes. Mõõdetud suurused, kiirused ja vormid on otsesed vaatlused; üleküllastus, kasvulugu ja Peclet' arvud sisaldavad hinnanguid; võrdlus Maaga tugineb osaliselt teistele avaldatud katsetele.

Kogu toimiku jaoks pole ühtset nimetajat. See ühendab kolme artikli üksikuid kristalle, kristallisaatoreid ja valitud näiteid. Nende liitmine üheks koguarvuks jätaks mulje ühtsest katsest, mida tegelikult ei olnud.

Uuringud ei esita ka ühtegi tõendit, mida oleks vaja tootmisväite jaoks. Need ei mõõda läbilaskevõimet, tootmiskulu, energiakasutust, saagist, töökindlust ega kasulikku materjaliomadust. 2015. aasta seeria oli uurimuslik. Maapealsed võrdlused ei olnud sobitatud kontrollid. Ja suur või visuaalselt silmatorkav ei tähenda rakenduse jaoks paremat.

Looduslikes soolalademetes võib leiduda sentimeetrimõõdus hopper-kuupe, mõnikord soolveest küllastunud mudas hõljumas. 2019. aasta artikkel pakub võimaliku analoogia aeglase, difusioonidomineeriva kasvuga. See on huvitav võrdlus, mitte tõend, et looduslikel ja orbiidil kasvanud hopper-kristallidel on üks ja sama mehhanism.

Lühidalt

Rahvusvahelises kosmosejaamas aurustuvast soolveest kasvatatud soolakristallide hulgas olid 2 kuni 8 millimeetri suurused õõnsad, astmelised hopper-kuubid. Artiklid toetavad transpordipõhist seletust: mikrogravitatsioon surus tugevalt alla tavalise settimise ja ujuvusest põhjustatud voolu, võimaldades aeglast kasvu ja pikemat hõljumist, samal ajal kui kasvu alguses domineeris difusioon. Morfoloogiat mõjutasid ka vedeliku geomeetria, piirpinnad, aurustumine ja lisandid. Neutronidifraktsioon ei näidanud uut naatriumkloriidi struktuuri ning kristallidesse jäid soolvee inklusioonid. Tegu on piiritletud materjaliteaduse juhtumiuuringuga, mitte tõendiga, et kosmos teeb täiuslikke kristalle või võimaldab tööstuslikku protsessi.

Ilustamata kontroll

Mida artiklid näitavad: Mitmes ISS-i soolveegeomeetrias kasvasid millimeetrimõõdus naatriumkloriidi hopper-kuubid ja muud morfoloogiad. 2019. aasta hopper-kuubid kasvasid madala hinnangulise üleküllastuse juures aeglaselt, kusjuures alguses domineeris difusioon.

Mida tõlgendatakse: Tugevalt vähendatud settimine ja ujuvusest põhjustatud vool võimaldasid pikemat hõljumist ja sümmeetrilisemat kasvu. Suuremas kristallisaatoris võis aeglane vedelikuliikumine hilises faasis oluliseks muutuda.

Mida need ei näita: Uut soola aatomvormi, puhtamaid või defektivabu kristalle, sobitatud Maa-versus-ISS katset, mikrogravitatsiooni universaalset eelist ega kaubanduslikku tootmisviisi.

Peamised piirangud: Kolm eraldi uuringut erinevate geomeetriate ja valitud näidetega; uuringutevahelised maapealsed võrdlused; hinnangulised transpordisuurused; toimiku uurimuslikud, mitteprogrammilised osad; ning protsessi majanduse või jõudluse testide puudumine.

Kui palju peaks tavalugeja seda usaldama? Kõrge kindlus, et kirjeldatud orbiidimorfoloogiad ja aeglane kasv on reaalsed. Mõõdukas kindlus transpordiseletuse suhtes kui parima koondseletuse suhtes. Väga madal kindlus mistahes väite suhtes, mis muudab need soolakatsed üldiseks lubaduseks kosmosetootmise kohta.

Allikad

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