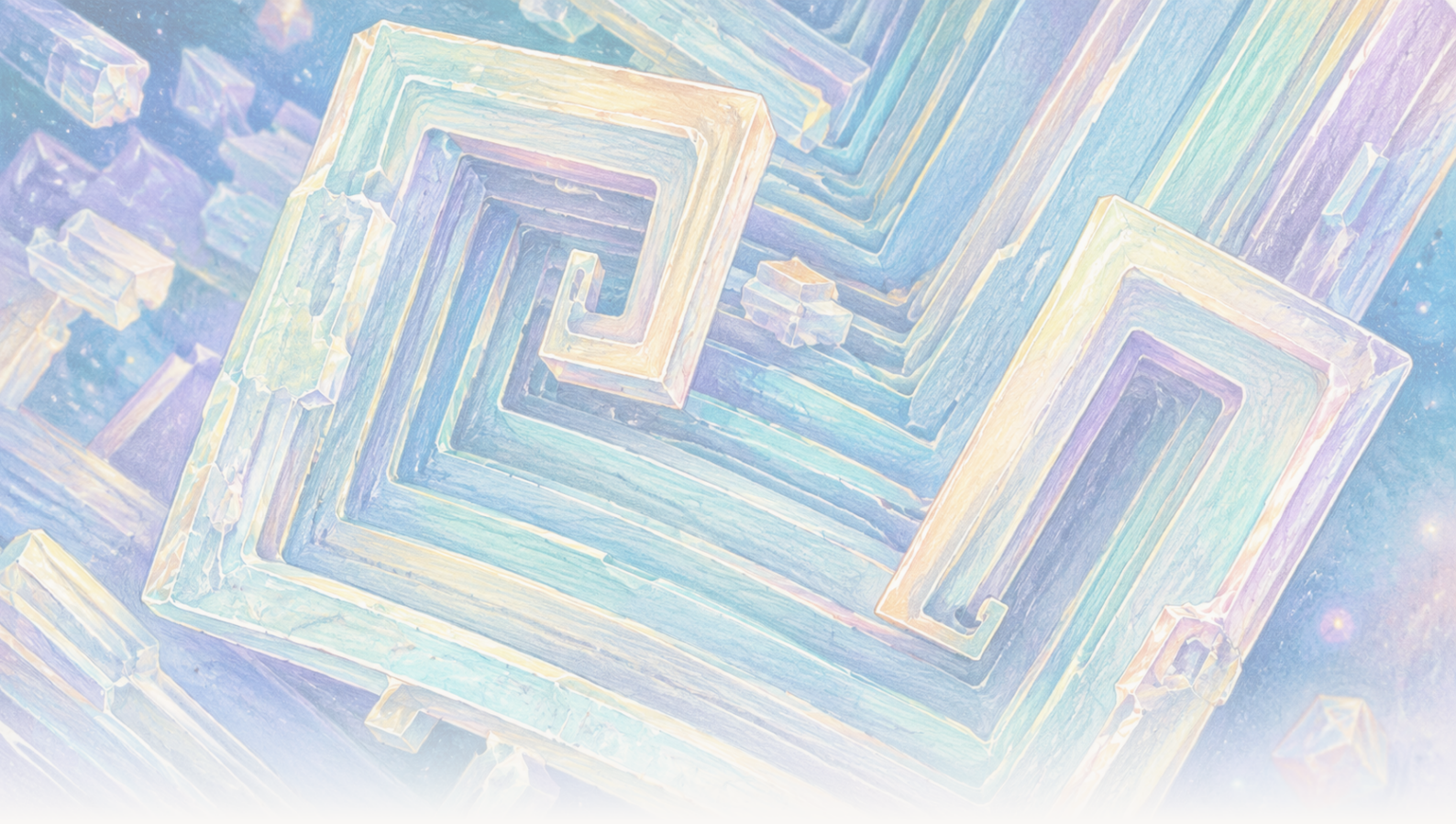




The CLEAN PAPER

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

Σε τροχιά, το επιτραπέζιο αλάτι σχημάτισε κοίλους κύβους. Η βαρύτητα άλλαξε την άλμη, όχι το αλάτι

Κρύσταλλοι χλωριούχου νατρίου που αναπτύχθηκαν στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό περιλάμβαναν κοίλους, βαθμιδωτούς κύβους διαστάσεων 2 έως 8 χιλιοστών. Οι εργασίες υποστηρίζουν μια εξήγηση μέσω της μεταφοράς: η συνηθισμένη καθίζηση και η ροή λόγω άνωσης καταστέλλονται έντονα, ενώ η διάχυση κυριαρχούσε στην πρώιμη ανάπτυξη. Το κρυσταλλικό πλέγμα δεν έγινε νέα μορφή αλατιού και τα πειράματα δεν καθιερώνουν βιομηχανική διαδικασία.

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

Σε τροχιά, το κοινό επιτραπέζιο αλάτι μεγάλωσε σε κοίλους, βαθμιδωτούς κύβους

Οι κρύσταλλοι έμοιαζαν αρχιτεκτονικοί: τετράγωνα πλαίσια μέσα σε άλλα τετράγωνα πλαίσια, με τις έδρες τους να βυθίζονται σε σκαλοπάτια.

Ήταν φτιαγμένοι από κοινό χλωριούχο νάτριο, την ίδια ένωση με το επιτραπέζιο αλάτι. Το ασυνήθιστο δεν ήταν το υλικό. Ήταν η άλμη γύρω του.

Στη Γη, ένας αναπτυσσόμενος κρύσταλλος μέσα σε όγκο υγρού της τάξης των εκατοστών μπορεί να βυθιστεί, να αγγίξει ένα τοίχωμα ή μια επιφάνεια και να συμβάλει στη δημιουργία διαφορών πυκνότητας που θέτουν το διάλυμα σε κυκλοφορία. Στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, η συνηθισμένη καθίζηση και η ροή που προκαλείται από την άνωση καταστέλλονται έντονα. Ορισμένοι κρύσταλλοι αλατιού παρέμειναν αιωρούμενοι αρκετά ώστε να αναπτυχθούν αργά και πιο συμμετρικά σε **κοίλους βαθμιδωτούς κύβους (hopper cubes)** με ακμές από 2 έως 8 χιλιοστά.

Τρεις εργασίες, δημοσιευμένες το 2011, το 2015 και το 2019, περιγράφουν αυτά τα πειράματα. Μαζί προσφέρουν ένα καθαρό μάθημα φυσικής μεταφοράς: αλλάζοντας τον τρόπο με τον οποίο το διαλυμένο υλικό φτάνει σε έναν κρύσταλλο, μπορεί να αλλάξει η ορατή μορφή του χωρίς να αλλάξει η ατομική του δομή.

Δεν δείχνουν ότι το διάστημα δημιουργεί τέλειους κρυστάλλους, δεν καθιερώνουν βιομηχανική διαδικασία και δεν αποκαλύπτουν νέο είδος αλατιού.

Τι κάνει έναν κύβο να γίνει hopper

Ένας κανονικός κρύσταλλος χλωριούχου νατρίου έχει κυβική ατομική διάταξη. Ένας **κρύσταλλος hopper** παραμένει κυβικός, αλλά οι γωνίες και οι ακμές του αναπτύσσονται πιο γρήγορα από τα κέντρα των εδρών του. Το αποτέλεσμα είναι μια κοίλη, βαθμιδωτή εσοχή σε κάθε έδρα, σαν ο κύβος να προσπαθεί πρώτα να χτίσει τον σκελετό του και μετά να γεμίσει τους τοίχους.

Ένα μεταγενέστερο παράδειγμα από τον ISS κάνει αυτό το μοτίβο ανάπτυξης ορατό, αλλά αποτελεί πλαίσιο και όχι τεκμήριο από τις τρεις εργασίες για το χλωριούχο νάτριο. Η εικόνα και το time-lapse του Donald Pettit παρακάτω δείχνουν **χλωριούχο κάλιο**, ένα διαφορετικό άλας, να σχηματίζει βαθμιδωτές μορφολογίες hopper και μορφές τύπου έλικας σε μικροβαρύτητα.

[figure_pair pending]

Δύο μικρογραφίες ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης κρυστάλλων χλωριούχου καλίου τύπου hopper με μορφή έλικας, που αναπτύχθηκαν στον ISS. Αυτές οι μεταγενέστερες εικόνες είναι παραδείγματα της

μορφολογίας για λόγους πλαισίου, όχι δείγματα χλωριούχου νατρίου ή μετρήσεις από τις μελέτες του 2011, 2015 ή 2019 που συζητούνται σε αυτό το άρθρο.

[video pending]

Μεταγενέστερο time-lapse ανάπτυξης κρυστάλλου hopper χλωριούχου καλίου μέσα σε λεπτό υδάτινο υμένιο σε μικροβαρύτητα. Απεικονίζει την ανάπτυξη ακμών και γωνιών, όχι τα πειράματα ή τα δεδομένα χλωριούχου νατρίου που αναλύονται σε αυτό το άρθρο.

Οι κρύσταλλοι αναπτύσσονται από **υπέρκορη άλμη**: αλατόνερο που περιέχει περισσότερο διαλυμένο χλωριούχο νάτριο από όσο θα συγκρατούσε σε ισορροπία υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες. Τα ιόντα νατρίου και χλωρίου πρέπει να κινηθούν μέσα στο υγρό και να ενσωματωθούν στην επιφάνεια του κρυστάλλου.

Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι μεταφοράς τους. **Διάχυση** είναι η τυχαία μοριακή κίνηση που μεταφέρει διαλυμένη ύλη κατά μήκος μιας διαφοράς συγκέντρωσης χωρίς μαζική κυκλοφορία του υγρού. **Συναγωγή** είναι η κίνηση του ίδιου του υγρού. Υπό κανονική βαρύτητα, μικρές διαφορές θερμοκρασίας ή συγκέντρωσης μπορούν να αλλάξουν την πυκνότητα και να προκαλέσουν κυκλοφορία λόγω άνωσης. Οι κρύσταλλοι μπορούν επίσης να **καθίζανουν**, δηλαδή να κατακάθονται μέσα στο υγρό.

Gravity changes the growth environment, not the salt lattice

Conceptual transport comparison for ordinary centimetre-scale bulk brine

ORDINARY BULK BRINE ON EARTH

crystals can settle
density differences can circulate liquid

walls and surfaces can break symmetry

NaCl

same cubic lattice

MICROGRAVITY

settling strongly suppressed
weaker buoyancy-driven flow

longer suspension;
diffusion matters more early

NOT A MATCHED EARTH-VERSUS-ISS EXPERIMENT

- terrestrial hopper growth in confined capillaries can also be diffusion dominated

Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Μια εννοιολογική σύγκριση δείχνει το ίδιο πλέγμα χλωριούχου νατρίου και στα δύο περιβάλλοντα. Σε συνηθισμένο μαζικό όγκο άλμης στη Γη μπορεί να υπάρχουν καθίζηση, κυκλοφορία λόγω άνωσης και επαφή με επιφάνειες· η μικροβαρύτητα καταστέλλει έντονα τα δύο πρώτα, επιτρέποντας μεγαλύτερη διάρκεια αιώρησης και κάνοντας τη διάχυση σημαντικότερη στα πρώτα στάδια ανάπτυξης. Δεν επρόκειτο για αντιστοιχισμένο πείραμα Γης έναντι ISS.

The Clean Paper CC BY 4.0

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό, ένα τροχιακό εργαστήριο μικροβαρύτητας. Ο όρος **μικροβαρύτητα** δεν σημαίνει απουσία βαρύτητας. Η εργασία του 2019 ανέφερε υπολειπόμενη επιτάχυνση περίπου 1,2 εκατομμυριοστών της επιφανειακής βαρύτητας της Γης, δηλαδή 1,2 micro-g, μαζί με αργή κυκλική κίνηση του υγρού. Το περιβάλλον άλλαξε την ισορροπία των μηχανισμών μεταφοράς· δεν έκανε την άλμη απολύτως ακίνητη.

Ένας αργός δρόμος προς κύβους κλίμακας χιλιοστού

Η μελέτη του 2019 επικεντρώθηκε σε κύβους hopper που αναπτύχθηκαν καθώς εξατμιζόταν νερό από άλμη στον ISS. Οι αναφερόμενες ακμές των κύβων κυμαίνονταν από **2 έως 8 χιλιοστά**. Οι ρυθμοί ανάπτυξης ήταν από **0,34 έως 1,0 μικρόμετρα ανά λεπτό** (περίπου **0,49 έως 1,44 χιλιοστά ανά ημέρα**), με μέση τιμή **0,68 μικρόμετρα ανά λεπτό** και τυπική απόκλιση 0,23.

Με αυτόν τον μέσο ρυθμό, μια ακμή 8 χιλιοστών θα χρειαζόταν περίπου μία εβδομάδα για να αναπτυχθεί. Ο υπολογισμός είναι εκτίμηση και όχι μέτρηση time-lapse κάθε σταδίου ενός συγκεκριμένου κρυστάλλου.

Οι συγγραφείς εκτίμησαν υπερκορεσμό κάτω από **1,002**. Η βιβλιογραφία γήινων συγκρίσεων που χρησιμοποίησαν περιέγραφε ανάπτυξη hopper σε πολύ υψηλότερο υπερκορεσμό, πάνω από 1,45, με ρυθμούς 10 έως 110 μικρομέτρων ανά δευτερόλεπτο για δευτερόλεπτα ή λεπτά, που συνήθως παρήγαγαν κύβους μικρότερους από 250 μικρόμετρα.

Η σύγκριση είναι κατατοπιστική αλλά όχι αντιστοιχισμένη. Οι κρύσταλλοι του ISS και τα δεδομένα της επίγειας βιβλιογραφίας δεν προήλθαν από ταυτόχρονους, πανομοιότυπους βραχίονες στη Γη και σε τροχιά που εκτελέστηκαν από την ίδια ομάδα. Διαφορετικά δοχεία, διεπιφάνειες και μέθοδοι μπορούν να έχουν σημασία παράλληλα με τη βαρύτητα.

Η ισχυρότερη αντίθεση είναι επομένως περιγραφική: σε αυτές τις παρατηρήσεις στον ISS, οι κύβοι hopper αναπτύχθηκαν αργά, σε χαμηλό υπερκορεσμό, επί ημέρες έως εβδομάδες και έφτασαν σε κλίμακα χιλιοστού.

Η διάχυση κυριαρχούσε αρχικά· αργότερα η ροή παρέμενε δυνατή

Η εργασία του 2019 χρησιμοποίησε τον αριθμό **Peclet** για να συγκρίνει τη μεταφορά μέσω κίνησης του υγρού με τη μεταφορά μέσω διάχυσης. Τιμή μικρότερη από ένα σημαίνει ότι η διάχυση είναι σημαντικότερη· τιμή μεγαλύτερη από ένα σημαίνει ότι μπορεί να κυριαρχεί η μαζική κίνηση.

Λόγος, όχι διακόπτης

Ο αριθμός Peclet είναι σύγκριση ανάμεσα σε δύο ρυθμούς μεταφοράς. Δεν χωρίζει τον κόσμο σε απολύτως ακίνητο υγρό κάτω από το ένα και καθαρή συναγωγή πάνω από το ένα. Εδώ η τιμή άλλαζε με το μέγεθος του κρυστάλλου και με την εκτίμηση ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκε για τη γύρω άλμη. Οι μικρότεροι κρύσταλλοι βρίσκονται καθαρά σε καθεστώς όπου κυριαρχούσε η διάχυση· ο μεγαλύτερος κρύσταλλος στο μεγαλύτερο δοχείο θα μπορούσε να έχει περάσει σε καθεστώς όπου είχε σημασία η αργή κίνηση του υγρού.

Στις μικρότερες σταγόνες, διαμέτρου περίπου 0,8 εκατοστών, οι εκτιμώμενες τιμές Peclet αυξήθηκαν από περίπου **0,0004** κοντά στην πυρηνοποίηση σε περίπου **0,03** στο τελικό μετρούμενο μέγεθος. Η διάχυση παρέμεινε κυρίαρχη.

Σε κρυσταλλωτήρες 2 έως 3 εκατοστών, η εκτίμηση αυξήθηκε από περίπου **0,05** για πυρήνα 50 μικρομέτρων σε περίπου **4** για ακμή 4 χιλιοστών. Η πρώιμη ανάπτυξη εξακολουθούσε να κυριαρχείται από τη διάχυση, αλλά αργότερα θα μπορούσε να έχει συμβάλει η αργή κυκλική κίνηση.

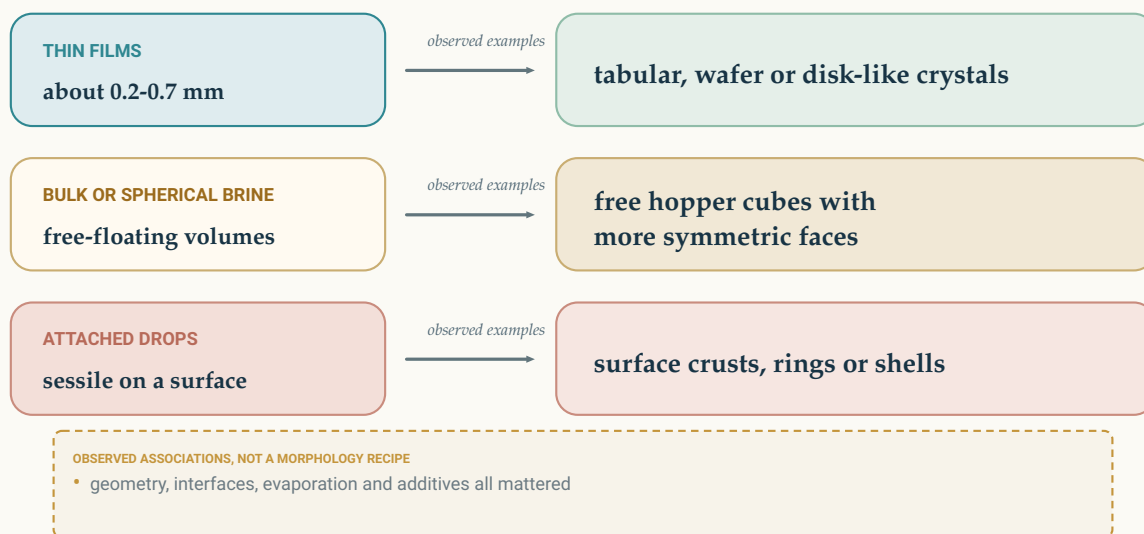
Γι' αυτό θα ήταν λάθος να πούμε ότι «η μικροβαρύτητα εξαφάνισε τη συναγωγή». Η συνηθισμένη κυκλοφορία λόγω άνωσης και η καθίζηση μειώθηκαν έντονα. Παρέμειναν όμως υπολειπόμενη επιτάχυνση και μετρήσιμη κίνηση.

Σημασία είχε και το σχήμα του υγρού

Η εργασία του 2011 και η εργασία του 2015 διεύρυναν την εικόνα. Απέφεραν κρυστάλλωση αλατιού σε λεπτά υμένια, παχύτερα στρώματα υγρού, περίπου σφαιρικούς όγκους άλμης και σταγόνες προσκολλημένες σε επιφάνεια.

Different brine geometries, different observed forms

Descriptive examples from the 2011 and 2015 ISS series



Original diagram - The Clean Paper - CC BY 4.0

Τρεις σειρές συνοψίζουν παρατηρημένα παραδείγματα σε όλο το σύνολο των μελετών: λεπτά υμένια με πλακοειδείς ή δισκοειδείς μορφές, μαζική ή σφαιρική άλμη με ελεύθερους κύβους hopper, και προσκολλημένες σταγόνες με κρούστες, δακτυλίους ή κελύφη. Πρόκειται για περιγραφικές συσχετίσεις, όχι για συνταγή ή εγγύηση.

The Clean Paper CC BY 4.0

Στη μελέτη του 2011, λεπτά υμένια πάχους περίπου 0,2 έως 0,7 χιλιοστών παρήγαγαν λεπτές πλάκες και πλακοειδείς κρυστάλλους. Οι ελεύθερα αιωρούμενοι όγκοι άλμης επέτρεψαν πιο συμμετρικές πλευρικές έδρες και κύβους hopper.

Οι παρατηρήσεις του 2015 περιλάμβαναν λεπτά φύλλα πάχους 0,2 έως 0,7 χιλιοστών, παχύτερα στρώματα περίπου 4 έως 6 χιλιοστών και προσκολλημένες ημισφαιρικές σταγόνες διαμέτρου περίπου 20 έως 32 χιλιοστών. Οι αναφερόμενες μορφές περιλάμβαναν πλακοειδείς hoppers, κύβους, δισκοειδείς κρυστάλλους, δενδρίτες, δακτυλίους και κελύφη. Η προσθήκη πολυαιθυλενογλυκόλης κατέστειλε την ανάπτυξη hopper σε ένα σύνολο παρατηρήσεων.

Οι συγγραφείς περιέγραψαν την εργασία του 2015 ως παρατηρήσεις που έγιναν με μη καταγεγραμμένα αναλώσιμα στον ελεύθερο χρόνο του πληρώματος και όχι ως αυστηρή, προγραμματικά οργανωμένη έρευνα. Τα παραδείγματα δείχνουν ότι η γεωμετρία του υγρού, οι διεπιφάνειες, η εξάτμιση και τα πρόσθετα είχαν όλα σημασία. Δεν ορίζουν μια ντετερμινιστική συνταγή όπου ένα συγκεκριμένο σχήμα δοχείου εγγυάται ένα συγκεκριμένο σχήμα κρυστάλλου.

Το πλέγμα δεν έγινε μια νέα μορφή αλατιού

Η διάκριση ανάμεσα στην **κρυσταλλική δομή** και τη **μορφολογία** είναι ουσιώδης.

Δομή είναι η επαναλαμβανόμενη ατομική διάταξη. Μορφολογία είναι η ορατή εξωτερική μορφή. Η περίθλαση νετρονίων στην εργασία του 2011 δεν εντόπισε αλλαγμένη δομή χλωριούχου νατρίου ή αλλαγμένες παραμέτρους της μοναδιαίας κυψελίδας σε σύγκριση με επίγεια δείγματα. Τα δείγματα από την τροχιά περιείχαν επίσης **εγκλείσματα άλμης**, μικρούς θύλακες διαλύματος παγιδευμένους μέσα στον κρύσταλλο.

Επομένως, η μεγάλη και συμμετρική εμφάνιση δεν αποτελεί ένδειξη καθαρότερου υλικού ή υλικού χωρίς ελαττώματα. Καμία εργασία στο σύνολο αυτό δεν αναφέρει υψηλότερη χημική καθαρότητα, καλύτερη μηχανική απόδοση ή καταλληλότητα για συγκεκριμένη συσκευή.

Η βαρύτητα έδρασε έμμεσα. Άλλαξε την καθίζηση, την κυκλοφορία του υγρού, τον προσανατολισμό και την επαφή με επιφάνειες. Δεν άλλαξε την ισχύ των δεσμών νατρίου-χλωρίου ούτε δημιούργησε νέα ατομική φάση.

Τι μπορούν και τι δεν μπορούν να μας μάθουν αυτά τα πειράματα

Οι εργασίες υποστηρίζουν μια εξήγηση μέσω της μεταφοράς: η έντονη καταστολή της συνηθισμένης καθίζησης και της ροής λόγω άνωσης επέτρεψε σε ορισμένους κρυστάλλους να παραμείνουν αιωρούμενοι και να αναπτυχθούν αργά υπό πιο συμμετρικές συνθήκες. Τα μετρούμενα μεγέθη, οι ρυθμοί και οι μορφές είναι άμεσες παρατηρήσεις: ο υπερκορεσμός, το ιστορικό ανάπτυξης και οι τιμές Peclet περιλαμβάνουν εκτιμήσεις: η σύγκριση με τη Γη αντλεί εν μέρει από άλλα δημοσιευμένα πειράματα.

Δεν υπάρχει ένας ενιαίος, καθαρός παρονομαστής για αυτό το σύνολο στοιχείων. Συνδυάζει μεμονωμένους κρυστάλλους, κρυσταλλωτήρες και επιλεγμένα παραδείγματα από τρεις εργασίες. Η πρόσθεσή τους σε ένα συνολικό πλήθος θα υπονοούσε ένα ομοιόμορφο πείραμα που δεν υπήρξε.

Οι μελέτες δεν αναφέρουν επίσης κανένα από τα στοιχεία που θα απαιτούνταν για ισχυρισμό περί παραγωγής. Δεν μετρούν ρυθμό παραγωγής, κόστος, κατανάλωση ενέργειας, απόδοση, αξιοπιστία ή χρήσιμη απόδοση του υλικού. Η σειρά του 2015 ήταν διερευνητική. Οι επίγειες συγκρίσεις δεν ήταν αντιστοιχισμένοι μάρτυρες. Και το μεγάλο ή εντυπωσιακό οπτικά δεν είναι το ίδιο με το καλύτερο για μια εφαρμογή.

Φυσικά κοιτάσματα αλατιού μπορούν να περιέχουν κύβους hopper διαστάσεων εκατοστών, μερικές φορές αιωρούμενους σε λάσπη εμποτισμένη με άλμη. Η εργασία του 2019 προτείνει μια πιθανή αναλογία με αργή ανάπτυξη όπου κυριαρχεί η διάχυση. Είναι μια ενδιαφέρουσα σύγκριση, όχι απόδειξη ότι οι φυσικοί και οι τροχιακοί hopper έχουν τον ίδιο μηχανισμό.

Καθαρή σύνοψη

Οι κρύσταλλοι αλατιού που αναπτύχθηκαν από εξατμιζόμενη άλμη στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό περιλάμβαναν κοίλους, βαθμιδωτούς κύβους hopper διαστάσεων 2 έως 8 χιλιοστών. Οι εργασίες υποστηρίζουν μια εξήγηση βασισμένη στη μεταφορά: η μικροβαρύτητα κατέστειλε έντονα τη συνηθισμένη καθίζηση και τη ροή λόγω άνωσης, επιτρέποντας αργή ανάπτυξη και μεγαλύτερη διάρκεια αιώρησης, ενώ στα πρώτα στάδια κυριαρχούσε η διάχυση. Η γεωμετρία του υγρού, οι διεπιφάνειες, η εξάτμιση και τα πρόσθετα επηρέασαν επίσης τη μορφολογία. Η περίθλαση νετρονίων δεν έδειξε νέα δομή χλωριούχου νατρίου και παρέμειναν εγκλείσματα άλμης. Η εργασία είναι μια οριοθετημένη μελέτη περίπτωσης στην επιστήμη υλικών, όχι απόδειξη ότι το διάστημα δημιουργεί τέλειους κρυστάλλους ή επιτρέπει βιομηχανική διαδικασία.

Έλεγχος χωρίς υπερβολές

Τι δείχνουν οι εργασίες: Κύβοι hopper χλωριούχου νατρίου κλίμακας χιλιοστού και άλλες μορφολογίες αναπτύχθηκαν σε διάφορες γεωμετρίες άλμης στον ISS. Οι κύβοι hopper της μελέτης του 2019 αναπτύχθηκαν αργά σε χαμηλό εκτιμώμενο υπερκορεσμό, με τη διάχυση να κυριαρχεί αρχικά.

Τι αποτελεί ερμηνεία: Η έντονα μειωμένη καθίζηση και ροή λόγω άνωσης επέτρεψαν μεγαλύτερη διάρκεια αιώρησης και πιο συμμετρική ανάπτυξη. Η αργή κίνηση του υγρού μπορεί να είχε σημασία στα τελευταία στάδια στον μεγαλύτερο κρυσταλλωτήρα.

Τι δεν δείχνουν: Νέα ατομική μορφή αλατιού, καθαρότερους ή χωρίς ελαττώματα κρυστάλλους, αντιστοιχισμένη δοκιμή Γης έναντι ISS, καθολικό πλεονέκτημα της μικροβαρύτητας ή εμπορική οδό παραγωγής.

Κύριοι περιορισμοί: Τρεις διαφορετικές μελέτες με διαφορετικές γεωμετρίες και επιλεγμένα παραδείγματα· επίγειες συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών μελετών· εκτιμώμενα μεγέθη μεταφοράς· διερευνητικά, μη προγραμματικά τμήματα του συνόλου στοιχείων· και απουσία οικονομικών στοιχείων διαδικασίας ή δοκιμών απόδοσης.

Πόση εμπιστοσύνη πρέπει να έχει ένας γενικός αναγνώστης; Υψηλή εμπιστοσύνη ότι οι αναφερόμενες μορφολογίες σε τροχιά και η αργή ανάπτυξη είναι πραγματικές. Μέτρια εμπιστοσύνη στην εξήγηση μέσω της μεταφοράς ως την καλύτερη συνολική ερμηνεία των παρατηρήσεων. Πολύ χαμηλή εμπιστοσύνη σε οποιονδήποτε ισχυρισμό μετατρέπει αυτά τα πειράματα με αλάτι σε γενική υπόσχεση για παραγωγή στο διάστημα.

Πηγές

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.jcrysgr.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.jcrysgr.2015.07.026>