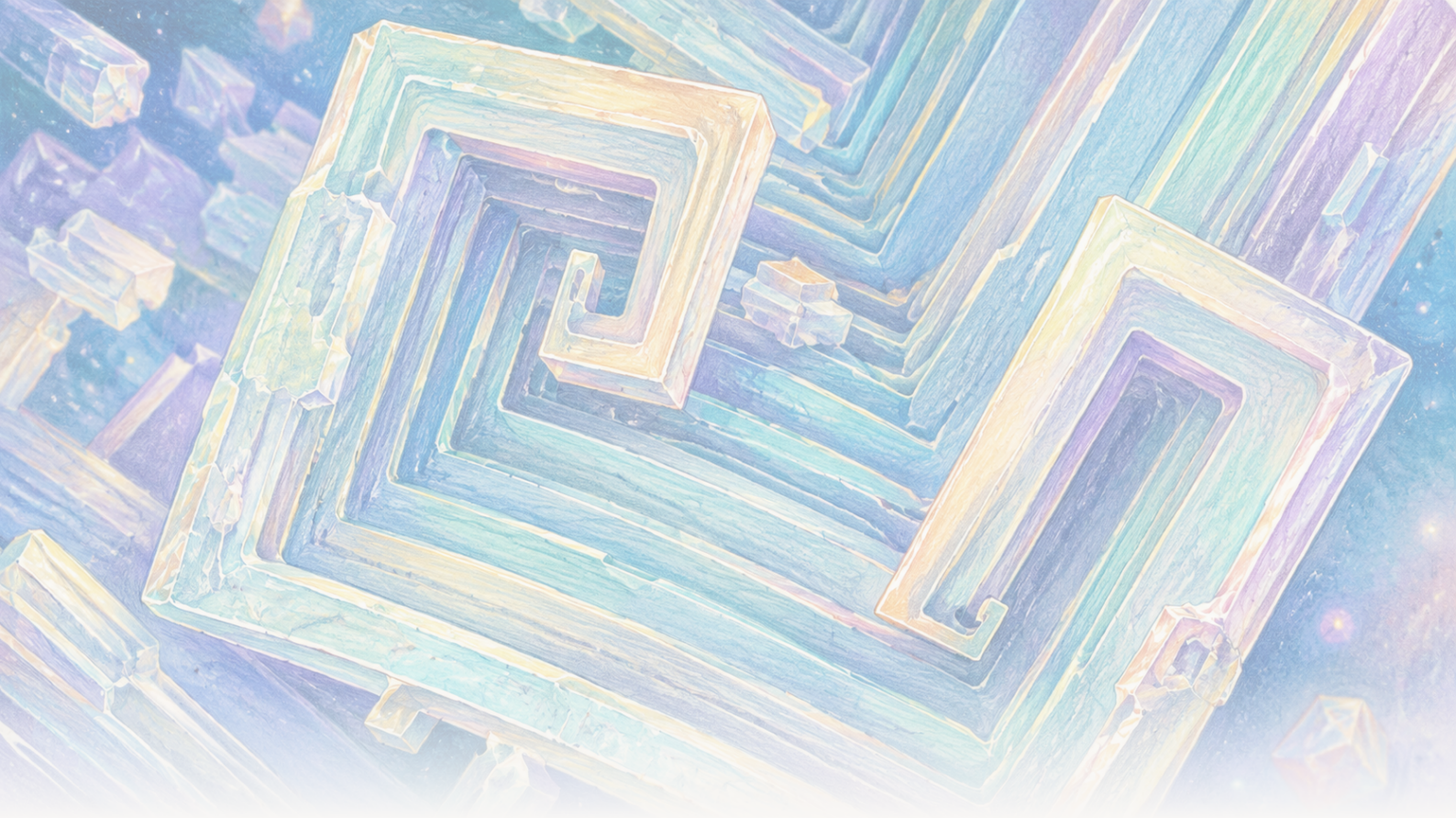


The Clean Paper

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

Yörüngede sofra tuzu içi boş küpler hâlinde büyüdü. Yerçekimi tuzu değil, tuzlu suyu değiştirdi

Uluslararası Uzay İstasyonu'nda büyütülen sodyum klorür kristalleri arasında 2 ile 8 milimetre çapında içi boş, basamaklı küpler vardı. Makaleler taşınıma dayalı bir açıklamayı destekliyor: olağan çökelme ve kaldırma kuvvetine bağlı akış güçlü biçimde bastırılırken, erken büyümede difüzyon baskındı. Kristal örgüsü yeni bir tuz biçimine dönüşmedi ve deneyler endüstriyel bir süreç ortaya koymuyor.

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

Yörüngede sıradan sofra tuzu içi boş, basamaklı küpler hâlinde büyüdü

Kristaller mimari yapıları andırıyordu: iç içe geçmiş kare çerçeveler ve basamaklar hâlinde oyulmuş yüzeyler.

Bunlar sıradan sodyum klorürden, yani sofra tuzuyla aynı bileşikten yapılmıştı. Olağandışı olan madde değil, onu çevreleyen tuzlu suydu.

Dünya'da santimetre ölçeğinde bir sıvı hacminde büyüyen bir kristal dibe çökebilir, bir duvara ya da yüzeye dokunabilir ve çözeltinin dolaşmasına yol açan yoğunluk farklarının oluşmasına katkıda bulunabilir. Uluslararası Uzay İstasyonu'nda ise olağan çökelme ve kaldırma kuvvetinin sürüklediği akış büyük ölçüde bastırıldı. Bazı tuz kristalleri, **huni biçimli küpler** hâlinde yavaş ve daha simetrik büyüyecek kadar uzun süre askıda kaldı; kenar uzunlukları 2 ile 8 milimetre arasındaydı.

2011, 2015 ve 2019 yıllarında yayımlanan üç makale bu deneyleri anlatıyor. Birlikte, taşınım fiziği açısından temiz bir ders sunuyorlar: çözünmüş maddenin kristale nasıl ulaştığını değiştirmek, atomik yapıyı değiştirmeden kristalin görünen biçimini değiştirebilir.

Bu çalışmalar uzayın kusursuz kristaller ürettiğini göstermiyor, endüstriyel bir süreç ortaya koymuyor ve yeni bir tuz türü keşfetmiyor.

Bir küpü "huni kristali" yapan nedir?

Normal bir sodyum klorür kristalinin atomları kübik bir düzende dizilir. **Huni kristali (hopper crystal)** de hâlâ kübiktir, ancak köşeleri ve kenarları yüzey merkezlerinden daha hızlı büyür. Sonuç, küpün önce iskeletini kurup sonra duvarları doldurmaya çalışıyormuş gibi her yüzünde içi boş, basamaklı bir çöküntüdür.

ISS'de daha sonra elde edilen bir örnek bu büyüme desenini görünür kılıyor, ancak burada tartışılan üç sodyum-klorür makalesinin kanıtı değil, yalnızca bağlam niteliğinde. Donald Pettit'in aşağıdaki görüntüsü ve hızlandırılmış videosu, farklı bir tuz olan **potasyum klorürün** mikrogravitede basamaklı huni ve kıvrımlı morfolojiler oluşturmasını gösteriyor.

[figure_pair pending]

ISS'de büyütülen potasyum klorürün kıvrımlı-huni biçimli kristallerine ait iki taramalı elektron mikrografı. Bu daha sonraki görüntüler morfolojinin bağlamsal örnekleridir; bu makalede tartışılan 2011, 2015 veya 2019 çalışmalarındaki sodyum-klorür örnekleri ya da ölçümleri değildir.

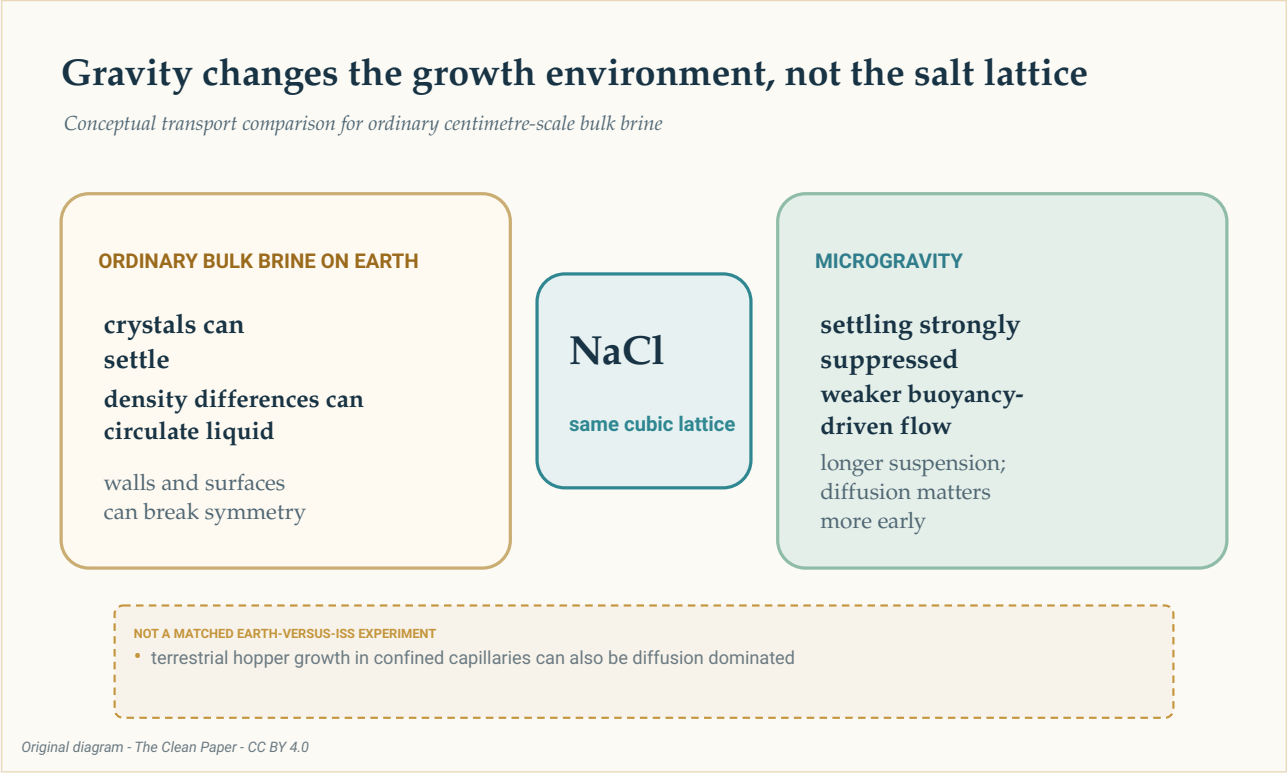
[video pending]

Mikrogravitede ince bir su filmi içinde potasyum klorür huni kristalinin büyümesini gösteren daha sonraki bir

hızlandırılmış çekim. Kenar ve köşe büyümesini örnekler; bu makalede analiz edilen sodyum-klorür deneylerini veya verilerini göstermez.

Kristaller **aşırı doymuş tuzlu sudan** büyür: belirli koşullarda dengede çözünmüş hâlde kalabileceğinden daha fazla sodyum klorür içeren tuzlu su. Sodyum ve klorür iyonlarının sıvı içinde hareket edip kristal yüzeyine ulaşması gerekir.

Bunları taşımanın iki genel yolu vardır. **Difüzyon**, çözünmüş maddeyi toplu sıvı dolaşımı olmaksızın yoğunluk farkı boyunca taşıyan rastgele moleküler harekettir. **Konveksiyon** ise sıvının kendisinin hareketidir. Normal yerçekiminde sıcaklık veya derişimdeki küçük farklar yoğunluğu değiştirip kaldırma kuvvetine bağlı dolaşıma yol açabilir. Kristaller ayrıca **sedimante olabilir**, yani sıvı içinde dibe doğru çöker.



Kavramsal karşılaştırmada iki ortamda da aynı sodyum klorür örgüsü gösteriliyor. Dünya'daki olağan hacimli tuzlu suda çökelme, kaldırma kuvvetine bağlı dolaşım ve yüzey teması görülebilir; mikrogravite ilk ikisini güçlü biçimde bastırarak daha uzun süre askıda kalmaya ve büyümenin erken evrelerinde difüzyonun daha önemli olmasına imkân verir. Bu, eşleştirilmiş bir Dünya-ISS deneyi değildi.

The Clean Paper CC BY 4.0

Bu deney, yörüngede çalışan bir mikrogravite laboratuvarı olan Uluslararası Uzay İstasyonu'nda gerçekleştirildi. **Mikrogravite** ifadesi "yerçekimi yok" anlamına gelmez. 2019 makalesi, Dünya yüzeyindeki yerçekiminin yaklaşık 1,2 milyonda biri, yani 1,2 mikro-g düzeyinde artık ivme ve buna eşlik eden yavaş döngüsel sıvı hareketi bildirdi. Ortam taşınım dengesini değiştirdi; tuzlu suyu tamamen hareketsiz hâle getirmedi.

Milimetre ölçeğindeki küplere giden yavaş yol

2019 çalışması, ISS'de tuzlu sudan su buharlaşırken büyüyen huni küplerine odaklandı. Bildirilen küp kenarları **2 ile 8 milimetre** arasındaydı. Büyüme hızları **dakikada 0,34 ile 1,0 mikrometre** (yaklaşık **günde 0,49 ile 1,44 milimetre**) arasında değişti; ortalama **dakikada 0,68 mikrometre**, standart sapma ise 0,23'tü.

Bu ortalama hızda 8 milimetrelik bir kenarın gelişmesi yaklaşık bir hafta sürerdi. Bu hesap bir tahmindir; tek bir kristalin bütün büyüme aşamalarının hızlandırılmış ölçümü değildir.

Yazarlar aşırı doygunluğun **1,002'nin altında** olduğunu tahmin etti. Karşılaştırma için kullandıkları Dünya literatürü ise çok daha yüksek, 1,45'in üzerindeki aşırı doygunluklarda, saniyede 10 ile 110 mikrometre hızla saniyeler ya da dakikalar içinde huni büyümesi bildiriyor ve genellikle 250 mikrometreden küçük küpler ortaya çıkıyordu.

Bu karşılaştırma bilgi verici ama eşleştirilmiş değil. ISS kristalleri ile Dünya literatüründeki kristaller, aynı ekibin aynı anda ve özdeş koşullarda yürüttüğü Dünya ve yörünge kollarından gelmiyordu. Yerçekiminin yanı sıra farklı kaplar, arayüzler ve yöntemler de sonuçları etkileyebilir.

Bu nedenle en güçlü karşıtlık betimleyicidir: bu ISS gözlemlerinde huni küpleri düşük aşırı doygunlukta, günler ile haftalar boyunca yavaşça büyüdü ve milimetre ölçeğine ulaştı.

Erken evrede difüzyon baskındı; daha sonra akış yine rol oynayabilirdi

2019 makalesi, sıvı hareketiyle taşınımı difüzyonla taşınımla karşılaştırmak için **Péclet sayısını** kullandı. Birden küçük değer difüzyonun daha önemli olduğunu; birden büyük değer ise toplu sıvı hareketinin baskın olabileceğini gösterir.

> **Bir anahtar değil, bir oran**
>
> Péclet sayısı iki taşınım hızının karşılaştırmasıdır. Dünyayı, birin altında kusursuz hareketsiz sıvı ve birin üstünde saf konveksiyon diye ikiye ayırmaz. Burada değer kristal boyutuyla ve çevredeki tuzlu su için kullanılan hız tahminiyle değişti. En küçük kristaller açıkça difüzyonun baskın olduğu rejimdeydi; daha büyük kaptaki en büyük kristal ise yavaş sıvı hareketinin önem kazandığı bir rejime girmiş olabilir.

Daha küçük, yaklaşık 0,8 santimetrelik damlalarda tahmini Péclet değerleri çekirdeklenme yakınında yaklaşık **0,0004'ten**, ölçülen son boyutta yaklaşık **0,03'e** yükseldi. Difüzyon baskın kalmaya devam etti.

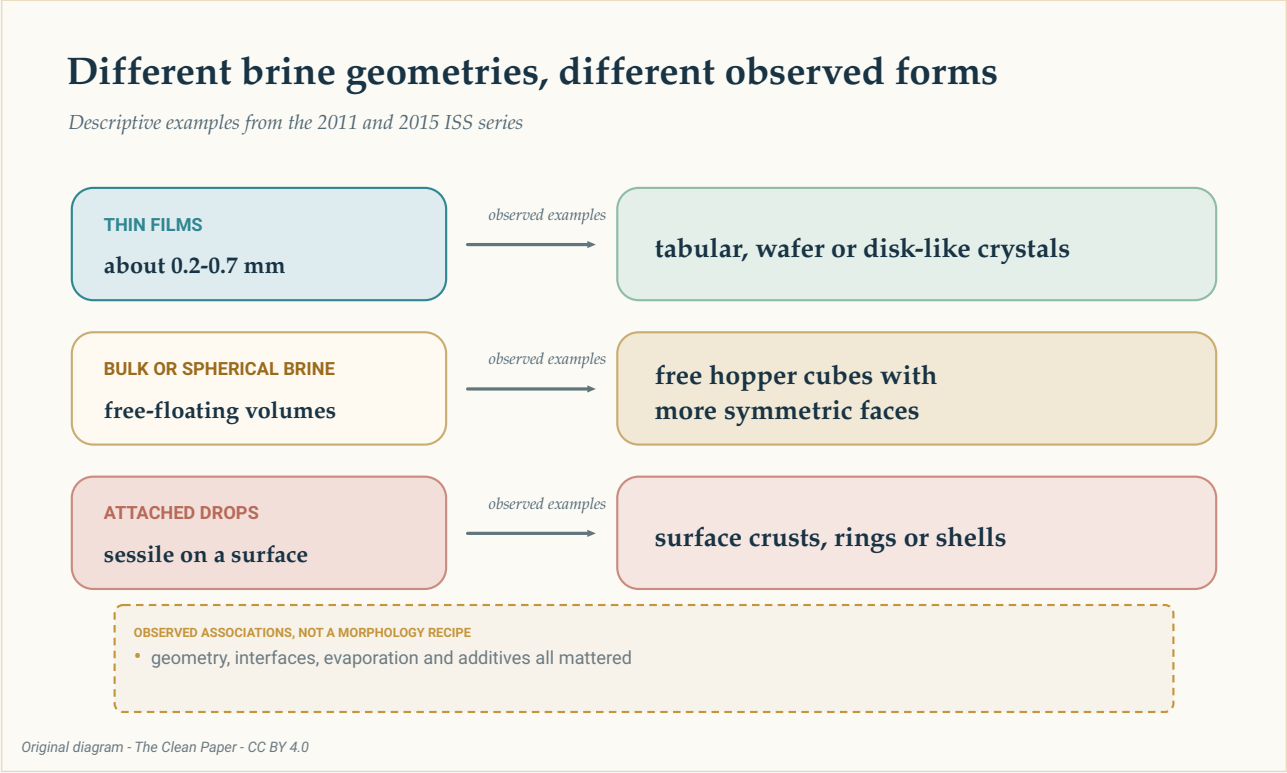
2 ile 3 santimetrelik kristallendiricilerde ise tahmin, 50 mikrometrelik bir çekirdek için yaklaşık **0,05'ten**, 4 milimetrelik bir kenar için yaklaşık **4'e** çıktı. İlk büyüme yine difüzyon baskındı, ancak

yavaş döngüsel hareket daha sonra katkıda bulunmuş olabilir.

Bu yüzden “mikrogravite konveksiyonu ortadan kaldırdı” demek yanlış olur. Olağan kaldırma kuvvetine bağlı dolaşım ve çökelme güçlü biçimde azaldı. Ancak artık ivme ve ölçülebilir hareket devam etti.

Sıvının şekli de önemliydi

2011 makalesi ile 2015 makalesi tabloyu genişletti. İnce filmlerde, daha kalın sıvı tabakalarında, yaklaşık küresel tuzlu su hacimlerinde ve bir yüzeye tutunmuş damlalarda tuz kristalleşmesi bildirdiler.



Üç satır, dosya genelindeki gözlenen örnekleri özetliyor: ince filmlerde levhamsı veya disk benzeri biçimler; hacimli veya küresel tuzlu suda serbest huni küpleri; yüzeye tutunmuş damlalarda kabuklar, halkalar veya zarlar. Bunlar bir tarif ya da garanti değil, betimleyici ilişkilerdir.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011 çalışmasında, yaklaşık 0,2 ile 0,7 milimetre kalınlığındaki ince filmler ince pullar ve levhamsı kristaller üretti. Serbestçe yüzen tuzlu su hacimleri daha simetrik yan yüzeylere ve huni küplerine izin verdi.

2015 gözlemleri, 0,2 ile 0,7 milimetre kalınlığındaki ince tabakaları, yaklaşık 4 ile 6 milimetrelik daha kalın katmanları ve yaklaşık 20 ile 32 milimetre çapındaki yüzeye tutunmuş yarımküresel damlaları kapsıyordu. Bildirilen biçimler arasında levhamsı huni kristalleri, küpler, disk benzeri kristaller, dendritler, halkalar ve kabuklar vardı. Bir gözlem grubunda polietilen glikol eklenmesi

huni büyümesini bastırdı.

Yazarlar 2015 çalışmasını, mürettebatın görev dışı zamanında envantere kaydedilmemiş malzemelerle yapılan gözlemler olarak tanımladı; katı, programlı bir araştırma değildi. Örnekler sıvı geometrisi, arayüzler, buharlaşma ve katkı maddelerinin hepsinin önemli olduğunu gösteriyor. Belirli bir kap şeklinin belirli bir kristal biçimini garanti ettiği deterministik bir tarif sunmuyorlar.

Kristal örgüsü yeni bir tuz biçimine dönüşmedi

Kristal yapısı ile **morfoloji** arasındaki ayrım temel önemdedir.

Yapı, tekrar eden atomik düzendir. Morfoloji ise gözle görülen dış biçimdir. 2011 makalesindeki nötron kırınımı, Dünya'daki örneklerle karşılaştırıldığında farklı bir sodyum klorür yapısı ya da farklı örgü hücresi parametreleri saptamadı. Yörüngedeki örnekler ayrıca kristal içinde hapsolmuş küçük çözelti cepleri olan **tuzlu su inklüzyonları** içeriyordu.

Dolayısıyla büyük ve simetrik görünüm, daha saf ya da kusursuz bir malzemenin kanıtı değildir. Dosyadaki hiçbir makale daha yüksek kimyasal saflık, daha iyi mekanik performans veya belirli bir cihaz için uygunluk bildirmiyor.

Yerçekimi dolaylı etkide bulundu. Çökelmeyi, sıvı dolaşımını, yönelimi ve yüzeylerle teması değiştirdi. Sodyum-klorür bağlarının gücünü değiştirmedi ve yeni bir atomik faz oluşturmadı.

Bu deneyler bize ne öğretebilir, ne öğretemez?

Makaleler taşınıma dayalı bir açıklamayı destekliyor: olağan çökelme ile kaldırma kuvvetine bağlı akışın güçlü biçimde bastırılması, bazı kristallerin daha uzun süre askıda kalmasına ve daha simetrik koşullarda yavaş büyümesine izin verdi. Ölçülen boyutlar, hızlar ve biçimler doğrudan gözlemdir; aşırı doygunluk, büyüme geçmişi ve Péclet değerleri tahminler içerir; Dünya ile karşılaştırma ise kısmen başka yayımlanmış deneylere dayanır.

Bu dosya için tek ve temiz bir payda yoktur. Üç makaledeki tekil kristalleri, kristallendiricileri ve seçilmiş örnekleri bir araya getirir. Hepsini tek bir toplamda toplamak, gerçekte var olmayan tekdüze bir deney izlenimi yaratır.

Çalışmalar ayrıca bir üretim iddiası için gerekli kanıtların hiçbirini sunmuyor. Üretim hacmi, maliyet, enerji kullanımı, verim, güvenilirlik veya yararlı malzeme performansı ölçülmemiş. 2015 serisi keşif niteliğindeydi. Dünya karşılaştırmaları eşleştirilmiş kontroller değildi. Büyük veya görsel olarak çarpıcı olmak da bir uygulama için daha iyi olmakla aynı şey değildir.

Doğal tuz yataklarında santimetrelerle ölçülen huni küpleri bulunabilir; bazen tuzlu suyla ıslanmış çamur içinde askıda kalmışlardır. 2019 makalesi, yavaş ve difüzyon baskın büyümeyle olası bir benzerlik öneriyor. Bu ilginç bir karşılaştırmadır; doğal ve yörüngedeki huni kristallerinin tek bir

mekanizmayı paylaştığının kanıtı değil.

Kısa özet

Uluslararası Uzay İstasyonu'nda buharlaşan tuzlu sudan büyütülen tuz kristalleri arasında 2 ile 8 milimetre çapında içi boş, basamaklı huni küpleri vardı. Makaleler taşınıma dayalı bir açıklamayı destekliyor: mikrogravite olağan çökelme ve kaldırma kuvvetine bağlı akışı güçlü biçimde bastırdı; bu da erken büyümede difüzyon baskınken yavaş büyümeye ve daha uzun süre askıda kalmaya imkân verdi. Sıvı geometrisi, arayüzler, buharlaşma ve katkı maddeleri de morfolojiyi etkiledi. Nötron kırınımı yeni bir sodyum klorür yapısı göstermedi ve tuzlu su inklüzyonları varlığını sürdürdü. Bu çalışma sınırları belirli bir malzeme bilimi vaka çalışmasıdır; uzayın kusursuz kristaller ürettiğinin veya endüstriyel bir süreç sağladığının kanıtı değildir.

Abartısız değerlendirme

Makalelerin gösterdiği: ISS'deki çeşitli tuzlu su geometrilerinde milimetre ölçeğinde sodyum klorür huni küpleri ve başka morfolojiler büyüdü. 2019'daki huni küpleri düşük tahmini aşırı doygunlukta yavaş büyüdü; erken evrede difüzyon baskındı.

Yorumlanan: Çökelmenin ve kaldırma kuvvetine bağlı akışın güçlü biçimde azalması, daha uzun süre askıda kalmaya ve daha simetrik büyümeye imkân verdi. Büyük kristallendiricide geç evrede yavaş sıvı hareketi rol oynamış olabilir.

Göstermedikleri: Tuzun yeni bir atomik biçimini, daha saf ya da kusursuz kristalleri, eşleştirilmiş bir Dünya-ISS denemesini, mikrogravitenin evrensel bir avantajını veya ticari bir üretim yolunu.

Başlıca sınırlamalar: Farklı geometrilere ve seçilmiş örneklere sahip üç ayrı çalışma; çalışmalar arası Dünya karşılaştırmaları; tahmini taşınım büyüklükleri; dosyanın keşif amaçlı, program dışı bölümleri; süreç ekonomisi veya performans testlerinin olmaması.

Genel okuyucu ne kadar güvenmeli? Bildirilen yörünge morfolojilerinin ve yavaş büyümenin gerçek olduğuna yüksek güven. Gözlemler genelinde en iyi açıklama olarak taşınım mekanizmasına orta düzey güven. Bu tuz deneylerini uzayda üretim hakkında genel bir vaade dönüştüren herhangi bir iddiaya ise çok düşük güven.

Kaynaklar

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