

# 探寻时间晶体

(西安交通大学郭启溟、清华大学尹璋琦 编译自 Philip Ball. *Physics World*, 2018, (7): 29)

不可否认，新科学想法的吸引力往往取决于名字，就如大爆炸、黑洞和暗物质那样。但这些名字没有一个能像带有《神秘博士》风格的“时间晶体”那样引发共鸣。2012年由诺贝尔物理学奖得主弗兰克·维尔切克提出的“时间晶体”，已与许多深刻的物理学主题，如时间对称性、量子力学以及无序等密切相关。

晶体通常由原子或分子在空间中规律排列而成。不同于空间上的周期性，时间晶体在时间上表现出周期性。时间晶体具有不断周期重复的动力学行为。尽管维尔切克关于时间晶体的最初概念“物质自发展现出时间周期性”不再可行，但通过驱动系统远离平衡态，此想法的变形是可以实现的。去年，这种时间晶体首次在实验室中被实现。

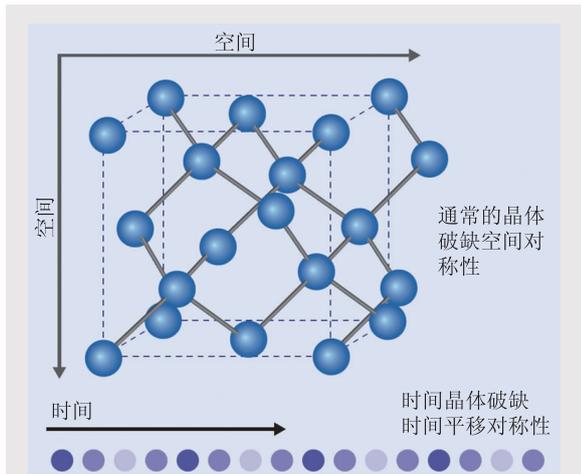


图1 普通晶体比如钻石，破缺空间对称性，因此不是晶格中所有位置都等价。如果你移动或者“平移”钻石的晶格任意距离，它将不会与原始晶格重叠。另一方面，时间晶体破缺“时间平移”对称性。如果你在时间上平移任意时间，系统将会变化，如果移动整数倍的周期，系统将会还原

最近，两种新时间晶体的发现，暗示它是材料的普遍特性。

时间晶体有什么用呢？它可用于制造高敏感度磁场探测器，乃至量子计算机。但它真正的价值是为物质的凝聚态行为提供更广阔的图景。

## 时间破缺

为理解时间晶体，让我们借助空间晶体。钻石破缺空间对称性，一些位置有碳原子，另一些则没有。如果“平移”晶格任意长度，将不会与原来的格点重叠。换言之，晶体破缺了空间平移对称性。但如果将晶格平移原子间距的整数倍，它们将会重叠，破缺的平移对称性具有周期性。

如果材料破缺“时间平移”对称性呢？维尔切克在2012年考虑了一个量子化粒子形成的环，研究环的基态能否破缺时间对称性。他认为，如果系统能破缺时间对称性，未必引发原子的运动，也可能是其他性质的周期循环，如自旋的方向。类似我们在空间中平移晶体，沿着时间平移时间晶体将会让系统周期性的远离又回归初态。

这种自发连续的运动听起来像“永动机”。但并非如此，我们知道量子基态允许一类持续的运动：超导环中的永恒电流，它的状态不依赖

于时间，而时间晶体中的自旋沿着“维尔切克环”不断地循环翻转，就像比赛中欢呼的人潮。

## 时间谜题

2015年，加州大学伯克利分校渡边悠树和东京大学的押川正毅证明了没有物理系统能在基态形成时间晶体，之前不久在欧洲同步辐射装置工作的帕特里克·布鲁诺也提出了类似的意见。他们认为振荡系统的能量耗散无法避免。难道时间晶体仅仅是诺奖得主徒劳的幻想吗？

不完全是。悠树和正毅承认他们的论证存在漏洞：在被周期性驱动推离平衡态的系统中，“时间晶体”是可以存在的。平衡态之外能获得具有周期的行为并不令人惊讶。例如，物种数量变化以及著名的“时钟反应”——只要不断加入新的反应物就可以持续进行。

事实上，周期性驱动调制的量子系统在之前就被人研究过。它们被归在名为弗洛凯(Floquet)系统中，得名于19世纪用数学方式研究它的数学家弗洛凯。

## 离散特性

2016年，普林斯顿与马普所的研究组展示了耗散的弗洛凯系统可以反直觉地产生周期性相位。研究者考虑自旋链系统，类似于开放版本的维尔切克环。“他们没有考虑到它与时间晶体之间的联系”，休斯说到。微软圣芭芭拉的实验室Chetan Nayak及其合作者，同时也提出了类似的方案。诺曼·姚和他的同事们将其称为“离散时间晶体”，“离散”源于其周期总是驱动周期的整

数倍。

离散时间晶体与其他非平衡周期性系统不同——虽然它们都需要驱动，但时间晶体不吸收或消耗能量，马里兰大学的克里斯·门罗说：“这是一个难以理解的概念，系统看起来处于平衡态，但并非如此。”

### 局域事件

这种被驱动而不吸收能量的能力源于无序，系统被囚禁在非平衡状态或被“局域化”了。这被称为“多体局域化”，源于菲利普·安德森在无序系统中的工作。

休斯说，多体局域化来源于能级的量子化。“以特殊频率驱动时，驱动力不会引发精确地共振，因此系统将会局域化，无法从驱动中吸收能量。”姚认为这一点是关键，一旦系统吸收能量，它将缓慢的热化，有序的状态都将最终消失。

看上去至少两个要素：无序以及较强的相互作用。这让门罗想起了他的专业方向：离子阱。为了实现时间晶体，需要在离子阵列掺杂无序的结构，“从而使得每一个离子量子比特都不同”，门罗说。这使得他们可以引入控制方法让离子阱成为理想的测试环境，将时间晶体与其他弗洛凯系统区别开来。

### 实验室中的时间晶体

门罗去年报道了离子阱中镱离子阵列的时间晶体特性。当使用激光脉冲激发自旋的转变时，镱离子链的自旋按照激光频率的整数倍振荡。更关键的是，这种反应的频率具有稳定性，这正是离散时间晶体的行为。与此同时，哈佛大学米哈伊尔·鲁金所领导的小组找到了一种产生有必要的无序的量子系统：随机分布的钻石晶格杂质。鲁金等人报道了一种基于室温下相互耦合的金刚石氮—空位中心电子系综的时间晶体。

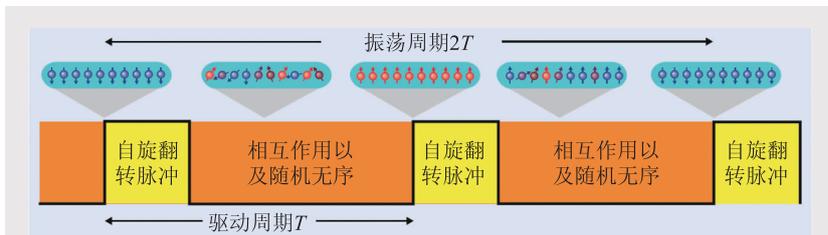


图2 2016年，加州大学伯克利分校诺曼·姚发布了一个关于制造和探测时间晶体的蓝图，并很快被马里兰大学的克里斯·门罗以及哈佛大学米哈伊尔·鲁金各自带领的实验团队付诸行动。在门罗的方案中，它涉及了一个激光激发下的一维离子链的自旋翻转。离子的自旋彼此之间通过磁相互作用互相影响，当激光脉冲打乱它们的取向时，就会产生局部的磁场无序。由于自旋之间不能交换能量，它们无法达到热平衡，从而被囚禁或“局域化”在一个非平衡态中。经过时间 $T$ 后，自旋将达到相反的方向，在磁场与激光重复的交替作用下，离子将打破时间平移对称性，这样的晶体将形成一个“离散时间晶体”。重要的是，即使脉冲并非完美的以 $T$ 为周期，系统振荡并回到初态的周期仍是 $2T$

展现离散时间晶体效应的材料不断增加。今年印度科学教育与研究学院 Ganesh Sreejith 等人报道了氢、碳和硅原子组成的有机分子在核磁共振下可能形成离散时间晶体。通过时间晶体以两倍于驱动频率的振荡频率发生着周期振荡，Sreejith 找到了时间晶体的显著证据。耶鲁大学的肖恩·巴雷特也有在 NMR 系统用磷酸二氢铵实现相同目标的想法。在无线电频段段的脉冲作用下，他们看到磷的自旋形成的离散时间晶体行为。

姚认为，NMR 系统只能探测较短的时间晶体现象，在长时间下将达到热平衡。重要的是，无论是磷酸二氢铵晶体还是星状分子，都存在无序。“因此多体局域化是更普遍的，或许它不是观测到离散时间晶体特性所必须的”，巴雷特说。

“不依赖于无序的时间晶体已经出现”，门罗这样说，“只需要足够复杂的相互作用。”某些条件下系统将永不会达到热平衡态：这种现象被称为“预热化”。他正在离子阱量子比特上试图实现它。

### 实际应用

这种在无序系统获得稳定周期的能力具有应用前景。“在那些混乱

且无序的系统中，涌现出非常稳定的特性有望用于制作某些时钟”，门罗说道。巴雷特补充说“如果我们能更深入地理解它，将可用于改进类似原子钟这样的量子技术。”

若时间晶体能帮我们更可靠地计量时间，那将极具诗意。鲁金认为离散时间晶体中耦合粒子间的量子纠缠将很稳定，不仅能抵御破坏纠缠的“退相干”，且对磁场扰动具有高敏感度。因此它可作为微型磁场传感器。粒子纠缠数目越多，系统敏感度越高。

姚也预见了一个应用。微软及其他的研究者正在试图通过“拓扑保护”使得量子比特保持稳定。姚认为，离散时间晶体有望在更高的温度实现它。他还有更大胆的想法：从经典物理出发构建离散时间晶体。姚和他的合作者已经发现将噪音引发的无序与强的相互作用结合，在经典粒子链上有望实现离散时间晶体。

什么是时间晶体真正令人激动的地方呢？它展现了你从未想象的可能。更多神奇的结构已经产生，如“时间准晶”和“超流时间晶体”。给我们带来了充满奇幻与神秘的物质宝藏。