
非厄米量子行走中的自正交和双正交动力学量子相变

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36367.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

非厄米量子行走中的自正交和双正交动力学量子相变。 导读

动力学量子相变作为非平衡量子系统中的重要现象，近年来在凝聚态物理和量子信息领域引发了人们的广泛关注。然而，在非厄米系统中由于哈密顿量左右本征态间不再满足转置共轭关系，对动力学量子相变的定义与探测变得尤为复杂。近日，安徽大学王坤坤教授及其合作者利用非厄米量子行走，系统地研究了自正交与双正交动力学量子相变，从理论和实验的角度分别揭示了两种动力学量子相变在临界时间和临界动量上的差异。这一发现为理解非厄米系统中的非平衡动力学提供了新视角。相关研究成果以 Self-normal and biorthogonal dynamical quantum phase transitions in non-Hermitian quantum walks 为题发表于国际顶尖光学期刊《Light：Science Applications》。

研究背景

在统计力学中，平衡相变的本质是热力学函数（如自由能）的非解析性，但传统实参数（如温度和磁场）下的配分函数通常表现为解析函数，难以直接体现相变。1965年Michael Fisher提出Fisher零点，将配分函数的参数延拓到复平面，通过研究零点分布来揭示相变的临界行为。2013年Hely等人首次将Fisher零点推广到非平衡系统，提出动力学量子相变概念，通过Loschmidt振幅的奇异性定义动力学量子相变的临界点。

传统动力学量子相变的研究主要集中于封闭的厄米系统，其相变由Loschmidt回波速率的非解析或动力学拓扑序参量的突变来表征。然而，非厄米系统中增益与损耗的存在导致系统的动力学演化是非幺正的，对系统Loschmidt回波的定义存在双正交基和自正交基两种不同方式。对于这两种理论框架，一直是大家广泛关注的课题，二者在动力学量子相变的差异有待进一步研究。针对这一问题，王坤坤等通过设计非厄米量子行走模型，首次从理论与实验的角度，分别实现了对两种动力学量子相变的对比研究，全方位展示非厄米系统中两种不同正交基定义下动力学量子相变的不同。

研究亮点

本文全面分析了在自正交和双正交两种不同基矢定义下，满足宇称-时间（PT）对称性的非厄米量子行走中的动力学量子相变。具体而言，在不同的淬火演化过程中，详细探究了表征这两种类型动力学量子相变的相关物理量，如Loschmidt回波速率、动力学拓扑序参量、复平面的Fisher零点和动力学不动点。

首先，在PT对称保持区域不同拓扑相之间淬火演化，揭示了两种动力学量子相变均可通过Loschmidt回波速率有非解析点（图1a和1e）以及动力学拓扑序参量有跃变（图1b和1f）进行刻画。然而，从复平面的Fisher零点可以看出（图1c和1g），发生两种动力学量子相变的临界时间及其数量是不同的。还进一步通过分析自正交基和双正交基下的动力学不动点（图1d和1h），得到两者简并情况是不同的。

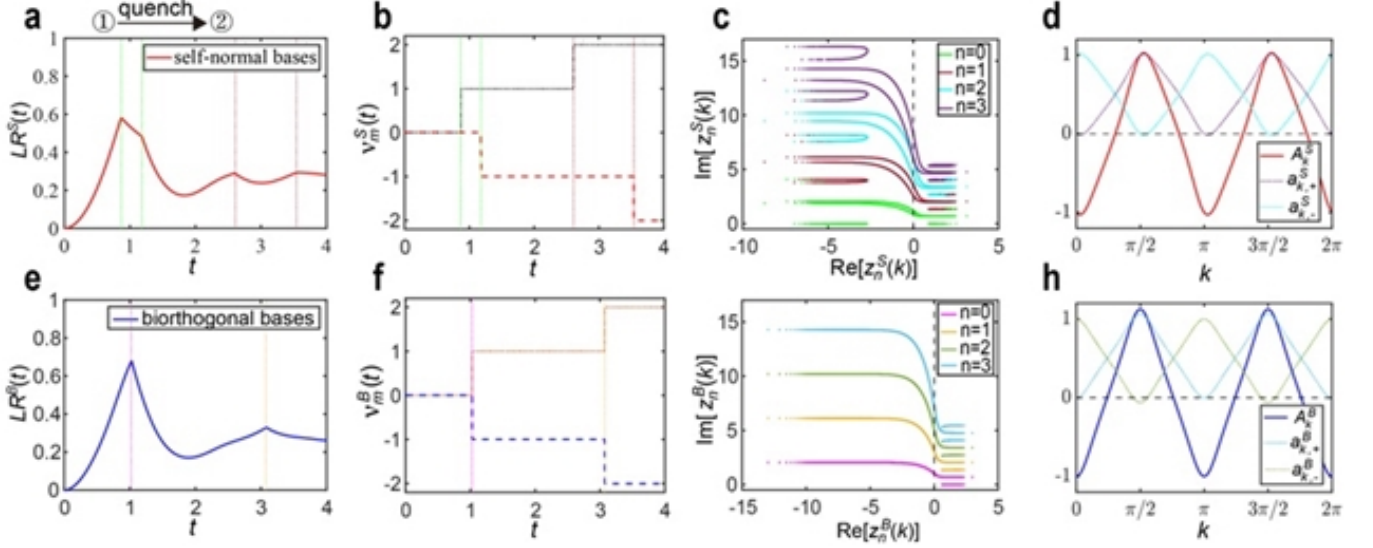


图1. PT对称保持区域，不同拓扑相之间淬火的自正交与双正交动力学量子相变。

其次，在PT对称保持区域相同拓扑相之间淬火演化，通过Loschmidt回波速率非解析现象消失（图2a和2e）、动力学拓扑序参量无跃变（图2b和2f）、复平面无Fisher零点（图2c和2g），揭示了两种动力学量子相变均不会发生。同时，通过分析自正交基和双正交基下的动力学不动点（图2d和2h），发现两者具有相同的不定点。

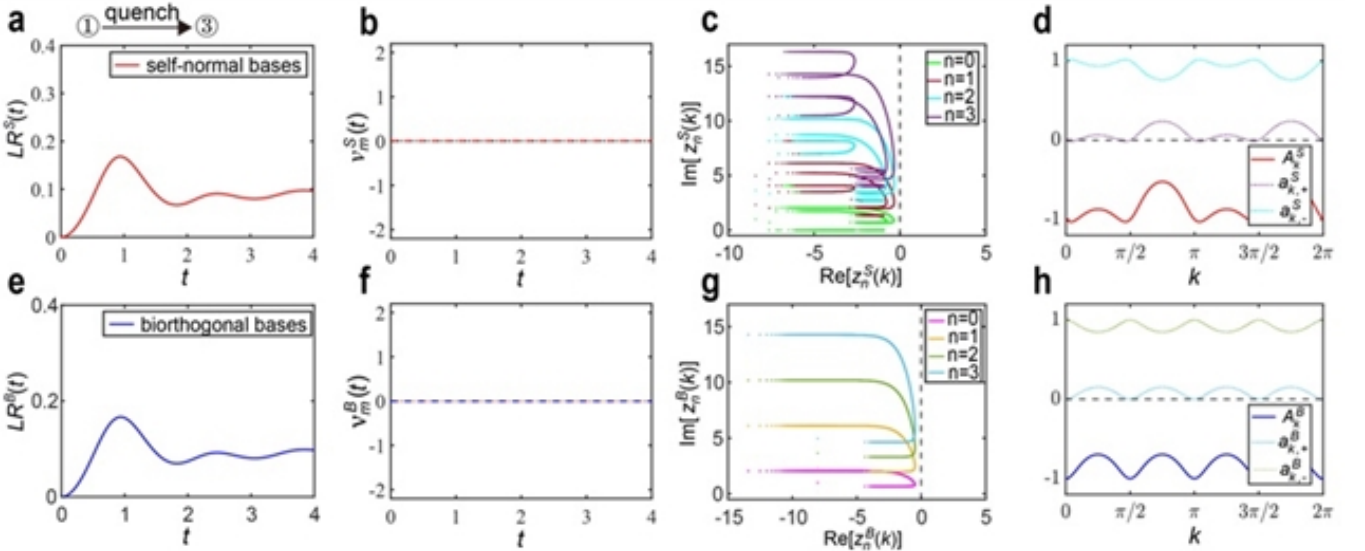


图2. PT对称保持区域，相同拓扑相之间淬火的自正交与双正交动力学量子相变。

随后，通过分析PT对称破缺区域不同（图3）和相同（图4）拓扑相之间淬火动力学演化过程，

揭示了两种动力学量子相变均没有发生。进一步解析分析自正交基和双正交基下的动力学不动点，发现在PT对称破缺区域动力学不动点存在消失的现象。

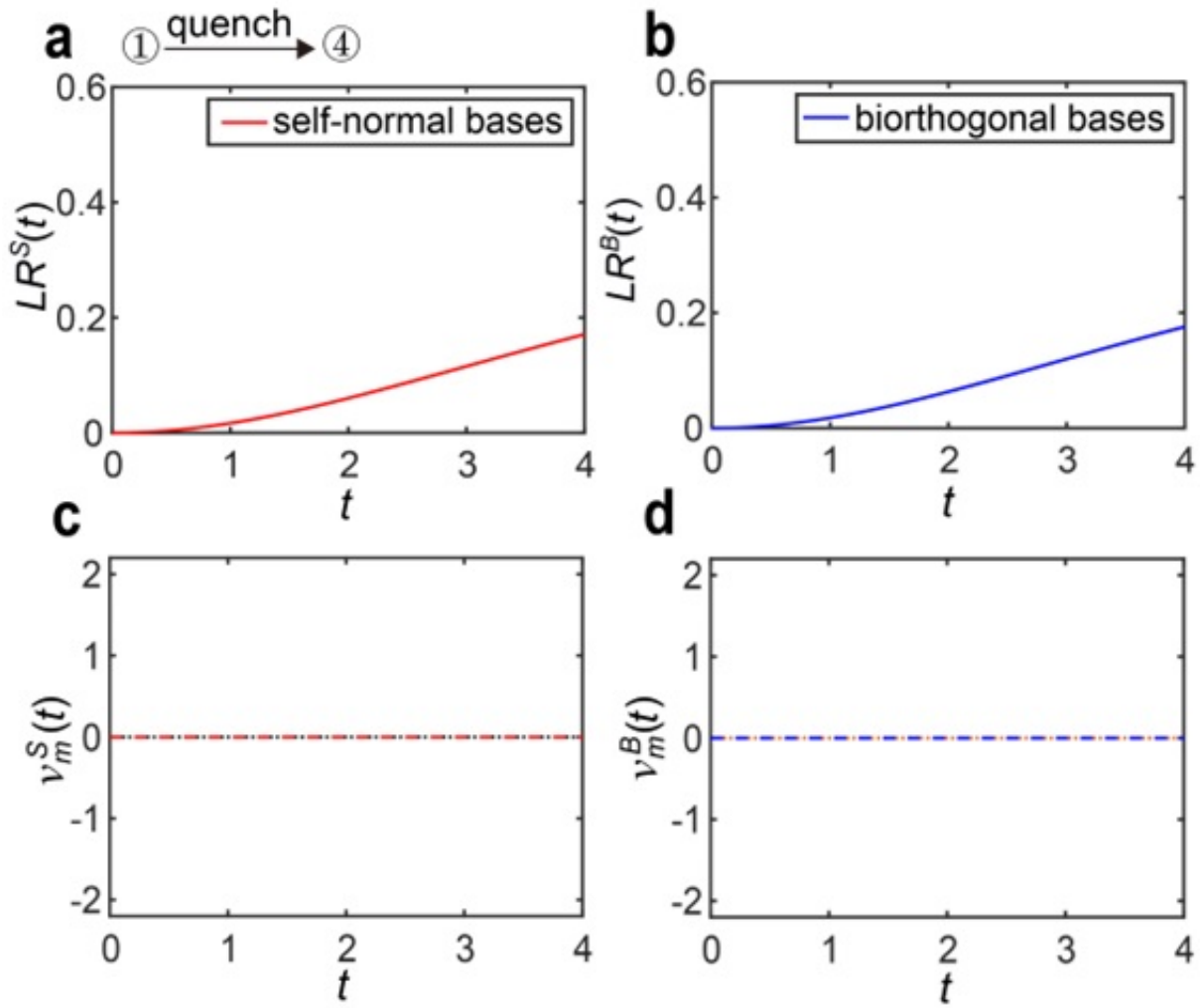


图3. PT对称破缺区域，不同拓扑相之间淬火的自正交与双正交动力学量子相变。

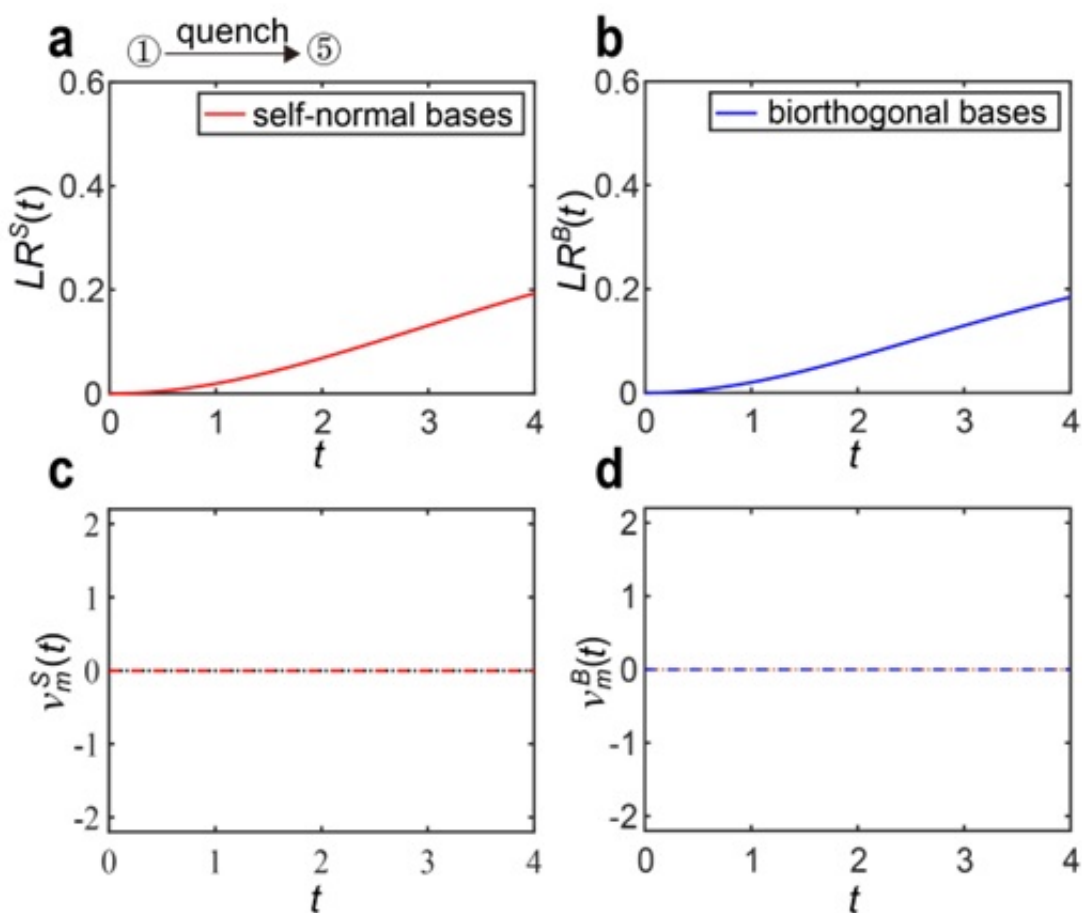


图4. PT对称破缺区域，相同拓扑相之间淬火的自正交与双正交动力学量子相变。

最后，还搭建非厄米光量子行走实验平台，通过实空间测量重构自正交和双正交基下，演化态的密度矩阵（图5），揭示了自正交和双正交动力学量子相变（图6）在临界时间和临界动量上的不同，验证了上述理论结果。

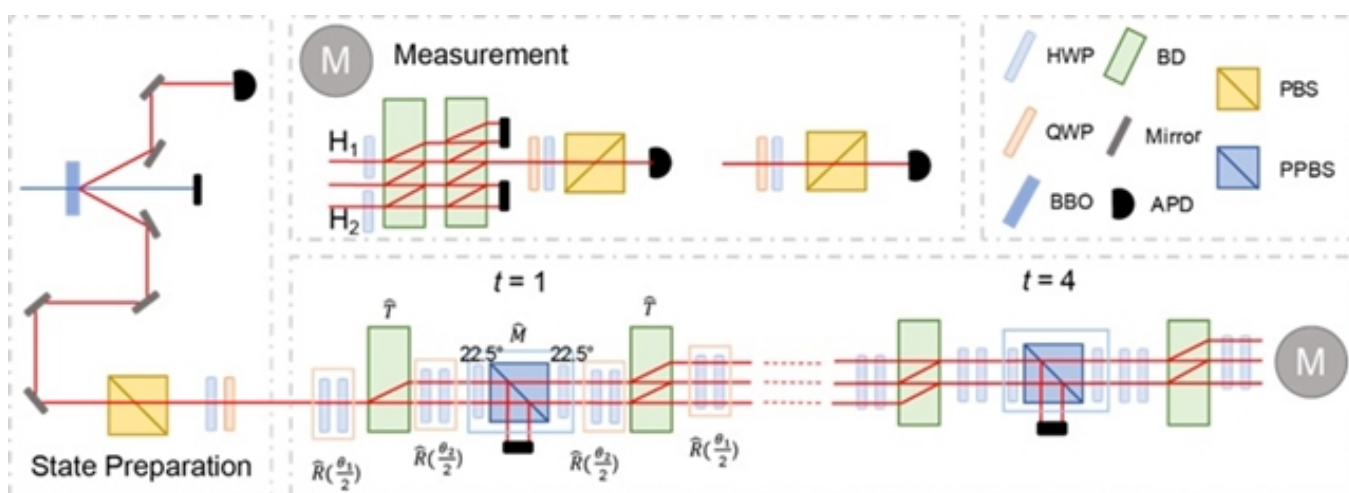


图5. 在非厄米光量子行走中观测自正交和双正交动力学量子相变的实验装置图。

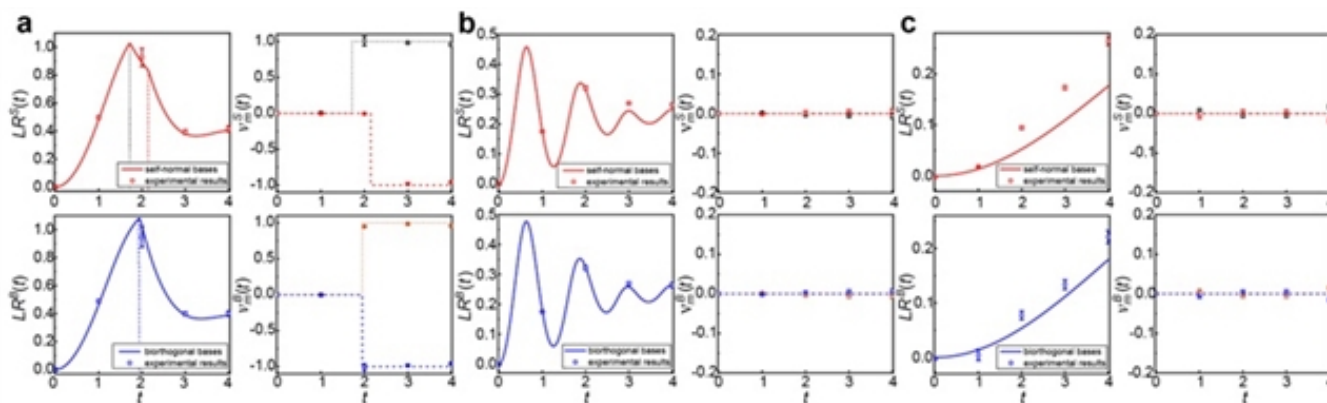


图6. 不同淬火过程中自正交和双正交的动力学量子相变实验结果。(a) PT对称保持区域，不同拓扑相之间淬火演化；(b) PT对称保持区域，相同拓扑相之间淬火演化；(c) PT对称破缺区域，不同拓扑相之间淬火演化。

总结与展望

该研究基于非厄米量子行走，理论分析了非厄米系统中的自正交和双正交动力学量子相变，揭示了两种动力学量子相变在临界时间和临界动量上的不同。并进一步，利用光量子行走实验平台，实验观测并刻画了非厄米系统中的自正交和双正交动力学量子相变，为理解非厄米量子动力学奠定了基础。未来，团队计划将这一研究拓展至更高维非厄米量子模型，并探索其在无序和相互作用系统中的鲁棒性。该成果为非平衡量子多体系统的研究开辟了新方向。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01919-6>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：王坤坤等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发