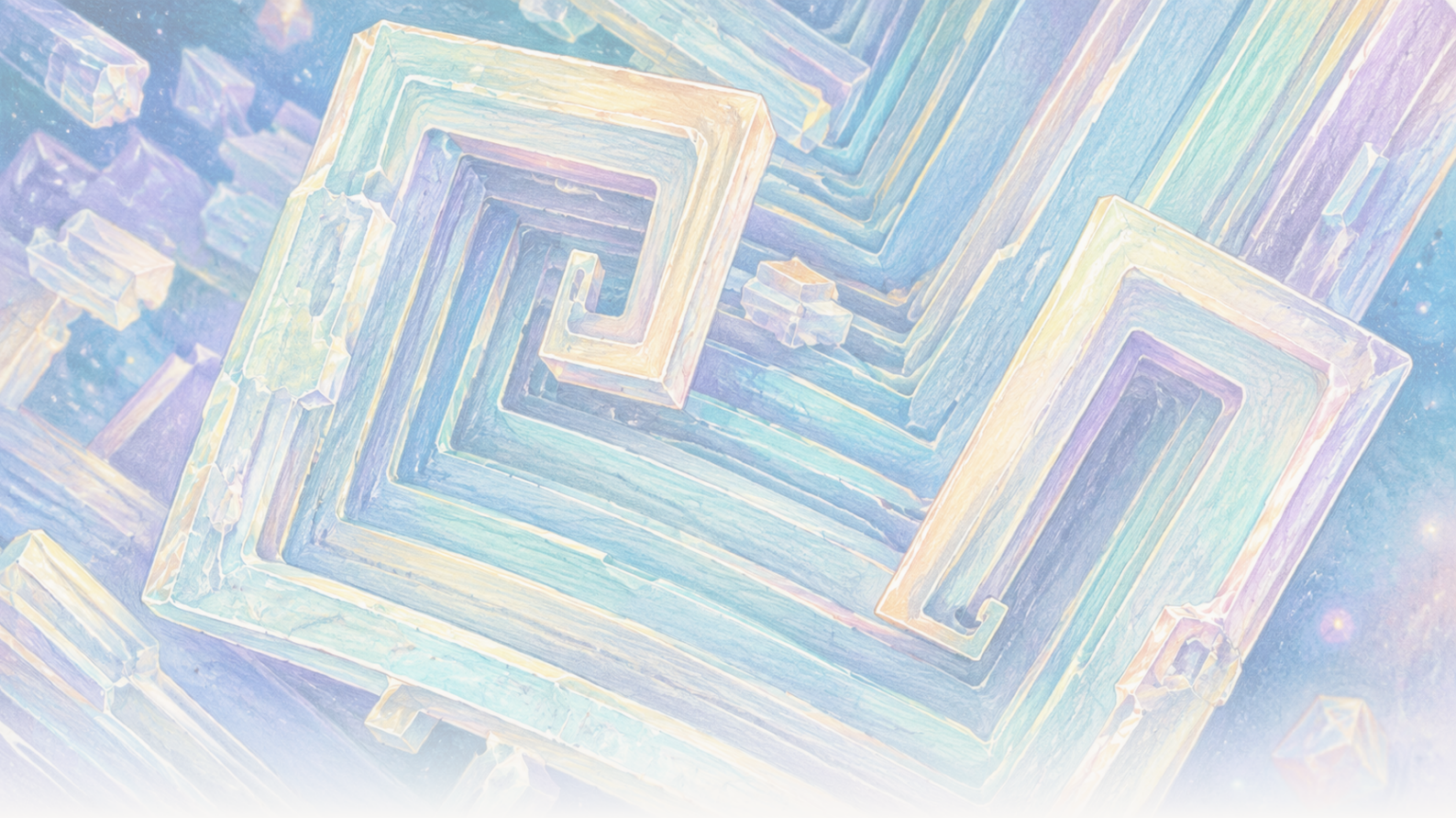


The Clean Paper

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

# Pályán a konyhasó üreges kockákká nőtt. A gravitáció a sós oldatot változtatta meg, nem a sót

*A Nemzetközi Űrállomáson növesztett nátrium-klorid kristályok között 2–8 milliméteres, üreges, lépcsőzetes kockák is voltak. A tanulmányok transzportfizikai magyarázatot támogatnak: a közönséges ülepedés és a felhajtóerő által hajtott áramlás erősen visszaszorult, miközben a korai növekedésben a diffúzió dominált. A rács nem vált új sóformává, és a kísérletek nem alapoznak meg ipari eljárást.*

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

# Pályán a közönséges konyhasó üreges, lépcsőzetes kockákká nőtt

A kristályok szinte építészeti formákat idéztek: négyzetes keretek egymásba ágyazva, a lapokon lépcsőzetes bemélyedésekkel.

Közönséges nátrium-kloridból készültek, ugyanabból a vegyületből, mint a konyhasó. A szokatlan rész nem maga az anyag volt. Hanem a körülötte levő sós oldat.

A Földön egy centiméteres léptékű folyadéktérfogatban növekvő kristály lesüllyedhet, hozzáérhet egy falhoz vagy felülethez, és olyan sűrűségkülönbségek kialakulásához járulhat hozzá, amelyek megforgatják az oldatot. A Nemzetközi Űrállomáson a közönséges ülepedés és a felhajtóerő által hajtott áramlás erősen visszaszorult. Egyes sókristályok elég sokáig maradtak lebegve ahhoz, hogy lassan és szimmetrikusabban **hopperkockákká** növekedjenek, 2 és 8 milliméter közötti élhosszal.

Három tanulmány, amelyek 2011-ben, 2015-ben és 2019-ben jelentek meg, írja le ezeket a kísérleteket. Együtt tiszta leckét adnak a transzportfizikából: ha megváltozik, hogyan jut el az oldott anyag a kristályhoz, megváltozhat a látható alakja anélkül, hogy atomrácsa megváltozna.

Nem mutatják meg, hogy az űr tökéletes kristályokat hozna létre, nem alapoznak meg ipari eljárást, és nem tárnak fel új sófajtát.

## Mitől lesz egy kockából hopperkristály?

A közönséges nátrium-klorid kristály atomrácsa köbös. A **hopperkristály** továbbra is köbös, de a sarkai és élei gyorsabban nőnek, mint a lapok közepe. Ennek eredménye minden lapon egy üreges, lépcsőzetes bemélyedés, mintha a kocka előbb a vázát akarná felépíteni, és csak azután töltené ki a falakat.

Egy későbbi ISS-példa jól láthatóvá teszi ezt a növekedési mintázatot, de csak kontextus, nem a három nátrium-klorid-tanulmány bizonyítéka. Donald Pettit alábbi képe és time-lapse felvétele **kálium-kloridot**, tehát másik sót mutat, amely mikrogravitációban lépcsőzetes hopper- és csigavonalas morfológiákat alakít ki.

[figure_pair pending]

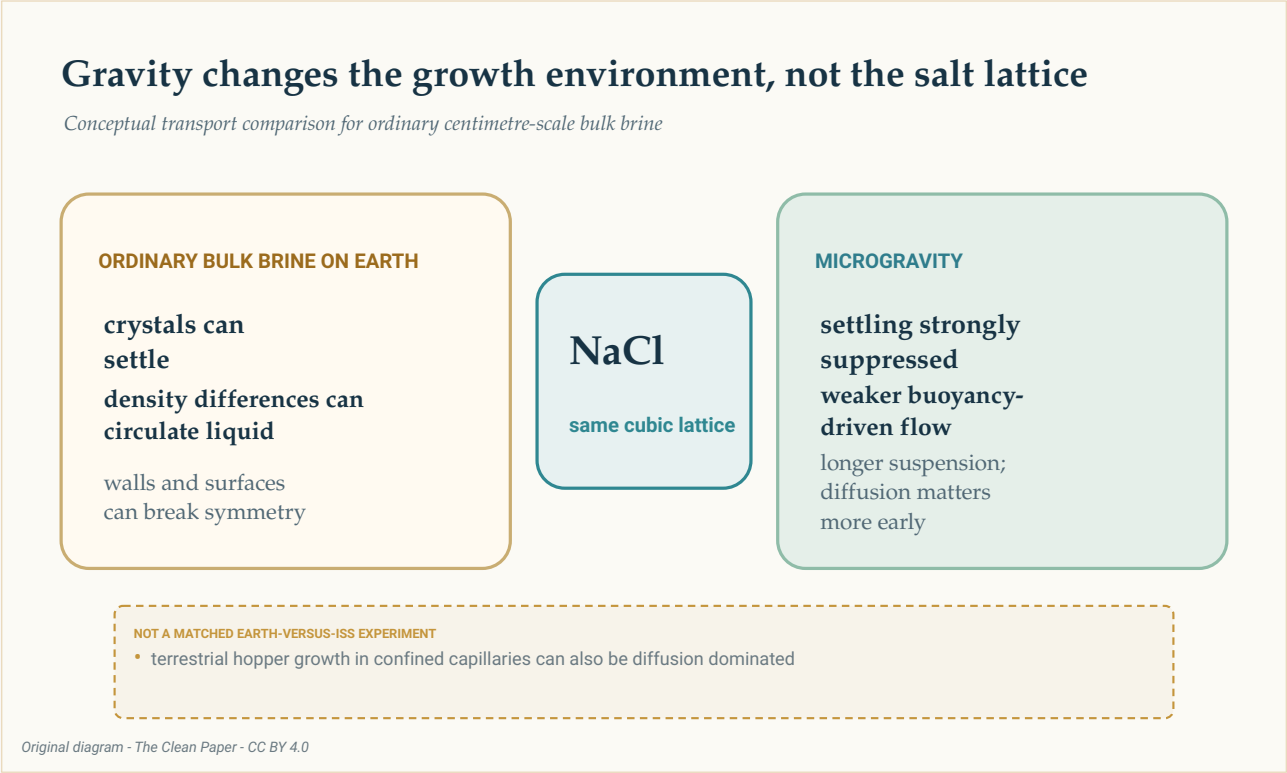
Két pásztázó elektronmikroszkópos felvétel az ISS fedélzetén növesztett, csigavonalas hopperformájú kálium-klorid kristályokról. Ezek a későbbi képek a morfológia szemléltető példái, nem nátrium-klorid minták vagy a cikkben tárgyalt 2011-es, 2015-ös vagy 2019-es vizsgálatok mérései.

[video pending]

Egy későbbi time-lapse felvétel kálium-klorid hoppernövekedéséről vékony vízfilmben, mikrogravitációban. Az él- és saroknövekedést szemlélteti, nem az ebben a cikkben elemzett nátrium-klorid-kísérleteket vagy adatokat.

A kristályok **túltelített sós oldatból** nőnek: olyan sós vízből, amely az adott körülmények között egyensúlyban tartható mennyiségnél több oldott nátrium-kloridot tartalmaz. A nátrium- és kloridionoknak át kell jutniuk a folyadékon és csatlakozniuk kell a kristály felületéhez.

Két alapvető módon mozoghatnak. A **diffúzió** véletlenszerű molekuláris mozgás, amely tömegáramlás nélkül, koncentrációkülönbség mentén szállítja az oldott anyagot. A **konvekció** maga a folyadék mozgása. Közönséges gravitációban kis hőmérséklet- vagy koncentrációkülönbségek megváltoztathatják a sűrűséget, és felhajtóerő által hajtott áramlást idézhetnek elő. A kristályok emellett **ülepedhetnek**, vagyis lesüllyedhetnek a folyadékban.




A fogalmi összehasonlítás mindkét környezetben ugyanazt a nátrium-klorid-rácsot mutatja. A Földön a közönséges tömbi sós oldatban ülepedés, felhajtóerő által hajtott keringés és fal- vagy felületérintkezés is jelen lehet; a mikrogravitáció az első kettőt erősen visszaszorítja, hosszabb lebegést tesz lehetővé, és a növekedés korai szakaszában fontosabbá teszi a diffúziót. Ez nem azonos feltételekkel végzett Föld–ISS összehasonlító kísérlet volt.

The Clean Paper CC BY 4.0

A kísérletet a Nemzetközi Űrállomáson, egy Föld körül keringő mikrogravitációs laboratóriumban végezték. A **mikrogravitáció** nem jelent gravitációmentességet. A 2019-es tanulmány a földfelszíni gravitáció körülbelül 1,2 milliomod részének, vagyis 1,2 mikro-g-nek megfelelő maradék gyorsulást, valamint lassú ciklikus folyadékmozgást közölt. A környezet a transzportfolyamatok egyensúlyát változtatta meg; nem tette teljesen mozdulatlanná a sós oldatot.

# Lassú út a milliméteres kockákhoz

A 2019-es vizsgálat olyan hopperkockákra összpontosított, amelyek az ISS-en a sós oldat vizének párolgása közben nőttek. A közölt élhosszak **2 és 8 milliméter** között voltak. A növekedési sebesség **0,34–1,0 mikrométer/perc** volt (körülbelül **0,49–1,44 milliméter/nap**), **0,68 mikrométer/perc** átlaggal és 0,23-as szórással.

Ezzel az átlagos sebességgel egy 8 milliméteres él kialakulásához nagyjából egy hét kellene. Ez számított becslés, nem egyetlen kristály minden növekedési fázisát rögzítő time-lapse mérés.

A szerzők a túltelítettséget **1,002 alá** becsülték. Az általuk idézett földi összehasonlító irodalom jóval nagyobb, 1,45 fölötti túltelítettség mellett, 10–110 mikrométer/másodperces növekedési sebességgel, másodpercek vagy percek alatt létrejövő, jellemzően 250 mikrométernél kisebb kockákat írt le.

Ez az összehasonlítás informatív, de nem illesztett kontroll. Az ISS-kristályok és a földi szakirodalmi példák nem ugyanannak a kutatócsoportnak egyidejűleg, azonos Föld- és orbitális karban végzett kísérleteiből származtak. A gravitáció mellett eltérő edények, határfelületek és módszerek is számíthatnak.

A legerősebb kontraszt ezért leíró: ezekben az ISS-megfigyelésekben a hopperkockák lassan, alacsony túltelítettségnél, napok vagy hetek alatt nőttek, és milliméteres méretet értek el.

# Korán a diffúzió dominált; később áramlás is számíthatott

A 2019-es tanulmány a **Péclet-számot** használta a folyadékmozgás és a diffúzió által végzett transzport összehasonlítására. Az egynél kisebb érték azt jelenti, hogy a diffúzió fontosabb; az egynél nagyobb érték azt, hogy a tömegáramlás dominánssá válhat.

> **Arány, nem kapcsoló**
>
> A Péclet-szám két transzportsebesség összehasonlítása. Nem osztja a világot egynél kisebb értéknél tökéletesen álló folyadékra és egynél nagyobbnál tiszta konvekcióra. Itt az érték a kristály méretével és a környező sós oldat sebességére használt becsléssel változott. A legkisebb kristályok egyértelműen diffúziódominált tartományban voltak; a nagyobb edény legnagyobb kristálya már olyan tartományba kerülhetett, ahol a lassú folyadékmozgás is számított.

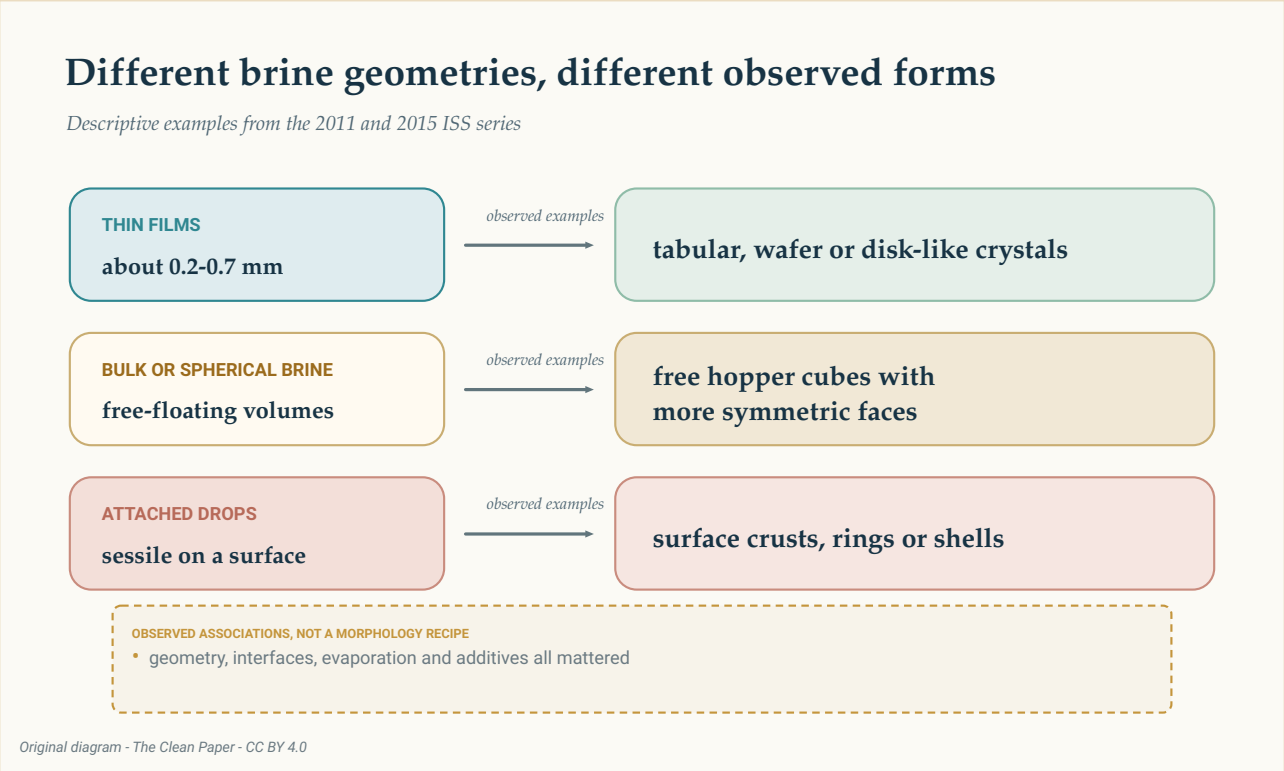
A kisebb, körülbelül 0,8 centiméteres cseppekben a becsült Péclet-szám a nukleáció körüli **0,0004** értékről a végső mért méretnél körülbelül **0,03**-ra nőtt. A diffúzió maradt domináns.

A 2–3 centiméteres kristályosítókban a becslés egy 50 mikrométeres mag körül **0,05**-ről egy 4 milliméteres él esetén körülbelül **4**-re nőtt. A korai növekedés továbbra is diffúziódominált volt, de a lassú ciklikus mozgás később hozzájárulhatott.

Ezért lenne hibás azt mondani, hogy „a mikrogravitáció megszüntette a konvekciót”. A közönséges felhajtóerő által hajtott keringés és az ülepedés erősen csökkent. Maradék gyorsulás és mérhető mozgás azonban továbbra is jelen volt.

# A folyadék alakja is számított

A 2011-es tanulmány és a 2015-ös tanulmány szélesebb képet adott. Sókristályosodást írtak le vékony filmekben, vastagabb folyadékrétegekben, nagyjából gömb alakú sós oldattérfogatokban és felülethez tapadó cseppekben.




Három sor foglalja össze a dosszié megfigyelt példáit: vékony filmek lemez- vagy korongszerű formákkal, tömbi vagy gömbszerű sós oldat szabad hopperkockákkal, valamint felülethez tapadó cseppek kéreggel, gyűrűkkel vagy héjakkal. Ezek leíró összefüggések, nem recept vagy garancia.

The Clean Paper CC BY 4.0

A 2011-es vizsgálatban a körülbelül 0,2–0,7 milliméter vastag vékony filmek vékony lapkákat és táblás kristályokat hoztak létre. A szabadon lebegő sós oldattérfogatok szimmetrikusabb oldallapokat és hopperkockákat tettek lehetővé.

A 2015-ös megfigyelések 0,2–0,7 milliméter vastag vékony rétegeket, körülbelül 4–6 milliméteres vastagabb rétegeket és nagyjából 20–32 milliméter átmérőjű, felülethez tapadó félgömb alakú cseppeket tartalmaztak. A közölt formák között táblás hopperek, kockák, korongszerű kristályok, dendritek, gyűrűk és héjak szerepeltek. Egy megfigyeléssorozatban a polietilén-glikol hozzáadása visszaszorította a hoppernövekedést.

A szerzők a 2015-ös munkát a személyzet szabadidejében, nem leltározott készletekkel végzett megfigyelésként írták le, nem szigorúan programozott vizsgálatként. A példák azt mutatják, hogy a folyadékgeometria, határfelületek, párolgás és adalékok mind számítottak. Nem adnak determinisztikus receptet, amelyben egy bizonyos edényforma garantál egy adott kristályformát.

## A rács nem vált új sóformává

A **kristályszerkezet** és a **morfológia** közötti különbségtétel alapvető.

A szerkezet az ismétlődő atomelrendezés. A morfológia a látható külső forma. A 2011-es tanulmány neutron-diffrakciója nem mutatott megváltozott nátrium-klorid szerkezetet vagy megváltozott rácscella-paramétereket a földi mintákhoz képest. Az orbitális minták **sós oldatzárványokat** is tartalmaztak, vagyis a kristály belsejébe zárt kis oldatzsebeket.

A nagy, szimmetrikus megjelenés tehát nem bizonyít nagyobb kémiai tisztaságot vagy hibamentes anyagot. A dosszié egyik tanulmánya sem közöl nagyobb kémiai tisztaságot, jobb mechanikai teljesítményt vagy konkrét eszközben való használhatóságot.

A gravitáció közvetetten hatott. Megváltoztatta az ülepedést, a folyadékkeringést, az orientációt és a felületekkel való érintkezést. Nem változtatta meg a nátrium–klorid kötések erősségét, és nem hozott létre új atomi fázist.

## Mit taníthatnak és mit nem taníthatnak ezek a kísérletek?

A tanulmányok transzportfolyamatokon alapuló magyarázatot támogatnak: a közönséges ülepedés és a felhajtóerő által hajtott áramlás erős visszaszorítása lehetővé tette, hogy egyes kristályok hosszabb ideig lebegjenek és lassan, szimmetrikusabb körülmények között növekedjenek. A mért méretek, sebességek és formák közvetlen megfigyelések; a túltelítettség, növekedési történet és Péclet-számok becsléseket is tartalmaznak; a Földdel való összehasonlítás részben más publikált kísérletekre támaszkodik.

A dossziénak nincs egyetlen tiszta nevezője. Három tanulmány egyedi kristályait, kristályosítóit és kiválasztott példáit egyesíti. Ezek egyszerű összeadása olyan egységes kísérlet látszatát keltené, amely nem létezett.

A vizsgálatok nem közölnek semmilyen, gyártási állításhoz szükséges bizonyítékot sem. Nem mérnek áteresztőképességet, gyártási költséget, energiafelhasználást, hozamot, megbízhatóságot vagy hasznos anyagtulajdonságot. A 2015-ös sorozat feltáró jellegű volt. A földi összehasonlítások nem illesztett kontrollok. És a nagy vagy látványos kristály nem ugyanaz, mint az alkalmazás szempontjából jobb kristály.

Természetes sótelepek centiméteres hopperkockákat is tartalmazhatnak, olykor sós vízzel átitatott iszapban lebegve. A 2019-es tanulmány lehetséges analógiát vet fel a lassú, diffúziódominált

növekedéssel. Ez érdekes összehasonlítás, nem bizonyíték arra, hogy a természetes és orbitális hopperek ugyanazon mechanizmussal alakulnak ki.

# Röviden

A Nemzetközi Űrállomáson párolgó sós oldatból növesztett sókristályok között 2–8 milliméteres, üreges, lépcsőzetes hopperkockák is voltak. A tanulmányok transzportfizikai magyarázatot támogatnak: a mikrogravitáció erősen visszaszorította a közönséges ülepedést és a felhajtóerő által hajtott áramlást, lehetővé tette a lassú növekedést és hosszabb lebegést, miközben a korai növekedésben a diffúzió dominált. A folyadék geometriája, a határfelületek, a párolgás és az adalékok szintén befolyásolták a morfológiát. A neutron-diffrakció nem mutatott új nátrium-klorid szerkezetet, és sós oldatzárványok is megmaradtak. A munka korlátozott anyagtudományi esettanulmány, nem bizonyíték arra, hogy az űr tökéletes kristályokat készít vagy ipari eljárást tesz lehetővé.

# Tárgyilagos mérleg

**Mit mutatnak a tanulmányok:** Milliméteres nátrium-klorid hopperkockák és más morfológiák nőttek többféle ISS-sósoldat-geometriában. A 2019-es hopperkockák lassan, alacsony becsült túltelítettségnél nőttek, a korai szakaszban diffúziódominált transzporttal.

**Mi az értelmezés:** Az erősen csökkentett ülepedés és felhajtóerő által hajtott áramlás hosszabb lebegést és szimmetrikusabb növekedést tett lehetővé. A nagyobb kristályosítóban a lassú folyadékmozgás később számíthatott.

**Mit nem mutatnak:** Új atomi sóformát, tisztább vagy hibamentes kristályokat, illesztett Föld–ISS vizsgálatot, a mikrogravitáció univerzális előnyét vagy kereskedelmi gyártási útvonalat.

**Fő korlátok:** Három külön vizsgálat eltérő geometriákkal és kiválasztott példákkal; tanulmányok közötti földi összehasonlítások; becsült transzportmennyiségek; a dosszié feltáró, nem programozott részei; valamint folyamatgazdasági és teljesítménytesztek hiánya.

**Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak?** Nagy abban, hogy a közölt orbitális morfológiák és lassú növekedés valósak. Közepes a transzportmagyarázatban mint a megfigyelések legjobb közös értelmezésében. Nagyon alacsony minden olyan állítással kapcsolatban, amely ezekből a sókísérletekből általános ígéretet csinál az űrgyártásról.

# Források

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