

超固体的回归

(北京大学 林 熙 编译自 Stephen Ornes. *Physics World*, 2017, (2):24)

在2004年的误报之后，两个课题组可能报道了超固体的第一次观测。超固体是一个理论预言的物态，它是固体同时又是超流体。超固体也许现在能跻身于如超导体和超流体之类的奇异的基础物态之列。

固体保持形状，液体可以流动，这是我们小时候学到的知识。固体在空间中占据特定的位置，它的分子的位置也是固定的。液体的形状取决于它的容器，它的分子在不停地运动。然而对于理论上预言的仅在极端条件下存在的物态超固体，它并不符合这样的规定。超固体的描述是矛盾的：它形成刚性的晶格结构，理论又预言它的一部分物质的行为像超流体——一个能像液体一样流动但没有粘滞的量子态。这些特性让超固体能做室温下

“平凡”世界中无法实现的事情，比如没有阻力地流过自身。

尽管俄国物理学家 Alexander Andreev 和 Ilya Lifshitz 在1969年首先预言了超固体能在接近绝对零度的氦中存在，明确的证据一直很难获得，这个令人困惑的物态很大程度上只存在于理论的领域。然而，两个独立的课题组(美国的MIT和瑞士的ETH)最近报道了超固体的存在。这两项工作均暂时发布在arXiv预印本系统上(arXiv:1610.08194; arXiv:1609.09053)，尚未发表在需要同行评议的杂志上。

两个组获得超固体的方法均基于玻色—爱因斯坦凝聚态(BEC)而不是基于氦。BEC是一个奇特的物态，它只在一堆玻色子接近绝对零度时才出现。这两个几乎同时的报道采用了不同的实验方法，这个消息令人激动不仅仅是因为超固体也许现在能跻身于如超导体和超流体之类的奇异的基础物态之列，也因为从理论预言到实验证据之间那漫长而艰辛的过程。

一个不真实的开始

这次最新的报道

并不是物理学家们第一次觉得自己得到了超固体。2004年，美国宾州州立大学的物理学家 Moses Chan 和他的学生 Eun-Seong Kim(译者注：此处人名有误，应该是 Eunseong Kim)报道了氦4中非同寻常的一些实验结果。在低温下，氦4要么形成固体(在高压下)，或者形成超流体(在标准压力下)。Chan 和 Kim 的实验测量了固体氦4的转动惯量，在极低温下转动惯量减少了，这意味着参与转动的质量减少了。这个变化与1969年 Andreev 和 Lifshitz 的预言一致，他们也是预测部分氦将没有摩擦力地流过剩下的氦固体。其他组也重复了这个实验并获得了同样的结果，这让凝聚态物理界激动不已。可是，对于 Chan 和 Kim 的实验结果，人们有争议。2006年，美国康奈尔大学的物理学家 John Reppy 和他的学生 Sophie Rittner 发现固体氦中转动惯量所对应的信号和固体氦中的缺陷有关。2007年，加拿大阿尔伯特大学的物理学家 John Beamish 提出，固体氦不够刚性、有很大的柔软性，所以其中的一些原子能相对滑移，一样可以得到类似转动惯量减少的实验结果。Beamish 和法国的 Balibar 通过实验支持了这个新观点。

最终，Chan 为这一系列工作划上一个句号，他重新设计实验去验证这个可以替代超固体的解释。2012年，在新实验设计的基础上，

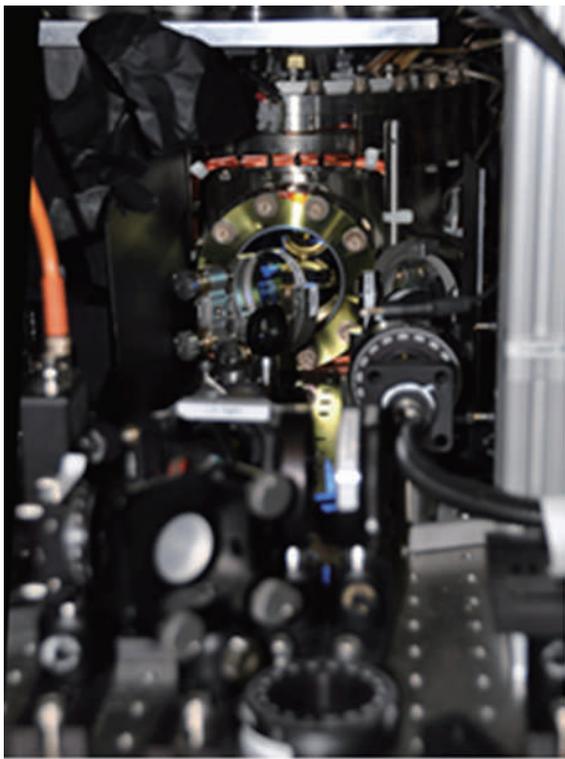


图1 冷原子实验的主真空腔：MIT Wolfgang Ketterle 实验室的新装置

他报道了没有支持转动惯量变化的证据，因而他没有发现超固体存在的证据。“这是科学史上非凡的一个篇章”，德国斯图加特大学的物理学家 Tilman Pfau 说，“一个作者提出观点，观点有争议，然后他重新设计实验，发现自己错了，还公开承认错误。”

新实验

尽管一些科研工作者继续在氦中寻找超固体，很多其他实验室通过 BEC 寻找超固体。基于印度物理学家 Satyendra Bose 的理论工作，Albert Einstein 于 1924 年最先提出 BEC 的存在，然而直到 1995 年，第一个 BEC 才在美国科罗拉多的一个实验室被产生出来，所用的方法是，用激光和磁场局域住一些铷原子，并将它们尽可能地降低温度。在接近绝对零度时，这些分立的原子开始集体表现得像一个巨大的超级原子：一个在最低能级的量子存在。BEC 的发现和测量让包括 MIT 的 Wolfgang Ketterle 在内的三人获得了诺贝尔奖，他的实验室也是这次发现超固体的两个课题组之一。

物理学家通常用对称性破缺来描述相变。形成晶格和形成超流态都伴随着对称性破缺，所以形成超固体需要两种对称性被同时破坏。超固体是两种不同的互相矛盾的有序在进行奇怪的竞争。一个有序是固体本身，原子得按晶格排列，另一个有序来自超流，这时候原子占据同一个量子态。所以，Balibar 说，“超固体中的原子又得局域又得非局域，又得可分辨又得不可分辨。”

从 BEC 体系开始寻找超固体的好处是，BEC 的行为和超流体的行

为很像，并且 BEC 中的原子相互作用可以调节。ETH 的 Tilman Esslinger 将 BEC 用激光局域，光子和原子的相互作用让 BEC 能自组织排列，这就很像固体的特征了，而 BEC 整体而言像一个超流体。Balibar 说这个结

果看起来是“可信”的，“显然有一个基本的效应存在于这个实验体系中”。同时，他还说尽管 Esslinger 组宣称有自发对称性破缺，他期望有更好的确认，“对于我而言，这并不是完全显而易见的”。MIT 的 Ketterle 组则利用自旋和原子的相互作用，发现了 BEC 中的干涉，这样的密度调制破坏了平移对称性，也类似于固体。日本 Okinawa Institute of Science and Technology 的物理学家 Thomas Busch 说，理论工作者几年前预测了超固体条纹的存在，对于这个领域的同行而言，实验上的验证是一个令人振奋的消息。

尽管这两个组的工作都提出支持超流态存在的说法，然而他们并没有真正证明一个材料能流过这个材料本身。

超固体之外

发现新物态是冷原子研究多年来的一个驱动力，增长中的新物态名单包括超流体和超导体，超固体是最近加入的奇异材料。因为科学家们已经在 BEC 上工作多年了，他们很清楚如何去调控它以探索基础

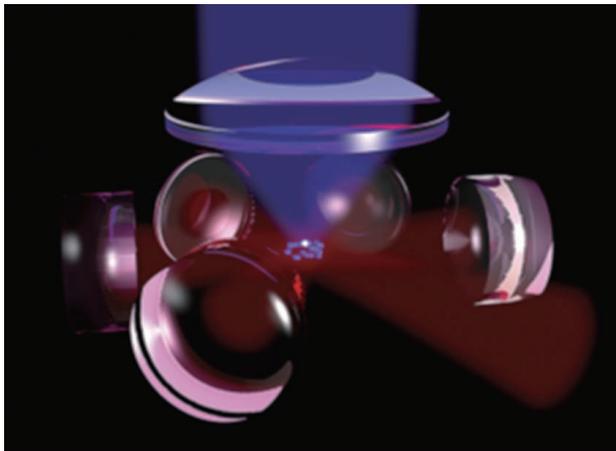


图2 交叉点：由激光局域的玻色—爱因斯坦凝聚态是产生超固体的一个方法

的物态。然而，他们的工作才刚刚开始，他们在寻找确定其他新物态和探索新物态各种性质的方法。“这些体系自身的行为如何？它们如何应对外界的激励？如果我们挤压它们会发生什么？”，Busch 说。他还说，物理学家想要研究不同长程相互作用的效果，以及更好地理解杂质对物性的影响，例如，在半导体中通过掺杂引入杂质能影响材料的传导并且让半导体有特定用途。在 Ketterle 组的工作中，一些可能的研究方向也被提及，例如将他们的工作扩展到二维自旋—轨道耦合体系。

像超固体这样奇异的物态，在极端条件下有新奇的、难以解释的物理现象。“冷原子中的物理像在模拟一些难以计算、但是很好规定的基础问题”，Balibar 说。理论也许预测了理想物质中一系列的未发现特性，然而在极端条件下控制这样奇怪的材料很难。“真实的物质有缺陷和表面态”，他还说，“所以我们对真实物质的了解还远不完整。”