

固体氦是超固体吗？

(北京大学 林熙 编译自 Robert Hallock. *Physics Today*, 2015, (5): 30)

一些新实验指出，氦原子(${}^4\text{He}$)能流过装满固体 ${}^4\text{He}$ 的样品腔。然而，这样的流动尚未被完全理解，并且不同于10年前令人激动的固体内部类超流运动。

一个奇怪的相变

氦(${}^4\text{He}$)是一个不寻常的元素。在一个大气压下，温度降至4.2 K之前， ${}^4\text{He}$ 都能保持气态。如果继续对液体 ${}^4\text{He}$ 降温，2.2 K时它将经历一个相变进入超流态。因为量子力学零点能，即使将 ${}^4\text{He}$ 降温到物理学家所能实现的最低温度，它依然保持液态。仅在极低温与高压(最少25个大气压)条件下， ${}^4\text{He}$ 才能固化。

1970年前，理论学家 Alexander Andreev 和 Ilya Lifshitz 提出，固体可能通过一个奇怪的相变进入一个新相，此时晶格与玻色—爱因斯坦凝聚可以共存。同时，一些理论学家认为固体 ${}^4\text{He}$ 具有可移动的基态空位。既然空位移动来自原子的移动，Chester 和其他理论学家猜测固体也能有类超流的性质： ${}^4\text{He}$ 原子也许能在有序的固体态中相干地移动。

这些令人震惊的预言很快唤起了实验上的兴趣。理论学家 Anthony Leggett 设计了一个简单的实验：将装满固体 ${}^4\text{He}$ 的样品腔放在一根扭杆的一端，测量其扭转振荡周期与温度的关系。如果一些 ${}^4\text{He}$ 原子脱离了固体，它们所引起的转动惯量改变将通过扭转振荡周期的改变显现出来。类似的实验技术曾用于测量液体 ${}^4\text{He}$ 中的超流。

1980年前，实验学家开始探索固体 ${}^4\text{He}$ 是否有不寻常的地方。Greywall 挤压固体的压力差实验和

Bishop, Paalanen 和 Reppy 的扭转振荡实验，都认为不存在一个新的固体态。因为这些工作，在之后的20年里，人们寻找超固体的热情不高。1997年，Goodkind 在掺杂的固体 ${}^4\text{He}$ 中发现了异常的声学信号，此异常信号被解释为玻色凝聚态的出现，这个实验重新点燃了人们寻找超固体的激情。

仅有少数人关注了此声学异常，宾州州立大学的 Moses Chan 是其中之一。2004年，他和学生 Eunseong Kim 报道了一系列扭转振荡测量实验。早期的理论工作预测空位有利于超固体的出现，因此在 Kim 和 Chan 的早期实验中，样品腔里放满了 Vycor：一种大表面积的纳米尺度多孔玻璃。他们认为，固体 ${}^4\text{He}$ 晶格与 Vycor 的表面不匹配，因此固体 ${}^4\text{He}$ 中将出现大量的空位。他们很快发现了异常的实验现象，如图1所示，当温度降低到低于0.15 K 时，大约有1%的 ${}^4\text{He}$ 不参与转动惯

量的贡献，这些与理论预言一致的现象，被认为是通往超固体的相变证据。在一系列的对比实验之后，Chan 和 Kim 宣布超固体可能被观测到了。

难以捉摸的超固态

世界范围内数个实验组开展了与 Kim 和 Chan 类似的扭转振荡实验。相同的周期改变规律被观测到了，也同样被认为是由超固体中去耦合质量不参与转动惯量的贡献所引起的。超固体相关实验现象的确认轰动了凝聚态物理领域。然而不参与转动的质量，其百分比在不同的实验装置中相差4个数量级。

James Day 和 John Beamish 测量了固体 ${}^4\text{He}$ 中的剪切模量，发现其温度依赖关系非常类似于扭转振荡周期与温度的依赖关系。他们认为，低温下的位错使固体 ${}^4\text{He}$ 变得更硬。位错被固体 ${}^4\text{He}$ 中的 ${}^3\text{He}$ 杂质所钉扎，尽管 ${}^3\text{He}$ 的含量可能低达千万分之二。

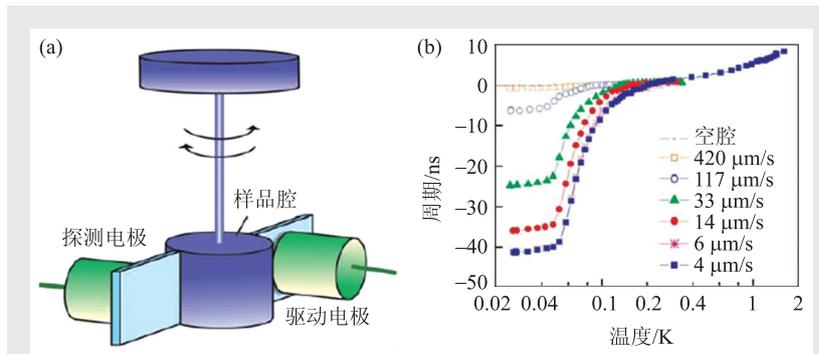


图1 (a)扭转振荡实验示意图。转动惯量的改变与振荡周期变化有关；(b)Kim 和 Chan 的实验数据图。随着温度改变，共振周期有明显改变，并且其规律与液氦中的超流相变类似

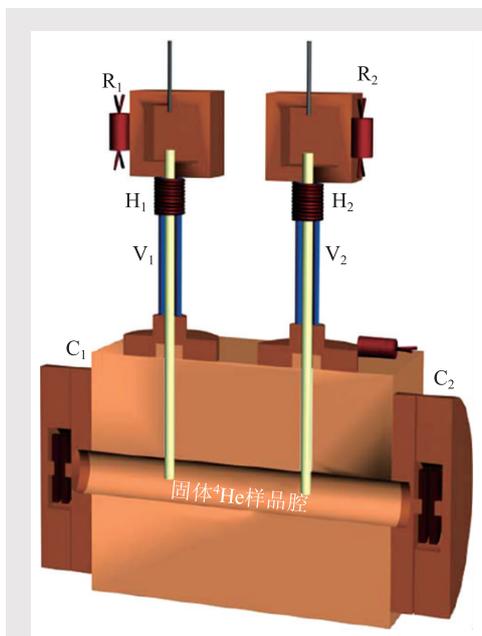


图2 UMass三明治被用于探测是否有流体能流过一个充满固体 ${}^4\text{He}$ 的样品腔。 R_1 和 R_2 为超流体区域，它们通过一个固体 ${}^4\text{He}$ 样品腔连接在一起。固体 ${}^4\text{He}$ 就是三明治的“肉”

Day和Beamish的工作引出了如下问题：是超固态引起了剪切模量的变化，还是结构的变化产生了超固态？一个更为麻烦的问题也浮现了：是不是所有观测到的实验现象都完全来自结构性效应，超固态根本就不存在？早期的计算发现，结构性效应不足以解释观测到的周期改变，超固态的存在依然得到支持，但是Day和Beamish的工作还是引起了人们的一些警惕。可是，Humphrey Maris的一轮新计算让结构性效应更加受到重视。这套计算表明，固体 ${}^4\text{He}$ 的结构性变化也能影响样品腔本身的转动惯量测量。不过争议依然存在，人们还是不确定这个机制是否足以解释现有实验。

对于此争议，实验学家用更硬的样品腔开展相同实验，并且发现，伴随着更硬的样品腔，更小的超固体信号被观测到。2012年，宾州州立小组重新设计了扭转振荡实

验，在此新样品腔中测量到的去耦合质量大幅度减小，小到与该实验的不确定度相仿。于是，宾州州立小组收回原有说法，认为在装满Vycor的样品腔中不存在超固体。宾州州立大学的Chan进一步宣布，在常规固体 ${}^4\text{He}$ 中也不存在超固体，至少在百万分之四的精度上不存在。

双共振周期的扭转振荡实验最早由Haruo Kojima开展，此实验能将超固体的出现与固体 ${}^4\text{He}$ 变硬两种效应区分开。后来，不同的实验组开展了此类实验，支持与不支持超固体存在的实验结果均出现了。不管如何，扭转振荡

实验已经无法提供足够令人信服的超固体存在的证据。

研究固体 ${}^4\text{He}$ 还有其他实验手段。新压力差实验与Greywall的实验类似，未发现固体 ${}^4\text{He}$ 的流动。第四声测量(用多孔材料缩住正常成分，只允许超流成分移动的声学模式)也未发现超固体存在的证据。

越来越奇妙

超流相变的一个特征是比热峰。Chan和他的实验组在固体 ${}^4\text{He}$ 中发现了一个比热峰，这个峰出现的温度与扭转振荡实验中周期变化的特征温度相近。与之前扭转振荡实验不同的是，这个比热峰所在的温度不随 ${}^3\text{He}$ 杂质的含量变化。这个比热峰背后的物理依然需要被完全理解。

与固体 ${}^4\text{He}$ 相关的其他特性也缺乏解释，比如Kimitoshi Kono在旋转的制冷机上开展的扭转振荡实验结果、Kubota的涡旋模型相关实

验、Candela和Sullivan的核磁共振实验等。

UMass三明治

作者Robert Hallock和其合作者采用了一个不同寻常的研究方案。与前人直接挤压固体 ${}^4\text{He}$ 不同，他们将固体放置于两个超流体区域之间，并且在两个超流体区域间产生化学势差，例如，在一个超流液体区域上加压。如果氦原子能通过固体 ${}^4\text{He}$ ，那么他们将在另外一个超流体区域也观测到压力上升。实验装置如图2所示，被称为UMass三明治。

实验发现有流动通过固体，并且流量大小与温度有关。当固体样品小于 0.6 K 时，流量随温度下降而增加，并且此现象在多个样品中出现。在大约 0.1 K 时，流量迅速下降，这个特征温度与 ${}^3\text{He}$ 杂质的浓度有关。在 ${}^3\text{He}$ 浓度足够高时，流动被完全阻止。类似现象也被Beamish和Chan在实验上分别验证了。UMass三明治的实验结果与液体流经位错核的理论预测一致，然而，无法用于证明此理论的正确与否。

一条曲折的道路

令人感兴趣的问题依然存在。例如，在UMass三明治中，谁在携带流体，如何携带流体，为什么 ${}^3\text{He}$ 能阻止流动？我们依然处在一个未完全了解的领域。

固体 ${}^4\text{He}$ 的故事还没有结束。它能以超固体形式存在吗？如果能，超固体将与理论学家40年前设想的物态不一样。这条理解的道路很曲折，真实的故事不像教科书或者综述文章中的历史回顾——它们会用最直接的方式介绍一个问题的最终解释。然而，真正通往发现的科研之路是激动人心的，特别是当与坦率而友好的同行们一起前行时。