The Clean Paper

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

ორბიტაზე სუფრის მარილი ღრუ კუბებად გაიზარდა. გრავიტაციამ მარილხსნარი შეცვალა და არა თვით მარილი

საერთაშორისო კოსმოსურ სადგურზე გაზრდილი ნატრიუმის ქლორიდის კრისტალები მოიცავდა 2-დან 8 მილიმეტრამდე ზომის ღრუ, საფეხურებიან კუბებს. ნაშრომები მხარს უჭერს ტრანსპორტის ახსნას: ჩვეულებრივი დალექვა და ამომგდები ძალით გამოწვეული ნაკადი ძლიერ იყო ჩახშობილი, ხოლო ადრეულ ზრდაში დიფუზია დომინირებდა. გისოსი მარილის ახალ ფორმად არ ქცეულა და ექსპერიმენტები სამრეწველო პროცესს არ ადგენს.

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

ორბიტაზე ჩვეულებრივი სუფრის მარილი ღრუ, საფეხურებიან კუბებად გაიზარდა

კრისტალები არქიტექტურულ ნაგებობებს ჰგავდა: კვადრატული ჩარჩოები ერთმანეთის შიგნით იყო ჩასმული, ხოლო ზედაპირები საფეხურებად ჩაღრმავებული ჩანდა.

ისინი ჩვეულებრივი ნატრიუმის ქლორიდისგან იყო დამზადებული — იმავე ნაერთისგან, რასაც სუფრის მარილი წარმოადგენს. უჩვეულო თვით მასალა კი არა, მის გარშემო არსებული მარილხსნარი იყო.

დედამიწაზე, სანტიმეტრების ზომის სითხის მოცულობაში მზარდ კრისტალს შეუძლია ჩაიძიროს, კედელს ან ზედაპირს შეეხოს და ხელი შეუწყოს სიმკვრივის განსხვავებების შექმნას, რომლებიც ხსნარის ცირკულაციას იწვევს. საერთაშორისო კოსმოსურ სადგურზე ჩვეულებრივი დალექვა და ამომგდები ძალით გამოწვეული ნაკადი ძლიერ იყო ჩახშობილი. ზოგი მარილის კრისტალი საკმარისად დიდხანს დარჩა შეჩერებული, რომ ნელა და უფრო სიმეტრიულად გაზრდილიყო **hopper-კუბებად**, 2-დან 8 მილიმეტრამდე სიგრძის წიბოებით.

სამი ნაშრომი, გამოქვეყნებული 2011, 2015 და 2019 წლებში, აღწერს ამ ექსპერიმენტებს. ერთად ისინი ტრანსპორტის ფიზიკის ძალიან მკაფიო გაკვეთილს გვაძლევს: იმის შეცვლას, თუ როგორ აღწევს გახსნილი ნივთიერება კრისტალამდე, შეუძლია შეცვალოს მისი ხილული ფორმა ისე, რომ ატომური სტრუქტურა უცვლელი დარჩეს.

ეს კვლევები არ აჩვენებს, რომ კოსმოსი იდეალურ კრისტალებს ქმნის, არ ამყარებს სამრეწველო პროცესს და არ გვიჩვენებს მარილის ახალ სახეობას.

როგორ იქცევა კუბი hopper-კრისტალად

ჩვეულებრივ ნატრიუმის ქლორიდის კრისტალს კუბური ატომური განლაგება აქვს. **Hopper-კრისტალი** კვლავ კუბურია, მაგრამ მისი კუთხეები და წიბოები ზედაპირების ცენტრებზე სწრაფად იზრდება. შედეგად თითოეულ ზედაპირზე ღრუ, საფეხუროვანი ჩაღრმავება წარმოიქმნება — თითქოს კუბი ჯერ ჩარჩოს აშენებას ცდილობდეს და შემდეგ ავსებდეს კედლებს.

ISS-ზე მოგვიანებით მიღებული მაგალითი ამ ზრდის ფორმას თვალსაჩინოს ხდის, მაგრამ ის მხოლოდ კონტექსტია და არა ამ სამი ნატრიუმის ქლორიდის ნაშრომის მტკიცებულება. Donald Pettit-ის ქვემოთ მოცემული სურათი და time-lapse ვიდეო აჩვენებს **კალიუმის ქლორიდს** — სხვა მარილს — რომელიც მიკროგრავიტაციაში საფეხურებიან hopper და scroll მორფოლოგიებს ქმნის.

[figure_pair pending]

ISS-ზე გაზრდილი კალიუმის ქლორიდის scroll-ფორმის hopper-კრისტალების ორი სკანირებადი ელექტრონული მიკროგრაფია. ეს მოგვიანებით მიღებული სურათები

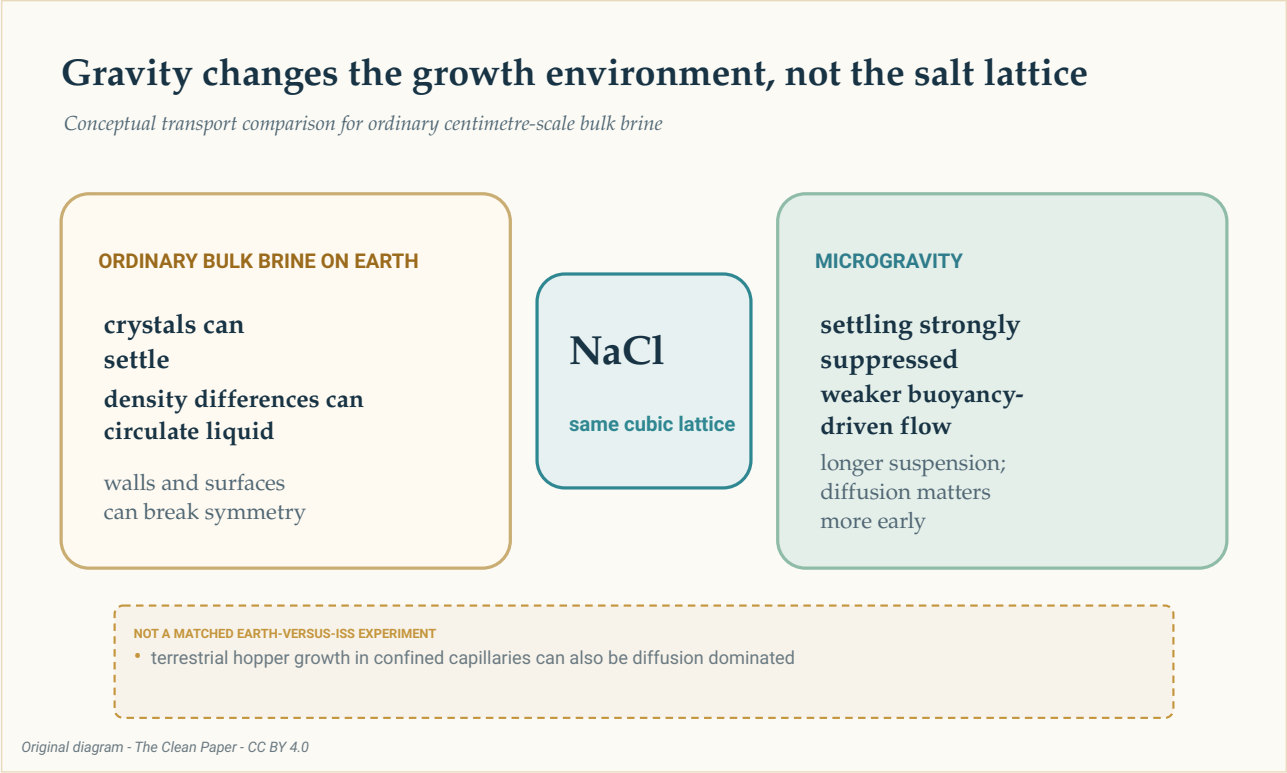
მორფოლოგიის კონტექსტური მაგალითებია და არა ამ სტატიაში განხილული 2011, 2015 ან 2019 წლების კვლევების ნატრიუმის ქლორიდის ნიმუშები ან გაზომვები.

[video pending]

მოგვიანებით გადაღებული time-lapse ვიდეო, რომელიც მიკროგრავიტაციაში წყლის თხელ ფენაში კალიუმის ქლორიდის hopper-კრისტალის ზრდას აჩვენებს. ის წიბოებისა და კუთხეების უპირატეს ზრდას ასახავს და არა ამ სტატიაში გაანალიზებულ ნატრიუმის ქლორიდის ექსპერიმენტებს ან მონაცემებს.

კრისტალები იზრდება **ზეგაჯერებული მარილხსნარიდან**: მარილიანი წყლიდან, რომელიც მოცემულ პირობებში წონასწორობისას შესაძლებელზე მეტ გახსნილ ნატრიუმის ქლორიდს შეიცავს. ნატრიუმისა და ქლორის იონებმა სითხეში უნდა იმოძრაონ და კრისტალის ზედაპირს შეუერთდნენ.

მათი გადატანის ორი ფართო გზა არსებობს. **დიფუზია** არის მოლეკულების შემთხვევითი მოძრაობა, რომელიც გახსნილ ნივთიერებას კონცენტრაციის სხვაობის გასწვრივ გადააქვს მთლიანი სითხის ცირკულაციის გარეშე. **კონვექცია** თვით სითხის მოძრაობაა. ჩვეულებრივი გრავიტაციის პირობებში ტემპერატურის ან კონცენტრაციის მცირე განსხვავებამ შეიძლება სიმკვრივე შეცვალოს და ამომგდები ძალით ცირკულაცია გამოიწვიოს. კრისტალებს ასევე შეუძლიათ **დალექვა**, ანუ სითხეში ჩაძირვა.



კონცეპტუალური შედარება ორივე გარემოში ერთსა და იმავე ნატრიუმის ქლორიდის გისოსს აჩვენებს. დედამიწაზე ჩვეულებრივ მოცულობით მარილხსნარში შეიძლება მოხდეს დალექვა, ამომგდები ძალით გამოწვეული ცირკულაცია და ზედაპირთან კონტაქტი; მიკროგრავიტაცია პირველ ორ პროცესს ძლიერ თრგუნავს, რაც უფრო ხანგრძლივ შეჩერებას და ზრდის ადრეულ ეტაპზე დიფუზიის უფრო დიდ მნიშვნელობას იძლევა. ეს არ იყო ერთმანეთთან

შეწყვილებული დედამიწა-versus-ISS ექსპერიმენტი.

The Clean Paper CC BY 4.0

ექსპერიმენტი ჩატარდა საერთაშორისო კოსმოსურ სადგურზე — ორბიტულ მიკროგრავიტაციულ ლაბორატორიაში. სიტყვა **მიკროგრავიტაცია** ნულოვან გრავიტაციას არ ნიშნავს. 2019 წლის ნაშრომში დარჩენილი აჩქარება შეფასებულია დედამიწის ზედაპირის გრავიტაციის დაახლოებით 1.2 მემილიონედად, ანუ 1.2 მიკრო-g-ად, ასევე დაფიქსირდა სითხის ნელი ციკლური მოძრაობა. გარემომ ტრანსპორტის ბალანსი შეცვალა; მარილხსნარი სრულად უძრავი არ გამხდარა.

ნელი გზა მილიმეტრიან კუბებამდე

2019 წლის კვლევა ფოკუსირებული იყო hopper-კუბებზე, რომლებიც ISS-ზე მარილხსნარიდან წყლის აორთქლებისას გაიზარდა. კუბების წიბოები **2-დან 8 მილიმეტრამდე** იყო. ზრდის სიჩქარე მერყეობდა **0.34-დან 1.0 მიკრომეტრამდე წუთში** (დაახლოებით **0.49-დან 1.44 მილიმეტრამდე დღეში**), საშუალო მნიშვნელობით **0.68 მიკრომეტრი წუთში** და 0.23 სტანდარტული გადახრით.

ამ საშუალო სიჩქარით 8-მილიმეტრიან წიბოს დაახლოებით ერთი კვირა დასჭირდებოდა განვითარებისთვის. ეს გამოთვლა შეფასებაა და არა ერთი კრისტალის ზრდის ყოველი ეტაპის time-lapse გაზომვა.

ავტორებმა ზეგაჯერება **1.002-ზე ნაკლებად** შეაფასეს. მათ მიერ განხილულ დედამიწის კვლევებში hopper-ზრდა აღწერილი იყო ბევრად მაღალი, 1.45-ზე მეტი ზეგაჯერებისას, 10-დან 110 მიკრომეტრამდე წამში სიჩქარით, წამებისა ან წუთების განმავლობაში, და ჩვეულებრივ 250 მიკრომეტრზე პატარა კუბებით.

ეს შედარება ინფორმაციულია, მაგრამ შეწყვილებული არ არის. ISS-ის კრისტალები და დედამიწის ლიტერატურა არ წარმოადგენდა ერთდროულ, იდენტურ დედამიწისა და ორბიტის ექსპერიმენტულ ჯგუფებს, რომლებიც ერთმა გუნდმა ჩაატარა. გრავიტაციასთან ერთად მნიშვნელობა შეიძლება ჰქონდეს განსხვავებულ ჭურჭელს, ინტერფეისებსა და მეთოდებსაც.

ამიტომ ყველაზე ძლიერი კონტრასტი აღწერითია: ISS-ის ამ დაკვირვებებში hopper-კუბები ნელა, დაბალი ზეგაჯერების პირობებში, დღეებისა და კვირების განმავლობაში იზრდებოდა და მილიმეტრულ ზომებს აღწევდა.

ადრეულ ეტაპზე დიფუზია დომინირებდა; მოგვიანებით ნაკადიც შეიძლებოდა მნიშვნელოვანი ყოფილიყო

2019 წლის ნაშრომმა გამოიყენა **პეკლეს რიცხვი**, რათა ერთმანეთისთვის შეედარებინა სითხის მოძრაობით და დიფუზიით ნივთიერების გადატანა. ერთზე ნაკლები მნიშვნელობა ნიშნავს, რომ დიფუზია უფრო მნიშვნელოვანია; ერთზე მეტი კი იმას ნიშნავს, რომ მოცულობით მოძრაობას შეიძლება წამყვანი როლი ჰქონდეს.

> **ეს შეფარდება და არა ჩამრთველია**
>
> პეკლეს რიცხვი ორი ტრანსპორტის სიჩქარის შედარებაა. ის სამყაროს არ ყოფს ერთზე ქვემოთ სრულად უძრავ სითხედ და ერთზე ზემოთ სუფთა კონვექციად. აქ მნიშვნელობა იცვლებოდა კრისტალის ზომასთან და მის გარშემო მარილხსნარის სიჩქარის შეფასებასთან ერთად. ყველაზე პატარა კრისტალები აშკარად დიფუზიით დომინირებულ რეჟიმში იყო; უფრო დიდ ჭურჭელში ყველაზე დიდი კრისტალი შეიძლებოდა მოხვედრილიყო რეჟიმში, სადაც ნელი სითხის მოძრაობაც მნიშვნელოვანი იყო.

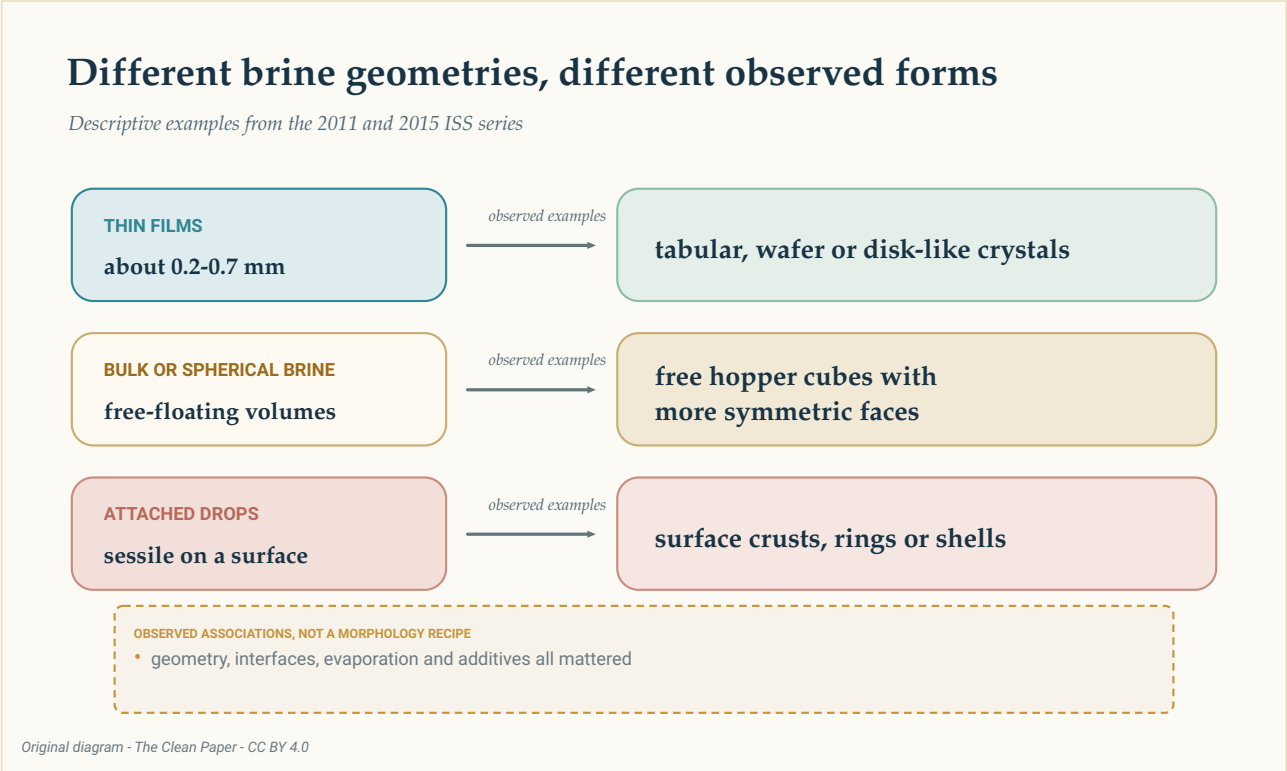
უფრო პატარა, დაახლოებით 0.8-სანტიმეტრიან წვეთებში შეფასებული პეკლეს რიცხვი ნუკლეაციის მახლობლად დაახლოებით **0.0004**-დან საბოლოო გაზომილ ზომაზე დაახლოებით **0.03**-მდე გაიზარდა. დიფუზია კვლავ დომინირებდა.

2-დან 3-სანტიმეტრიან კრისტალიზატორებში შეფასება 50-მიკრომეტრიანი ბირთვისთვის დაახლოებით **0.05**-დან 4-მილიმეტრიანი წიბოსთვის დაახლოებით **4**-მდე გაიზარდა. ადრეული ზრდა კვლავ დიფუზიით იყო დომინირებული, მაგრამ მოგვიანებით ნელ ციკლურ მოძრაობას შეიძლებოდა წვლილი შეეტანა.

ამიტომ ფრაზა „მიკროგრავიტაციამ კონვექცია მთლიანად გააქრო“ არასწორი იქნებოდა. ჩვეულებრივი ამომგდები ძალით გამოწვეული ცირკულაცია და დალექვა ძლიერ შემცირდა. მაგრამ ნარჩენი აჩქარება და გაზომვადი მოძრაობა დარჩა.

სითხის ფორმასაც ჰქონდა მნიშვნელობა

2011 წლის ნაშრომმა და 2015 წლის ნაშრომმა სურათი გააფართოვა. მათ აღწერეს მარილის კრისტალიზაცია თხელ ფენებში, უფრო სქელ სითხის შრეებში, დაახლოებით სფერულ მარილხსნარის მოცულობებში და ზედაპირზე მიმაგრებულ წვეთებში.



სამი რიგი აჯამებს დოსიეში დაფიქსირებულ მაგალითებს: თხელი ფენები ფირფიტისებრი ან დისკოსებრი ფორმებით, მოცულობითი ან სფერული მარილხსნარი თავისუფალი hopper-კუბებით და მიმაგრებული წვეთები ქერქებით, რგოლებით ან გარსებით. ეს აღწერითი ასოციაციებია და არა რეცეპტი ან გარანტია.

The Clean Paper CC BY 4.0

2011 წლის კვლევაში დაახლოებით 0.2-დან 0.7 მილიმეტრამდე სისქის თხელმა ფენებმა წარმოქმნა თხელი ფირფიტები და ტაბულარული კრისტალები. თავისუფლად მცურავმა მარილხსნარის მოცულობებმა უფრო სიმეტრიული გვერდითი ზედაპირები და hopper-კუბები დაუშვა.

2015 წლის დაკვირვებები მოიცავდა 0.2-დან 0.7 მილიმეტრამდე სისქის თხელ ფენებს, დაახლოებით 4-დან 6 მილიმეტრამდე სქელ შრეებს და ზედაპირზე მიმაგრებულ, დაახლოებით 20-დან 32 მილიმეტრამდე დიამეტრის ნახევარსფერულ წვეთებს. აღწერილი ფორმები მოიცავდა ტაბულარულ hopper-ებს, კუბებს, დისკოსებრ კრისტალებს, დენდრიტებს, რგოლებსა და გარსებს. ერთ დაკვირვებათა სერიაში პოლიეთილენგლიკოლის დამატებამ hopper-ზრდა ჩაახშო.

ავტორებმა 2015 წლის სამუშაო აღწერეს, როგორც ეკიპაჟის თავისუფალ დროს არაინვენტარიზებული მასალებით ჩატარებული დაკვირვებები და არა მკაცრი პროგრამული კვლევა. მაგალითები აჩვენებს, რომ მნიშვნელობა ჰქონდა სითხის გეომეტრიას, ინტერფეისებს, აორთქლებასა და დანამატებს. ისინი არ ადგენს დეტერმინისტულ რეცეპტს, რომლის მიხედვითაც ერთი ფორმის ჭურჭელი ერთ კონკრეტულ კრისტალის ფორმას გარანტირებულად იძლევა.

გისოსი მარილის ახალ ფორმად არ ქცეულა

კრისტალური სტრუქტურისა და **მორფოლოგიის** განსხვავება აქ გადამწყვეტია.

სტრუქტურა ატომების განმეორებადი განლაგებაა. მორფოლოგია — გარედან ხილული ფორმა. 2011 წლის ნაშრომში ნეიტრონულმა დიფრაქციამ დედამიწის ნიმუშებთან შედარებით ნატრიუმის ქლორიდის შეცვლილი სტრუქტურა ან გისოსის უჯრედის შეცვლილი პარამეტრები არ გამოავლინა. ორბიტულ ნიმუშებში ასევე იყო **მარილხსნარის ჩანართები** — კრისტალში ჩაკეტილი ხსნარის პატარა ჯიბეები.

ამიტომ დიდი და სიმეტრიული გარეგნობა უფრო სუფთა ან დეფექტებისგან თავისუფალ მასალას არ ნიშნავს. დოსიეში არცერთი ნაშრომი არ აღწერს უფრო მაღალ ქიმიურ სისუფთავეს, უკეთეს მექანიკურ თვისებებს ან კონკრეტული მოწყობილობისთვის ვარგისიანობას.

გრავიტაცია ირიბად მოქმედებდა. მან შეცვალა დალექვა, სითხის ცირკულაცია, ორიენტაცია და ზედაპირებთან კონტაქტი. მას ნატრიუმ-ქლორის ბმების სიმტკიცე არ შეუცვლია და ახალი ატომური ფაზა არ შეუქმნია.

რას გვასწავლის და რას ვერ გვასწავლის ეს ექსპერიმენტები

ნაშრომები მხარს უჭერს ტრანსპორტზე დაფუძნებულ ახსნას: ჩვეულებრივი დალექვისა და ამომგდები ძალით გამოწვეული ნაკადის ძლიერი შემცირება ზოგ კრისტალს უფრო დიდხანს შეჩერებულ მდგომარეობაში ტოვებდა და უფრო სიმეტრიულ პირობებში ნელი ზრდის საშუალებას აძლევდა. გაზომილი ზომები, სიჩქარეები და ფორმები პირდაპირი დაკვირვებებია; ზეგაჯერება, ზრდის ისტორია და პეკლეს რიცხვები ნაწილობრივ შეფასებებს შეიცავს; დედამიწასთან შედარება კი ნაწილობრივ სხვა გამოქვეყნებულ ექსპერიმენტებს ეყრდნობა.

ამ დოსიეს ერთი საერთო მნიშვნელი არ აქვს. ის აერთიანებს ცალკეულ კრისტალებს, კრისტალიზატორებსა და შერჩეულ მაგალითებს სამი განსხვავებული ნაშრომიდან. მათი ერთ საერთო ჯამად შეკრება შექმნიდა შთაბეჭდილებას, თითქოს ერთგვაროვანი ექსპერიმენტი არსებობდა, რაც ასე არ არის.

კვლევებში ასევე არ არის წარმოების შესახებ დასკვნისთვის საჭირო მტკიცებულებები. ისინი არ ზომავს გამტარუნარიანობას, წარმოების ღირებულებას, ენერგიის მოხმარებას, გამოსავლიანობას, საიმედოობას ან სასარგებლო მატერიალურ თვისებებს. 2015 წლის სერია საძიებო ხასიათის იყო. დედამიწასთან შედარებები შეწყვილებული კონტროლები არ ყოფილა. და დიდი ან ვიზუალურად შთამბეჭდავი არ ნიშნავს კონკრეტული გამოყენებისთვის უკეთესს.

ბუნებრივ მარილის საბადოებში შეიძლება სანტიმეტრებში გაზომილი hopper-კუბებიც არსებობდეს, ზოგჯერ მარილხსნარით გაჟღენთილ ტალახში შეჩერებული. 2019 წლის

ნაშრომი ვარაუდობს შესაძლო ანალოგიას ნელ, დიფუზიით დომინირებულ ზრდასთან. ეს საინტერესო შედარებაა და არა მტკიცებულება, რომ ბუნებრივ და ორბიტულ hopper-ებს ერთი და იგივე მექანიზმი აქვს.

სუფთა შეჯამება

საერთაშორისო კოსმოსურ სადგურზე აორთქლებადი მარილხსნარიდან გაზრდილი მარილის კრისტალები მოიცავდა 2-დან 8 მილიმეტრამდე ზომის ღრუ, საფეხურებიან hopper-კუბებს. ნაშრომები მხარს უჭერს ტრანსპორტზე დაფუძნებულ ახსნას: მიკროგრავიტაციამ ჩვეულებრივი დალექვა და ამომგდები ძალით გამოწვეული ნაკადი ძლიერ შეამცირა, რის გამოც კრისტალები უფრო დიდხანს რჩებოდა შეჩერებული და ნელა იზრდებოდა, ხოლო ადრეულ ეტაპზე დიფუზია დომინირებდა. მორფოლოგიაზე გავლენას ახდენდა სითხის გეომეტრია, ინტერფეისები, აორთქლება და დანამატებიც. ნეიტრონულმა დიფრაქციამ ნატრიუმის ქლორიდის ახალი სტრუქტურა არ აჩვენა და მარილხსნარის ჩანართებიც დარჩა. ეს არის მკაფიოდ შეზღუდული მასალათმცოდნეობის შემთხვევა და არა მტკიცებულება, რომ კოსმოსი იდეალურ კრისტალებს ქმნის ან სამრეწველო პროცესს შესაძლებელს ხდის.

შელამაზების გარეშე შემოწმება

რას აჩვენებს ნაშრომები: ISS-ის სხვადასხვა მარილხსნარის გეომეტრიაში გაიზარდა მილიმეტრიანი ნატრიუმის ქლორიდის hopper-კუბები და სხვა მორფოლოგიები. 2019 წლის hopper-კუბები იზრდებოდა ნელა, დაბალი შეფასებული ზეგაჯერების პირობებში, ადრეულ ეტაპზე დიფუზიის დომინირებით.

რა არის ინტერპრეტაცია: ძლიერ შემცირებულმა დალექვამ და ამომგდები ძალით გამოწვეულმა ნაკადმა უფრო ხანგრძლივი შეჩერება და უფრო სიმეტრიული ზრდა დაუშვა. უფრო დიდ კრისტალიზატორში გვიან ეტაპზე ნელ სითხის მოძრაობას შეიძლებოდა წვლილი ჰქონოდა.

რას არ აჩვენებს: მარილის ახალ ატომურ ფორმას, უფრო სუფთა ან დეფექტებისგან თავისუფალ კრისტალებს, შეწყვილებულ დედამიწა-versus-ISS კვლევას, მიკროგრავიტაციის უნივერსალურ უპირატესობას ან კომერციულ წარმოების გზას.

მთავარი შეზღუდვები: სამი განსხვავებული კვლევა სხვადასხვა გეომეტრიითა და შერჩეული მაგალითებით; დედამიწის მონაცემებთან ჯვარედინი კვლევების შედარებები; შეფასებული ტრანსპორტის პარამეტრები; დოსიეს საძიებო, არაპროგრამული ნაწილები; და პროცესის ეკონომიკისა თუ შესრულების ტესტების არარსებობა.

რამდენად უნდა ენდოს ამას ზოგადი მკითხველი? მაღალი ნდობა, რომ აღწერილი ორბიტული მორფოლოგიები და ნელი ზრდა რეალურია. ზომიერი ნდობა ტრანსპორტის ახსნაში, როგორც დაკვირვებების ერთობლიობისთვის საუკეთესო ანგარიშში. ძალიან

დაბალი ნდობა ნებისმიერი მტკიცების მიმართ, რომელიც ამ მარილის ექსპერიმენტებს კოსმოსურ წარმოებაზე ზოგად დაპირებად აქცევს.

წყაროები

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