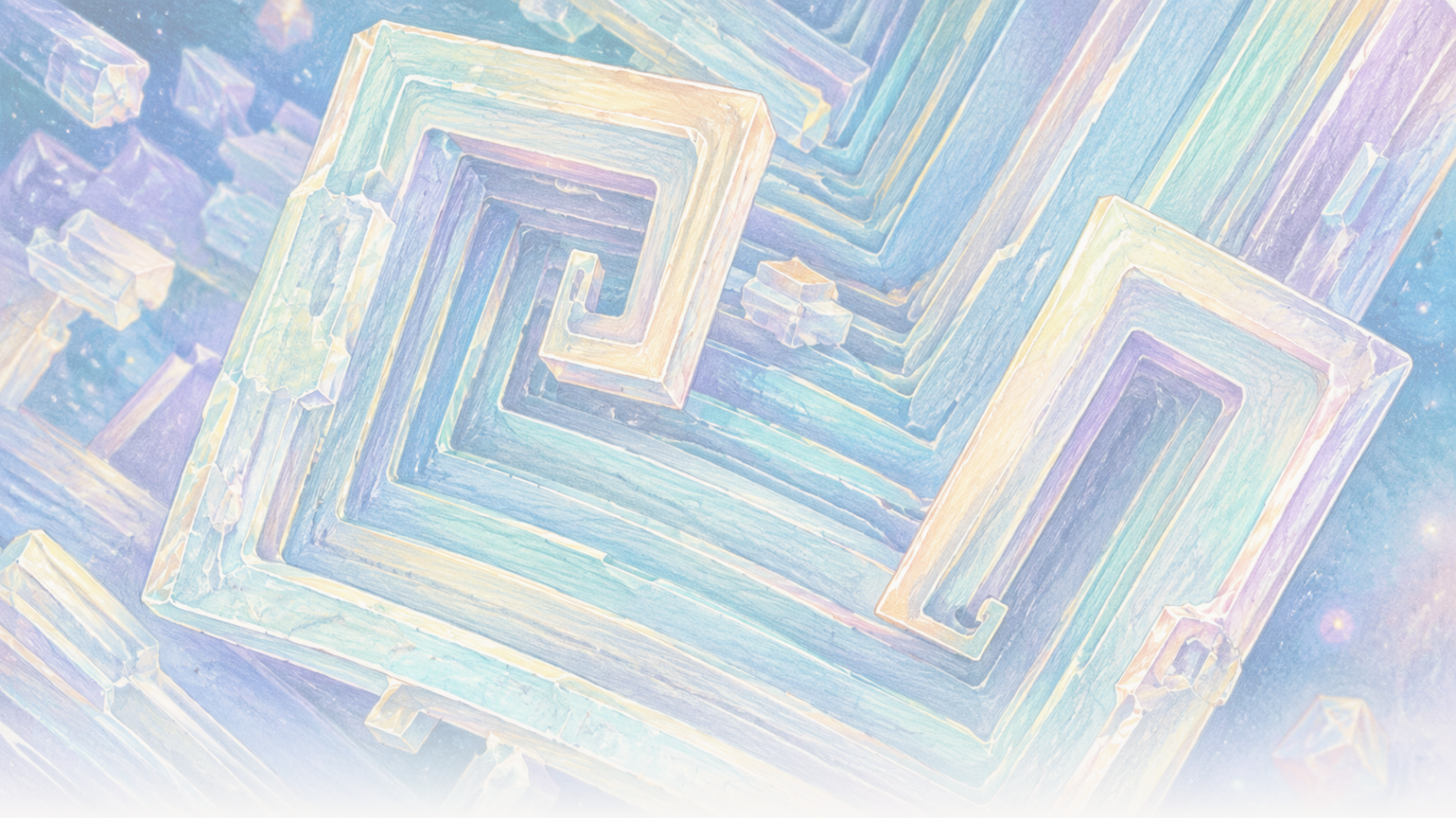


The Clean Paper

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

在軌道上，食鹽長成了空心方塊：重力改變的是鹵水，不是鹽本身

國際空間站上生長的氯化鈉晶體中，出現了邊長 *2–8* 毫米的空心階梯狀立方體。幾篇論文支持一種傳質解釋：通常由重力造成的沉降和浮力驅動流動受到強烈抑制，早期生長則主要由擴散控制。晶格沒有變成一種新的鹽結構，這些實驗也沒有證明存在可工業化的製程。

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

在軌道上，普通食鹽長成了空心的階梯狀立方體

這些晶體看上去像小型建築：一層方框套著一層方框，晶面中心則向內凹成階梯。

它們只是普通的氯化鈉，也就是食鹽的主要成分。不同尋常的不是材料本身，而是它周圍的鹵水。

在地球上，一個晶體如果在公分尺度的液體中生長，可能會下沉、碰到容器壁或液面，還會參與形成密度差，使溶液產生循環流動。在國際空間站上，通常的沉降以及由浮力驅動的流動都受到強烈抑制。一些鹽晶體因此能長時間懸浮，緩慢而更對稱地長成邊長 2–8 毫米的**漏斗狀立方體（hopper cubes）**。

發表於 2011 年、2015 年 和 2019 年 的三篇論文記錄了這些實驗。放在一起看，它們給出了一個很清楚的傳質物理案例：改變溶解物質抵達晶體表面的方式，可以改變晶體肉眼可見的外形，而不必改變它的原子結構。

這些研究並沒有說明太空能製造「完美晶體」，也沒有建立一種工業製程，更沒有發現一種新的鹽。

立方體為什麼會變成「漏斗」

普通氯化鈉晶體的原子排列是立方結構。**漏斗晶體**仍然是立方晶體，只是它的角和稜比各個晶面的中心生長得更快。於是，每個晶面都會留下空心、階梯狀的凹陷，看起來就像晶體先搭好了框架，卻還沒來得及把「牆面」填滿。

後來在 ISS 上拍到的一個例子可以直觀展示這種生長方式，不過它只是背景材料，並不是這三篇氯化鈉論文中的證據。下面 Donald Pettit 的影像與縮時影片顯示的是**氯化鉀**——另一種鹽——在微重力環境中形成階梯狀的漏斗和捲曲形貌。

[figure_pair pending]

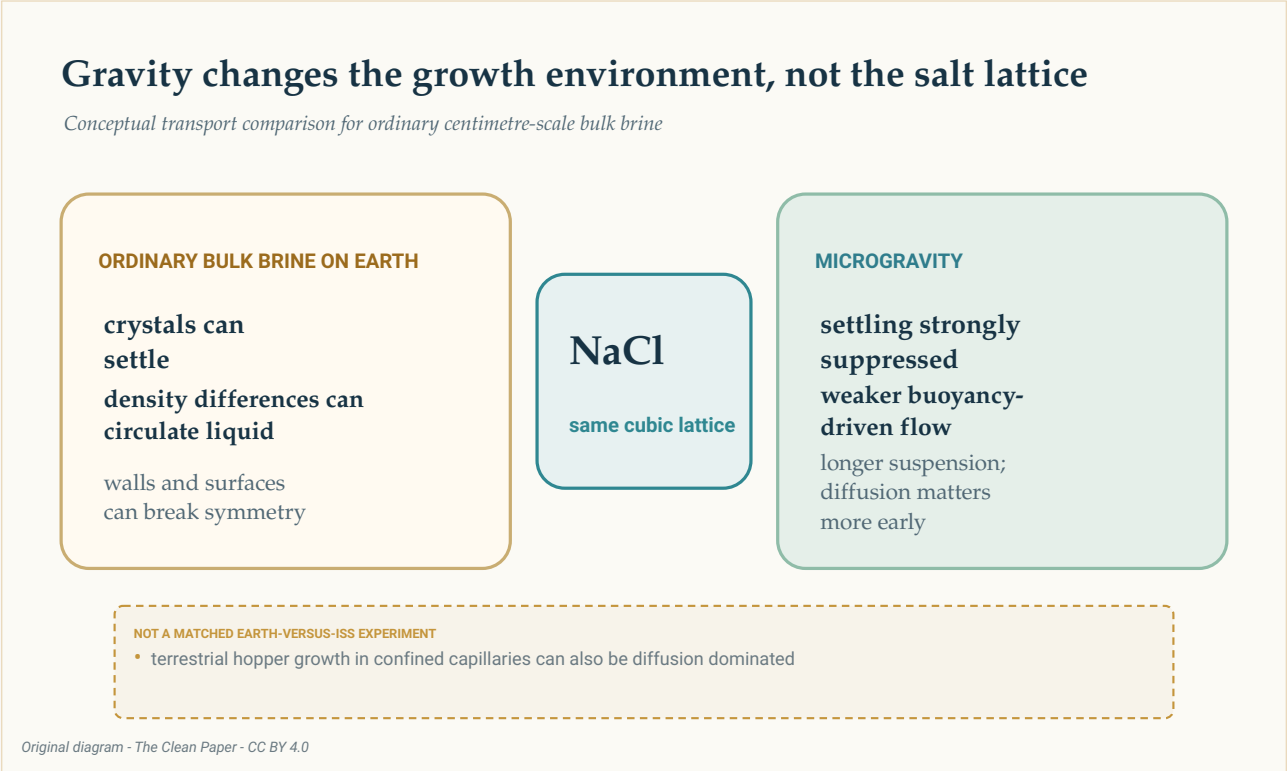
兩張掃描電子顯微鏡影像，展示在 ISS 上生長的捲曲型氯化鉀漏斗晶體。這些較晚拍攝的影像只是用來說明這種形貌，並不是本文討論的 2011、2015 或 2019 年研究中的氯化鈉樣品或測量結果。

[video pending]

後來拍攝的一段縮時影片，顯示氯化鉀在微重力薄水膜中形成漏斗晶體。它展示了晶體稜和角優先生長的過程，但不是本文分析的氯化鈉實驗或資料。

晶體從**過飽和鹵水**中生長：也就是在給定條件下，水中溶解的氯化鈉超過平衡狀態所能容納的量。鈉離子和氯離子必須穿過液體，到達並加入晶體表面。

它們大體可以透過兩種方式傳輸。**擴散**來自分子的隨機運動，溶解物會沿濃度差移動，而不需要整團液體發生循環。**對流**則是液體本身的整體運動。在普通重力下，溫度或濃度造成的小幅密度差，就可能驅動浮力循環。晶體還可能發生**沉降**，也就是在液體中向下落。



這張概念圖在兩種環境中畫出相同的氯化鈉晶格。地面上的普通體相鹵水可能同時出現沉降、浮力循環以及與表面的接觸；微重力會強烈抑制前兩者，使晶體懸浮得更久，並讓擴散在早期生長中更重要。這並不是一項條件嚴格匹配的地面—ISS 對照實驗。

The Clean Paper CC BY 4.0

實驗是在國際空間站這個軌道微重力實驗室中進行的。**微重力**並不等於完全沒有重力。2019 年的論文報告，殘餘加速度約為地球表面重力的 120 萬分之一，也就是約 1.2 微 g，同時液體中仍存在緩慢的週期性運動。環境改變了不同傳質機制之間的相對作用，卻沒有讓鹵水徹底靜止。

通往毫米級立方體的一條慢路

2019 年的研究重點分析了 ISS 上鹵水蒸發時長出的漏斗狀立方體。報告中的立方體邊長為 **2–8 毫米**。生長速率為每分鐘 **0.34–1.0 微米**（約每天 **0.49–1.44 毫米**），平均為每分鐘 **0.68 微米**，標準差為 0.23。

按這個平均速度估算，一條 8 毫米長的稜大約需要一周才能形成。這只是估算，並不是對某一個晶體整個生長過程逐階段拍攝得到的時間。

作者估計過飽和度低於 **1.002**。他們引用的地面研究文獻則描述了明顯更高的過飽和度——超過 1.45——在幾秒或幾分鐘內以每秒 10–110 微米的速度形成漏斗晶體，通常得到邊長小於 250 微米的立方體。

這個對比很有參考價值，但並不是嚴格匹配的對照。ISS 晶體和地面文獻中的晶體並非同一團隊在完全相同條件下同時進行的地面與軌道實驗。除了重力，容器、界面和實驗方法的差異也可能產生影響。

因此，最穩妥的結論仍然是描述性的：在這些 ISS 觀測中，漏斗狀立方體在較低過飽和度下緩慢生長，持續數天到數周，最終達到毫米尺度。

早期由擴散主導；後期仍可能有液體流動

2019 年論文使用**佩克萊數（Peclet number）**來比較液體整體運動所造成的輸運與擴散輸運。數值低於 1，表示擴散更重要；高於 1，則說明整體流動可能佔主導。

> **一個比值，不是一隻開關**
>
> 佩克萊數比較的是兩種輸運速率。它並不是說小於 1 時液體絕對靜止，而大於 1 時就只剩對流。在這裡，它會隨著晶體尺寸以及對周圍鹵水速度的估算而變化。最小的晶體顯然處在擴散主導區間；而較大容器中的最大晶體，則可能已經進入緩慢液體運動不可忽略的區間。

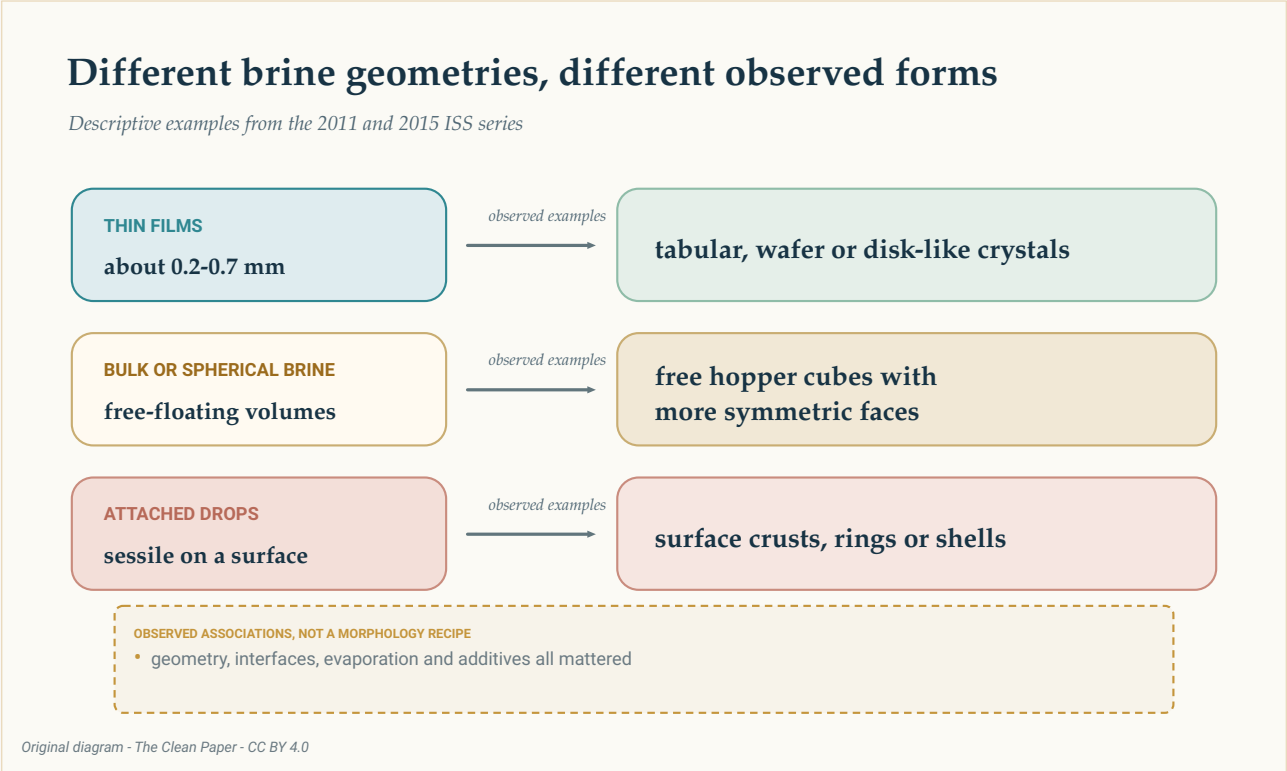
在較小、直徑約 0.8 公分的液滴中，估算的佩克萊數從成核附近約 **0.0004** 增長到最後測量尺寸時約 **0.03**。擴散始終佔主導。

在 2–3 公分的結晶器中，估算值則從 50 微米晶核時約 **0.05**，上升到晶體稜長 4 毫米時約 **4**。早期生長仍由擴散主導，但後期緩慢的週期性流動可能有所貢獻。

因此，說「微重力消除了對流」是不對的。它強烈減少了通常由浮力驅動的循環和沉降，但殘餘加速度以及可測得的液體運動依然存在。

液體本身的形狀也很重要

2011 年論文和 2015 年論文把這幅圖景擴展到了更多幾何條件。研究者報告了薄膜、較厚液層、近似球形鹵水體積以及附著在表面的液滴中的鹽結晶現象。



三行示例概括了這一組論文中的觀測：薄膜中出現片狀或盤狀形態；體相或近球形鹵水中出現自由懸浮的漏斗狀立方體；附著液滴中出現殼層、環或外殼。這些只是描述性聯繫，並不是配方，也不是保證。

The Clean Paper CC BY 4.0

在 2011 年研究中，厚約 0.2–0.7 毫米的薄膜形成了薄片和板狀晶體。自由懸浮的鹵水體積則允許側面更對稱地生長，並形成漏斗狀立方體。

2015 年的觀測包括厚 0.2–0.7 毫米的薄層、約 4–6 毫米的較厚液層，以及直徑約 20–32 毫米、附著在表面的半球形液滴。報告的形貌包括板狀漏斗晶體、立方體、盤狀晶體、枝晶、環和殼層。在一組觀測中，加入聚乙二醇抑制了漏斗晶體的生長。

作者把 2015 年的工作描述為宇航員利用未編目物資、在非值班時間開展的觀察，而不是一項嚴格規劃的系統研究。這些例子說明，液體幾何形狀、界面、蒸發和添加劑都會影響形貌。它們並沒有給出一種確定性規則，不能說某一種容器形狀必然得到某一種晶體形狀。

晶格並沒有變成一種新的鹽結構

必須區分**晶體結構**和**形貌**。

結構指的是重複的原子排列；形貌是肉眼可見的外部形狀。2011 年論文中的中子衍射，與地面樣品相比，並沒有發現氯化鈉結構或晶胞參數發生改變。軌道樣品中還含有**鹵水包裹體**，也就是被封在晶體內部的小液滴。

因此，晶體看起來更大、更對稱，並不意味著材料更純或沒有缺陷。這一組論文中沒有任何一篇報告更高的化學純度、更好的力學性能，或某種具體元件應用上的優勢。

重力的作用是間接的。它改變了沉降、液體循環、晶體取向以及與表面接觸的方式；它並沒有改變氯化鈉鍵的強度，也沒有創造一種新的原子相。

這些實驗能教會我們什麼，又不能教會我們什麼

這些論文支持一種傳質解釋：當通常的沉降和浮力驅動流動受到強烈抑制，一些晶體就能保持懸浮，在更對稱的條件下緩慢生長。測得的尺寸、速率和形貌是直接觀測結果；過飽和度、生長歷史和佩克萊數則包含估算；與地球環境的比較部分依賴其他已發表實驗。

這組材料不存在一個可以直接相加的統一「樣本總數」。三篇論文混合了單個晶體、結晶器以及挑選出來的示例。把它們統統相加，會讓人誤以為這裡存在一套統一實驗，而實際上並沒有。

這些研究也沒有提供支持製造業結論所需的證據。它們沒有測量產量、生產成本、能耗、良率、可靠性或有用的材料性能。2015 年的系列觀測本身就是探索性的；地面對比也不是嚴格匹配的控制實驗。而且晶體「大」或者「好看」，不等於它在某種應用中更好。

天然鹽礦床中也能發現以公分計的漏斗狀立方體，有時它們懸浮在浸滿鹵水的泥中。2019 年論文提出，這可能與緩慢、擴散主導的生長有某種類比。這是一個有趣的比較，卻不能證明天然漏斗晶體和軌道漏斗晶體由同一種機制形成。

重點摘要

國際空間站上，從蒸發鹵水中生長出的鹽晶體包括邊長 2–8 毫米的空心階梯狀漏斗立方體。幾篇論文支持一種基於傳質的解釋：微重力強烈抑制通常的沉降和浮力驅動流動，使晶體能懸浮更久並緩慢生長，而早期生長主要由擴散控制。液體幾何形狀、界面、蒸發和添加劑也會影響晶體形貌。中子衍射沒有顯示氯化鈉形成了新的晶體結構，晶體中仍存在鹵水包裹體。這是一組邊界明確的材料科學案例，並不能證明太空會製造完美晶體，也沒有證明一種工業化製程。

務實檢視

論文真正顯示了什麼：在 ISS 的多種鹵水幾何條件下，確實生長出了毫米級氯化鈉漏斗狀立方體以及其他形貌。2019 年的漏斗立方體在估算的低過飽和度下緩慢生長，早期由擴散主導。

屬於解釋的部分：沉降和浮力驅動流動的大幅減弱，讓晶體懸浮更久，並更對稱地生長。在較大的結晶器中，後期緩慢液體運動可能也有作用。

論文沒有顯示什麼：一種新的鹽原子結構；更純或無缺陷的晶體；嚴格匹配的地面—ISS 對照試驗；微重力具有普遍優勢；或一條商業化製造路線。

主要侷限：三項不同研究使用了不同幾何條件和經過選擇的示例；地面對比跨越不同研究；部分輸運量來自估算；資料中有探索性、非系統規劃的部分；也沒有製程經濟性或材料性能測試。

普通讀者應該有多大信心？可以高度相信這些軌道環境中的晶體形貌和緩慢生長確實被觀測到了。把傳質變化視為貫穿這些觀察的最佳解釋，可以有中等程度的信心。但任何把這些鹽實驗擴展成「太空製造普遍更好」的說法，都幾乎沒有依據。

來源

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