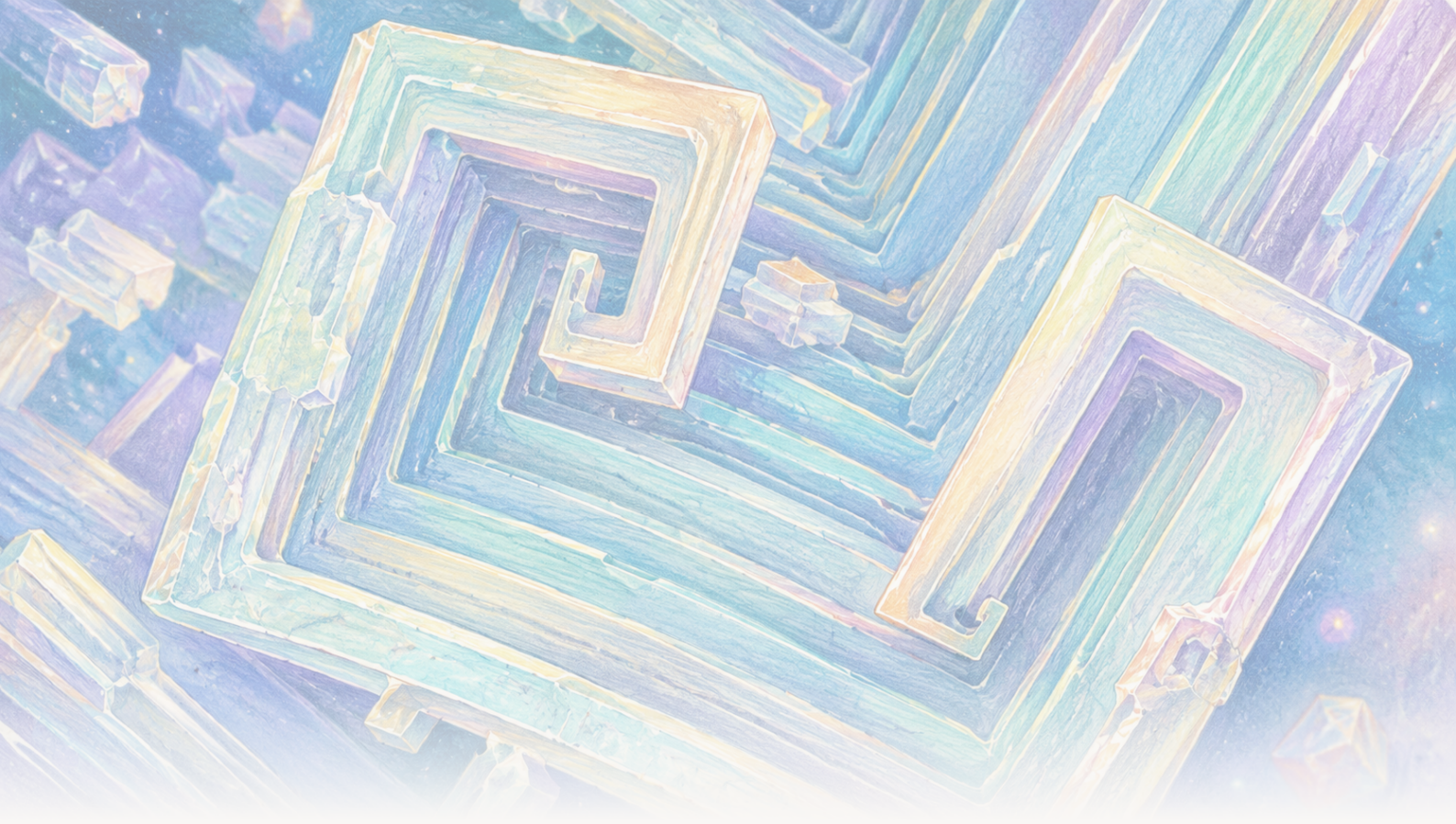




The CLEAN PAPER

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

Ní òkè òfurufú, iyò tàbìlì dàgbà sí cube tí inú rẹ sófo.
Gravity yí brine padà, kì í ẹ iyò nàà

Àwọn crystal sodium chloride tí wọn dàgbà lórí International Space Station ní àwọn cube sófo tí ó ní ìpele, 2 sí 8 millimita ní ìwọn. Àwọn paper nàà ẹ atileyin fún transport explanation: ordinary settling àti buoyancy-driven flow dín kù gan-an, nígbà tí diffusion jẹ olórí ní ìbẹ̀rẹ̀ ìdàgbàsókè. Lattice nàà kò di irú tuntun, àwọn ìdánwò nàà kò sì fídí industrial process kan múlẹ̀.

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

Ní òkè òfurufú, iyò tábilì lasan dàgbà sí àwọn cube tí inú wọn sọfo tí wọn sì ní ìpele

Àwọn crystal nàà dà bí iṣẹ faaji: àwọn fireemu onígun méréin wà nínú ara wọn, ojú wọn sì rò sí inú bí àtẹ̀gùn.

Sodium chloride lasan ni wọn fi ẹ wọn, èyí nàà ni compound tí ó wà nínú iyò tábilì. Ohun tí ó ẹ̀jẹ̀jẹ̀ kì í ẹ ohun èlò nàà. Brine tó yí i ká ni.

Lórí Ayé, crystal tó ní dàgbà nínú omi tó tó iwọn centimita lè rì, lè kan odi tàbí ojú-ilẹ̀, ó sì lè ràn lówọ láti dá iyàtò density sílẹ̀ tí yòò mú solution nàà máa yí ká. Lórí International Space Station, settling lasan àti sísàn omi tí buoyancy ní fa dín kù gan-an. Diẹ lára àwọn crystal iyò dúró lójú omi fún àkókò tó tó kí wọn lè dàgbà diẹdiẹ, ní iṣòkan tó pọ̀ sí i, sí **hopper cubes** tí etí wọn wà láàárín 2 sí 8 millimita.

Àwọn iwé iwádíí mэта, tí a tẹ jade ní 2011, 2015 àti 2019, ẹ̀làyé àwọn idánwò wònyí. Ní àpapọ̀, wọn fún wa ní èkọ̀ tó mó nípa transport physics: yíyí ọ̀nà tí ohun tó tú sínú omi fi dé crystal padà lè yí irisi crystal nàà padà láì yí atomic iṣètò rẹ padà.

Wọn kò fi hàn pé òfurufú ní dá crystal pípé sílẹ̀, wọn kò fídí industrial ilà̀nà kan múlẹ̀, wọn kò sì ẹ́ irú iyò tuntun kan hàn.

Kí ni ó ní sọ cube di hopper?

Crystal sodium chloride lasan ní atomic arrangement oní-cube. **Hopper crystal** nàà sì jẹ cubic, ẹ̀gbọn àwọn igun àti etí rẹ̀ ní dàgbà ẹ́áájú ẹ́áárín àwọn ojú rẹ̀. Àbájáde ni pé ojú kòòkan ní ihò tí ó ní lọ sí inú ní ìpele, bí ẹni pé cube nàà fẹ̀ kọ̀ fireemu rẹ̀ kí ó tó kún àwọn ọ̀giri rẹ̀.

Àpẹẹrẹ ISS kan tó wá lẹ́yìn nàà ní jẹ kí ilà̀nà idàgbàsókè yí hàn gbangba, ẹ̀gbọn ó jẹ context, kì í ẹ ẹ́rì láti inú àwọn iwé iwádíí sodium-chloride mэта nàà. Àwòrán àti time-lapse Donald Pettit ní isàlẹ̀ fi **potassium chloride**, iyò mífíràn, hàn bí ó ẹ ní dá hopper tí ó ní ìpele àti scroll morphologies sílẹ̀ ní microgravity.

[figure_pair pending]

Àwọn scanning electron micrograph méjì ti potassium chloride scroll-form hopper crystals tí wọn dàgbà lórí ISS. Àwọn àwòrán tó wá lẹ́yìn wònyí jẹ àpẹẹrẹ context fún morphology nàà, kì í ẹ àwọn àpẹẹrẹ sodium chloride tàbí measurement láti inú àwọn iwádíí 2011, 2015 tàbí 2019 tí a ní jíròrò nínú àpilẹ̀kọ̀ yíí.

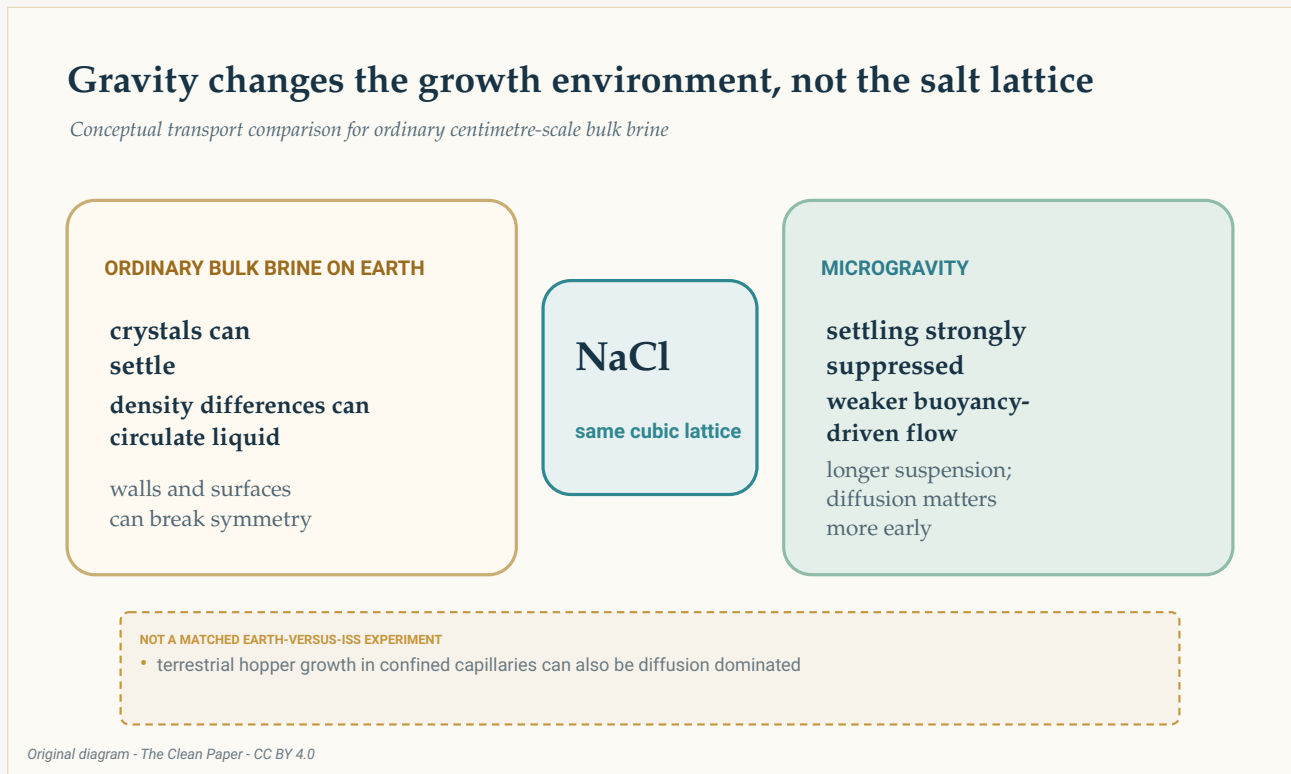
[video pending]

Time-lapse kan tó wá lẹ́yìn ti idàgbàsókè potassium chloride hopper nínú fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ omi tìn-ín-rín ní microgravity. Ó ní ẹ̀pẹẹrẹ bí etí àti igun ẹ ní dàgbà, kì í ẹ àwọn idánwò sodium chloride tàbí dátà tí a ẹ àyèwò nínú àpilẹ̀kọ̀ yíí.

Àwọn crystal ní dàgbà láti inú **supersaturated brine**: omi iyò tí ó ní sodium chloride tí ó tú sínú rẹ̀ ju iye tí yòò wà ní equilibrium lábẹ̀ àwọn ipo yẹn lọ. Àwọn ion sodium àti chloride gbọ̀dọ̀ rìn kojá omi nàà kí wọn sì darapọ̀

mọ ojú crystal.

Ọ̀nà gbooro méjì ní wọ̀n fí lẹ̀ rìn. **Diffusion** ni random molecular motion tó ń gbé ohun tó tú sínú omi lọ láti ibi tí concentration tí ga sí ibi tí ó kéré láísí bulk liquid circulation. **Convection** ni ìrìn omi náà fúnra rẹ̀. Láàbẹ̀ agbára walẹ̀ lasan, ìyàtò kékeré nínú temperature tàbí concentration lẹ̀ yí density padà kí ó sì fa buoyancy circulation. Àwọ̀n crystal tún lẹ̀ **sediment**, ìyẹn ní kí wọ̀n rí sínú omi.



Ìfíwéra àfojúsùn kan fí lattice sodium chloride kan náà hàn ní àwọ̀n ayíká méjèèjì. Brine tó pọ̀ lórí Ayé lẹ̀ ní settling, buoyancy circulation àti fífi ara kan ojú-ilẹ̀; microgravity dín àwọ̀n méjì àkọkọ̀ kù gan-an, ó jẹ́ kí crystal lẹ̀ dúró pẹ́ sí i, ó sì mú diffusion ẹ̀ ẹ̀ pàtàkì sí i ní ìbẹ̀rẹ̀ ìdàgbàsókè. Èyí kì í ẹ̀ ìdánwò Earth-versus-ISS tí a ẹ̀ ní àwọ̀n ipo tó bá ara wọ̀n mu.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ìdánwò yíí ní a ẹ̀ lórí International Space Station, yàrá ìdánwò microgravity tí ń yí Ayé ká. Ọ̀rọ̀ **microgravity** kò tùmọ̀ sí pé agbára walẹ̀ kò sí. ìwé ìwádíí 2019 rọ̀yìn residual acceleration tó jẹ́ nùkan bí 1.2 millionths tí agbára walẹ̀ lórí ojú Ayé, tàbí 1.2 micro-g, pẹ̀lú ìrìn omi cyclical tó lora. Ayíká náà yí ìwọ̀ntúnwọ̀nsì transport padà; kò jẹ́ kí brine náà dúró patapata.

Ọ̀nà tó lora sí cube ìwọ̀n millimita

Ìwádíí 2019 dojuko àwọ̀n hopper cube tí wọ̀n dàgbà bí omi ẹ̀ ń evaporate láti inú brine lórí ISS. Etí cube tí a rọ̀yìn wà láàárín **2 sí 8 millimita**. Growth rate wà láàárín **0.34 sí 1.0 micromita ní ìṣẹ́jú kan** (nùkan bí **0.49 sí 1.44 millimita ní ọ̀jó kan**), pẹ̀lú mean **0.68 micromita ní ìṣẹ́jú kan** àti standard deviation 0.23.

Ní average rate yẹn, etí 8-millimita yòò gba nńkan bí ọ̀sẹ̀ kan láti dágba. Ísírò yí jẹ́ ísírò àfójúsùn, kì í ẹ̀ ẹ̀ time-lapse measurement ti gbogbo ìpele crystal kan.

Àwọn onkòwé ẹ̀ ẹ̀ ísírò àfójúsùn supersaturation pé ó kéré ju **1.002**. Literature wọn fún ifiwéra lórí Ayé sàpèjúwe hopper growth ní supersaturation tó ga púpò sí i, ju 1.45 lọ, ní rate 10 sí 110 micromita ní aaya kan fún àwọn aaya tàbí íṣẹ́jú diẹ̀, tí ó sáà maa ní dá cube tí ó kéré ju 250 micromita sílẹ̀.

Ìfiwéra náà wúlò, sùgbón kò matched. Àwọn crystal ISS àti terrestrial literature kò wá láti Earth àti orbit arms tó jọra tí ẹgbẹ̀ kan náà ẹ̀ ní àkókò kan náà. Oríṣííríṣí container, interface àti ọ̀nà lè ní ipa pẹ̀lú agbára walẹ̀.

Nítorí náà, iyàtò tó lágbára jù lọ jẹ́ descriptive: nínú àwọn observation ISS wọnyí, hopper cubes dàgbà diẹ̀diẹ̀, ní supersaturation kékeré, fún ojò sí ọ̀sẹ̀, wọn sì dé iwọn millimita.

Diffusion ló ẹ̀ pàtàkì jù ní ìbèrẹ̀; sísàn omi sì lè ní ipa lẹ́yìn náà

ìwé iwádíí 2019 lo **Peclet number** láti fi transport tí ìrìn omi ní fa wé transport tí diffusion ní fa. Iye tó kéré ju ọ̀kan tùmọ̀ sí pé diffusion ẹ̀ pàtàkì sí i; iye tó ju ọ̀kan lọ tùmọ̀ sí pé bulk motion lè jẹ́ olórí.

Ratio ni, kì í ẹ̀ switch

Peclet number jẹ́ ifiwéra láàárín transport rate méjì. Kò pin ayé sí omi tó dúró pátápátá ní ìsàlẹ̀ ọ̀kan àti convection mímọ̀ ní òkè ọ̀kan. Níhìn-ín, iye náà yí padà pẹ̀lú iwọn crystal àti velocity ísírò àfójúsùn tí a lò fún brine tó yí i ká. Àwọn crystal tó kéré jù lọ wà kedere nínú regime tí diffusion jẹ́ olórí; crystal tó tóbi jù lọ nínú vessel tó tóbi lè ti wọ̀ regime kan níbi tí ìrìn omi tó lora ti ní ipa.

Nínú àwọn drop tó kéré, tó tó 0.8 centimita, estimated Peclet values gòkè láti nńkan bí **0.0004** lẹgbẹ́ nucleation sí nńkan bí **0.03** ní iwọn ìkẹyìn tí a wọn. Diffusion sì jẹ́ olórí.

Nínú crystallizer 2 sí 3 centimita, ísírò àfójúsùn gòkè láti nńkan bí **0.05** fún nucleus 50-micromita sí nńkan bí **4** fún etí 4-millimita. Ìdàgbàsókè ìbèrẹ̀ sì jẹ́ diffusion dominated, sùgbón ìrìn cyclical tó lora lè ti kópa lẹ́yìn náà.

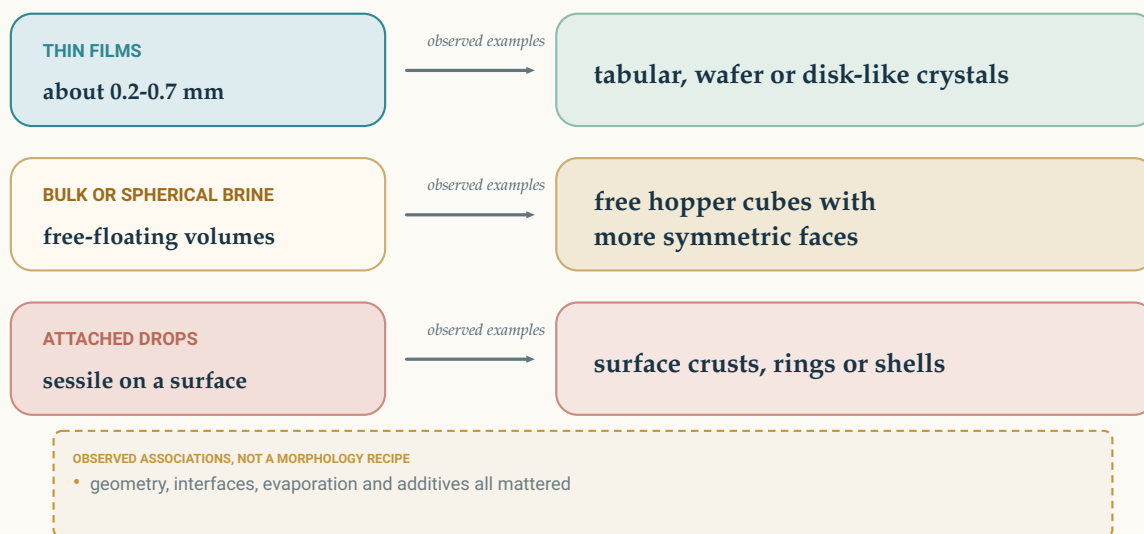
Ìdí nìyẹn tí gbolohun pé “microgravity yọ convection kúrò” fi maa jẹ́ aṣiṣe. Ordinary buoyancy-driven circulation àti settling dín kù gan-an. Residual acceleration àti ìrìn tí a lè wọn sì wà.

Ìrísí omi náà tún ẹ̀ pàtàkì

ìwé iwádíí 2011 àti ìwé iwádíí 2015 mú àwòrán náà gbooro sí i. Wọn rọ̀yìn crystallization iyò nínú thin films, fẹ́lẹ́fẹ́lẹ́ omi tó nípon sí i, brine volume tó fẹ́rẹ́ yika, àti àwọn drop tí ó so mó ojú-ilẹ̀.

Different brine geometries, different observed forms

Descriptive examples from the 2011 and 2015 ISS series



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Àwọn ilà mèta şàkópò àwọn àpẹẹrẹ tí a rí kojá dossier nàà: thin films pèlú tabular tàbí disk-like forms, bulk tàbí spherical brine pèlú free hopper cubes, àti attached drops pèlú crusts, rings tàbí shells. Wònyí jẹ descriptive associations, kì í şe recipe tàbí idánilójú.

The Clean Paper CC BY 4.0

Nínú iwádìí 2011, thin films tó nípon nńkan bí 0.2 sí 0.7 millimita dá thin wafers àti tabular crystals sílẹ. Àwọn brine volume tó ní fò láiso mó nkan jẹ kí lateral faces lẹ dágba ní symmetry tó pò sí i àti hopper cubes.

Àwọn observation 2015 ní thin sheets 0.2 sí 0.7 millimita nípon, fẹlẹfẹlẹ tó nípon sí i nńkan bí 4 sí 6 millimita, àti attached hemispherical drops tó fẹrẹẹ jẹ 20 sí 32 millimita ní iwọn kojá. Àwọn form tí a ròyìn ní tabular hoppers, cubes, disk-like crystals, dendrites, rings àti shells. Fífi polyethylene glycol kún un dín hopper growth kù nínú set observation kan.

Àwọn onkòwé şàpẹjúwe işẹ 2015 gégẹ bí observation tí a şe pèlú supplies tí kò wà nínú inventory ní àkókò isinmi crew, kì í şe rigorous programmatic investigation. Àwọn àpẹẹrẹ nàà fi hàn pé geometry omi, interfaces, evaporation àti additives gbogbo wọn şe pàtàkì. Wọn kò şètò deterministic recipe kan níbi tí shape container kan yòò fi dá shape crystal kan lójú.

Lattice nàà kò di irú iyò tuntun

Ìyàtò láàárín **crystal** işètò àti **morphology** şe pàtàkì gan-an.

Structure ni atomic arrangement tó ní tún ara rẹ şe. Morphology ni irisi òde tí a lẹ rí. Neutron diffraction nínú iwé iwádìí 2011 kò rí sodium chloride işètò tó yí padà tàbí lattice-cell parameters tó yàtò sí àwọn àpẹẹrẹ lóri Ayé. Àwọn orbital àpẹẹrẹ nàà tún ní **brine inclusions**, iyen ni àwọn àpò solution kékeré tí ó dì sínú crystal.

Nítorí nàà, irisi tó tóbi tí ó sì ní symmetry kì í ẹ̀rí pé ohun èlò nàà mọ́ sí i tàbí kò ní defect. Kò sí ìwé ìwádíí kankan nínú dossier tó rọ̀yìn chemical purity tó ga sí i, mechanical performance tó dára sí i tàbí suitability fún device kan pàtò.

Gravity ẹ̀ṣẹ́ ní ọ̀nà àìṣe-taara. Ó yí settling, liquid circulation, orientation àti contact pèlú ojú padà. Kò yí agbára sodium-chloride bonds padà, kò sì dá atomic phase tuntun sílẹ̀.

Ohun tí àwọn ìdánwò yíì lè kọ́ wa àti ohun tí wọn kò lè kọ́ wa

Àwọn ìwé ìwádíí nàà ẹ̀ atileyin fún transport explanation: dídín ordinary settling àti buoyancy-driven flow kù gan-an jẹ́ kí diẹ̀ lára àwọn crystal dúró lójú omi, kí wọn sì dàgbà diẹ̀diẹ̀ lábẹ̀ àwọn ipo tó ní symmetry púpọ̀ sí i. Àwọn ìwò̀n, rate àti form tí a wọn jẹ́ taara observations; supersaturation, growth history àti Peclet values ní ìṣírò àfojúsùn nínú; ìfiwéra pèlú Ayé sì gbẹ̀kẹ̀ lẹ́ àwọn ìdánwò mǐràn tí a ti tẹ̀ jáde fún apá kan.

Kò sí denominator kan ọ̀so tó mọ́ fún dossier nàà. Ó darapọ̀ individual crystals, crystallizers àti selected examples láti ìwé ìwádíí mọ́ta. Fífi gbogbo wọn jọ sí total kan yòò dà bí ẹ̀ni pé uniform ìdánwò kan wà, nígbà tí kò sí bẹ̀.

Àwọn ìwádíí nàà tún kò rọ̀yìn ẹ̀rí kankan tí a nílò fún manufacturing claim. Wọn kò wọn throughput, production cost, agbára lò, yield, reliability tàbí useful ohun èlò performance. Series 2015 jẹ́ exploratory. Àwọn terrestrial ìfiwéra kì í ẹ̀ matched controls. Àti pé ohun tó tóbi tàbí tó lẹ̀wà lójú kì í ẹ̀ dandan pé ó dára jù fún application kan.

Àwọn natural salt deposits lè ní hopper cubes tí a wọn ní centimita, nígbà míí tí wọn dúró nínú brine-soaked mud. ìwé ìwádíí 2019 dabaa ẹ́ẹ́ ẹ̀ analogy pèlú ìdàgbàsókè tó lọ́ra tí diffusion jẹ́ olórí. Ìfiwéra tó nífẹ́ sí ni, kì í ẹ̀ ẹ̀rí pé natural àti orbital hoppers ní ọ̀nà ịṣẹ́ kan nàà.

Àkótán tó mọ́

Àwọn crystal iyò tí wọn dàgbà láti brine tó ní evaporate lórí International Space Station ní àwọn hollow, stepped hopper cubes tí ó tó 2 sí 8 millimita ní ìwò̀n kojá. Àwọn ìwé ìwádíí nàà ẹ̀ atileyin fún explanation tí ó dá lórí transport: microgravity dín ordinary settling àti buoyancy-driven flow kù gan-an, ó jẹ́ kí ìdàgbàsókè lọ́ra àti suspension pé sí i, nígbà tí diffusion jẹ́ olórí ní ìbẹ̀rẹ̀. Geometry omi, interfaces, evaporation àti additives tún ní ipa lórí morphology. Neutron diffraction kò fi sodium chloride ịṣètò tuntun hàn, brine inclusions sì ẹ̀ wà. Ịṣẹ́ nàà jẹ́ ọ̀ràn ìwádíí materials-science tó ní ààlà, kì í ẹ̀ ẹ̀rí pé ọ̀furufú ní dá crystal pípé sílẹ̀ tàbí pé ó ní jẹ́ kí industrial ilànà ẹ́ẹ́ ẹ̀.

Àyèwò No-BS

Ohun tí àwọn iwé iwádíí fi hàn: Millimetre-scale sodium chloride hopper cubes àti morphology mífíràn dàgbà nínú oríṣííríṣí geometry brine lórí ISS. Àwọn hopper cubes 2019 dàgbà díèdìè ní estimated supersaturation kékeré, pèlú diffusion gégé bí olórí ní ìbèrè.

Ohun tí a tùmò láti inú rẹ: Dídín settling àti buoyancy-driven flow kù gan-an jẹ kí suspension pẹ sí i àti ìdàgbàsókè tó ní symmetry púpò sí i. Ìrìn omi tó lora lè ti ní ipa ní apá ìkẹyìn nínú crystallizer tó tóbi.

Ohun tí wọn kò fi hàn: Irú atomic tuntun ti iyò, crystal tó mó sí i tàbí tí kò ní defect, matched Earth-versus-ISS ìdánwò, universal advantage ti microgravity tàbí commercial manufacturing route.

Àwọn ààlà pàtàkì: Àwọn iwádíí mēta tó yàtò pèlú geometry àti selected examples tó yàtò; terrestrial comparisons láàárín iwádíí; estimated transport quantities; exploratory, non-programmatic parts ti dossier; àti àìsí ìlànà economics tàbí performance ìdánwò.

Ìgbókànlé mélòó ni olùkà gbogbogbò yẹ kí ó ní? Ìgbókànlé gíga pé orbital morphologies àti slow growth tí a ròyìn jẹ gidi. Ìgbókànlé àárín pé transport explanation ni account tó dára jù kọjá àwọn observation náà. Ìgbókànlé kékeré gan-an nínú claim kankan tó ní yí àwọn ìdánwò iyò wònyí padà sí ìlérí gbogbogbò nípa space manufacturing.

Àwọn orísun

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>