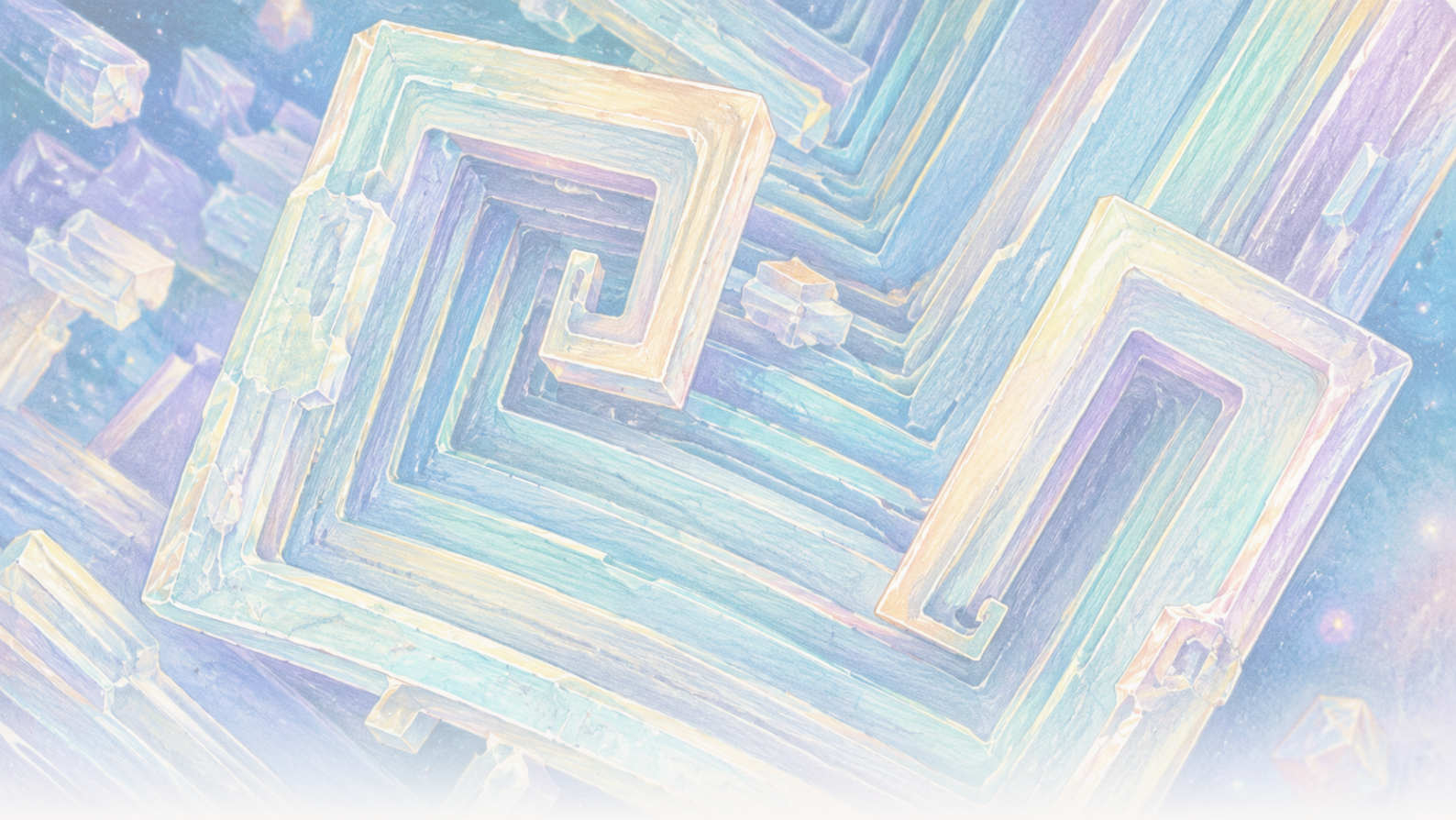


The Clean Paper

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

في المدار، نما ملح الطعام إلى مكعبات جوفاء. الجاذبية غيّرت المحلول الملحي، لا الملح

شملت بلورات كلوريد الصوديوم التي نمت على محطة الفضاء الدولية مكعبات جوفاء ومتدرجة بعرض 2 إلى 8 مليمترات. وتدعم الأوراق تفسيراً قائماً على النقل: جرى كبح الترسيب المعتاد والتدفق المدفوع بالطفو بشدة، بينما هيمن الانتشار على النمو المبكر. ولم تتحول الشبكة البلورية إلى نوع جديد من الملح، كما أن التجارب لا تثبت عملية صناعية.

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: 0-0085-019-s41526/1038.10

في المدار، نما ملح الطعام العادي على هيئة مكعبات جوفاء متدرجة

بدت البلورات معمارية: إطارات مربعة داخل إطارات مربعة، ووجوهها محفورة إلى الداخل على شكل درجات.

كانت مكوّنة من كلوريد الصوديوم العادي، وهو المركب نفسه الموجود في ملح الطعام. الغريب لم يكن المادة نفسها، بل المحلول الملحي المحيط بها.

على الأرض، يمكن لبلورة تنمو في حجم من السائل بمقياس السنتيمتر أن تهبط إلى الأسفل، أو تلامس جداراً أو سطحاً، وأن تساعد على نشوء فروق في الكثافة تحرّك المحلول. أما على محطة الفضاء الدولية، فقد جرى كبح الترسيب المعتاد والتدفق الناتج عن الطفو بشدة. وبقيت بعض بلورات الملح معلقة مدة طويلة بما يكفي لتنمو ببطء وبتماثل أكبر إلى **مكعبات قادوسية** تراوحت أطوال حوافها بين 2 و8 مليمترات.

تصف ثلاث أوراق نُشرت في 2011 و2015 و2019 هذه التجارب. وهي تقدم مجتمعة درساً واضحاً في فيزياء النقل: تغيير الطريقة التي تصل بها المادة الذائبة إلى البلورة يمكن أن يغيّر شكلها المرئي من دون أن يغيّر بنيتها الذرية.

ولا تُظهر هذه الدراسات أن الفضاء يصنع بلورات مثالية، ولا تثبت عملية صناعية، ولا تكشف نوعاً جديداً من الملح.

ما الذي يحوّل المكعب إلى بلورة قادوسية؟

تملك بلورة كلوريد الصوديوم العادية ترتيباً ذرياً مكعباً. أما **البلورة القادوسية** فتبقى مكعبة، لكن زواياها وحوافها تنمو أسرع من مراكز وجوهها. والنتيجة انخفاض مجوف ومتدرج في كل وجه، كما لو أن المكعب بدأ ببناء إطاره قبل أن يملأ الجدران.

يوضح مثال لاحق من محطة الفضاء الدولية هذا النمط من النمو، لكنه يقدم سياقاً بصرياً لا دليلاً مأخوذاً من أوراق كلوريد الصوديوم الثلاث. فصورة دونالد بيتيت والتصوير المتتابع أدناه يعرضان **كلوريد البوتاسيوم**، وهو ملح مختلف، وهو يتشكل في الجاذبية الصغرى إلى بلورات قادوسية متدرجة وأشكال لولبية.

[figure_pair pending]

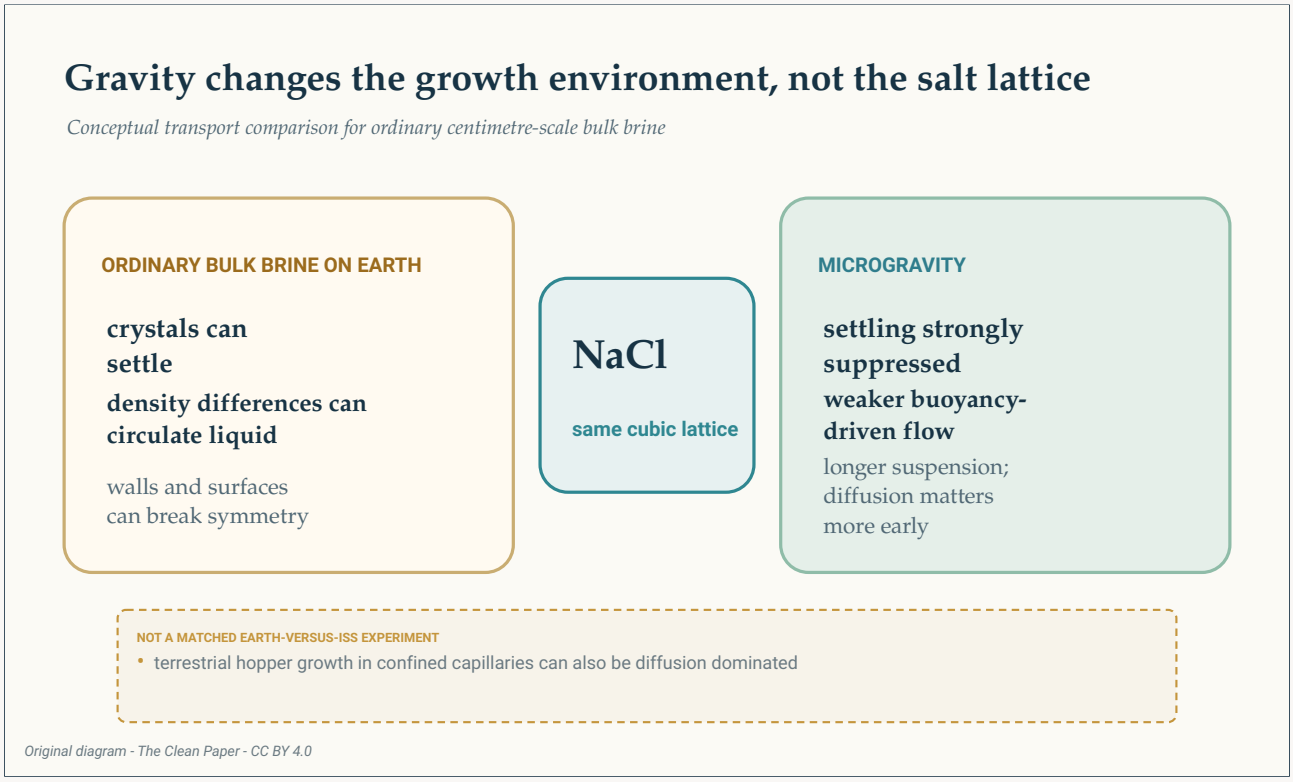
صورتان بالمجهر الإلكتروني الماسح لبلورات قادوسية لولبية الشكل من كلوريد البوتاسيوم نمت على متن محطة الفضاء الدولية. هذه الصور اللاحقة أمثلة سياقية على المورفولوجيا، وليست عينات من كلوريد الصوديوم أو قياسات من دراسات 2011 أو 2015 أو 2019 التي يناقشها هذا المقال.

[video pending]

تصوير متتابع لاحق لنمو بلورة قادوسية من كلوريد البوتاسيوم داخل طبقة رقيقة من الماء في الجاذبية الصغرى. يوضح نمو الحواف والزوايا، لا تجارب كلوريد الصوديوم أو البيانات التي يحللها هذا المقال.

تنمو البلورات من **محلول ملحي فائق الإشباع**: ماء مالح يحتوي على كلوريد صوديوم مذاب أكثر مما يمكنه الاحتفاظ به عند الاتزان في تلك الظروف. ويجب على أيونات الصوديوم والكلوريد أن تتحرك خلال السائل وتلتحق بسطح البلورة.

هناك طريقتان عريضتان لنقلها. **الانتشار** هو الحركة الجزيئية العشوائية التي تنقل المادة الذائبة على طول فرق التركيز من دون دوران جماعي للسائل. أما **الحمل الحراري** فهو حركة السائل نفسه. وفي الجاذبية العادية، يمكن لفروق صغيرة في درجة الحرارة أو التركيز أن تغيّر الكثافة وتولد دوراناً مدفوعاً بالطفو. كما يمكن للبلورات أن **تترسب**، أي تهبط عبر السائل.



مقارنة مفاهيمية تعرض شبكة كلوريد الصوديوم نفسها في البيئتين. في المحلول الملحي الحجمي العادي على الأرض يمكن أن يحدث الترسيب، والدوران المدفوع بالطفو، والتلامس مع الأسطح؛ أما الجاذبية الصغرى فتقمع الأولين بشدة، ما يسمح بتعليق أطول ويجعل الانتشار أكثر أهمية في المراحل المبكرة من النمو. لم تكن هذه تجربة مطابقة مباشرة بين الأرض ومحطة الفضاء الدولية.

The Clean Paper CC BY 0.4

أُجريت هذه التجربة على متن محطة الفضاء الدولية، وهي مختبر مداري في بيئة جاذبية صغرى. ومصطلح **الجاذبية الصغرى** لا يعني انعدام الجاذبية. فقد أفادت ورقة 2019 بتسارع متبقٍ يقارب 2.1 من مليون من جاذبية سطح الأرض، أي 2.1 ميكرو-جي، إلى جانب حركة سائلة دورية بطيئة. غيّرت البيئة ميزان النقل، لكنها لم تجعل المحلول الملحي ساكناً تماماً.

طريق بطيء إلى مكعبات بمقياس المليمتر

ركزت دراسة 2019 على المكعبات القادوسية التي نمت مع تبخر الماء من المحلول الملحي على محطة الفضاء الدولية. تراوحت أطوال الحواف المبلغ عنها بين **2 و8 مليمترات**. وتراوحت معدلات النمو بين **34.0 و0.1 ميكرومتر في الدقيقة** (نحو **49.0 إلى 44.1 مليمتر في اليوم**)، بمتوسط **68.0 ميكرومتر في الدقيقة** وانحراف معياري قدره 23.0.

وبهذا المعدل المتوسط، تحتاج حافة طولها 8 مليمترات إلى نحو أسبوع كي تتطور. هذا الحساب تقدير، لا قياساً بالتصوير المتتابع لكل مرحلة من مراحل بلورة واحدة.

قدّر المؤلفون فرط الإشباع بأقل من **002.1**. أما الأدبيات الأرضية التي استخدموها للمقارنة فقد وصفت نمو البلورات القادوسية عند فرط إشباع أعلى بكثير، يزيد على 45.1، وبمعدلات من 10 إلى 110 ميكرومتر في الثانية خلال ثوانٍ أو دقائق، وكانت تنتج عادة مكعبات أصغر من 250 ميكروماتراً.

هذه المقارنة مفيدة لكنها غير مطابقة. فلم تأتِ بلورات محطة الفضاء الدولية والأدبيات الأرضية من ذراعين متزامنين ومتطابقين، أحدهما على

الأرض والآخر في المدار، نفذهما الفريق نفسه. ويمكن أن تؤثر اختلافات الحاويات والواجهات والطرق إلى جانب الجاذبية.

ولذلك فإن أقوى مقارنة هنا وصفية: في هذه الرصديات المدارية، نمت المكعبات القادوسية ببطء، عند فرط إشباع منخفض، على مدى أيام إلى أسابيع، ووصلت إلى مقياس المليمتر.

هيمن الانتشار في البداية؛ لكن التدفق ظل ممكناً لاحقاً

استخدمت ورقة 2019 عدد بيكليه لمقارنة النقل الناتج عن حركة السائل بالنقل الناتج عن الانتشار. القيمة الأقل من واحد تعني أن الانتشار أكثر أهمية؛ أما القيمة الأعلى من واحد فتعني أن الحركة الحجمية قد تصبح المسيطرة.

> **نسبة، لا مفتاح تشغيل وإيقاف**
>
> هنا الواحد. فوق خالص حراري وحمل الواحد تحت تماماً ساكن سائل إلى العالم يقسم لا وهو للنقل. معدلين بين مقارنة بيكليه عدد الانتشار؛ عليه يهيمن نظام في بوضوح البلورات أصغر كانت بها. المحيط الملحي المحلول سرعة تقدير ومع البلورة حجم مع القيمة تغيّرت مؤثرة. البطيئة السائل حركة فيه أصبحت نظاماً دخلت تكون فقد الأكبر الوعاء في بلورة أكبر أما

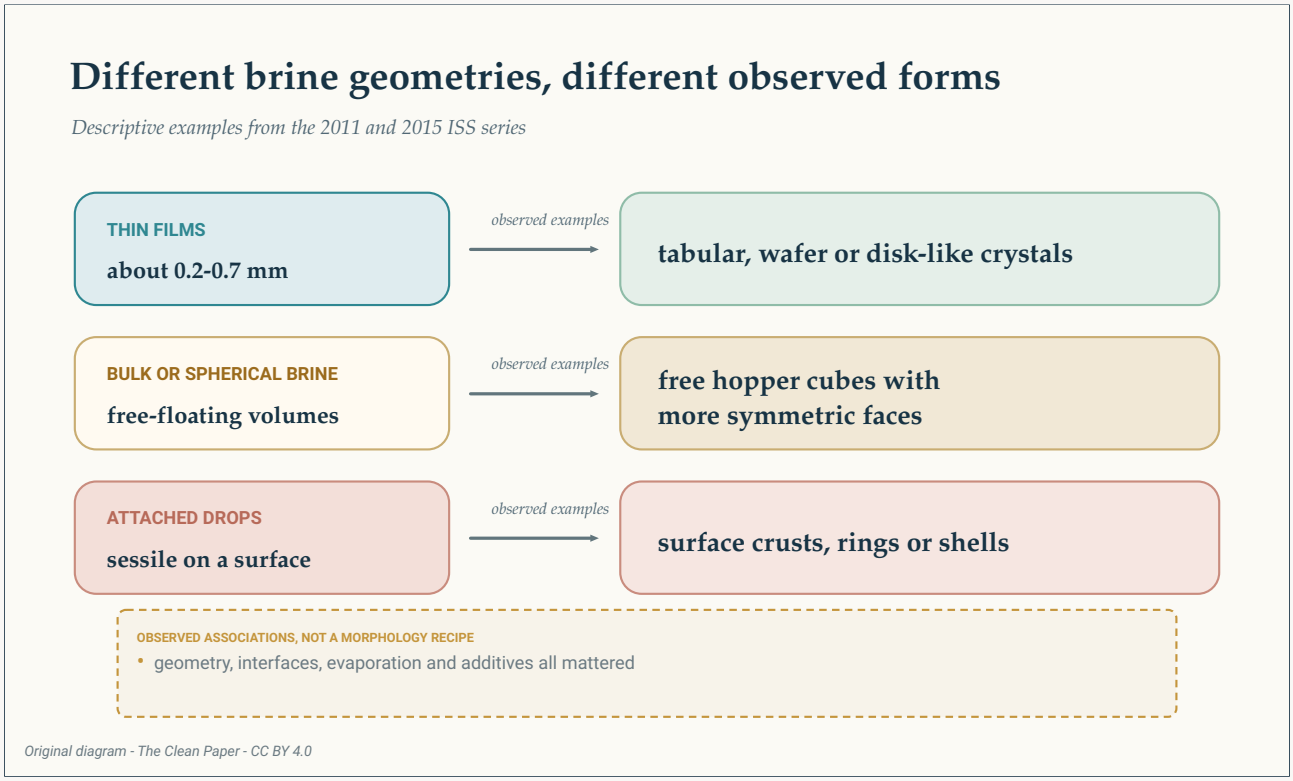
في القطرات الأصغر، التي كان قطرها نحو 8.0 سنتيمتر، ارتفعت قيم بيكليه المقدرة من نحو **0004.0** قرب بدء التبلور إلى نحو **03.0** عند الحجم النهائي المقاس. وظل الانتشار هو المسيطر.

وفي أوعية التبلور بقطر 2 إلى 3 سنتيمترات، ارتفع التقدير من نحو **05.0** لنواة قطرها 50 ميكرومتراً إلى نحو **4** عند حافة طولها 4 مليمترات. ظل النمو المبكر خاضعاً لهيمنة الانتشار، لكن الحركة الدورية البطيئة ربما ساهمت في المراحل المتأخرة.

ولهذا تكون عبارة «الجاذبية الصغرى أزالت الحمل الحراري» خاطئة. لقد انخفض الدوران العادي المدفوع بالطفو والترسيب بشدة، لكن التسارع المتبقي والحركة القابلة للقياس بقيا موجودين.

شكل السائل كان مهماً أيضاً

وسعت ورقة 2011 وورقة 2015 الصورة. فقد أبلغتا عن تبلور الملح في أغشية رقيقة، وطبقات سائلة أكثر سماكة، وأحجام من المحلول الملحي شبه كروية، وقطرات ملتصقة بسطح.



تلخص ثلاثة صفوف أمثلة مرصودة عبر ملف الدراسات: أغشية رقيقة مع أشكال صفائحية أو قرصية، ومحلول ملحي حجمي أو كروي مع مكعبات قادوسية حرة، وقطرات ملتصقة مع قشور أو حلقات أو أغلفة. هذه ارتباطات وصفية وليست وصفة أو ضماناً.

The Clean Paper CC BY 0.4

في دراسة 2011، أنتجت الأغشية الرقيقة بسماكة تقارب 2.0 إلى 7.0 مليمتر رقائق رقيقة وبلورات صفائحية. أما أحجام المحلول الملحي الحرة فسمحت بوجوه جانبية أكثر تماثلاً وبمكعبات قادوسية.

وشملت رصديات 2015 صفائح رقيقة بسماكة 2.0 إلى 7.0 مليمتر، وطبقات أكثر سماكة بنحو 4 إلى 6 مليمترات، وقطرات نصف كروية ملتصقة بعرض يقارب 20 إلى 32 مليمتر. ومن الأشكال المبلغ عنها بلورات قادوسية صفائحية، ومكعبات، وبلورات قرصية، وتفرعات شجرية، وحلقات، وأغلفة. كما أدى إضافة البولي إيثيلين غليكول إلى كبح نمو البلورات القادوسية في إحدى مجموعات الرصد.

وصف المؤلفون عمل 2015 بأنه رصديات باستخدام مستلزمات غير مدرجة في الجرد خلال وقت فراغ الطاقم، لا برنامجاً بحثياً صارماً ومنظماً. وتبين الأمثلة أن هندسة السائل والواجهات والتبخر والإضافات كلها كانت مهمة. لكنها لا تحدد وصفة حتمية يضمن فيها شكل وعاء معين شكلاً بلورياً معيناً.

الشبكة البلورية لم تتحول إلى نوع جديد من الملح

التمييز بين **البنية البلورية والمورفولوجيا** أساسي.

البنية هي الترتيب الذري المتكرر. أما المورفولوجيا فهي الشكل الخارجي المرئي. ولم يكشف حيود النيوترونات في ورقة 2011 عن بنية مختلفة لكلوريد الصوديوم أو عن تغير في معاملات خلية الشبكة مقارنة بعينات أرضية. كما احتوت العينات المدارية على **شوائب من المحلول الملحي**، أي جيوب صغيرة من المحلول احتُجزت داخل البلورة.

ولذلك فالمظهر الكبير والمتناظر ليس دليلاً على مادة أنقى أو خالية من العيوب. ولا تبلغ أي ورقة في هذا الملف عن نقاء كيميائي أعلى، أو أداء ميكانيكي أفضل، أو ملاءمة لجهاز معين.

أثرت الجاذبية بصورة غير مباشرة. فقد غيّرت الترسيب ودوران السائل والاتجاه والتلامس مع الأسطح. لكنها لم تغيّر قوة روابط كلوريد الصوديوم ولم تنشئ طوراً ذرياً جديداً.

ما الذي يمكن أن تعلمنا إياه هذه التجارب، وما الذي لا يمكنها؟

تدعم الأوراق تفسيراً قائماً على النقل: إن الكبح الشديد للترسيب المعتاد والتدفق المدفوع بالطفو سمح لبعض البلورات بالبقاء معلقة والنمو ببطء في ظروف أكثر تماثلاً. الأحجام ومعدلات النمو والأشكال المقاسة رصديات مباشرة؛ أما فرط الإشباع وتاريخ النمو وقيم بيكليه فتتضمن تقديرات، والمقارنة مع الأرض تعتمد جزئياً على تجارب منشورة أخرى.

ولا يوجد مقام واحد واضح يمكن جمع نتائج الملف كله تحته. فهو يضم بلورات منفردة، وأوعية تبلور، وأمثلة مختارة عبر ثلاث أوراق. جمعها في رقم إجمالي واحد سيوحي بتجربة موحدة لم توجد أصلاً.

كما أن الدراسات لا تقدم أياً من الأدلة اللازمة لادعاء تصنيعي. فهي لا تقيس الإنتاجية أو تكلفة الإنتاج أو استهلاك الطاقة أو المردود أو الموثوقية أو أداء المادة في تطبيق مفيد. وكانت سلسلة 2015 استكشافية. كما لم تكن المقارنات الأرضية ضوابط مطابقة. والحجم الكبير أو الشكل اللافت بصرياً لا يعني بالضرورة أنه أفضل لتطبيق ما.

يمكن أن تحتوي رواسب الملح الطبيعية على مكعبات قادوسية تقاس بالسنتيمترات، وأحياناً تكون معلقة في طين مشبع بالمحلول الملحي. وتقترح ورقة 2019 تشابهاً محتملاً مع نمو بطيء تهيمن عليه عملية الانتشار. إنها مقارنة مثيرة للاهتمام، وليست دليلاً على أن البلورات القادوسية الطبيعية والمدارية تشترك في آلية واحدة.

الخلاصة الواضحة

شملت بلورات الملح التي نمت من محلول ملحي متبخر على محطة الفضاء الدولية مكعبات قادوسية جوفاء ومتدرجة بعرض 2 إلى 8 مليمترات. وتدعم الأوراق تفسيراً قائماً على النقل: فقد قمعت الجاذبية الصغرى بشدة الترسيب المعتاد والتدفق المدفوع بالطفو، ما أتاح نمواً بطيئاً وتعليقاً أطول بينما كان الانتشار يهيمن في البداية. كما أثرت هندسة السائل والواجهات والتبخر والإضافات في المورفولوجيا. لم يكشف حيود النيوترونات عن بنية جديدة لكلوريد الصوديوم، وظلت شوائب المحلول الملحي موجودة. هذا مثال محدود من علم المواد، لا دليلاً على أن الفضاء يصنع بلورات مثالية أو يتيح عملية صناعية.

مراجعة بلا تهويل

ما الذي تُظهره الأوراق: نمت مكعبات قادوسية من كلوريد الصوديوم بمقياس المليمتر وأشكال أخرى في عدة هندسات للمحلول الملحي على محطة الفضاء الدولية. ونمت مكعبات 2019 القادوسية ببطء عند فرط إشباع مقدر منخفض، مع هيمنة الانتشار في البداية.

ما هو تفسيري: سمح الانخفاض الشديد في الترسيب والتدفق المدفوع بالطفو بتعليق أطول ونمو أكثر تماثلاً. وربما كان لحركة السائل البطيئة دور في المراحل المتأخرة داخل وعاء التبلور الأكبر.

ما الذي لا تُظهره: شكلاً ذرياً جديداً للملح، أو بلورات أنقى أو خالية من العيوب، أو تجربة مطابقة بين الأرض ومحطة الفضاء الدولية، أو ميزة عامة للجاذبية الصغرى، أو مساراً تصنيعياً تجارياً.

القيود الرئيسية: ثلاث دراسات منفصلة بهندسات وأمثلة مختارة مختلفة؛ مقارنات أرضية عبر دراسات مختلفة؛ كميات نقل مقدرة؛ أجزاء استكشافية وغير برنامجية من الملف؛ وعدم وجود اقتصاديات عملية أو اختبارات أداء.

ما مقدار الثقة المناسبة للقارئ العام؟ ثقة عالية بأن الأشكال المدارية المبلغ عنها والنمو البطيء حقيقيان. وثقة متوسطة في تفسير النقل بوصفه أفضل شرح جامع للرصديات. وثقة منخفضة جداً في أي ادعاء يحول تجارب الملح هذه إلى وعد عام بشأن التصنيع في الفضاء.

المصادر

conditions, terrestrial and microgravity under grown cubes hopper chloride sodium of Comparison Fontana, and Pettit (2019) 25 ,5 Microgravity npj
https://doi.org/10.1038/s41526-019-0085-0

Crystal of Journal microgravity, in grown crystals chloride sodium of Characterization Pettit, and Schefer Fontana, (2011) 211-207 ,324 Growth
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.04.001

drops sessile and layers, thick sheets, liquid thin from crystallization chloride Sodium Cristoforetti, and Pettit Fontana, (2015) 85-80 ,428 Growth Crystal of Journal microgravity, in
https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2015.07.026