

时间晶体：一种新物态的探索

(上海交通大学 蔡子 编译自 Pedram Roushan. *Physics World*, 2022, (4): 24)

由于其迷人的魅力，晶体在过去几个世纪里一直吸引着我们的注意。人们所熟知的晶体，从雪花到钻石，通常都是由原子或分子在空间中规则排列所构成的。对晶体的研究帮助我们建立了一整套框架，可以用于理解其他的空间有序相，例如超导体、液晶和铁磁相。

周期性振荡是另外一个无处不在的现象。小到原子，大到行星，它可以出现在任何尺寸的系统。多年来，我们用它们来标记时间的流逝，它甚至让我们思考实现永动机的可能。空间和时间上的周期模式的一个共同特点是他们都降低了系统的对称性：周期结构明显破缺了时间或者空间上的连续平移对称性。

在物理学中，空间与时间通常具有密切的关联。因此如果一个多粒子体系能够显示出空间上的周期性，那么可以很自然地联想到这种周期模式是否能够自发地出现在时间维度。当系统的基态并不满足系统本身的对称性时，意味着系统发生了自发对称破缺。最为常见的例子便是在自然界中广泛存在的晶体，其连续平移对称性被破缺，取而代之的是空间中的离散平移对称性。

空间周期与时间周期

在过去的十年中，物理学家一直在思考，基态具有自发时间平移对称性破缺的系统是否能够存在。空间平移对称性的破缺似乎与时间平移对称性的破缺有着很大的不同。一般来说，空间成序的系统往往由多个相互作用的粒子组成，而

时间上呈现周期振荡的系统通常只有很少的几个自由度(图1(a))。事实上我们一般很难找到多个相互作用粒子一起周期振荡的例子。

是否可能找到一个相互作用的可以在无限长的时间内持续振荡的多体系统？虽然确实有一些多体系统中可以观察到集体同步的振荡，例如声子或质点弹簧系统，但是这些振荡在孤立的多体系统中一般无法持续。即使能够持续，往往需要对其初始构型进行高度调节，而这种对初态的高度依赖性使其不能构成一个新的物相。

在相互作用多粒子系统中时空周期性的显著差异有些出人预料，毕竟爱因斯坦的相对论已经将时间和空间统一成了一个整体。尽管通过洛伦兹变换将时空坐标联系起来，却并不意味着时空维度的完全等价，因为还存在着因果律的约束。

面对热力学第二定律

对于时间的正向、反向演化，或者对于一个给定的方程来选择任意的初始时间，物理基本定律都具有不变性。但热力学第二定律则是一个例外。

热力学第二定律告诉我们，任何一个孤立的多体系统都会自发地演化至其平衡态的构型，在此构型下我们不能通过对局域量的测量来分辨时间的流逝。这种在时间上具有的同质性与我们想要建立一个稳定的时间序(时间上的周期结构)相矛盾。这种矛盾使得对时间晶体的研究极具挑战性。

在一个开放系统中，系统可以与外界发生能量交换，封闭系统的熵理论不再适用，因而我们可以通过调节系统的参数来建立一个稳定的时间序。然而在我们的定义中，时间晶体是一个孤立相互作用多体系统，其可以在无限长的时间内进行振荡。因此系统中大量粒子自由度的存在是这一定义的关键。

举例来说，在超导体约瑟夫森结中观测到的振荡并不构成时间晶体。尽管这些振荡能够永久地持续下去，但是整个超导体的自由度十分有限：在极低温下成对的电子被绑定在一起形成库珀对，进而形成一种宏观相干态。其中，不同库珀对的相位自由度都被冻结，就像当我们翻转一个硬币时，其中所有的原子只能跟着一起运动，而不能各自独立运动。

十年探索

2012年，诺贝尔奖得主弗兰克·维尔切克第一次提出了一个机制来实现一种永久的周期振荡。他建议用小磁场穿过一个超导环，从而在其中产生一个无限期循环的电流。然而这个自发产生的电流虽然是一个永久的运动但并不是一个永久的振荡，因为在每个时刻，环上电子密度分布都是均匀且相同的。

维尔切克提出可以在循环流动的库珀对中引入一个比较弱的相互作用使得它们能够束缚在一起。这将会导致在这一系统的基态中，粒子密度在环上出现不均匀的分布，而这种空间不均匀的状态一旦出现

流动，会呈现出一种清晰的振荡(图1(b))。然而2014年，物理学家渡边悠树和押川正毅通过考虑系统在平衡态下所需要满足的一些隐含条件否定了这一结论。他们更进一步提出了“不可行定理”，该定理证明具有非长程相互作用的系统不可能在其基态或热力学平衡态下形成时间晶体。

局域化导致稳定

因此为了能够稳定地得到时间序，不可避免地要跳出平衡态的限制。一个最简单的解决办法是通过将具有周期性的脉冲施加到系统上使其远离平衡态。从表面上看，选择周期驱动的系统似乎违背直觉，因为这类系统一般会不断地从驱动中吸收能量并朝着熵最大的状态演化进而毁掉所有的序。然而最近的研究表明，如果系统本身具有一个很强的无序，则这种无序能够避免系统不同能级之间的能量交换，进而防止系统的熵一直增加。满足

这一条件的系统被称为多体局域化系统。

由于熵理论的存在，大多数系统会通过与外部环境进行能量交换抹除对初始信息的记忆，进而达到热力学平衡态。但是对于多体局域化的系统来说，无序结构会使其无法达到热力学平衡态，从而可以无限期地保留对初态信息的记忆。系统的熵最终稳定在一个较小的值，因此可以允许时间序的存在。

尽管存在周期驱动，能量的净流动却变为零，熵的稳定值会低于其可能的最大值(图1(c))。虽然热力学第二定律要求一个孤立系统的熵不会随着时间减少，但熵的饱和值低于其可达到的最大值并不违背该定律。热力学第二定律只要求系统熵的变化率始终不为负数，可以为零或其他正值。

借助多体局域化系统的稳定性

当一个系统处于平衡态时，它不会再与周围环境发生净的能量流

动也不会有新的熵产生。许多理论和实验的研究表明，多体局域化的系统也会有这些特性，但是其本质却与平衡态相差甚远。因此它可能是唯一可以产生稳定时间晶体相的系统。迄今为止，所有已知的经典系统都没有办法维持无限期的振荡。

多体局域化的系统究竟有多稳定？我们又能否确定它们不能达到最大熵的平衡态呢？事实上，迄今为止，二维和三维多体局域化系统是否稳定依然是一个有争议的问题。2006年美国的研究者指出，一维的多体局域化系统能够在任意级微扰展开下维持它们局域化的性质。然而，这并不能排除亚稳态的情况，很有可能只是系统的热化时间极长，才在有限时间下显现出局域化的特征。但是2016年，弗吉尼亚大学的乔治·帕里西在某些特定的系统中，对几乎所有非微扰的效应进行了排除，使得对多体局域相的研究有了突破性的进展。

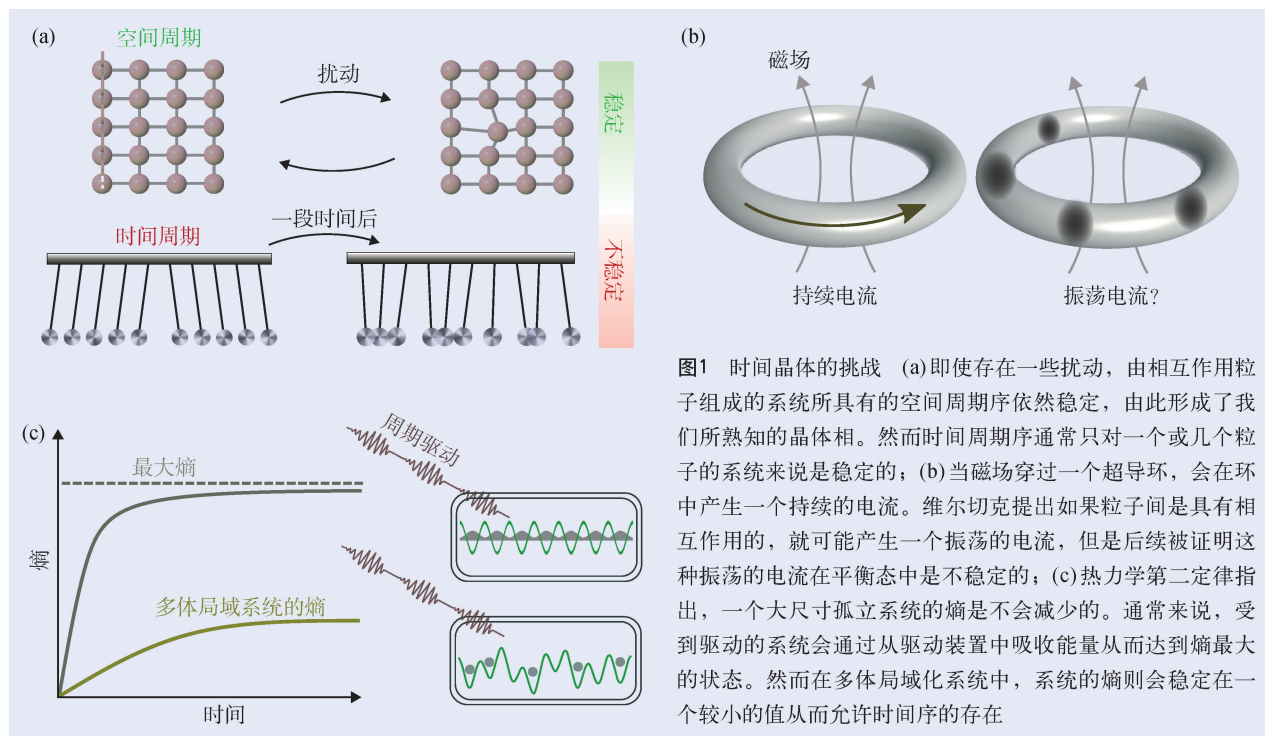


图1 时间晶体的挑战 (a)即使存在一些扰动，由相互作用粒子组成的系统所具有的空间周期序依然稳定，由此形成了我们所熟知的晶体相。然而时间周期序通常只对一个或几个粒子的系统来说是稳定的；(b)当磁场穿过一个超导环，会在环中产生一个持续的电流。维尔切克提出如果粒子间是具有相互作用的，就可能产生一个振荡的电流，但是后续被证明这种振荡的电流在平衡态中是不稳定的；(c)热力学第二定律指出，一个大尺寸孤立系统的熵是不会减少的。通常来说，受到驱动的系统会通过从驱动装置中吸收能量从而达到熵最大的状态。然而在多体局域化系统中，系统的熵则会稳定在一个较小的值从而允许时间序的存在

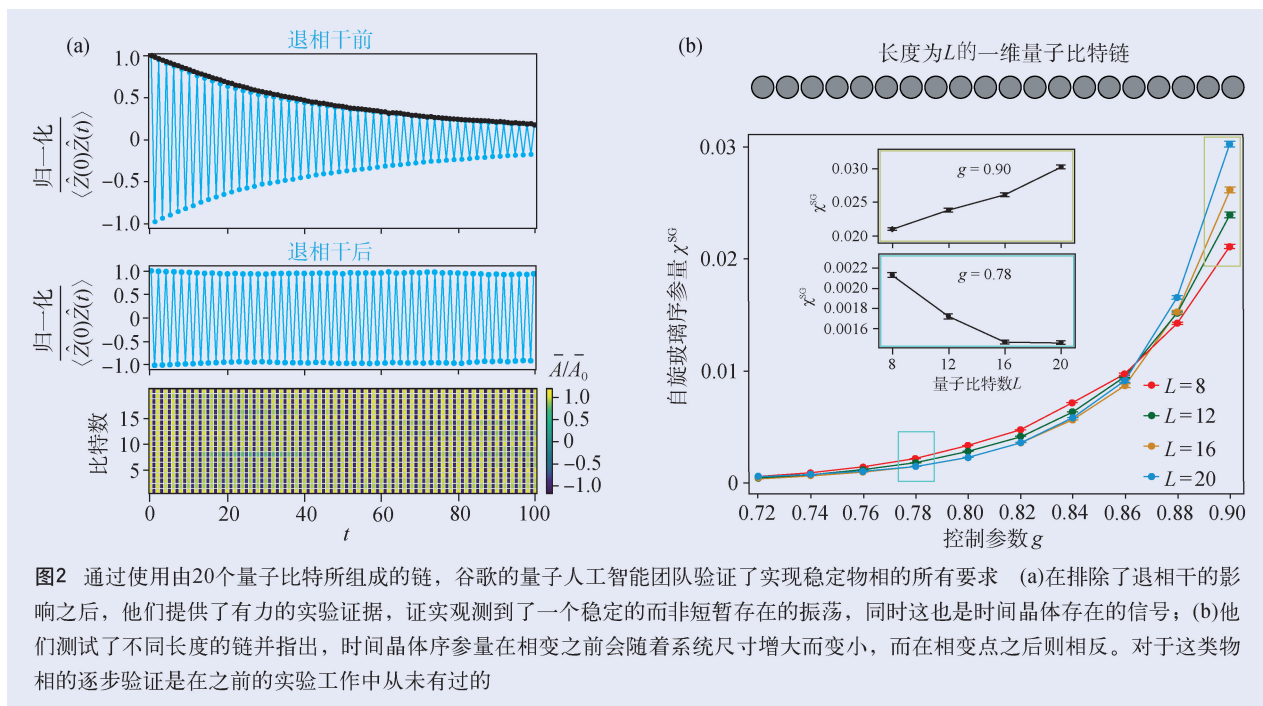


图2 通过使用由20个量子比特所组成的链，谷歌的量子人工智能团队验证了实现稳定物相的所有要求 (a)在排除了退相干的影响之后，他们提供了有力的实验证据，证实观测到了一个稳定的而非短暂存在的振荡，同时这也是时间晶体存在的信号；(b)他们测试了不同长度的链并指出，时间晶体序参量在相变之前会随着系统尺寸增大而变小，而在相变点之后则相反。对于这类物相的逐步验证是在之前的实验工作中从未有过的

建立一种新物相

即使我们已经观测到时间序存在的证据，但是将它称为一个新的物相需要满足一定的规范和要求。我们需要排除目前观测到的证据只是一个短时间行为或者只是一个在极小参数范围内精确调节结果的可能性。为了实现这一目的，我们将考虑以下4个因素来测试时间响应的刚性：(1)为了建立一个非平衡的物相，我们需要考虑系统在无限长时间这一极限下的情况；(2)在热力学中，物相只有在无限大尺寸的极限下才能被精确定义；(3)证明一个相具有稳定性需要保证它的本征模式对于施加在其运动方程上的任何微扰都是稳定的；(4)它不具有对初始构型的依赖性。

通过使用谷歌的“悬铃木”量子处理器，我们在噪音中程量子计算机上实现了第一个令人信服的对时间晶体相的观测，并通过了上述检验标准。(i)为了探究无限长的时间响应并证明观测到的振荡并不是

短暂的，我们设计了一个时间反转方案来区别内在的动力学与外部的退相干(图2(a))。这使我们能够从由20个量子比特组成的链中观测到稳定的时间周期序。(ii)为了证明观测到的振荡能够存在于更长的链中，我们演示了有限尺寸标度，从而能够确定相变的参数(图2(b))。(iii)我们也证明了这种序能够在很大的参数范围内被观测到，而且这个系统的确是局域化的。

最后，(iv)我们利用了“量子典型性”的概念来表明对于任何初态来说都会存在持续的振荡。典型性理论指出从希尔伯特空间中任意挑选出的一个纯态，对于该纯态计算物理量的期待值能够很好地符合运用统计系综平均所得到的结果。因此，利用典型性我们可以规避从整个能谱中抽样所花费的指数级代价，并有效地确定所有初态的响应。

实现一种动力学相

我们通过一种独特的方式在量子处理器上实现了一个时间晶体

相。因为所有的计算通常由处理器通过一系列被称为量子门的逻辑运算来实现。这种运算和系统本身的动力学并没有联系，在技术层面，预期的哈密顿量并没有在处理器上实现。在这种计算中，量子处理器的使用方式和经典计算机是大致相仿的。

然而，这种建立动力学相的方法有着根本的不同。问题在于一个稳定的相究竟是否能从一个含有驱动的多体孤立系统中产生。对于这类问题的探索，量子计算机是一个天然的平台。但是这一结果对于动力学相的完全实现仍然有一些距离：判断系统在热力学极限下的响应依然是一个巨大的挑战，因为系统的相干时间终归是有限的。这一工作的核心成就便是设计了一种实验方法为下一步的外推提供了基础。

正如这一结果中展示的那样，我们发展的方案具有一般性并且建立了一种可扩展的研究方法，可以被用于在噪音中程量子计算机上研究非平衡物相。