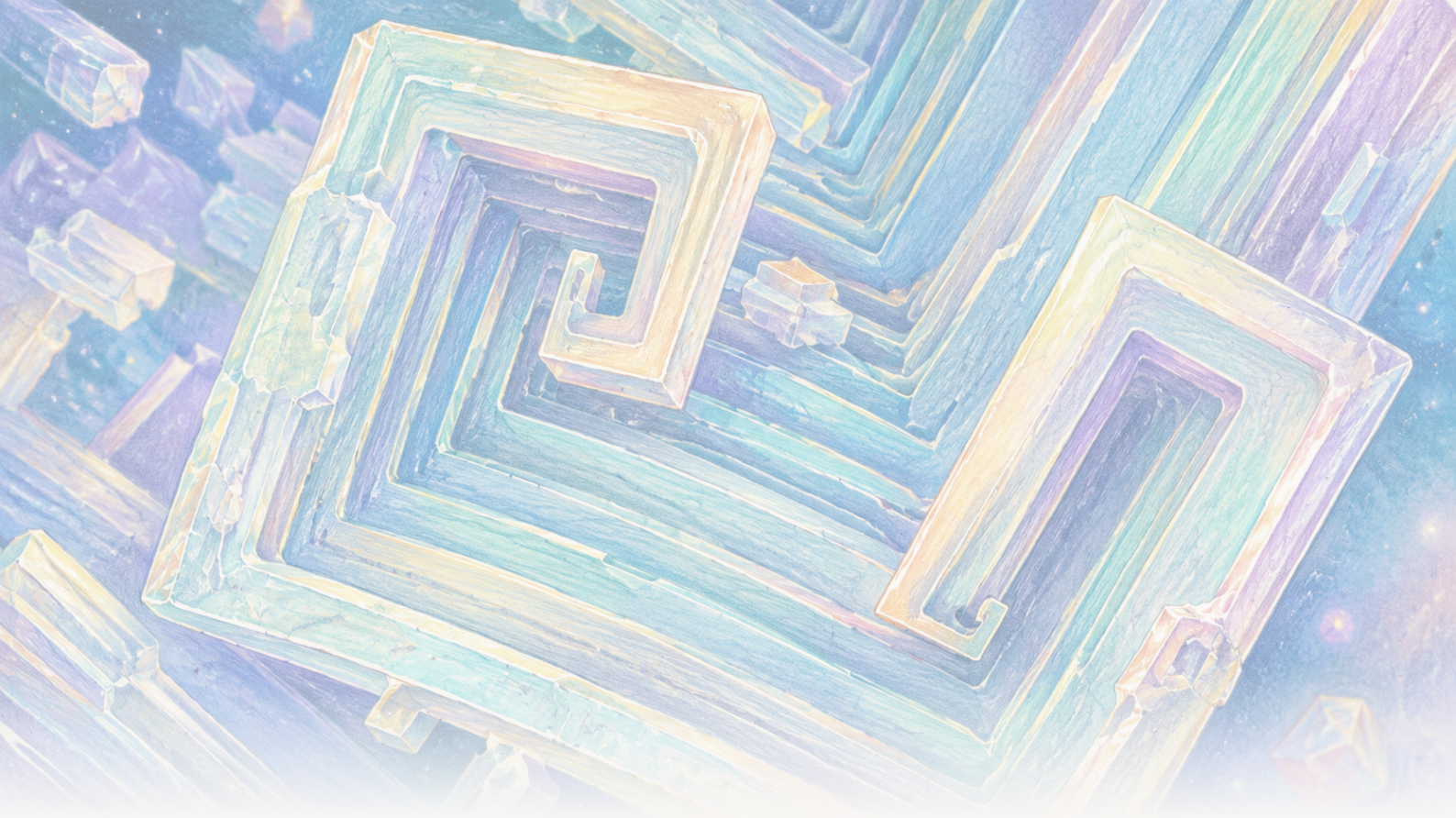


The Clean Paper

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

Orbītā galda sāls izauga par dobiem kubiem. Gravitācija mainīja sālījumu, nevis sāli

Nātrija hlorīda kristāli, kas audzēti Starptautiskajā kosmosa stacijā, ietvēra dobus, pakāpienveida kubus 2 līdz 8 milimetru platumā. Darbi atbalsta transporta skaidrojumu: parastā nosēšanās un peldspējas izraisīta plūsma bija stipri nomāktas, bet agrīnajā augšanas posmā dominēja difūzija. Kristālrežģis nekļuva par jaunu sāls formu, un eksperimenti nepierāda rūpniecisku procesu.

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

Orbītā parasts galda sāls izauga par dobiem, pakāpienveida kubiem

Kristāli izskatījās gandrīz arhitektoniski: kvadrātveida rāmji cits cita iekšpusē, bet to skaldnes izdobtas kā kāpnes.

Tie bija veidoti no parasta nātrija hlorīda — tā paša savienojuma, ko pazīstam kā galda sāli. Neparasts nebija materiāls. Neparasts bija sālījums ap to.

Uz Zemes augošs kristāls centimetru mēroga šķidruma tilpumā var grimt, pieskarties sienai vai virsmai un veicināt blīvuma atšķirības, kas liek šķīdumam cirkulēt. Starptautiskajā kosmosa stacijā parastā nosēšanās un peldspējas izraisīta plūsma bija stipri nomāktas. Daži sāls kristāli palika suspensijā pietiekami ilgi, lai lēni un simetriskāk izaugtu par **piltuvveida kubiem** ar 2 līdz 8 milimetru garām šķautnēm.

Trīs darbi, kas publicēti 2011., 2015. un 2019. gadā, apraksta šos eksperimentus. Kopā tie sniedz skaidru mācību par vielas transporta fiziku: mainot to, kā izšķīdusī viela nonāk līdz kristālam, var mainīt tā redzamo formu, nemainot atomāro struktūru.

Tie neparāda, ka kosmosā rodas perfekti kristāli, nepierāda rūpniecisku procesu un neatklāj jaunu sāls veidu.

Kā kubs kļūst piltuvveida

Parastam nātrija hlorīda kristālam ir kubisks atomu izkārtojums. **Piltuvveida kristāls** joprojām ir kubisks, taču tā stūri un šķautnes aug ātrāk nekā skaldņu centri. Rezultātā katrā skaldnē izveidojas doba, pakāpienveida ieplaka — it kā kubs vispirms būvētu rāmi un tikai pēc tam aizpildītu sienas.

Vēlāks ISS piemērs šo augšanas veidu parāda ļoti uzskatāmi, taču tas ir konteksts, nevis pierādījums no trim šeit aplūkotajiem nātrija hlorīda darbiem. Donalda Petita attēls un zemāk redzamais paātrinātais video rāda **kālija hlorīdu**, citu sāli, kas mikrogravitācijā veido pakāpienveida piltuvveida un spirālveida morfoloģijas.

[figure_pair pending]

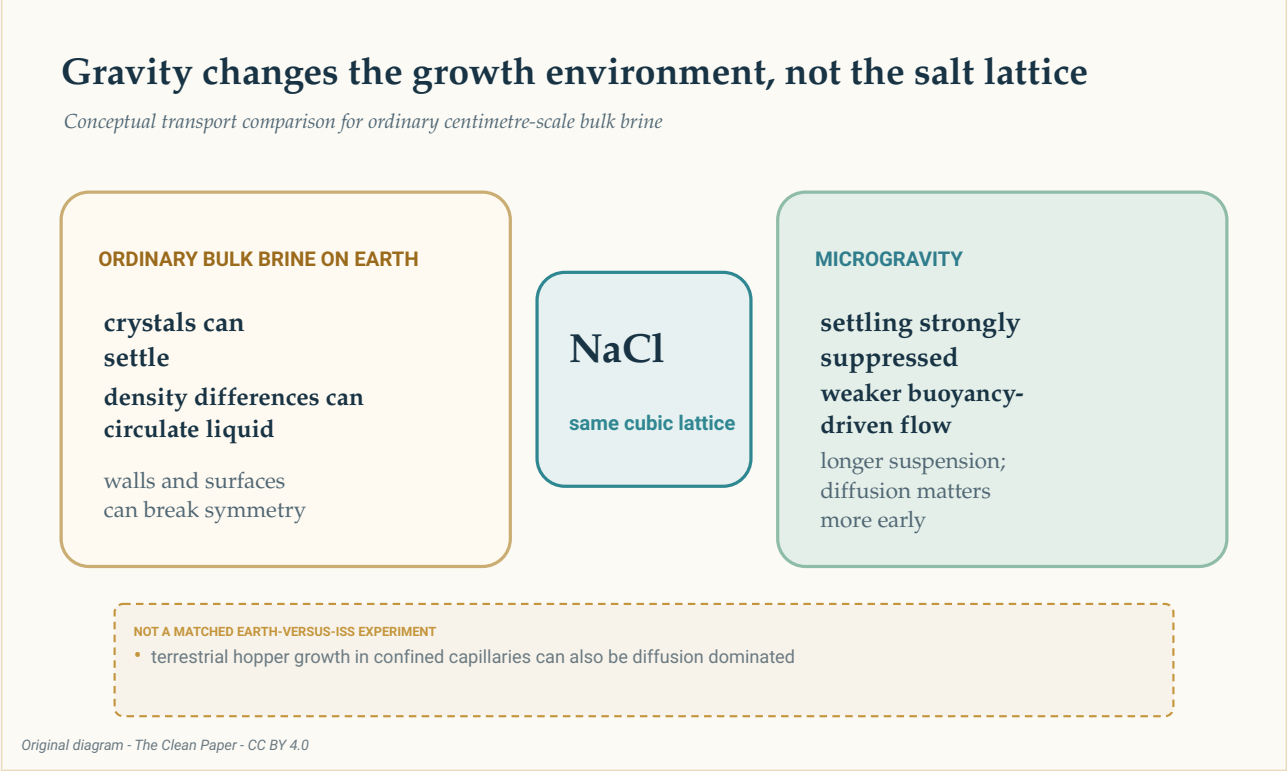
Divi skenējošās elektronu mikroskopijas attēli ar kālija hlorīda spirālveida piltuvkristāliem, kas izaudzēti ISS. Šie vēlākie attēli ir morfoloģijas kontekstuāli piemēri, nevis nātrija hlorīda paraugi vai mērījumi no 2011., 2015. vai 2019. gada pētījumiem, kas aplūkoti šajā rakstā.

[video pending]

Vēlāks paātrināts video ar kālija hlorīda piltuvkristāla augšanu plānā ūdens plēvē mikrogravitācijā. Tas ilustrē augšanu pie šķautnēm un stūriem, nevis šajā rakstā analizētos nātrija hlorīda eksperimentus vai datus.

Kristāli aug no **pārsātināta sālījuma**: sālsūdens, kurā attiecīgajos apstākļos ir izšķīdināts vairāk nātrija hlorīda, nekā līdzsvarā tas spētu saturēt. Nātrija un hlorīda joniem jāpārvietojas caur šķidrumu un jāpievienojas kristāla virsmai.

Ir divi galvenie veidi, kā tos pārvietot. **Difūzija** ir nejauša molekulārā kustība, kas pārvieto izšķīdušo vielu lejup pa koncentrācijas starpību bez visa šķidruma cirkulācijas. **Konvekcija** ir paša šķidruma kustība. Parastas gravitācijas apstākļos nelielas temperatūras vai koncentrācijas atšķirības var mainīt blīvumu un izraisīt peldspējas radītu cirkulāciju. Kristāli var arī **sedimentēt**, tas ir, nosēsties šķidrumā.



Konceptuāls salīdzinājums abās vidēs rāda vienu un to pašu nātrija hlorīda kristālrežģi. Parastā lielāka tilpuma sālījumā uz Zemes iespējama nosēšanās, peldspējas radīta cirkulācija un saskare ar virsmām; mikrogravitācija pirmos divus procesus stipri nomāc, ļaujot kristāliem ilgāk palikt suspensijā un agrīnā augšanas posmā palielinot difūzijas nozīmi. Tas nebija saskaņots Zemes un ISS eksperiments.

The Clean Paper CC BY 4.0

Eksperiments notika Starptautiskajā kosmosa stacijā — orbītā esošā mikrogravitācijas laboratorijā. Vārds **mikrogravitācija** nenozīmē gravitācijas neesamību. 2019. gada darbs ziņoja par atlikušo paātrinājumu aptuveni 1,2 miljondaļu apmērā no Zemes virsmas gravitācijas jeb 1,2 mikro-g, kā arī par lēnu ciklisku šķidruma kustību. Vide mainīja transporta procesu līdzsvaru; tā nepadarīja sālījumu pilnīgi nekustīgu.

Lēns ceļš līdz milimetru izmēra kubiem

2019. gada pētījumā uzmanība bija pievērsta piltuvveida kubiem, kas ISS auga, ūdenim iztvaikojot no sālījuma. Ziņotais kubu šķautņu garums bija no **2 līdz 8 milimetriem**. Augšanas ātrums bija no **0,34 līdz 1,0 mikrometram minūtē** (aptuveni **0,49 līdz 1,44 milimetriem dienā**), vidēji **0,68 mikrometri minūtē** ar standartnovirzi 0,23.

Pie šāda vidējā ātruma 8 milimetru šķautnes izveide prasītu aptuveni nedēļu. Tas ir aprēķināts novērtējums, nevis viena kristāla visu augšanas stadiju tiešs laika gaitas mērījums.

Autori novērtēja pārsātinājumu zem **1,002**. Salīdzinājumam izmantotajā Zemes eksperimentu literatūrā piltuvveida augšana bija aprakstīta pie daudz lielāka pārsātinājuma — virs 1,45 — ar augšanas ātrumu 10 līdz 110 mikrometri sekundē dažu sekunžu vai minūšu garumā, parasti iegūstot kubus, kas mazāki par 250 mikrometriem.

Šis salīdzinājums ir informatīvs, bet nav saskaņots. ISS kristāli un Zemes literatūrā aprakstītie kristāli nebija vienlaikus veikti identiski Zemes un orbītas eksperimenta zari vienas komandas izpildījumā. Līdzās gravitācijai nozīme var būt atšķirīgiem traukiem, robežvirsmām un metodēm.

Tāpēc spēcīgākais secinājums ir aprakstošs: šajos ISS novērojumos piltuvveida kubi auga lēni, pie zema pārsātinājuma, dienām vai nedēļām ilgi un sasniedza milimetru mērogu.

Agrīni dominēja difūzija; vēlāk plūsma joprojām bija iespējama

2019. gada darbā tika izmantots **Peklē skaitlis**, lai salīdzinātu transportu ar šķidruma kustību un transportu ar difūziju. Vērtība zem viena nozīmē, ka svarīgāka ir difūzija; virs viena — ka lielāka nozīme var būt šķidruma kopējai kustībai.

> **Attiecība, nevis slēdzis**
>
> Peklē skaitlis ir divu transporta ātrumu salīdzinājums. Tas nesadala pasauli pilnīgi nekustīgā šķidrumā zem viena un tīrā konvekcijā virs viena. Šeit vērtība mainījās līdz ar kristāla izmēru un izvēlēto apkārtējā sālījuma ātruma novērtējumu. Mazākie kristāli nepārprotami atradās difūzijas dominētā režīmā; lielākais kristāls lielākajā traukā varēja nonākt režīmā, kurā nozīme bija lēnai šķidruma kustībai.

Mazākajos, aptuveni 0,8 centimetru pilienos novērtētais Peklē skaitlis pieauga no aptuveni **0,0004** kodola veidošanās tuvumā līdz aptuveni **0,03** pie galīgā izmērītā lieluma. Difūzija saglabāja dominējošo lomu.

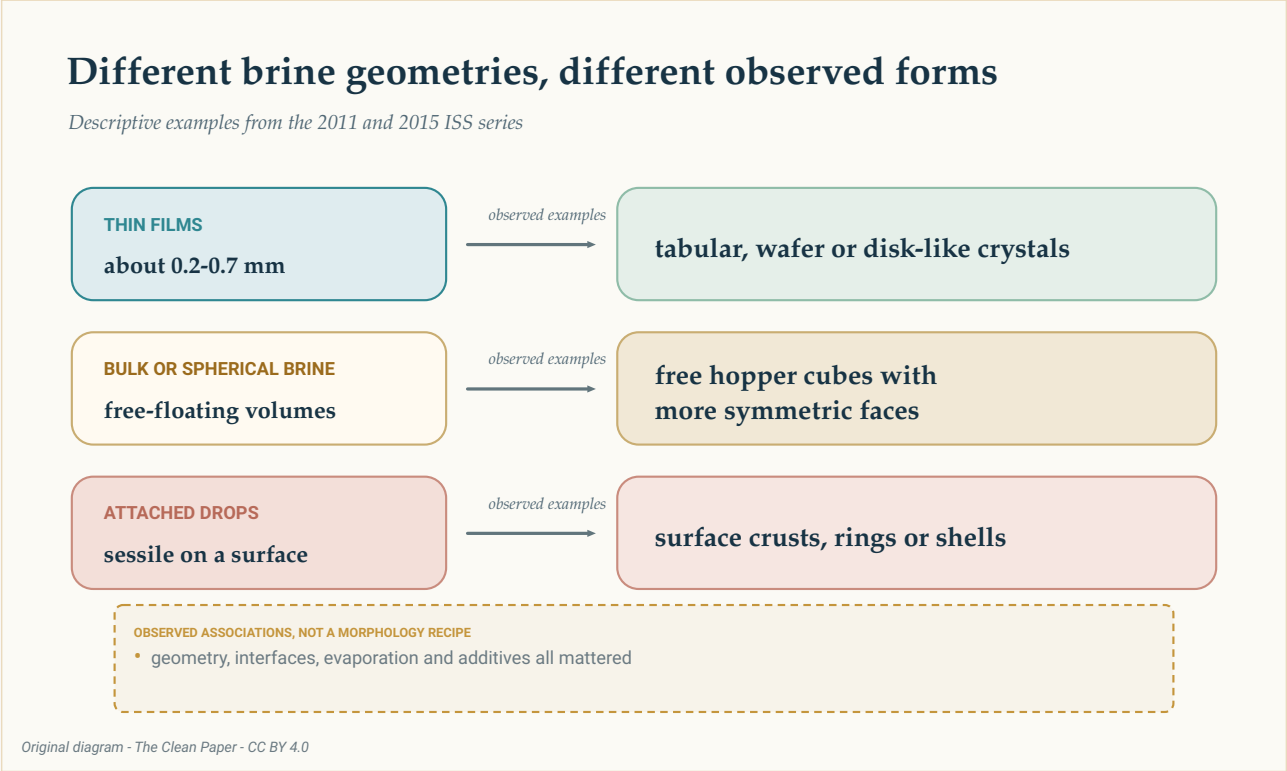
2 līdz 3 centimetru kristalizatoros novērtējums pieauga no aptuveni **0,05** 50 mikrometru kodolam līdz aptuveni **4** 4 milimetru šķautnei. Agrīno augšanu joprojām dominēja difūzija, taču vēlāk varēja

piedalīties lēnā cikliskā kustība.

Tāpēc apgalvojums „mikrogravitācija likvidēja konvekciju” būtu nepareizs. Parastā peldspējas izraisītā cirkulācija un nosēšanās bija stipri samazinātas. Atlikušais paātrinājums un izmērāma kustība saglabājās.

Svarīga bija arī šķidruma forma

2011. gada darbs un 2015. gada darbs paplašināja ainu. Tajos aprakstīta sāls kristalizācija plānās plēvēs, biezākos šķidruma slāņos, aptuveni sfēriskos sālījuma tilpumos un pie virsmas piestiprinātos pilienos.



Trīs rindās apkopoti dosjē novērotie piemēri: plānas plēves ar plāksnīšveida vai diskveida formām, lielāks vai sfērisks sālījuma tilpums ar brīviem piltuvveida kubiem un piestiprināti pilieni ar garozām, gredzeniem vai čaulām. Tās ir aprakstošas sakarības, nevis recepte vai garantija.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011. gada pētījumā aptuveni 0,2 līdz 0,7 milimetrus biezas plānas plēves radīja plānus plāksnīšveida kristālus. Brīvi peldoši sālījuma tilpumi ļāva izveidoties simetriskākām sānu skaldnēm un piltuvveida kubiem.

2015. gada novērojumos bija plāni 0,2 līdz 0,7 milimetrus biezi slāņi, biezāki aptuveni 4 līdz 6 milimetru slāņi un pie virsmas piestiprināti puslodes formas pilieni aptuveni 20 līdz 32 milimetru diametrā. Aprakstītās formas ietvēra plāksnīšveida piltuvkristālus, kubus, diskveida kristālus,

dendrītus, gredzenus un čaulas. Vienā novērojumu sērijā polietilēnglikola pievienošana nomāca piltuvveida augšanu.

Autori 2015. gada darbu raksturoja kā novērojumus, kas veikti ar neinventarizētiem materiāliem apkalpes brīvajā laikā, nevis kā stingri plānotu sistemātisku pētījumu. Piemēri rāda, ka nozīme bija šķidruma ģeometrijai, robežvirsmām, iztvaikošanai un piedevām. Tie nenosaka deterministisku recepti, kurā viena trauka forma garantētu vienu kristāla formu.

Kristālrežģis nekļuva par jaunu sāls formu

Būtiski ir nošķirt **kristālstruktūru** no **morfoloģijas**.

Struktūra ir atkārtojošais atomu izkārtojums. Morfoloģija ir redzamā ārējā forma. Neitronu difrakcija 2011. gada darbā neuzrādīja izmainītu nātrija hlorīda struktūru vai izmainītus kristālrežģa elementāršūnas parametrus salīdzinājumā ar Zemes paraugiem. Orbītā audzētajos paraugos bija arī **sālījuma ieslēgumi** — nelielas šķīduma kabatas kristāla iekšienē.

Tāpēc liels un simetrisks izskats nav pierādījums tīrākam vai bezdefektu materiālam. Neviens no dosjē darbiem neziņo par augstāku ķīmisko tīrību, labākām mehāniskajām īpašībām vai piemērotību kādai konkrētai ierīcei.

Gravitācija darbojās netieši. Tā mainīja nosēšanos, šķidruma cirkulāciju, orientāciju un saskari ar virsmām. Tā nemainīja nātrija un hlorīda saišu stiprumu un neradīja jaunu atomāru fāzi.

Ko šie eksperimenti var un nevar iemācīt

Darbi atbalsta transporta procesu skaidrojumu: stipri nomācot parasto nosēšanos un peldspējas izraisīto plūsmu, daži kristāli varēja ilgāk palikt suspensijā un lēni augt simetriskākos apstākļos. Izmērītie izmēri, ātrumi un formas ir tieši novērojumi; pārsātinājums, augšanas vēsture un Peklē skaitļi ietver novērtējumus; salīdzinājums ar Zemi daļēji balstās uz citiem publicētiem eksperimentiem.

Visam dosjē nav viena vienota saucēja. Tajā apvienoti atsevišķi kristāli, kristalizatori un atlasīti piemēri no trim darbiem. Saskaitot tos vienā kopskaitā, rastos maldīgs priekšstats par vienotu eksperimentu, kāda nebija.

Pētījumos arī nav to pierādījumu, kas vajadzīgi ražošanas apgalvojumam. Tajos nav mērīta caurlaidspēja, ražošanas izmaksas, enerģijas patēriņš, iznākums, uzticamība vai lietderīgas materiāla īpašības. 2015. gada sērija bija izpētes rakstura. Salīdzinājumi ar Zemi nebija saskaņotas kontroles. Un liels vai vizuāli iespaidīgs nav tas pats, kas labāks kādā pielietojumā.

Dabiskās sāls iegulās var atrast centimetros mērāmus piltuvveida kubus, dažkārt suspendētus ar sālījumu piesūcinātos dubļos. 2019. gada darbs piedāvā iespējamu analoģiju ar lēnu, difūzijas dom-

inētu augšanu. Tas ir interesants salīdzinājums, nevis pierādījums, ka dabiskajiem un orbītā audzētajiem piltuvkristāliem ir viens mehānisms.

Īss kopsavilkums

No iztvaikojoša sālījuma Starptautiskajā kosmosa stacijā audzēti sāls kristāli ietvēra dobus, pakāpienveida piltuvkristālu kubus ar 2 līdz 8 milimetru garām šķautnēm. Darbi atbalsta transporta procesu skaidrojumu: mikrogravitācija stipri nomāca parasto nosēšanos un peldspējas izraisīto plūsmu, ļaujot lēnāk augt un ilgāk palikt suspensijā, kamēr agrīnajā stadijā dominēja difūzija. Morfoloģiju ietekmēja arī šķidruma ģeometrija, robežvirsmas, iztvaikošana un piedevas. Neitronu difrakcija neuzrādīja jaunu nātrija hlorīda struktūru, un kristālos saglabājās sālījuma ieslēgumi. Tas ir ierobežots materiālzinātnes gadījuma pētījums, nevis pierādījums, ka kosmoss rada perfektus kristālus vai nodrošina rūpniecisku procesu.

Bez pārspīlējumiem

Ko darbi parāda: Vairākās ISS sālījuma ģeometrijās izauga milimetru mēroga nātrija hlorīda piltuvveida kubi un citas morfoloģijas. 2019. gada piltuvkubi auga lēni pie zema novērtētā pārsātinājuma, un agrīnajā stadijā dominēja difūzija.

Kas ir interpretācija: Stipri samazināta nosēšanās un peldspējas izraisīta plūsma ļāva kristāliem ilgāk palikt suspensijā un augt simetriskāk. Lielākajā kristalizatorā vēlīnā stadijā varēja būt nozīme lēnai šķidruma kustībai.

Ko tie neparāda: Jaunu sāls atomāro formu, tīrākus vai bezdefektu kristālus, saskaņotu Zemes un ISS izmēģinājumu, universālu mikrogravitācijas priekšrocību vai komerciālu ražošanas ceļu.

Galvenie ierobežojumi: Trīs atšķirīgi pētījumi ar dažādām ģeometrijām un atlasītiem piemēriem; starppētījumu salīdzinājumi ar Zemes eksperimentiem; novērtēti transporta lielumi; izpētes rakstura, neprogrammatiski dosjē elementi; nav procesu ekonomikas vai veiktspējas testu.

Cik lielai pārliecībai vajadzētu būt parastam lasītājam? Augstai pārliecībai, ka aprakstītās orbītas morfoloģijas un lēnā augšana ir reālas. Mērenai pārliecībai, ka transporta skaidrojums ir labākais kopējais izskaidrojums novērojumiem. Ļoti zemai pārliecībai par jebkuru apgalvojumu, kas šos sāls eksperimentus pārvērš par vispārīgu solījumu kosmosa ražošanai.

Avoti

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