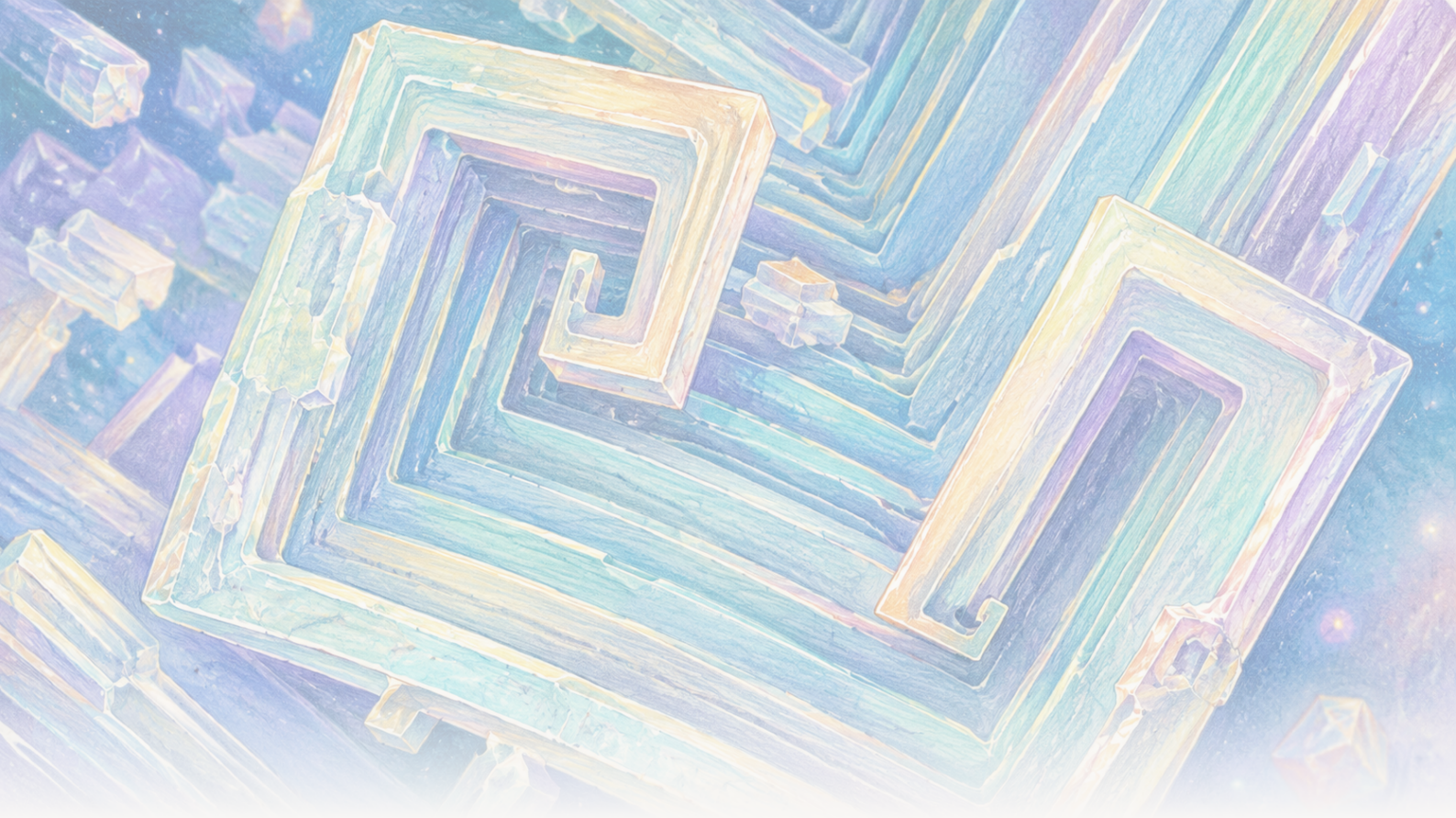


The Clean Paper

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

在轨道上，食盐长成了空心方块：重力改变的是卤水，不是盐本身

国际空间站上生长的氯化钠晶体中，出现了边长 *2–8* 毫米的空心阶梯状立方体。几篇论文支持一种传质解释：通常由重力造成的沉降和浮力驱动流动受到强烈抑制，早期生长则主要由扩散控制。晶格没有变成一种新的盐结构，这些实验也没有证明存在可工业化的工艺。

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

在轨道上，普通食盐长成了空心的阶梯状立方体

这些晶体看上去像小型建筑：一层方框套着一层方框，晶面中心则向内凹成阶梯。

它们只是普通的氯化钠，也就是食盐的主要成分。不同寻常的不是材料本身，而是它周围的卤水。

在地球上，一个晶体如果在厘米尺度的液体中生长，可能会下沉、碰到容器壁或液面，还会参与形成密度差，使溶液产生循环流动。在国际空间站上，通常的沉降以及由浮力驱动的流动都受到强烈抑制。一些盐晶体因此能长时间悬浮，缓慢而更对称地长成边长 2–8 毫米的**漏斗状立方体（hopper cubes）**。

发表于 2011 年、2015 年 和 2019 年 的三篇论文记录了这些实验。放在一起看，它们给出了一个很清楚的传质物理案例：改变溶解物质抵达晶体表面的方式，可以改变晶体肉眼可见的外形，而不必改变它的原子结构。

这些研究并没有说明太空能制造 “完美晶体”，也没有建立一种工业生产工艺，更没有发现一种新的盐。

立方体为什么会变成 “漏斗”

普通氯化钠晶体的原子排列是立方结构。**漏斗晶体**仍然是立方晶体，只是它的角和棱比各个晶面的中心生长得更快。于是，每个晶面都会留下空心、阶梯状的凹陷，看起来就像晶体先搭好了框架，却还没来得及把 “墙面” 填满。

后来在 ISS 上拍到的一个例子可以直观展示这种生长方式，不过它只是背景材料，并不是这三篇氯化钠论文中的证据。下面 Donald Pettit 的图像和延时录像显示的是**氯化钾**——另一种盐——在微重力环境中形成阶梯状的漏斗和卷曲形貌。

[figure_pair pending]

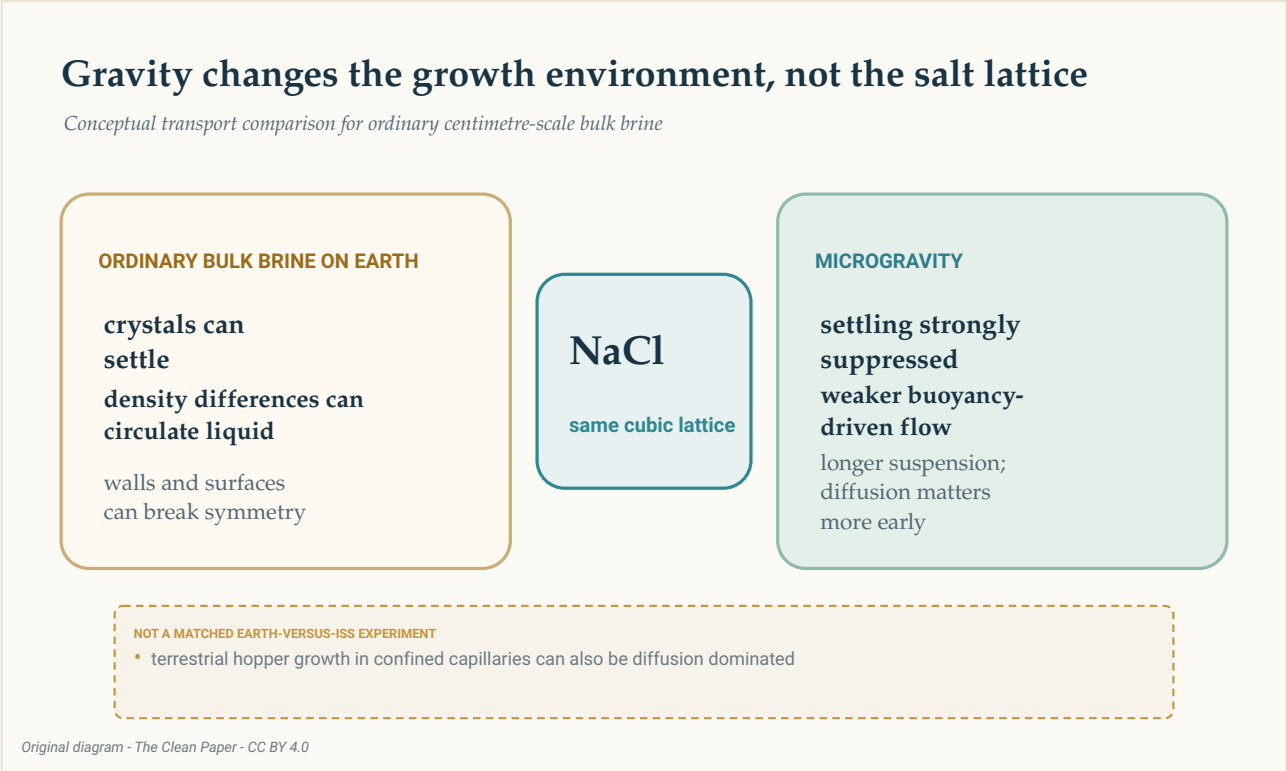
两张扫描电子显微镜图像，展示在 ISS 上生长的卷曲型氯化钾漏斗晶体。这些较晚拍摄的图像只是用来说明这种形貌，并不是本文讨论的 2011、2015 或 2019 年研究中的氯化钠样品或测量结果。

[video pending]

后来拍摄的一段延时录像，显示氯化钾在微重力薄水膜中形成漏斗晶体。它展示了晶体棱和角优先生长的过程，但不是本文分析的氯化钠实验或数据。

晶体从**过饱和卤水**中生长：也就是在给定条件下，水中溶解的氯化钠超过平衡状态所能容纳的量。钠离子和氯离子必须穿过液体，到达并加入晶体表面。

它们大体可以通过两种方式被输运。**扩散**来自分子的随机运动，溶解物会沿浓度差移动，而不需要整团液体发生循环。**对流**则是液体本身的整体运动。在普通重力下，温度或浓度造成的小幅密度差，就可能驱动浮力循环。晶体还可能发生**沉降**，也就是在液体中向下落。



这张概念图在两种环境中画出相同的氯化钠晶格。地面上的普通体相卤水可能同时出现沉降、浮力循环以及与表面的接触；微重力会强烈抑制前两者，使晶体悬浮得更久，并让扩散在早期生长中更重要。这并不是一项条件严格匹配的地面—ISS 对照实验。

The Clean Paper CC BY 4.0

实验是在国际空间站这个轨道微重力实验室中进行的。**微重力**并不等于完全没有重力。2019 年的论文报告，残余加速度约为地球表面重力的 120 万分之一，也就是约 1.2 微 g，同时液体中仍存在缓慢的周期性运动。环境改变了不同传质机制之间的相对作用，却没有让卤水彻底静止。

通往毫米级立方体的一条慢路

2019 年的研究重点分析了 ISS 上卤水蒸发时长出的漏斗状立方体。报告中的立方体边长为 **2–8 毫米**。生长速率为每分钟 **0.34–1.0 微米**（约每天 **0.49–1.44 毫米**），平均为每分钟 **0.68 微米**，标准差为 0.23。

按这个平均速度估算，一条 8 毫米长的棱大约需要一周才能形成。这只是估算，并不是对某一个晶体整个生长过程逐阶段拍摄得到的时间。

作者估计过饱和度低于 **1.002**。他们引用的地面研究文献则描述了明显更高的过饱和度——超过 1.45——在几秒或几分钟内以每秒 10–110 微米的速度形成漏斗晶体，通常得到边长小于 250 微米的立方体。

这个对比很有参考价值，但并不是严格匹配的对照。ISS 晶体和地面文献中的晶体并非同一团队在完全相同条件下同时进行的地面与轨道实验。除了重力，容器、界面和实验方法的差异也可能产生影响。

因此，最稳妥的结论仍然是描述性的：在这些 ISS 观测中，漏斗状立方体在较低过饱和度下缓慢生长，

持续数天到数周，最终达到毫米尺度。

早期由扩散主导；后期仍可能有液体流动

2019 年论文使用**佩克莱数（Peclet number）**来比较液体整体运动所造成的输运与扩散输运。数值低于 1，表示扩散更重要；高于 1，则说明整体流动可能占主导。

> **一个比值，不是一只开关**
>
> 佩克莱数比较的是两种输运速率。它并不是说小于 1 时液体绝对静止，而大于 1 时就只剩对流。在这里，它会随着晶体尺寸以及对周围卤水速度的估算而变化。最小的晶体显然处在扩散主导区间；而较大容器中的最大晶体，则可能已经进入缓慢液体运动不可忽略的区间。

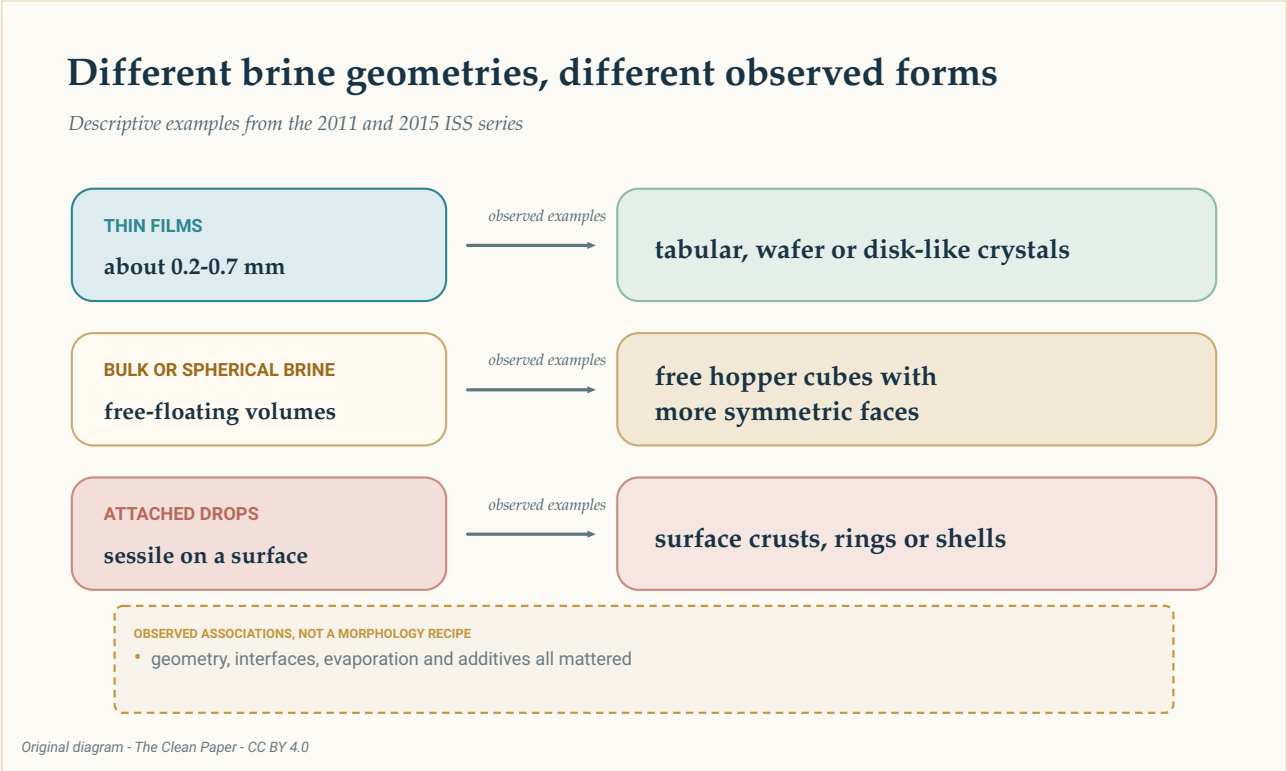
在较小、直径约 0.8 厘米的液滴中，估算的佩克莱数从成核附近约 **0.0004** 增长到最后测量尺寸时约 **0.03**。扩散始终占主导。

在 2–3 厘米的结晶器中，估算值则从 50 微米晶核时约 **0.05**，上升到晶体棱长 4 毫米时约 **4**。早期生长仍由扩散主导，但后期缓慢的周期性流动可能有所贡献。

因此，说 “微重力消除了对流” 是不对的。它强烈减少了通常由浮力驱动的循环和沉降，但残余加速度以及可测得的液体运动依然存在。

液体本身的形状也很重要

2011 年论文和 2015 年论文把这幅图景扩展到了更多几何条件。研究者报告了薄膜、较厚液层、近似球形卤水体积以及附着在表面的液滴中的盐结晶现象。



三行示例概括了这一组论文中的观测：薄膜中出现片状或盘状形态；体相或近球形卤水中出现自由悬浮的漏斗状立方体；附着液滴中出现壳层、环或外壳。这些只是描述性联系，并不是配方，也不是保证。

The Clean Paper CC BY 4.0

在 2011 年研究中，厚约 0.2–0.7 毫米的薄膜形成了薄片和板状晶体。自由悬浮的卤水体积则允许侧面更对称地生长，并形成漏斗状立方体。

2015 年的观测包括厚 0.2–0.7 毫米的薄层、约 4–6 毫米的较厚液层，以及直径约 20–32 毫米、附着在表面的半球形液滴。报告的形貌包括板状漏斗晶体、立方体、盘状晶体、枝晶、环和壳层。在一组观测中，加入聚乙二醇抑制了漏斗晶体的生长。

作者把 2015 年的工作描述为宇航员利用未编目物资、在非值班时间开展的观察，而不是一项严格规划的系统研究。这些例子说明，液体几何形状、界面、蒸发和添加剂都会影响形貌。它们并没有给出一种确定性规则，不能说某一种容器形状必然得到某一种晶体形状。

晶格并没有变成一种新的盐结构

必须区分**晶体结构**和**形貌**。

结构指的是重复的原子排列；形貌是肉眼可见的外部形状。2011 年论文中的中子衍射，与地面样品相比，并没有发现氯化钠结构或晶胞参数发生改变。轨道样品中还含有**卤水包裹体**，也就是被封在晶体内部的小液滴。

因此，晶体看起来更大、更对称，并不意味着材料更纯或没有缺陷。这一组论文中没有任何一篇报告更高的化学纯度、更好的力学性能，或某种具体器件应用上的优势。

重力的作用是间接的。它改变了沉降、液体循环、晶体取向以及与表面接触的方式；它并没有改变氯化钠键的强度，也没有创造一种新的原子相。

这些实验能教会我们什么，又不能教会我们什么

这些论文支持一种传质解释：当通常的沉降和浮力驱动流动受到强烈抑制，一些晶体就能保持悬浮，在更对称的条件下缓慢生长。测得的尺寸、速率和形貌是直接观测结果；过饱和度、生长历史和佩克莱数则包含估算；与地球环境的比较部分依赖其他已发表实验。

这组材料不存在一个可以直接相加的统一“样本总数”。三篇论文混合了单个晶体、结晶器以及挑选出来的示例。把它们统统相加，会让人误以为这里存在一套统一实验，而实际上并没有。

这些研究也没有提供支持制造业结论所需的证据。它们没有测量产量、生产成本、能耗、良率、可靠性或有用的材料性能。2015 年的系列观测本身就是探索性的；地面对比也不是严格匹配的控制实验。而且晶体“大”或者“好看”，不等于它在某种应用中更好。

天然盐矿床中也能发现以厘米计的漏斗状立方体，有时它们悬浮在浸满卤水的泥中。2019 年论文提出，这可能与缓慢、扩散主导的生长有某种类比。这是一个有趣的比较，却不能证明天然漏斗晶体和轨道漏斗晶体由同一种机制形成。

简明总结

国际空间站上，从蒸发卤水中生长出的盐晶体包括边长 2–8 毫米的空心阶梯状漏斗立方体。几篇论文支持一种基于传质的解释：微重力强烈抑制通常的沉降和浮力驱动流动，使晶体能悬浮更久并缓慢生长，而早期生长主要由扩散控制。液体几何形状、界面、蒸发和添加剂也会影响晶体形貌。中子衍射没有显示氯化钠形成了新的晶体结构，晶体中仍存在卤水包裹体。这是一组边界明确的材料科学案例，并不能证明太空会制造完美晶体，也没有证明一种工业化工艺。

不绕弯检查

论文真正显示了什么：在 ISS 的多种卤水几何条件下，确实生长出了毫米级氯化钠漏斗状立方体以及其他形貌。2019 年的漏斗立方体在估算的低过饱和度下缓慢生长，早期由扩散主导。

属于解释的部分：沉降和浮力驱动流动的大幅减弱，让晶体悬浮更久，并更对称地生长。在较大的结晶器中，后期缓慢液体运动可能也有作用。

论文没有显示什么：一种新的盐原子结构；更纯或无缺陷的晶体；严格匹配的地面—ISS 对照试验；微重力具有普遍优势；或一条商业化制造路线。

主要局限：三项不同研究使用了不同几何条件和经过选择的示例；地面对比跨越不同研究；部分输运量来自估算；资料中有探索性、非系统规划的部分；也没有工艺经济性或材料性能测试。

普通读者应该有多大信心？ 可以高度相信这些轨道环境中的晶体形貌和缓慢生长确实被观测到了。把传质变化视为贯穿这些观察的最佳解释，可以有中等程度的信心。但任何把这些盐实验扩展成 “太空制造普遍更好” 的说法，都几乎没有依据。

来源

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