

一份物理学家的冰淇淋指南：全球最受欢迎甜点背后的复杂科学

(中国科学院物理研究所 王立芬 编译自 Hamish Johnston. *Physics World*, 2025, (4): 23)

冰淇淋到底是什么？对大多数人来说，它是美味的冷冻甜点，但对像 Douglas Goff 这样的食品科学家来说，它也是物理和化学的奇迹。冰淇淋是复杂的多相材料，包含了乳液、泡沫、晶体、溶质和溶剂。无论是在家庭厨房还是在商业规模化的生产中，冰淇淋都需要成分比例的精确调配，以及在混合、搅拌和冷冻过程中的精确控制。

Goff 是在加拿大圭尔夫大学的食品科学研究员，也是冰淇淋科学的专家。除了研究冰淇淋中的结构和成分功能等课题外，Goff 还是圭尔夫大学年度冰淇淋课程的讲师。该课程自 1914 年开授，是该大学历史最悠久的课程。

在与 *Physics World* 杂志的 Hamish Johnston 进行的对话中，Goff 解释了冰淇淋的科学原理，为什么制作素食冰淇淋如此困难，以及他的团队如何在进行电子显微镜实验时不让样品融化。

冰淇淋的材料性质

冰淇淋是非常复杂的多相系统。它初始是一种乳液，其中脂肪微粒分散在含糖的水溶液中。接着，通过搅拌乳液引入了空气相，这个过程被称为发泡(图1)。因此，在一个冰淇淋桶中，大约有一半体积来自于空气的贡献。这些空气形成的细小气泡均匀分散在发泡乳

液中。

然后，部分冻结使得发泡乳液中至少一半的水转变为微小的冰晶，而剩余的未冻结相是使冰淇淋保持柔软、易舀取且可口的主因。并未被完全冻结的原因是溶解在乳液中的糖分降低了冰点。

这样的流程下来，就得到了呈乳液状的脂肪微粒、泡沫式的气泡、部分结晶的冰晶溶剂，以及浓缩的糖溶液。

冰淇淋中不同相的空间尺度是多少？

电子显微技术显示脂肪微粒的直径约为一微米，而空气泡的直径通常在 20—30 μm 之间，冰晶的大小在 10—20 μm 的范围内。

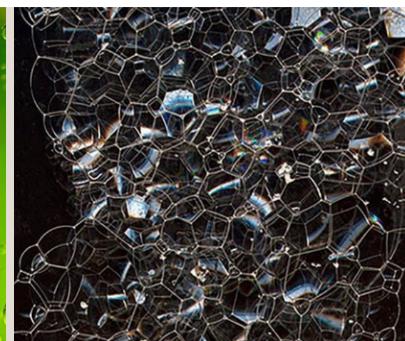


图1 冰淇淋中的不同相。乳液：有些液体是不互溶的，如油和水，将一种液体加入到另一种液体后无法混合。如果一种液体的许多液滴可以在另一种液体中稳定存在而不发生聚结，那么所得到的混合物称为乳液(左图)。泡沫：泡沫与乳液类似，由两个相组成，其中一种相分散在另一种相中。在泡沫的情况下，许多细小的气泡被困在液体或固体中(右图)。玻璃态：当一种液体被冷却到低于某一温度时，它通常会发生一阶相变，变成晶体。然而，如果一种液体可以在不结晶的情况下冷却到其冰点以下(过冷)，例如，当它被迅速冷却时，它可能会形成玻璃态——一种具有无序液体状结构但具备固体机械性能的非晶体固体。玻璃态形成的温度，其特征是材料粘度的快速增加，被称为玻璃化转变温度



图2 冰淇淋中的物理实验技术主要包括流变学、动态光散射、电子显微技术、临界点干燥技术等

期间经历很大的温度波动，它会比在恒定温度下储存时更快降解并变成冰块。温度越高，再结晶的速度就越快。商业冷冻设备能够产生比自制冰淇淋机更小的冰晶尺寸。低温和恒定温度的储存是大家追求的目标，因此在演变发生之前，温度越低、越恒定，初始冰晶越小，冰淇淋的保质期就越长。

还有另外一个影响冰淇淋长期储存的结构因素。当未冻结的含糖溶剂相浓缩到足够程度时，它可以经历玻璃化转变(图1)。玻璃态是一种非晶固体，因此如果这种情况发生，系统内的水或溶质将不会移动，它可以保持多年不变。对于冰淇淋来说，玻璃化转变温度约为-28 °C至-32 °C，因此如果要实现长期储存，就必须将温度降低到低于这个玻璃化转变温度。

第三个因素是添加稳定剂。这些稳定剂包括洋槐豆胶、瓜尔胶或纤维素胶，还有一些新型的稳定剂。它们的作用是增加未冻结相的粘度。这减缓了冰再结晶的速度，因为它减缓了水的扩散和冰的生长。

还有一些其他新型的添加剂可以防止冰转变为大晶体。其中一种叫做单硬脂酸丙二醇酯，它会吸附在冰晶的表面，防止其在温度波动

时生长。这种现象在自然界中也能看到，一些生活在寒冷环境中的昆虫、鱼类和植物物种，其血液和组织中含有可以控制冰生长的蛋白质。例如，许多鱼类在体内潜藏着微小的冰晶，但这些蛋白质能够防止晶体生长到足以造成伤害的程度。

添加香料如何改变冰淇淋的制造过程？

全球各地的冰淇淋有成百上千种不同的口味，一个重要的问题是香料会不会影响溶液或乳液。

例如，巧克力豆是惰性的，它与其他成分完全不发生相互作用。而草莓则会对系统产生很大影响，因为水果制品中的糖分含量很高。我们需要在水果制品中添加糖，以确保它比冰淇淋本身更软。但问题是，其中的一些糖会扩散到未冻结的水相中，从而降低其冰点。这意味着，由于额外添加的糖，即使配方完全相同，草莓冰淇淋会比香草冰淇淋更软。

另一个例子是酒精口味，从朗姆酒到百利甜或法兰杰利可酒，甚至红酒和啤酒，这些都非常受欢迎。但酒精会降低冰点，因此如果添加足够的酒精以获得所需的风味强度，产品就难以冷冻。在这种情况下，就需要减少酒精的用量，并多加一点去酒精化香料。

当前可以尝试用任何口味制作冰淇淋，但需要考虑这种口味的香料将对结构、保质期等方面产生的影响。

素食冰淇淋与乳制品冰淇淋相比，其制备和成分有什么不同？

很多方面都是相似的。素食也有乳化的脂肪来源，通常是椰子油或棕榈仁油，然后还有糖、稳定剂等，这些在乳制品冰淇淋中也会存在，不同之处在于蛋白质。牛奶蛋

白既是一种非常好的泡沫剂，又是一种非常好的乳化剂(乳化剂和泡沫剂是能够稳定泡沫和乳液的分子，这些分子附着在液滴或气泡的表面，防止它们彼此合并)。植物蛋白则很难做到这两点，所以在腰果、杏仁或大豆基的产品中会发现额外的成分，以提供原本可以从牛奶蛋白中获得的功能。

用什么技术来研究冰淇淋？在实验过程中如何防止冰淇淋融化？

我们用于研究的仪器主要包括颗粒大小分析仪、电子显微镜和研究材料流动和变形的流变仪(图2)。首先是激光光散射技术，它能告诉我们关于脂肪小球和脂肪结构所需的所有信息。我们也大量地使用光学显微镜。具体是将显微镜放置在冰箱或冷却箱中，或者使用冷台，将冰淇淋放在载玻片上，放置在用液氮冷却的腔体内。电子显微镜方面，冷冻扫描电子显微镜(SEM)实验自身有低温装置，可以研究冰淇淋中的物相。

透射电子显微镜(TEM)实验方法稍有区别。TEM不在冷冻环境中进行实验，而是使用一种“固定”结构的化学物质，通常结合使用一种称为“临界点干燥”的技术对冰淇淋进行干燥，然后将其切成薄样本，并使用TEM进行研究。

经过几十年的冰淇淋研究，你仍然对此感到兴奋吗？

当然。我很幸运地有机会去过很多有趣的国家，每到一处我都会观察冰淇淋市场的情况。这不仅仅是出于专业考量，我也想了解世界各地的动态，以便与他人分享。但当然，冰淇淋怎么会有错呢？这种产品太有趣了，能够与之关联真是太好了。