

在膨胀超冷原子气中发展出量子有序

(中国科学院理化技术研究所 戴闻 编译自 Stephen R. Clark. *Physics*, October 19, 2015)

“远离平衡”状态在我们生活中普遍存在。在生命科学、经济学，乃至物理学中，它产生无穷无尽的复杂效应、丰富的概念和现象。的确，非平衡态物理包括许多领域，例如：关于早期宇宙的研究，在重离子碰撞中夸克—胶子喷注的产生，在致密流体中玻璃的形成，以及固体中激光驱动的对称破缺。然而，对非平衡现象的解释经常会出现歧义，因为非平衡效应缺乏一个通用的组织原则。基于这个原因，系统的动力学实验(可以控制在微观水平上，并且能够很好地与环境隔绝)对于获取具体答案变得越发重要。

最近，来自德国慕尼黑路德维希马克西米利安大学的 Ulrich Schneider 和他的同事，用冷原子气体第一次周密地观察了一个非平衡现象——动力学准凝聚。这是一个微妙的量子长程有序，现在被看到在膨胀的冷原子气中自发地出现。

当物理系统中相互远离的部分以某种方式关联，长程有序便可发生。有序可以起源于量子力学，玻色—爱因斯坦凝聚就是这样一个例子。在冷原子系统中，在某一温度以下，玻色统计会迫使宏观数量的玻色原子聚积在同一个量子基态。由此产生的平衡状态，具有长程位相有序。这意味着，如果来自系统两个远离部分的物质波发生交叠，干涉条纹将出现。真正的凝聚要求这样的有序独立于距离。然而，如果玻色子被限制在一个二维平面或一维管中运动，它们将代之以形成准凝聚相，因为它们的长程位相有序随距离增加按幂律下跌。

理论预言，在一维晶格中，填充的玻色子可以在相邻格点之间跳跃。对一维设置，玻色子准凝聚将会动态发展。下一步，理论研究者设计了系统的初始状态。首先是一个布满冷原子的中心区，区内每个

格点占有一个玻色子；而区外的格点都是空的。这是一种高度激发态，并且当玻色子从中心区突然扩展到周围空旷的区域，状态将随时间演变。研究发现，这种扩展很快导致玻色子占据动量态的劈裂，即劈裂成 $k=\pm\pi/2a$ 两个态，每态各有 50% 的冷原子，其中 a 是晶格间距。

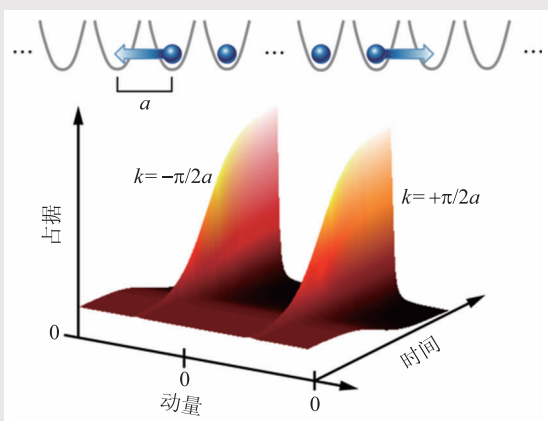
在整个格点区，将看到玻色子沿一条条直线运动，一半向左，一半向右。

Schneider 等首先实现了 100000 个玻色钾原子的玻色—爱因斯坦凝聚，然后将它们装入一个三维光学晶格。由于激光强度低，晶格势阱浅，且原子将在格点之间隧穿，在整个系统中玻色子是离域的。然而，随着激光强度的增加，势阱深化。这种深化遏制了隧穿，更紧密地束缚原子于阱中，增加了占据同一格点的原子之间的斥力。对于足够深的晶格势阱，原子将完全局域化，系统成为绝缘体。

Schneider 等布居冷原子于晶格中心区(每格点一个原子)，而区域外围的格点保持空着。研究人员随后迅速降低沿一个轴向的激光强度，从而将系统转化为由独立的一维链组成的二维阵列。由此产生的较低的势阱深度允许原子沿链跳跃。原子膨胀发生在一个势能尽可能平坦的一维管道，形成弹道扩展。通过对原子云的光吸收成像，作者实时测量了原子密度随时间的演化。

最后，当膨胀完成，研究人员移去所有的捕获，使用飞行时间成像技术，重构原子云的动量分布。他们观察到，清晰的动量峰非常接近 $k=\pm\pi/2a$ (见图)。图像表明这两个态被充分占据，占据随时间变得越来越显著，与理论对准凝聚的预言一致。

更多内容详见：L.Vidmar et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 115: 175301.



在 Schneider 和同事的实验中，一个长的一维钾原子晶格链(蓝色球)被制备，使之处于一个特定态：中心附近的晶格格点，精确地按照每格点一个原子填充，中心区外围的其余格点是空的(灰色抛物线代表势阱)