

数字化量子模拟拓扑时间晶体

王震^{1,†} 邓东灵^{2,3,††} 王浩华¹

(1 浙江大学物理学院 杭州 310058)

(2 清华大学交叉信息研究院 北京 100084)

(3 上海期智研究院 上海 200232)

2022-08-16收到

† email: 2010wangzhen@zju.edu.cn

†† email: dldeng@tsinghua.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20221106

处于非平衡态的量子多体系统中存在许多新奇的物理现象。对称、拓扑以及局域化等思想的引入，可以进一步丰富这类系统的相图^[1-3]。如何进一步深化对这些非平衡物质相的理解是一个广为人知的科学挑战：无论是在理论还是在数值方面，我们都缺乏有力工具来深入地研究这些非平衡物相及相变过程。最近几年，随着量子计算和量子模拟技术的迅速发展，人们期待这些人工量子系统可以成为探究多体量子物理的有力工具。在理论和实验的通力合作下，我们在超导量子芯片上实现了一种新奇的物相——拓扑时间晶体(图1(a))。实验采用全数字化方案，模拟了一条由26个超导量子比特(Q₁—Q₂₆)组成的一维链，在约240层量子线路演化过程中，观测到了时间平移对称性只在系统边界(链的两端)被破坏这一拓扑时间晶体的标志性动力学现象。该成果近期在

Nature 杂志上发表^[4]。

时间晶体的概念最早由诺贝尔物理学奖得主 Frank Wilczek 于2012年提出^[2]。常见的空间晶体(如钻石、石英等)中的原子在空间上周期排列，破坏了连续的空间平移对称性。时间晶体就是把“晶体”的特征拓展到时间维度，实现时间平移对称性的破缺。然而，长程时间晶体序无法在平衡系统中存在，因此时间平移对称性自发破缺不能在常见的平衡系统中实现^[5, 6]。人们将视角转移到了非平衡系统，研究发现在周期驱动的非平衡系统中可以实现离散的时间晶体^[3, 7]，其中周期驱动系统的离散时间平移对称性发生自发破缺，某些局域观测量在时间维度上呈现出周期驱动的二次分谐波振荡。

另外一方面，对称保护拓扑相的研究也吸引了物理学家极大的兴趣。拓扑本身是数学的一个概念，主要研究系统在连续变化下能够维持不变的属性。在量子多体系统中，许多物相及相变过程都可以用拓扑序来描述，这些非平凡拓扑的量子物质相一般会在系统边缘处呈现出与系统内部迥异的物理特性^[8]。一般来说，系统的拓扑属性在有限温度下会被热激发破坏，但引入强无序会导致系统呈现多体局域化，使得即便在有限温度下，边界态的拓扑行为仍然能够保持不变。

近年来，关于时间晶体的理论和实验都取得了重要的进展。理论方面，人们提出了离散时间晶

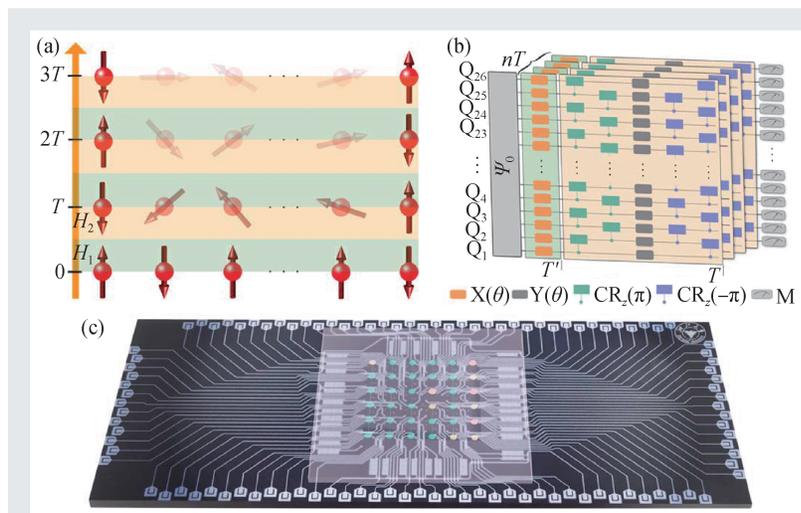


图1 数字化量子模拟拓扑时间晶体示意图 (a)拓扑时间晶体：在由周期哈密顿量 $H(t)$ 驱动的一维自旋链中，边缘比特发生离散时间平移对称性的自发破缺；(b)模拟拓扑时间晶体的量子线路示意图；(c)超导量子芯片示意图

体的概念，并探究了时间晶体相与其他非平衡物质相的转变^[3, 7, 9]。实验方面，国际上不同研究团队在离子阱^[10, 11]、固态自旋系统^[12-16]、冷原子^[17, 18]、超导^[19, 20]等各类量子平台上都观测到了离散时间晶体现象。我们对离散时间晶体的理解在不断加深，但是几乎没有任何研究去探索拓扑在这类系统中的作用。这是因为将拓扑、局域化和周期性驱动引入，并且构造一个存活时间足够长的对称保护拓扑相，给实验带来了严峻的挑战。

我们将拓扑与时间晶体的思想结合起来，在一维26个1/2自旋链上，使用数字量子门的方式构造三体相互作用，实现满足 $Z_2 \times Z_2$ 对称性的周期性哈密顿量，进而实现受拓扑保护的时间晶体(图1(b))。通过测量自旋在 z 轴上的投影，来观测拓扑时间晶体的动力学过程，即边界自旋的二次分谐波振荡。具体而言，我们在一维系统上周期性作用哈密顿量 H_1 和 H_2 ，其中 $H_1 \equiv \sum_k \left(\frac{\pi}{2} - \delta \right) \sigma_k^z$ ， $H_2 \equiv \sum_k [J_k \sigma_{k-1}^z \sigma_k^x \sigma_{k+1}^z + V_k \sigma_k^x \sigma_{k+1}^x + h_k \sigma_k^x]$ ， σ_k^x 和 σ_k^z 为第 k 个自旋的泡利算符， J_k 为三体作用耦合强度， δ 、 V_k 和 h_k 为不同的扰动强度。上述哈密顿量满足 $Z_2 \times Z_2$ 对称性，自旋链从 z 方向的随机初始直积态出发，在该哈密顿量的作用下演化，边缘自旋出现了离散的时间平移对称性破缺，而内部自旋无此现象。

本实验使用了一个基于倒扣焊技术制备的双层超导量子芯片(图1(c))。该芯片上共有 $6 \times 6 = 36$ 个量子比特(Xmon比特)，相邻比特间通过可调频耦合器连接在一起。通过给耦合器施加电流脉冲，可以实现近邻比特间耦合强度的打开或关断，从而实现两比特量子门。本实验中，我们总共选取了26个量子比特构成了一维链。哈密顿量 H_1 仅需要单比特旋转门 $X(\theta)$ 即可以实现，而 H_2 中的三体相互作用项，需要通过量子门组合来实现。为了大幅压缩线路深度，使用了量子神

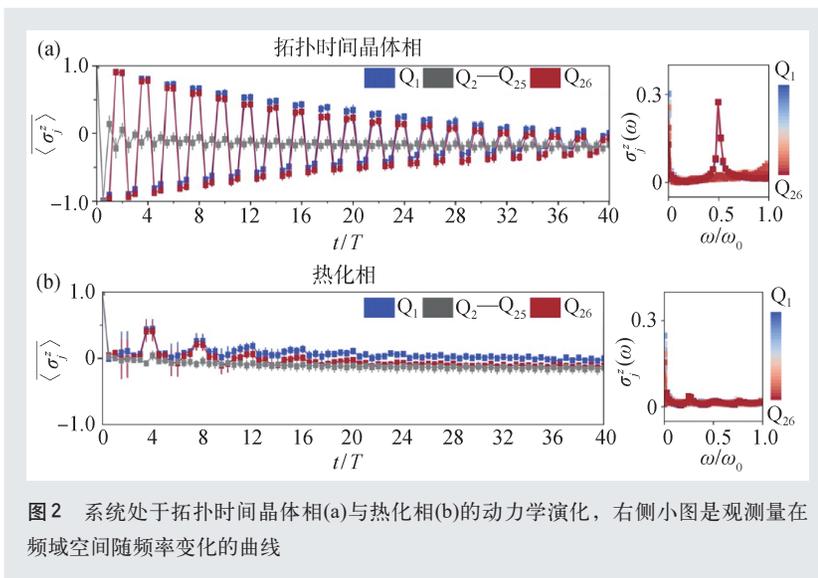


图2 系统处于拓扑时间晶体相(a)与热化相(b)的动力学演化，右侧小图是观测量在频域空间随频率变化的曲线

经网络进化算法，发现采用 $CR_z(\pm\pi) - Y(\theta) - CR_z(\pm\pi)$ 的三明治结构，即可实现三体相互作用，其中 $CR_z(\pm\pi)$ 可以使用两比特受控相位门(CZ)和单比特门组合实现。在同步运行的情况下，单比特门和两比特门保真度分别高于99%和98%。

实验中，我们首先将初态制备到 Z 方向随机直积态，然后在数字量子电路的不同时刻观察系统的演化过程。可以观察到边缘比特表现出与内部比特完全不同的动力学行为：如图2(a)所示， Q_1 和 Q_{26} 的 σ^z 观测量呈现周期为 $2T$ 的振荡(观测量在频域空间表现为在驱动频率的1/2处有明显的高峰，如右侧小图所示)，表明时间平移对称性破缺； Q_2-Q_{25} 的 σ^z 观测量呈现出无规则振荡，且很快趋向于零，呈现平庸的动力学行为。整个系统的行为符合理论预言中拓扑时间晶体的特征。我们随机制备了20个初态，都呈现相同的效果，表明该现象不依赖于初始态的选取。图2(a)中展示的结果为20个初态的平均值。进一步，可以通过改变系统的无序程度，实现从拓扑时间晶体到热化相的相变。对于热化相，边缘比特与内部比特都表现出同样的平庸动力学行为(图2(b))。

超导量子系统近年来在量子比特数目、相干时间、量子门保真度等方面都取得了飞跃式的发展，这吸引大家更多关注含噪声的中等尺度规模量子计算芯片及相应量子算法软件的开发。本实

验中,使用数字化量子模拟多体量子系统展现了量子计算的重要价值,一方面可以帮助理论物理发掘新的物理内涵,另一方面,模拟结果也可以反馈实验物理,加深我们对量子噪音的认识。与此同时,量子错误检测和纠正也有了初步进展。随着量子芯片规模的扩大和精度的提高,以及量

子算法生态的逐步培育,量子计算实用化的前途变得愈发明朗。可以预见,在未来几年内,会有越来越多学科方向和量子计算逐渐交融,量子计算的时代未来可期!

致谢 感谢研究生张叙、蒋文杰的辛勤工作。

参考文献

- [1] Harper F, Roy R, Rudner M S *et al.* *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2020, 11: 345
 [2] Wilczek F. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 109: 160401
 [3] Else D V, Monroe C, Nayak C *et al.* *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.*, 2020, 11: 467
 [4] Zhang X, Jiang W, Deng J *et al.* *Nature*, 2022, 607: 468
 [5] Watanabe H, Oshikawa M. *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114: 251603
 [6] Bruno P. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 070402
 [7] Else D V, Bauer B, Nayak C. *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 117: 090402
 [8] Chiu C K, Teo J C Y, Schnyder A P *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2016, 88: 035005
 [9] Yao N Y, Potter A C, Potirniche I D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 118: 030401
 [10] Zhang J *et al.* *Nature*, 2017, 543: 217

- [11] Kyprianidis A *et al.* *Science*, 2021, 372: 1192
 [12] Choi S *et al.* *Nature*, 2017, 543: 221
 [13] O'Sullivan J *et al.* *New J. Phys.*, 2020, 22: 085001
 [14] Randall J *et al.* *Science*, 2021, 374: 1474
 [15] Rovny J, Blum R L, Barrett S E. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 180603
 [16] Pal S, Nishad N, Mahesh T S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 180602
 [17] Smits J, Liao L, Stoof H T C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 185301
 [18] Autti S, Eltsov V B, Volovik G E. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 120: 215301
 [19] Mi X *et al.* *Nature*, 2022, 601: 531
 [20] Ying C *et al.* *Phys. Rev. A*, 2022, 105: 012418

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
—《物理》四十年集萃

部特推出优惠订阅活动:向编辑部连续订阅2年《物理》杂志,将获赠《岁月留痕—《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章,476页精美印刷,定价68元,值得收藏。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址:北京市中关村南三街8号中科院物理所,100190

收款人姓名:《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行:农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持,《物理》编辑

户名:中国科学院物理研究所

帐号:11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话:010-82649029; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

