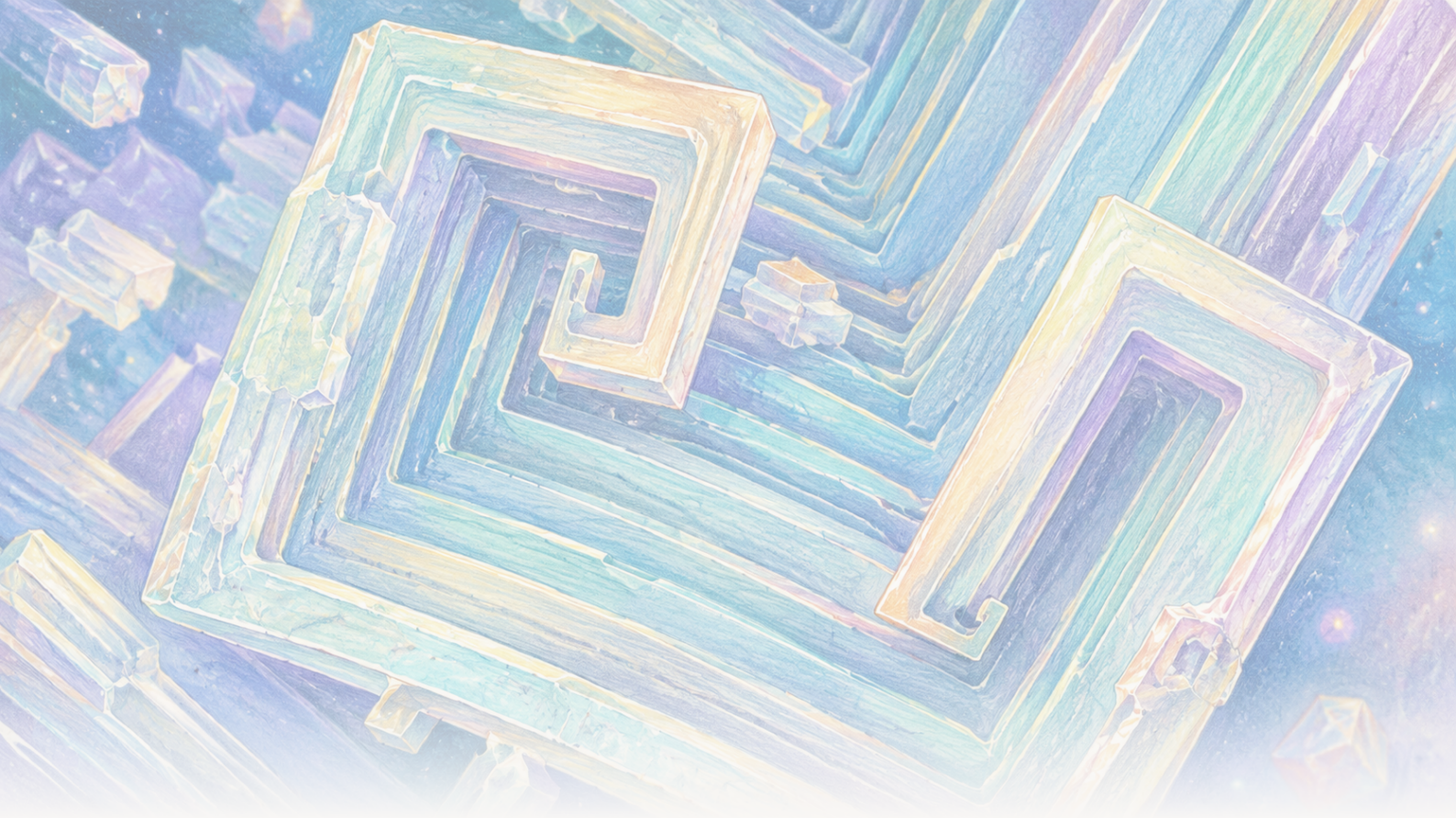


The Clean Paper

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

In orbita, il sale da cucina ha formato cubi cavi. La gravità ha cambiato la salamoia, non il sale

Tra i cristalli di cloruro di sodio cresciuti sulla Stazione Spaziale Internazionale vi erano cubi cavi e terrazzati larghi da 2 a 8 millimetri. Gli articoli sostengono una spiegazione basata sul trasporto: la normale sedimentazione e i moti indotti dalla galleggiabilità erano fortemente soppressi, mentre la diffusione dominava le prime fasi della crescita. Il reticolo non è diventato una nuova forma di sale e gli esperimenti non dimostrano un processo industriale.

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

In orbita, il comune sale da cucina ha formato cubi cavi e terrazzati

I cristalli sembravano piccole architetture: cornici quadrate dentro altre cornici quadrate, con le facce scavate in gradini.

Erano fatti di normale cloruro di sodio, lo stesso composto del sale da cucina. La parte insolita non era il materiale, ma la salamoia che lo circondava.

Sulla Terra, un cristallo che cresce in un volume di liquido dell'ordine dei centimetri può affondare, toccare una parete o una superficie e contribuire a creare differenze di densità che mettono in circolo la soluzione. Sulla Stazione Spaziale Internazionale, la normale sedimentazione e i moti indotti dalla galleggiabilità erano fortemente soppressi. Alcuni cristalli di sale sono rimasti sospesi abbastanza a lungo da crescere lentamente e in modo più simmetrico, formando **cubi a tramoggia** con spigoli lunghi da 2 a 8 millimetri.

Tre articoli, pubblicati nel 2011, nel 2015 e nel 2019, descrivono questi esperimenti. Nel loro insieme offrono una lezione limpida sulla fisica del trasporto: cambiare il modo in cui il materiale disciolto raggiunge un cristallo può modificarne la forma visibile senza cambiarne la struttura atomica.

Non dimostrano che lo spazio produca cristalli perfetti, non definiscono un processo industriale e non rivelano un nuovo tipo di sale.

Come un cubo diventa «a tramoggia»

Un normale cristallo di cloruro di sodio possiede una disposizione atomica cubica. Un **cristallo a tramoggia** rimane cubico, ma gli angoli e gli spigoli crescono più rapidamente dei centri delle facce. Il risultato è una depressione cava e terrazzata su ogni faccia, come se il cubo costruisse prima l'intelaiatura e solo dopo riempisse le pareti.

Un esempio successivo realizzato sulla ISS rende visibile questo schema di crescita, ma costituisce solo un contesto e non una prova tratta dai tre articoli sul cloruro di sodio. L'immagine e il time-lapse di Donald Pettit mostrati qui sotto riguardano il **cloruro di potassio**, un sale diverso, che in microgravità forma morfologie a tramoggia e a spirale terrazzata.

[figure_pair pending]

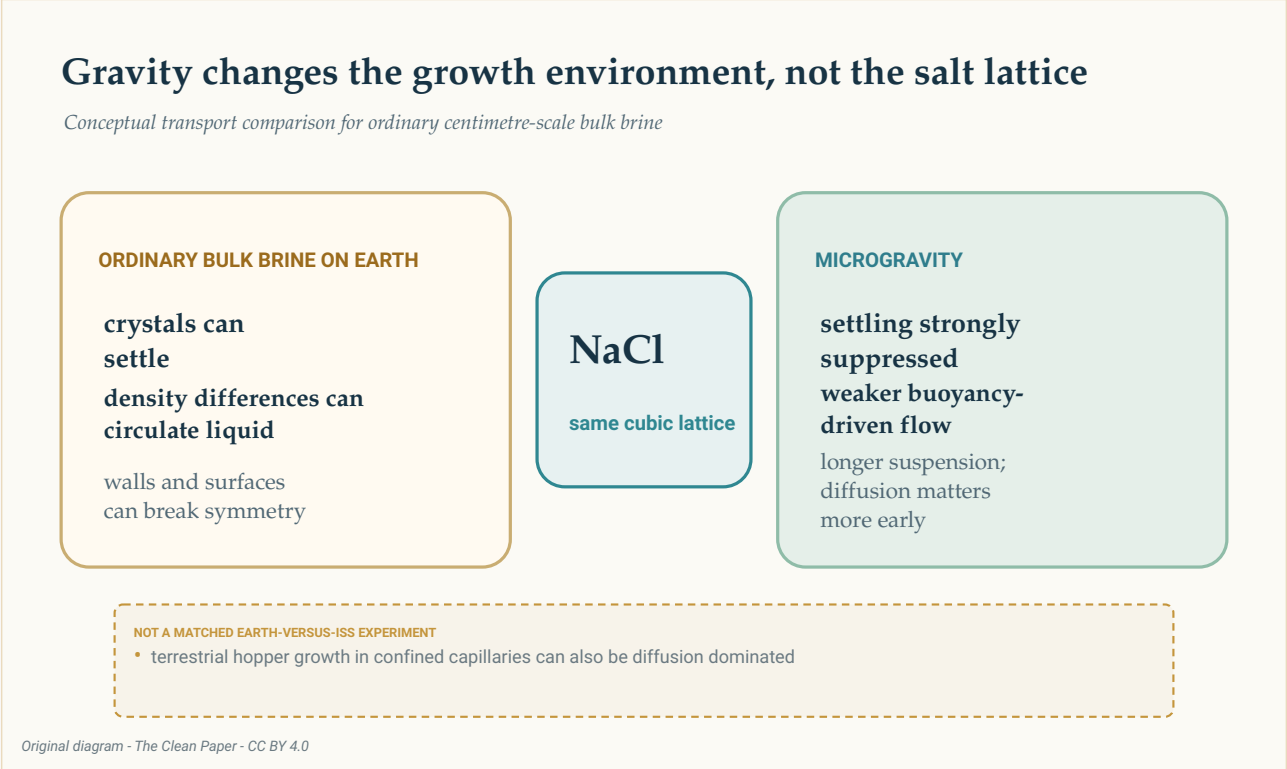
Due micrografie elettroniche a scansione di cristalli di cloruro di potassio a tramoggia e a spirale, cresciuti a bordo della ISS. Queste immagini successive sono esempi contestuali della morfologia, non campioni di cloruro di sodio né misure provenienti dagli studi del 2011, 2015 o 2019 discussi nell'articolo.

[video pending]

Un time-lapse successivo della crescita a tramoggia del cloruro di potassio in un sottile film d'acqua in microgravità. Illustra la crescita di spigoli e angoli, non gli esperimenti o i dati sul cloruro di sodio analizzati in questo articolo.

I cristalli crescono da una **salamoia sovrasatura**, cioè acqua salata che contiene più cloruro di sodio disciolto di quanto ne manterrebbe all'equilibrio in quelle condizioni. Gli ioni sodio e cloruro devono attraversare il liquido e unirsi alla superficie del cristallo.

Esistono due modi generali per trasportarli. La **diffusione** è il moto molecolare casuale che sposta il materiale disciolto lungo una differenza di concentrazione, senza una circolazione complessiva del liquido. La **convezione** è invece il movimento del liquido stesso. In condizioni di gravità ordinaria, piccole differenze di temperatura o concentrazione possono modificare la densità e innescare moti di galleggiabilità. I cristalli possono inoltre **sedimentare**, cioè scendere attraverso il liquido.



Un confronto concettuale mostra lo stesso reticolo di cloruro di sodio in entrambi gli ambienti. Nella salamoia ordinaria in volume sulla Terra possono intervenire sedimentazione, circolazione per galleggiabilità e contatto con le superfici; la microgravità sopprime fortemente i primi due fenomeni, permettendo una sospensione più lunga e rendendo la diffusione più importante nelle fasi iniziali della crescita. Non si trattava di un esperimento Terra-ISS con condizioni corrispondenti.

The Clean Paper CC BY 4.0

L'esperimento è stato condotto a bordo della Stazione Spaziale Internazionale, un laboratorio orbitante in microgravità. Il termine **microgravità** non significa assenza di gravità. L'articolo del 2019 riporta un'accelerazione residua pari a circa 1,2 milionesimi della gravità alla superficie terrestre, ossia 1,2 micro-g, insieme a un lento movimento ciclico del liquido. L'ambiente ha modificato l'equilibrio tra i meccanismi di trasporto; non ha reso la salamoia perfettamente immobile.

Una via lenta verso cubi millimetrici

Lo studio del 2019 si è concentrato sui cubi a tramoggia cresciuti durante l'evaporazione dell'acqua dalla salamoia sulla ISS. Gli spigoli misuravano da **2 a 8 millimetri**. Le velocità di crescita andavano da **0,34 a 1,0 micrometri al minuto** — circa **0,49–1,44 millimetri al giorno** — con una media di **0,68 micrometri al minuto** e una deviazione standard di 0,23.

A quella velocità media, per sviluppare uno spigolo di 8 millimetri sarebbe servita all'incirca una settimana. Il calcolo è una stima, non una misura time-lapse di tutte le fasi di crescita di un singolo cristallo.

Gli autori hanno stimato una sovrasaturazione inferiore a **1,002**. La letteratura terrestre usata come confronto descriveva la crescita a tramoggia con sovrasaturazioni molto maggiori, superiori a 1,45, e velocità da 10 a 110 micrometri al secondo per secondi o minuti, producendo in genere cubi più piccoli di 250 micrometri.

Il confronto è informativo, ma non corrispondente. I cristalli della ISS e quelli della letteratura terrestre non provenivano da due bracci simultanei e identici, uno a Terra e uno in orbita, gestiti dallo stesso gruppo. Oltre alla gravità, possono contare contenitori, interfacce e metodi diversi.

Il contrasto più solido è quindi descrittivo: in queste osservazioni sulla ISS, i cubi a tramoggia sono cresciuti lentamente, a bassa sovrasaturazione, nell'arco di giorni o settimane, raggiungendo dimensioni millimetriche.

All'inizio dominava la diffusione; in seguito restavano possibili moti del liquido

L'articolo del 2019 ha usato il **numero di Péclet** per confrontare il trasporto dovuto al moto del liquido con quello dovuto alla diffusione. Un valore inferiore a uno indica che la diffusione è più importante; un valore superiore a uno indica che il moto complessivo del liquido può dominare.

> **Un rapporto, non un interruttore**
>
> Il numero di Péclet confronta due velocità di trasporto. Non divide il mondo tra un liquido perfettamente immobile sotto il valore uno e convezione pura sopra il valore uno. Qui cambiava con la dimensione del cristallo e con la stima della velocità della salamoia circostante. I cristalli più piccoli si trovavano chiaramente in un regime dominato dalla diffusione; il cristallo più grande nel recipiente maggiore potrebbe essere entrato in un regime in cui contava anche il lento moto del liquido.

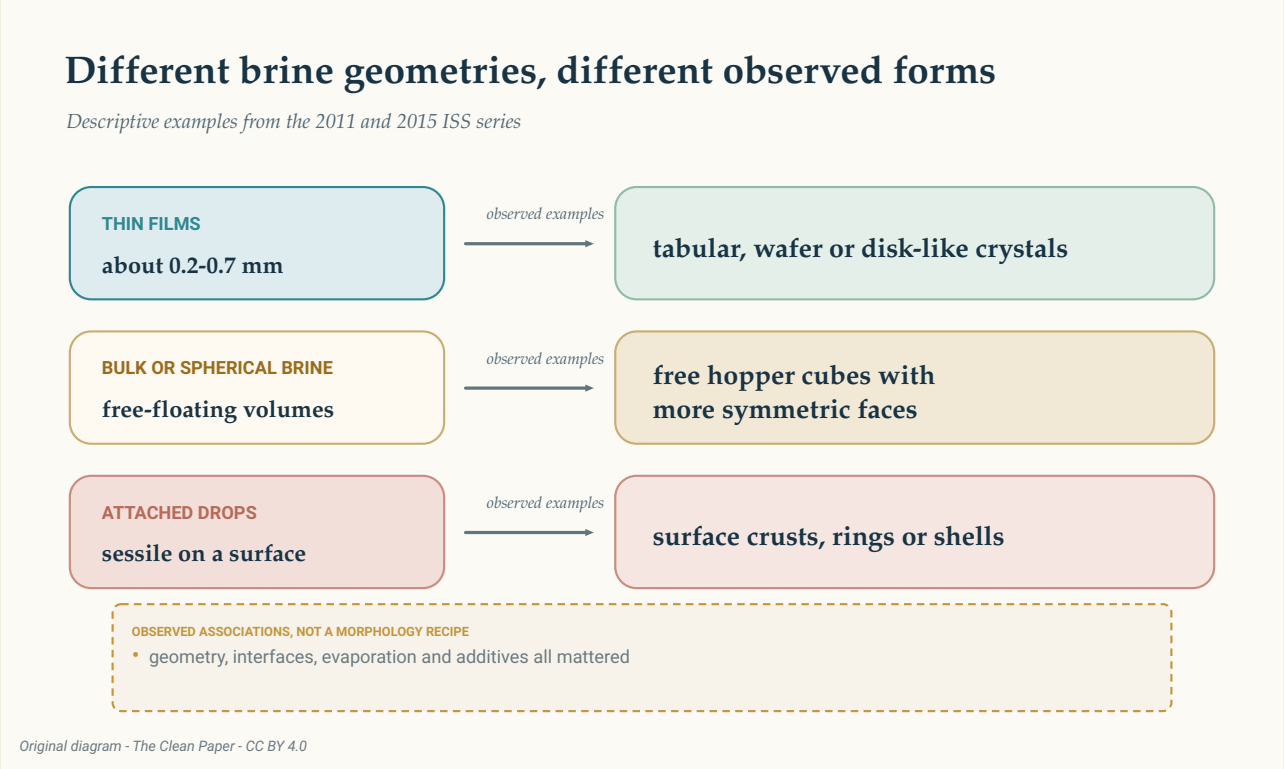
Nelle gocce più piccole, larghe circa 0,8 centimetri, i numeri di Péclet stimati sono saliti da circa **0,0004** vicino alla nucleazione a circa **0,03** alla dimensione finale misurata. La diffusione è rimasta dominante.

Nei cristallizzatori da 2–3 centimetri, la stima è aumentata da circa **0,05** per un nucleo di 50 micrometri a circa **4** per uno spigolo di 4 millimetri. Le prime fasi della crescita erano ancora dominate dalla diffusione, ma in seguito il lento moto ciclico avrebbe potuto contribuire.

Ecco perché sarebbe sbagliato dire che «la microgravità ha eliminato la convezione». La normale circolazione indotta dalla galleggiabilità e la sedimentazione erano fortemente ridotte. Rimanevano accelerazione residua e movimenti misurabili.

Contava anche la forma del liquido

L'articolo del 2011 e quello del 2015 hanno ampliato il quadro. Hanno descritto la cristallizzazione del sale in film sottili, strati di liquido più spessi, volumi di salamoia approssimativamente sferici e gocce aderenti a una superficie.



Tre righe riassumono gli esempi osservati nel dossier: film sottili con forme tabulari o simili a dischi, salamoia in volume o sferica con cubi a tramoggia liberi e gocce aderenti con croste, anelli o gusci. Sono associazioni descrittive, non una ricetta né una garanzia.

The Clean Paper CC BY 4.0

Nello studio del 2011, film sottili di circa 0,2–0,7 millimetri hanno prodotto lamine sottili e cristalli tabulari. I volumi di salamoia liberi di fluttuare consentivano facce laterali più simmetriche e cubi a tramoggia.

Le osservazioni del 2015 comprendevano fogli sottili da 0,2–0,7 millimetri, strati più spessi di circa 4–

6 millimetri e gocce emisferiche aderenti larghe approssimativamente 20–32 millimetri. Tra le forme riportate vi erano tramogge tabulari, cubi, cristalli simili a dischi, dendriti, anelli e gusci. In una serie di osservazioni, l'aggiunta di polietilenglicole ha soppresso la crescita a tramoggia.

Gli autori hanno descritto il lavoro del 2015 come un insieme di osservazioni realizzate con materiali non inventariati durante il tempo libero dell'equipaggio, non come un programma sperimentale rigoroso. Gli esempi mostrano che contavano tutti la geometria del liquido, le interfacce, l'evaporazione e gli additivi. Non definiscono una ricetta deterministica in cui una certa forma del contenitore garantisca una certa forma del cristallo.

Il reticolo non è diventato una nuova forma di sale

La distinzione tra **struttura cristallina** e **morfologia** è essenziale.

La struttura è la disposizione atomica che si ripete. La morfologia è la forma esterna visibile. La diffrazione neutronica nell'articolo del 2011 non ha identificato né una struttura modificata del cloruro di sodio né parametri diversi della cella reticolare rispetto ai campioni terrestri. I campioni orbitali contenevano inoltre **inclusioni di salamoia**, piccole tasche di soluzione intrappolate nel cristallo.

L'aspetto grande e simmetrico non è quindi una prova di maggiore purezza o di assenza di difetti. Nessuno degli articoli del dossier riporta una maggiore purezza chimica, migliori prestazioni meccaniche o l'idoneità per uno specifico dispositivo.

La gravità ha agito indirettamente. Ha modificato sedimentazione, circolazione del liquido, orientamento e contatto con le superfici. Non ha alterato la forza dei legami del cloruro di sodio né creato una nuova fase atomica.

Che cosa possono e non possono insegnare questi esperimenti

Gli articoli sostengono una spiegazione basata sul trasporto: sopprimere fortemente la normale sedimentazione e i moti indotti dalla galleggiabilità ha permesso ad alcuni cristalli di rimanere sospesi e crescere lentamente in condizioni più simmetriche. Dimensioni, velocità e forme misurate sono osservazioni dirette; sovrasaturazione, storia della crescita e numeri di Péclet comprendono stime; il confronto con la Terra si basa in parte su altri esperimenti pubblicati.

Il dossier non possiede un unico denominatore pulito. Combina singoli cristalli, cristallizzatori ed esempi selezionati provenienti da tre articoli. Sommarli in un unico totale farebbe pensare a un esperimento uniforme che non è mai esistito.

Gli studi non riportano neppure le prove necessarie per avanzare un'affermazione sulla produzione

industriale. Non misurano produttività, costo di produzione, consumo energetico, resa, affidabilità o prestazioni utili del materiale. La serie del 2015 era esplorativa. I confronti terrestri non erano controlli corrispondenti. E «grande» o «visivamente spettacolare» non significa «migliore per un'applicazione».

I depositi naturali di sale possono contenere cubi a tramoggia grandi centimetri, talvolta sospesi in fango impregnato di salamoia. L'articolo del 2019 propone una possibile analogia con una crescita lenta e dominata dalla diffusione. È un confronto interessante, non la prova che le tramogge naturali e quelle orbitali condividano lo stesso meccanismo.

In breve

Tra i cristalli di sale cresciuti da salamoia in evaporazione sulla Stazione Spaziale Internazionale vi erano cubi a tramoggia cavi e terrazzati larghi da 2 a 8 millimetri. Gli articoli sostengono una spiegazione fondata sul trasporto: la microgravità ha fortemente soppresso la normale sedimentazione e i moti indotti dalla galleggiabilità, consentendo una crescita lenta e una sospensione più lunga mentre la diffusione dominava le fasi iniziali. Anche la geometria del liquido, le interfacce, l'evaporazione e gli additivi hanno influenzato la morfologia. La diffrazione neutronica non ha mostrato una nuova struttura del cloruro di sodio e sono rimaste inclusioni di salamoia. Il lavoro è un caso di studio circoscritto di scienza dei materiali, non la prova che lo spazio produca cristalli perfetti o renda possibile un processo industriale.

Valutazione critica

Che cosa mostrano gli articoli: cubi a tramoggia di cloruro di sodio su scala millimetrica e altre morfologie sono cresciuti in diverse geometrie di salamoia sulla ISS. I cubi a tramoggia del 2019 sono cresciuti lentamente, a una bassa sovrasaturazione stimata, con la diffusione dominante nelle fasi iniziali.

Che cosa viene interpretato: la forte riduzione della sedimentazione e dei moti indotti dalla galleggiabilità ha permesso una sospensione più lunga e una crescita più simmetrica. Il lento moto del liquido potrebbe aver avuto un ruolo nelle fasi finali nel cristallizzatore più grande.

Che cosa non mostrano: una nuova forma atomica del sale, cristalli più puri o privi di difetti, uno studio Terra-ISS con condizioni corrispondenti, un vantaggio universale della microgravità o una via verso la produzione commerciale.

Principali limiti: tre studi distinti, con geometrie ed esempi selezionati diversi; confronti terrestri tra studi differenti; quantità di trasporto stimate; parti esplorative e non programmatiche del dossier; nessuna analisi economica del processo né test delle prestazioni.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore non specialista? Fiducia elevata nel fatto che le morfologie orbitali e la crescita lenta riportate siano reali. Fiducia moderata nella spiegazione basata

sul trasporto come migliore interpretazione complessiva delle osservazioni. Fiducia molto bassa in qualunque affermazione che trasformi questi esperimenti sul sale in una promessa generale sulla produzione nello spazio.

Fonti

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