

融入凝聚态世界的时间晶体

(浙江大学 万歆 编译自 Peter Hannaford, Krzysztof Sacha. *Physics World*, 2020, (3): 42)

普通晶体破缺了空间平移对称性，而时间晶体则破缺了时间平移对称性。探索四维时空中晶体行为是一个崭新的研究方向，将会带来创新性的凝聚态器件和应用。

在计算机芯片或是超导器件的内部，无数的电子在排列成晶格的离子间穿梭而过。这样的景象会不会在时间而不是空间中周而复始呢？传统的凝聚态器件或是电子元件会不会有四维时空中的新奇应用呢？

麻省理工学院的诺贝尔物理学奖得主维尔切克(Frank Wilczek)在2012年题为《量子时间晶体》的开创性工作中提出了一个问题：时间平移对称性，也就是说不同时刻的等价性，会不会在量子力学的低能态中出现自发破缺？如果说空间平移对称性的自发破缺导致了晶体的形成，时间平移对称性的破缺就会演生出时间晶体。

这个看似奇怪的想法激发了人们对时间维度中晶体行为的思考。波兰物理学家萨查(Krzysztof Sacha)提出可以在周期性驱动的非平衡量子多体系统中实现时间晶体。考虑在周期性振荡的原子镜面上弹跳的玻色—爱因斯坦凝聚体，镜面的驱动周期建立了离散的时间平移对称性，而粒子间的相互作用导致了系统对外力的响应周期是驱动周期的两倍。这种周期倍增的现象在经典受驱振荡系统中是为人熟知的。但在量子的世界中，薛定谔方程的稳态解则是遵循外力周期的。这就是说，系统自发地破缺了离散的时间平移对称性，选择了有不同周期的稳态运动。

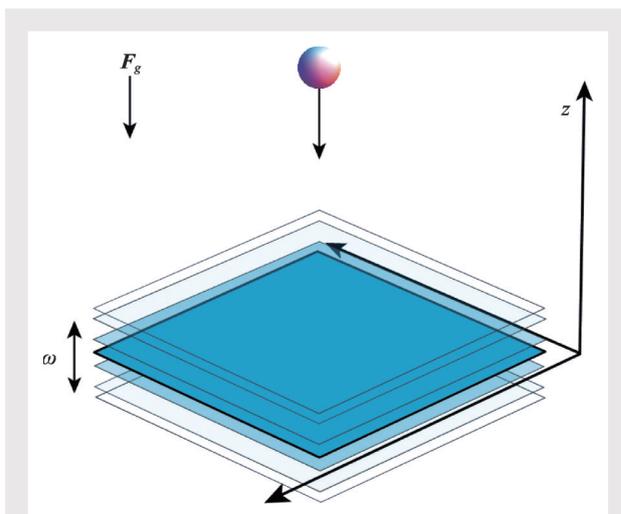
美国和德国的物理学家考虑了

束缚在离子阱中的粒子，它们同时受到周期性自旋反转驱动脉冲，自旋间的相互作用以及受控自旋无序。同样，粒子自组织产生有两倍于驱动周期的运动。从能量的角度来看，在一般系统中周期性驱动导致能量的不断吸收，使系统温度上升至无穷大。而在实现时间晶体的自旋链系统中，无序和粒子间的相互作用破坏了各态遍历性，引起多体局域化效应的产生，热量无法在系统中自由传递，从而阻碍了能量的吸收。

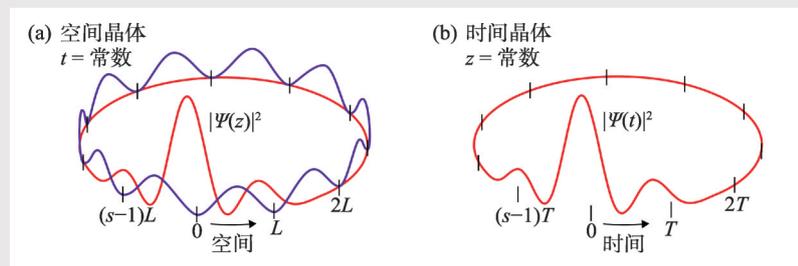
物理学家们在很多量子系统中观测到了时间晶体的实验证据。实验系统包括相互作用的镱-171离子链，金刚石中相互作用的氮-空位自旋中心，有机分子溶液中的核自旋，以及磷酸二氢铵晶体中的磷-31自旋。特别值得一提的是荷兰乌特勒支大学的范德斯特拉滕(Peter van der Straten)及其合作者制备的同时具有时间和空间周期性结构的时空晶体。这个实验中，研究人员在拉长的束缚阱中制备了钠-23超冷原子的玻色—

爱因斯坦凝聚态。当径向势阱频率突然变化后，凝聚体的径向振荡提供了周期驱动力。这导致原子密度以两倍的时间周期在振荡，并同时展示出空间上的周期结构。

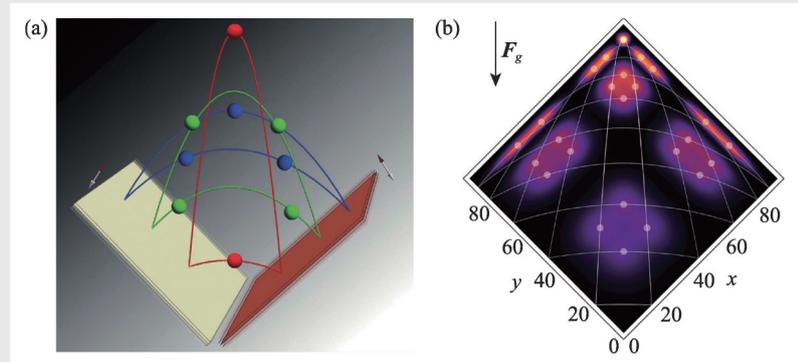
与空间晶体相同，时间晶体验证了固态系统的一条重要性质：平移对称性的自发破缺导致周期结构的形成。在空间晶体中因而会出现电子能带和能隙，导致晶体可以是导体或是能带绝缘体。但如果晶体中离子位置的无序足够强，电子的不同散射路径会产生破坏性的干涉，导致电子的局域化，从而阻碍导电。这就是物理学家安德森(Philip W. Anderson)在1958年预言的安德森局域化。在时间维度中，安德森局域化同样可以存在。对于在受驱



原子镜面系统示意图。在振荡镜面上弹跳的超冷原子是实现离散时间晶体的一种系统。原子镜面可以通过蓝失谐的光片层来实现(图片来源于 Artur Mirowszewski)



安德森局域化。(a)具有周期性边界条件的一维空间晶体中波函数可以局域在空间某处；(b)空间某处的波函数可以在时间维度中局域在某个时刻附近



二维时间晶体。(a)在两面互相垂直并振荡着的镜子之间共振弹跳的原子；(b)可以用二维玻色—哈伯德模型来描述的时间晶格照片

动的原子镜面上弹跳的超冷原子，原子镜面振荡在时间上的无序可以被高度受控地引入，就好像用随机颤抖的乒乓球拍在颠球。作为安德森局域化的潜在应用，有涨落的驱动力可以用来调控量子系统在指定的位置上出现的时刻。

在凝聚态世界中，物理学家利用晶体空间维度的不同和粒子间相互作用的变化来制备了各种用途的器件。时间维度中的调控也可以用来设计物理系统的性质。这里我们可以把周期性驱动的系统类比为荡秋千的孩子，共振现象发生在当孩子驱动秋千的频率是秋千摆动频率的整数倍时。动力学系统理论对这种共振周期轨道附近的行为已有透彻的理解。当整数倍数很大时，在和秋千一起运动的参照系里，可以在时间维度上观察到类似于电子在

一维周期性晶格中的运动。值得注意的是，就像我们观测晶体在给定时刻的空间结构，我们关注时间晶体在给定空间位置上随时间变化的行为。在凝聚态的真实世界里，这里的秋千应该是量子秋千，比如弹跳着的超冷原子。如果能让量子秋千同时被共振频率及其半频驱动的话，我们还可以实现时间维度上的苏—施里弗—黑格(Su—Schrieffer—Heeger)晶体。这是凝聚态物理中一种热门的拓扑绝缘体在时间晶体中的对应，可能在电子学、自旋电子学和量子计算等领域找到潜在的应用。

如果我们考虑的是有相互作用的超冷原子形成的时间晶体，那么系统就可以用玻色—哈伯德(Bose—Hubbard)有效模型来描述。调节周期性的驱动可以让我们设计和控制粒子在相邻时间格点间的隧穿速

率，而通过磁场调节碰撞原子间耦合的费什巴赫(Feshbach)共振则可以精准控制粒子间的相互作用。尽管中性超冷原子之间的相互作用是短程的，在时间晶体的玻色—哈伯德有效模型中，相互作用可以是长程的和可调控的。这是因为在时间演化中不同波包在共振周期轨道上穿梭而过，在时域中调制短程相互作用，可以设计出奇异的长程相互作用，产生常规空间晶体系统中不存在的新奇量子现象。

尽管时间是一维的，我们同样可以制备具有二维或三维性质的时间晶体。如果让原子在两面互相垂直并振荡着的镜子之间弹跳，共振动力学可以用二维时间晶体的玻色—哈伯德模型来描述。镜子间某一点上的探测器在时间维度上观测到的行为，就是玻色—哈伯德晶格中一条切线上的性质。通过在不同位置的探测，我们就可以研究受驱动系统动力学中演生出的二维凝聚态现象。

对原子镜面的调制不仅可以产生时间晶体，还可以实现在时域中没有任何周期却有长程序的准晶，例如像向日葵花盘图案的斐波那契(Fibonacci)准晶。这种准晶既可以用在单片振荡的镜面上弹跳的原子来模拟，也可以通过在两面互相垂直的振荡镜面上弹跳的原子来实现。

凝聚态的世界已经进入了四维时空。这个引人入胜的新奇研究方向可能带来创新性的应用，例如用时间晶体来实现自然界中不存在或是空间光学晶格无法模拟的奇异长程相互作用。“时间工程”这一领域正在开启。我们期待时空中的晶体结构，或者说把动力学过程和晶体结构结合起来，可以带来前所未有的器件。时空电子学呼之欲出？