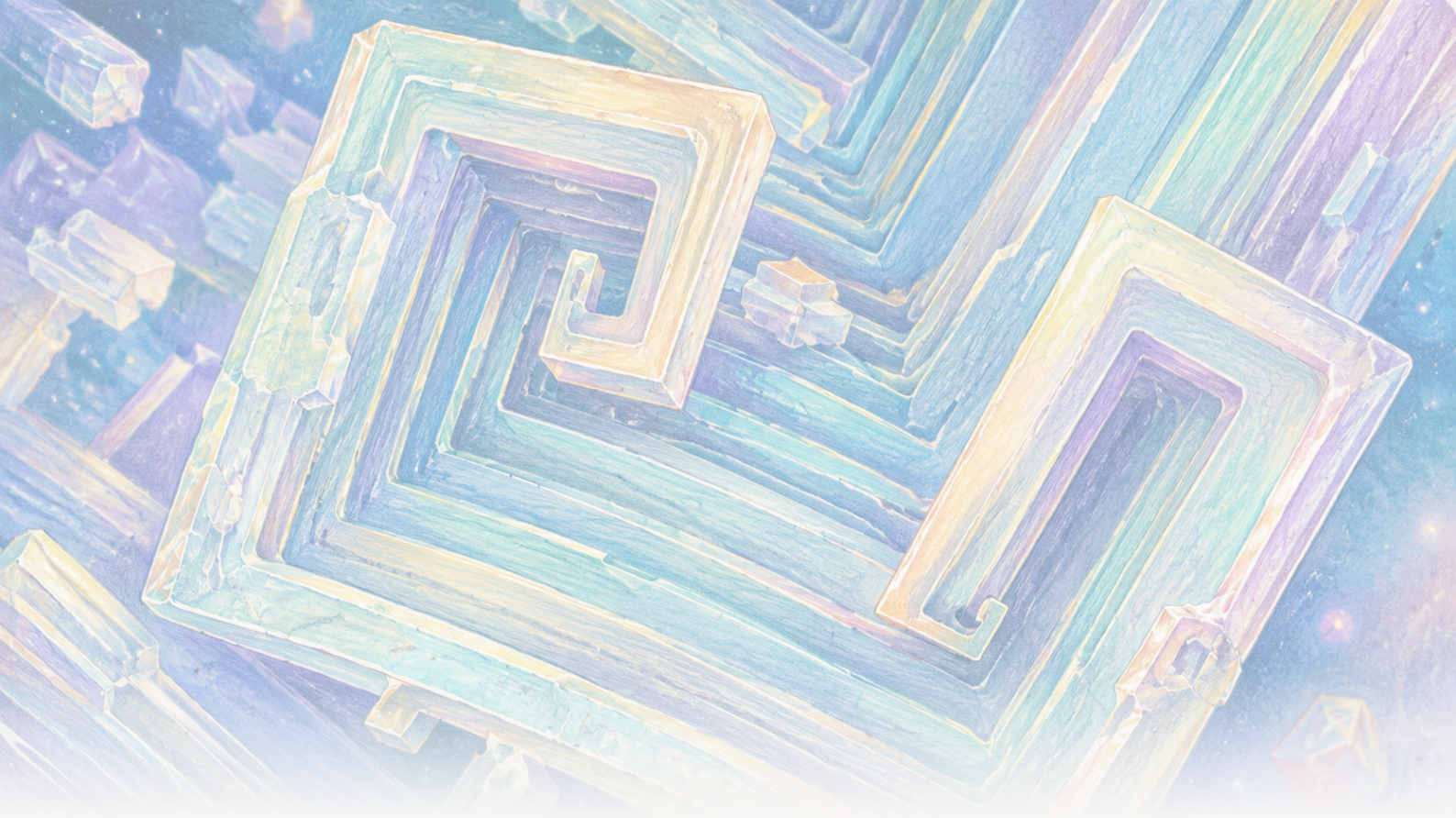


The Clean Paper

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

Orbitdə xörək duzu içi boş kublar şəklində böyüdü. Cazibə duzu yox, duzlu məhlulu dəyişdi

Beynəlxalq Kosmik Stansiyada yetişdirilən natrium xlorid kristalları arasında 2–8 millimetr ölçülü, içi boş pilləli kublar da vardı. Məqalələr nəqliyyat mexanizmi ilə bağlı izahı dəstəkləyir: adi çökmə və üzmə qüvvəsinin yaratdığı axın ciddi zəifləmiş, erkən böyümədə isə diffuziya üstün olmuşdu. Kristal qəfəsi yeni duz formasına çevrilmədi və təcrübələr sənaye prosesi nümayiş etdirmir.

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

Orbitdə adi xörək duzu içi boş, pilləli kublara çevrilərək böyüdü

Kristallar memarlıq quruluşuna bənzəyirdi: kvadrat çərçivələrin içində başqa kvadrat çərçivələr, səthlərində isə pilləkən kimi içəri çökən boşluqlar.

Onlar adi natrium xloriddən — xörək duzu ilə eyni birləşmədən — ibarət idi. Qeyri-adi olan maddənin özü yox, onu əhatə edən duzlu məhlul idi.

Yer üzündə santimetr miqyaslı maye həcmində böyüyən kristal aşağı çökə, divara və ya səthə toxuna və məhlulu dövr etdirən sıxlıq fərqlərinin yaranmasına kömək edə bilər. Beynəlxalq Kosmik Stansiyada isə adi çökmə və üzmə qüvvəsinin yaratdığı axın ciddi şəkildə zəifləmişdi. Bəzi duz kristalları kifayət qədər uzun müddət asılı qaldı və yavaş, daha simmetrik böyüyərək kənarları 2–8 millimetr olan **hopper kublarına** çevrildi.

2011, 2015 və 2019-cu illərdə dərc olunmuş üç məqalə bu təcrübələri təsvir edir. Birlikdə onlar nəqliyyat fizikası üzrə aydın bir dərs verir: həll olmuş maddənin kristala necə çatdığını dəyişmək, atom quruluşunu dəyişmədən onun görünən formasını dəyişə bilər.

Bu işlər kosmosun “mükəmməl kristallar” yaratdığını göstərmir, sənaye prosesi qurulmasını nümayiş etdirmir və yeni duz növü aşkar etmir.

Kubu hopper formasına nə çevirir?

Adi natrium xlorid kristalının atom düzülüşü kubikdir. **Hopper kristalı** da kubik qalır, amma onun künc və kənarları səthlərin mərkəzindən daha sürətli böyüyür. Nəticədə hər üzdə içi boş, pilləli çökəklik yaranır — sanki kub əvvəlcə çərçivəni qurur, sonra divarları doldurmağa çalışır.

Daha sonrakı ISS nümunəsi bu böyümə formasını vizual göstərir, amma bu, burada müzakirə olunan üç natrium-xlorid məqaləsinin sübutu yox, kontekstdir. Donald Pettitin aşağıdakı şəkli və time-lapse videosu başqa duz olan **kalium xloridin** mikroqravitasiyada pilləli hopper və burulğanabənzər morfologiyalar yaratdığını göstərir.

[figure_pair pending]

ISS-də yetişdirilmiş burulğan formalı hopper kalium xlorid kristallarının iki skanedici elektron mikrofotoqrafiyası. Bu sonrakı şəkillər morfologiyaya dair kontekstual nümunələrdir; bu məqalədə müzakirə edilən 2011, 2015 və 2019-cu il tədqiqatlarının natrium-xlorid nümunələri və ya ölçmələri deyil.

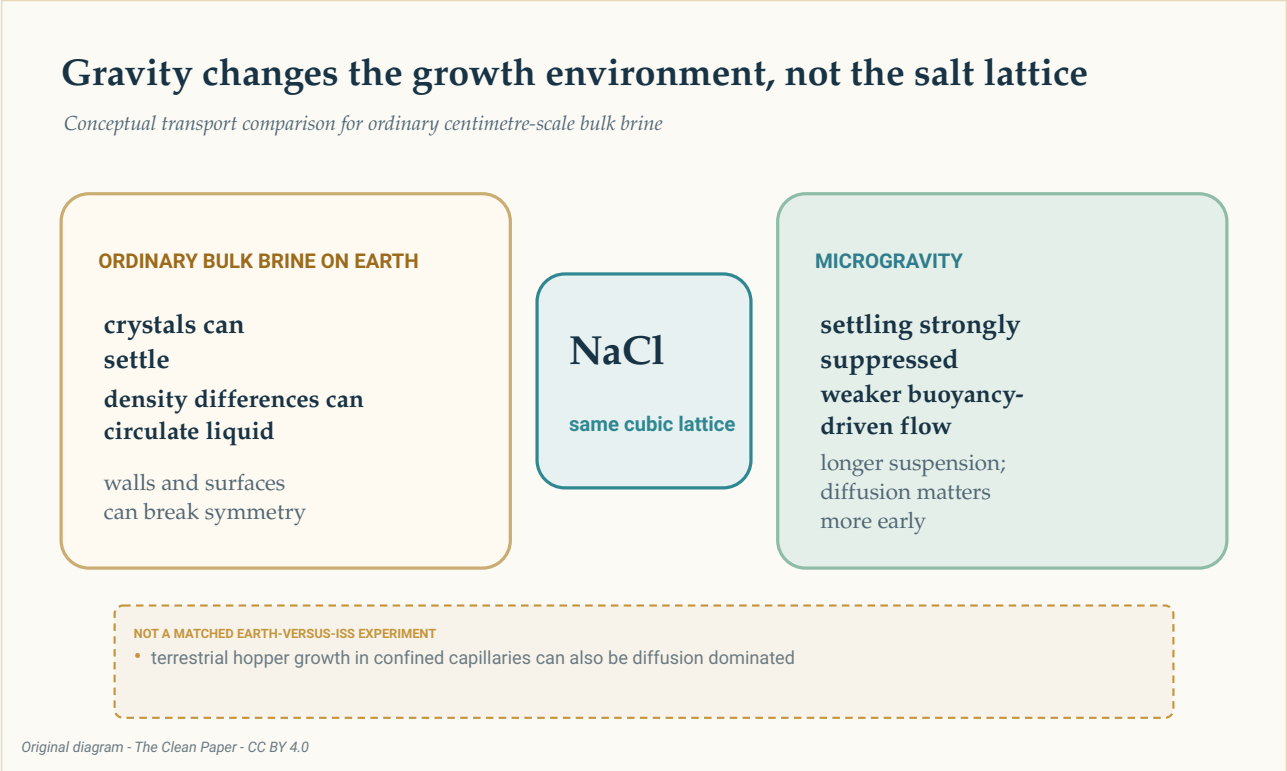
[video pending]

Mikroqravitasiyada nazik su təbəqəsi içində kalium xlorid hopper kristalının böyüməsini göstərən daha sonrakı

time-lapse. Bu video kənar və künclərin böyüməsini təsvir edir; bu məqalədə təhlil edilən natrium-xlorid təcrübələrini və ya məlumatlarını yox.

Kristallar **ifrat doymuş duzlu məhluldan** böyüyür: verilən şəraitdə tarazlıq halında saxlayacağından daha çox həll olmuş natrium xlorid ehtiva edən duzlu sudan. Natrium və xlorid ionları mayenin içindən keçərək kristalın səthinə çatmalıdır.

Onları daşımağın iki əsas yolu var. **Diffuziya** həll olmuş maddəni mayenin bütöv şəkildə dövr etməsi olmadan konsentrasiya fərqinin az olduğu istiqamətə aparan təsadüfi molekulyar hərəkətdir. **Konveksiya** isə mayenin özünün hərəkətidir. Adi cazibə şəraitində temperatur və ya konsentrasiyadakı kiçik fərqlər sıxlığı dəyişə və üzmə qüvvəsinin yaratdığı dövranı hərəkətə gətirə bilər. Kristallar həmçinin **çökə**, yəni mayenin içində aşağı enə bilər.



Konseptual müqayisə hər iki mühitdə eyni natrium xlorid qəfəsini göstərir. Yer üzündə adi həcmli duzlu məhlulda çökmə, üzmə dövranı və səthlə təmas ola bilər; mikroqravitasiya ilk ikisini ciddi zəiflədir, kristalın daha uzun müddət asılı qalmasına imkan verir və erkən böyümədə diffuziyanı daha vacib edir. Bu, eyni şərtlərdə aparılmış Yer–ISS müqayisə təcrübəsi deyildi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu təcrübə orbitdəki mikroqravitasiya laboratoriyası olan Beynəlxalq Kosmik Stansiyada aparılıb. **Mikroqravitasiya** “cazibənin olmaması” demək deyil. 2019-cu il məqaləsi Yer səthindəki cazibə sürətlənməsinin təxminən 1,2 milyonda biri, yəni 1,2 mikro-g qədər qalıq sürətlənmə və yavaş dövri maye hərəkəti qeydə alıb. Mühit nəqliyyat mexanizmləri arasındakı tarazlığı dəyişib; duzlu məhlulu tam hərəkətsiz etməyib.

Millimetr ölçülü kublara aparan yavaş yol

2019-cu il tədqiqatı ISS-də duzlu məhluldan su buxarlanarkən yaranan hopper kublarına fokuslanıb. Bildirilən kub kənarlarının uzunluğu **2–8 millimetr** idi. Böyümə sürəti **dəqiqədə 0,34–1,0 mikrometr** (təxminən **gündə 0,49–1,44 millimetr**) arasında dəyişib; orta qiymət **dəqiqədə 0,68 mikrometr**, standart sapma isə 0,23 olub.

Bu orta sürətlə 8 millimetrlik kənarın formalaşması təxminən bir həftə çəkərdi. Bu hesablamadır, bir kristalın bütün mərhələlərinin time-lapse ölçməsi deyil.

Müəlliflər ifrat doyma səviyyəsini **1,002-dən aşağı** qiymətləndiriblər. Yer şəraitindəki müqayisə ədəbiyyatında isə hopper böyüməsi xeyli yüksək ifrat doyma — 1,45-dən yuxarı — şəraitində, saniyədə 10–110 mikrometr sürətlə və saniyələr və ya dəqiqələr ərzində təsvir olunub; adətən 250 mikrometrdən kiçik kublar yaranırdı.

Bu müqayisə məlumatvericidir, amma eyni şərtlərdə aparılmayıb. ISS kristalları ilə Yer ədəbiyyatındakı nəticələr eyni komandanın eyni vaxtda, eyni qurğularda apardığı Yer və orbit qollarından gəlmirdi. Cazibə ilə yanaşı qablar, interfeyslər və metodlar da nəticəyə təsir edə bilər.

Ona görə ən möhkəm fərq təsviri xarakter daşıyır: bu ISS müşahidələrində hopper kubları aşağı ifrat doyma şəraitində günlərdən həftələrədək yavaş böyüyüb və millimetr miqyasına çatıb.

Erkən mərhələdə diffuziya üstün idi; sonradan axın yenə mümkün idi

2019-cu il məqaləsi maye hərəkəti ilə daşınmanı diffuziya ilə daşınma ilə müqayisə etmək üçün **Peclet ədədindən** istifadə edib. Birdən aşağı dəyər diffuziyanın daha vacib olduğunu, birdən yuxarı dəyər isə həcmli maye hərəkətinin üstün ola biləcəyini bildirir.

> **Nisbətdir, açar deyil**
>
> Peclet ədədi iki nəqliyyat sürətinin müqayisəsidir. O, dünyanı birdən aşağıda tam hərəkətsiz maye, birdən yuxarıda isə saf konveksiya kimi iki yerə bölmür. Burada dəyər kristalın ölçüsü və onu əhatə edən duzlu məhlul üçün götürülən sürət qiymətləndirməsi ilə dəyişirdi. Ən kiçik kristallar açıq şəkildə diffuziyanın üstün olduğu rejimdə idi; daha böyük qabdakı ən iri kristal isə yavaş maye hərəkətinin əhəmiyyət qazandığı rejimə keçmiş ola bilərdi.

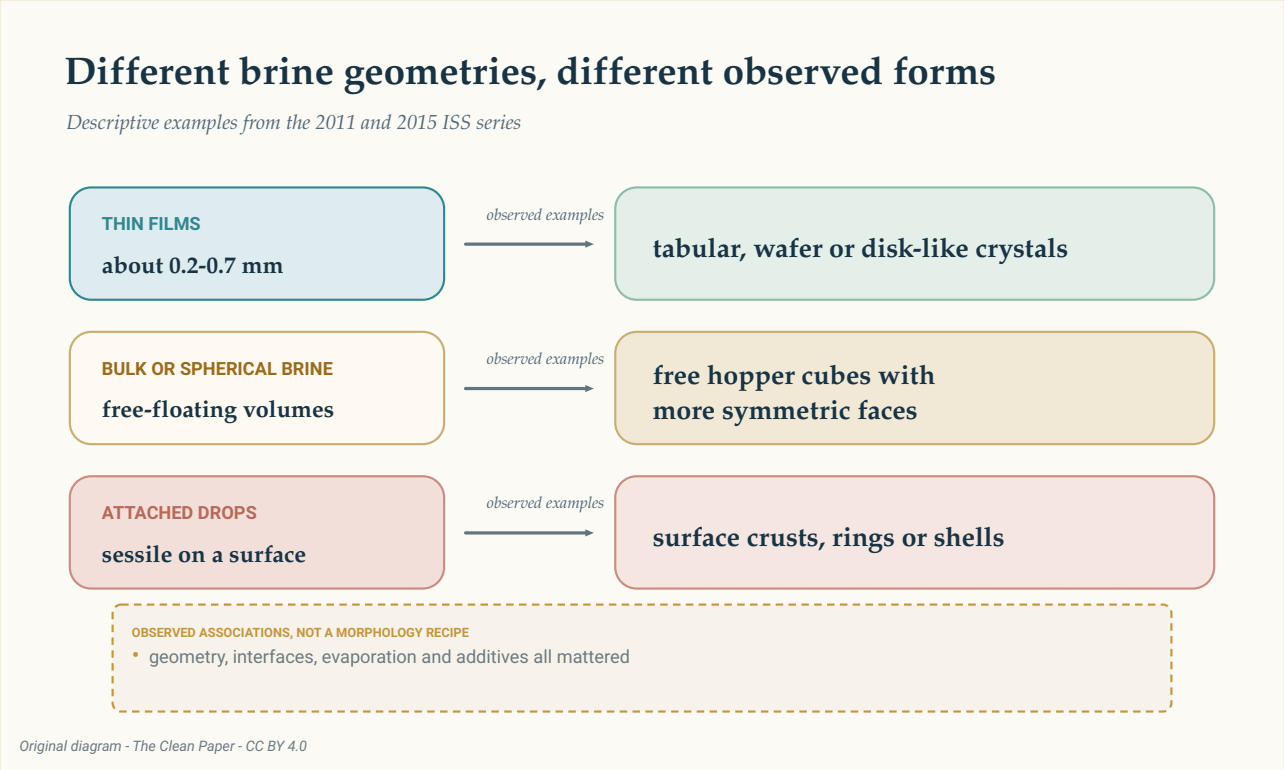
Daha kiçik, təxminən 0,8 santimetrlik damcılarda qiymətləndirilən Peclet dəyəri nüvələşmə yaxınlığında təxminən **0,0004**-dən son ölçüdə təxminən **0,03**-ə yüksəlib. Diffuziya üstün olaraq qalıb.

2–3 santimetrlik kristallaşdırıcılarda qiymətləndirmə 50 mikrometrlik nüvə üçün təxminən **0,05**-dən 4 millimetrlik kənar üçün təxminən **4**-ə yüksəlib. Erkən böyümədə yenə diffuziya üstün idi, amma sonrakı mərhələdə yavaş dövri hərəkət də rol oynamış ola bilər.

Buna görə “mikroqravitasiya konveksiyanı aradan qaldırdı” demək səhv olardı. Adi üzmə qüvvəli dövran və çökmə ciddi azaldı. Qalıq sürətlənmə və ölçülə bilən hərəkət isə qaldı.

Mayenin forması da vacib idi

2011-ci il məqaləsi və 2015-ci il məqaləsi mənzərəni genişləndirdi. Onlar nazik təbəqələrdə, daha qalın maye qatlarında, təxminən sferik duzlu məhlul həcmlərində və səthə yapışmış damcılarda duz kristallaşmasını təsvir etdilər.



Üç sıra dosyedə müşahidə olunan nümunələri ümumiləşdirir: lövhəvari və ya diskəbənzər formaları olan nazik təbəqələr, sərbəst hopper kubları olan həcmli və ya sferik duzlu məhlul və qabıq, halqa və ya örtük yaradan səthə yapışmış damcılar. Bunlar resept və ya zəmanət yox, təsviri əlaqələrdir.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011-ci il tədqiqatında təxminən 0,2–0,7 millimetr qalınlığında nazik təbəqələr nazik lövhəciklər və tabulyar kristallar yaradıb. Sərbəst üzən duzlu məhlul həcmləri daha simmetrik yan səthlərə və hopper kublarına imkan verib.

2015-ci il müşahidələrinə 0,2–0,7 millimetr qalınlığında nazik laylar, təxminən 4–6 millimetrlik daha qalın təbəqələr və diametri təxminən 20–32 millimetr olan səthə yapışmış yarıms-

ferik damcılar daxil idi. Bildirilən formalar arasında tabulyar hopperlər, kublar, diskəbənzər kristallar, dendritlər, halqalar və qabıqlar vardı. Bir müşahidə seriyasında polietilen qlikol əlavə edilməsi hopper böyüməsini zəiflətdi.

Müəlliflər 2015-ci il işini ekipajın istirahət vaxtında inventarlaşdırılmamış ləvazimatlarla aparılan müşahidələr kimi təsvir ediblər, ciddi proqramlaşdırılmış tədqiqat kimi yox. Nümunələr mayenin həndəsəsinin, interfeyslərin, buxarlanmanın və əlavələrin hamısının rol oynadığını göstərir. Onlar bir qab formasının müəyyən kristal formasına zəmanət verdiyi deterministik resept müəyyən etmir.

Kristal qəfəsi yeni duz formasına çevrilmədi

Kristal quruluşu ilə **morfologiya** arasındakı fərq əsasdır.

Quruluş təkrarlanan atom düzülüşüdür. Morfologiya isə görünən xarici formadır. 2011-ci il məqaləsindəki neytron difraksiyası Yer nümunələri ilə müqayisədə natrium xloridin quruluşunda və ya qəfəs hüceyrəsinin parametrlərində dəyişiklik aşkar etmədi. Orbitdəki nümunələrdə həmçinin **duzlu məhlul daxilolmaları** — kristalın içində qapanmış kiçik məhlul cibləri — vardı.

Ona görə böyük və simmetrik görünüş daha təmiz və ya qüsursuz materialın sübutu deyil. Dosyedəki heç bir məqalə daha yüksək kimyəvi təmizlik, daha yaxşı mexaniki xüsusiyyət və ya konkret cihaz üçün yararlılıq göstərmir.

Cazibə dolayı yolla təsir etdi. O, çökməni, maye dövranını, orientasiyanı və səthlə təması dəyişdi. Natrium-xlorid rabitələrinin möhkəmliyini dəyişmədi və yeni atom fazası yaratmadı.

Bu təcrübələr bizə nə öyrədə bilər, nəyi öyrədə bilməz?

Məqalələr nəqliyyat izahını dəstəkləyir: adi çökmə və üzmə qüvvəsinin yaratdığı axının ciddi zəifləməsi bəzi kristalların daha uzun müddət asılı qalmasına və daha simmetrik şəraitdə yavaş böyüməsinə imkan verib. Ölçülən ölçülər, sürətlər və formalar birbaşa müşahidələrdir; ifrat doyma, böyümə tarixi və Peclet dəyərlərinə qiymətləndirmələr daxildir; Yerlə müqayisə isə qismən başqa dərc olunmuş təcrübələrə əsaslanır.

Bu dosye üçün vahid, təmiz məxrəc yoxdur. O, üç məqalə üzrə ayrı-ayrı kristalları, kristallaşdırıcıları və seçilmiş nümunələri birləşdirir. Hamısını bir ümumi rəqəmə toplamaq əslində olmayan vahid eksperiment təsiri yaradardı.

Tədqiqatlar istehsal iddiası üçün lazım olan sübutların heç birini də təqdim etmir. Onlar məhsuldarlığı, istehsal xərcini, enerji sərfini, çıxımı, etibarlılığı və ya faydalı material performansını ölçmür. 2015-ci il seriyası kəşfiyyat xarakterli idi. Yer müqayisələri uyğunlaşdırılmış nəzarət qrupları deyildi. Böyük və ya vizual olaraq cəlbedici olmaq da konkret tətbiq üçün

daha yaxşı olmaq demək deyil.

Təbii duz yataqlarında santimetrlərlə ölçülən hopper kublarına, bəzən duzlu məhlulla islanmış palçıqda asılı halda rast gəlinir. 2019-cu il məqaləsi yavaş, diffuziya üstünlüklü böyümə ilə mümkün analogiya təklif edir. Bu maraqlı müqayisədir, amma təbii və orbital hopperlərin eyni mexanizmlə yarandığının sübutu deyil.

Təmiz xülasə

Beynəlxalq Kosmik Stansiyada buxarlanan duzlu məhluldan yetişdirilən duz kristalları arasında 2–8 millimetrlik içi boş, pilləli hopper kubları da vardı. Məqalələr nəqliyyata əsaslanan izahı dəstəkləyir: mikroqravitasiya adi çökməni və üzmə qüvvəsinin yaratdığı axını ciddi zəiflətdi, erkən mərhələdə diffuziya üstün olarkən yavaş böyümə və daha uzun asılı qalma mümkün oldu. Mayenin həndəsəsi, interfeyslər, buxarlanma və əlavələr də morfologiyaya təsir etdi. Neytron difraksiyası yeni natrium xlorid quruluşu göstərmədi və duzlu məhlul daxilolmaları qaldı. Bu iş məhdud materialşünaslıq nümunəsidir; kosmosun mükəmməl kristallar yaratdığının və ya sənaye prosesinə imkan verdiyinin sübutu deyil.

No-BS yoxlaması

Məqalələr nə göstərir: Millimetr miqyaslı natrium xlorid hopper kubları və başqa morfologiyalar ISS-də müxtəlif duzlu məhlul həndəsələrində böyüyüb. 2019-cu il hopper kubları aşağı qiymətləndirilmiş ifrat doyma şəraitində yavaş böyüyüb və erkən mərhələdə diffuziya üstün olub.

Nə şərh olunur: Çökmə və üzmə qüvvəsinin yaratdığı axının ciddi azalması daha uzun asılı qalma və daha simmetrik böyüməyə imkan verib. Böyük kristallaşdırıcıda son mərhələdə yavaş maye hərəkəti rol oynamış ola bilər.

Nəyi göstərmir: Duzun yeni atom formasını, daha təmiz və ya qüsursuz kristalları, eyni şərtlərdə Yer–ISS sınağını, mikroqravitasiyanın universal üstünlüyünü və ya kommersiya istehsalı marşrutunu.

Əsas məhdudiyyətlər: Fərqli həndəsələri və seçilmiş nümunələri olan üç ayrı tədqiqat; tədqiqatlararası Yer müqayisələri; qiymətləndirilmiş nəqliyyat kəmiyyətləri; dosyenin kəşfiyyat xarakterli, proqramlaşdırılmamış hissələri; proses iqtisadiyyatı və performans sınaqlarının olmaması.

Ümumi oxucu nə qədər əmin olmalıdır? Bildirilən orbital morfologiyaların və yavaş böyümənin real olduğuna yüksək inam. Müşahidələr üçün ən yaxşı ümumi izah kimi nəqliyyat mexanizminə orta inam. Bu duz təcrübələrini kosmik istehsal haqqında ümumi vəd kimi təqdim edən hər hansı iddiaya isə çox aşağı inam.

Mənbələr

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