

轨道角动量合成维度助力非厄米性质研究

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/36499.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！

轨道角动量合成维度助力非厄米性质研究。 导读

在量子力学中，观测量通常需满足厄米性，以确保其本征值为实数。然而，真实物理系统不可避免地与环境耦合，导致体系呈现开放性和耗散性，进而引入非厄米特性。非厄米理论的发展为描述这类开放系统和非平衡拓扑态提供了简洁而直观的框架。

近年来，大量非平凡拓扑态在非厄米系统中被发现，激发了对拓扑概念向非厄米领域拓展的广泛关注。相比传统厄米系统，非厄米拓扑系统展现出诸多新奇现象，例如新型的拓扑分类、非厄米趋肤效应等。在周期性非厄米系统中，本征能量谱呈复数形式，并在复平面中展现出独特的缠绕行为。本征态的拓扑缠绕数也突破了厄米系统中只能取整数的限制，可取半整数。然而，如何直接在实验中观测这些缠绕特性，尤其是半整数缠绕数，依然面临巨大挑战。

近日，中国科学技术大学李传锋教授、许金时教授、罗希望教授与博士后杨木等人组成的研究团队，基于轨道角动量（OAM）自由度构建合成维度，成功构造出一个非厄米拓扑晶格，实现了对本征能量和本征态缠绕行为的直接观测。这是首次在实验中观测到非厄米系统的半整数本征态缠绕数，并揭示了其与半无穷链上拓扑边界态的内在联系。相关成果以题为 Observing Half-Integer Topological Winding Numbers in Non-Hermitian Synthetic Lattices 的论文发表于《Light: Science Applications》。

非厄米系统与合成维度：从理论到实验突破

非厄米拓扑系统中的诸如复能谱、非互易性、趋肤效应及体边对应破缺等现象，构成了当前物理研究的前沿。然而，受限于实验平台的构建能力，这些现象的系统性探究仍然相对滞后。近年来，随着合成维度理念的兴起，科学家们能够通过调控粒子内在自由度（如光的频率、轨道角动量、原子能级等）模拟高维空间，为构建复杂的非厄米拓扑系统提供了全新路径。

相比传统在真实空间中构造拓扑晶格，基于光学合成维度具有以下显著优势：

- 复杂性降低：利用粒子自由度代替真实空间结构，减少了对高精度空间结构制造的依赖。
- 参数高度可控：通过成熟的光学器件（如波片、Q片）对模式耦合进行动态调节，方便模拟不同哈密顿量。
-

检测手段多样：每一种合成自由度均可对应特定的探测方式，使得关键拓扑信息可以直接获取。

实验设计与关键成果

研究团队构建了一个支持多轨道角动量模式的驻波谐振腔（图1a）。通过在腔内引入Q片和波片，分别实现了轨道角动量与自旋角动量（偏振）的耦合，使不同模式间产生耦合。进一步在系统中引入偏振相关的损耗，模拟出具有非厄米特性的合成轨道角动量晶格（图1b），从而诱导出非厄米趋肤效应。

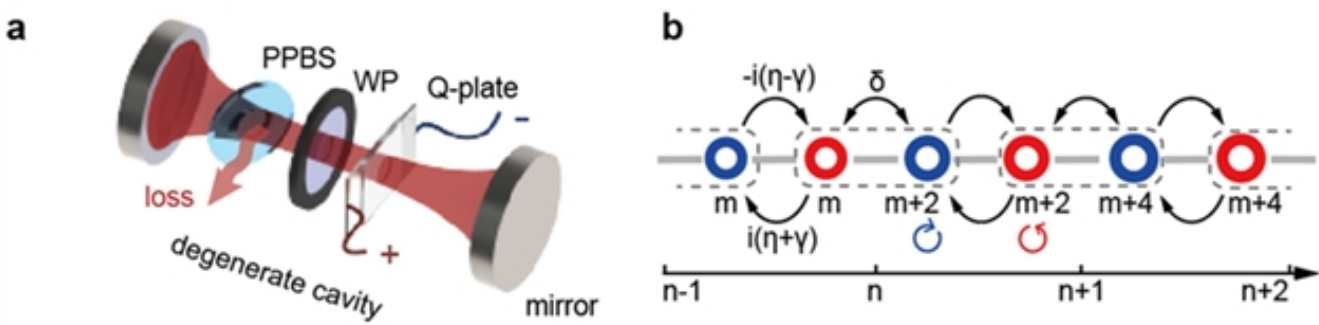


图1. (a) 实验装置图；(b) 非厄米合成轨道角动量晶格示意图。

在实验中，团队通过透射谱扫频与出射态偏振投影测量，首次同时测量了系统的本征能量缠绕数与本征态缠绕数（图2）。这为直接刻画非厄米拓扑性质提供了前所未有的实验手段。

通讯作者许金时教授指出：在非厄米系统中，拓扑缠绕数不仅是拓扑不变量的重要代表，也能体现系统对称性的深层结构。尤其是本征态缠绕数为半整数的特性，此前尚未在实验中被观测到。

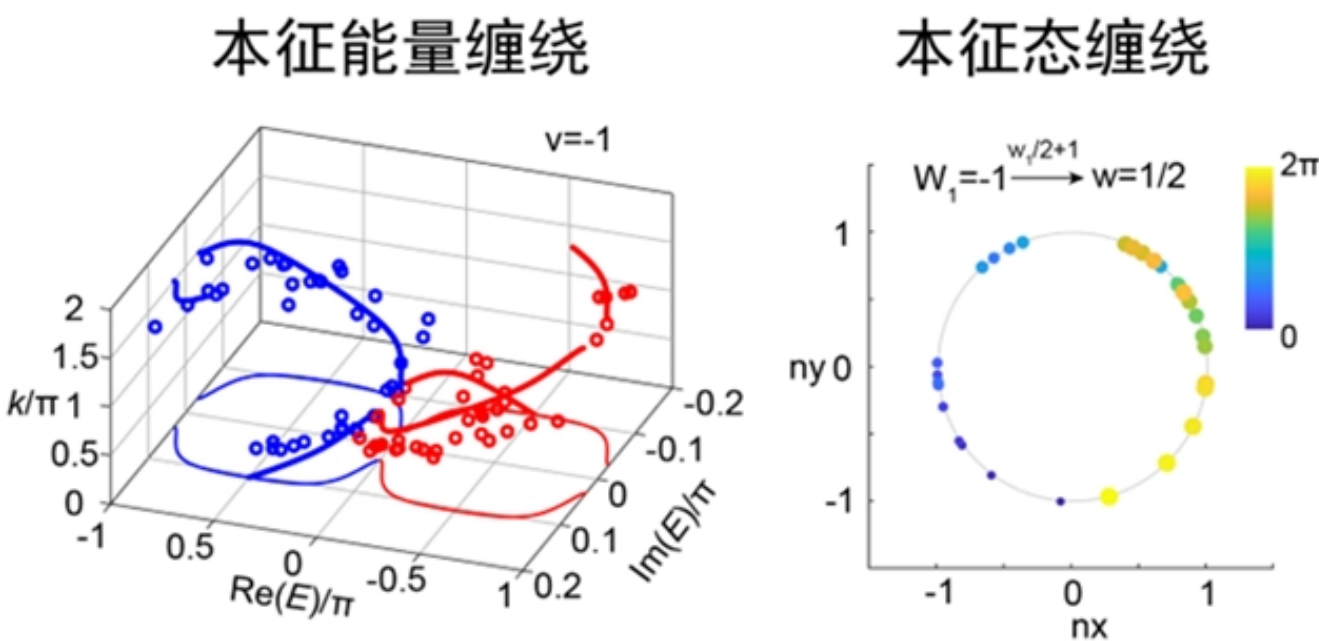


图2. 本征能量与本征态缠绕数的实验测量结果。

边界态与拓扑不变量：打破体边对应的新理解

论文第一作者杨木博士进一步阐述道：拓扑材料研究中，最令人着迷的是拓扑不变量与边界态之间的对应关系。然而非厄米趋肤效应使有限晶格边界间耦合增强，从而破坏传统体边对应关系。

为克服这一问题，研究团队巧妙地通过破坏OAM为0位置的耦合，构建出两条等效半无穷长的合成晶格（图3a），在其中观察到了由半整数缠绕数决定的边界零能态（图3b-d）。这是首次在实验中验证非厄米系统中半整数拓扑不变量与边界态之间的对应关系。

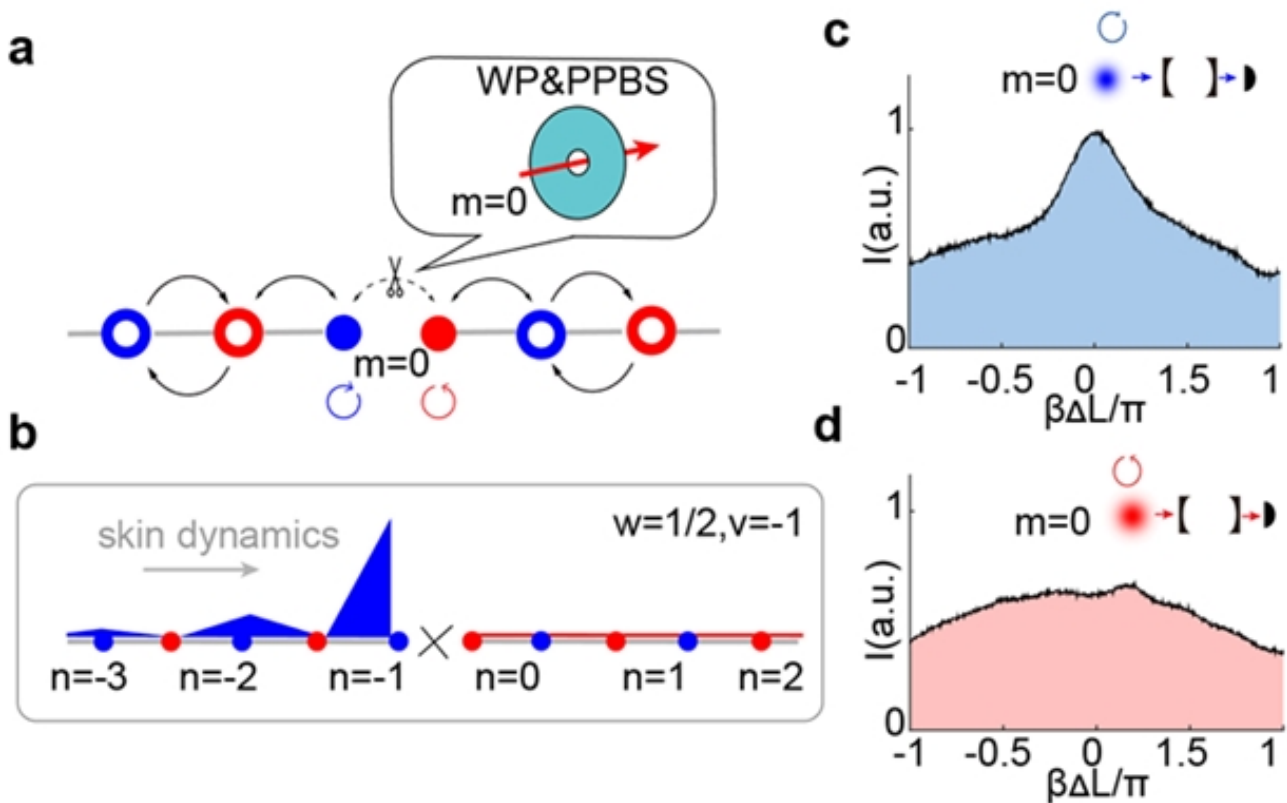


图3. (a) 在合成维度构建边界态；(b) 理论边界态分布；(c-d) 实验测到的边界零能态。

展望未来：合成维度平台拓展非厄米物理边界

这是该研究团队继之前相关研究 [Nat. Commun. 13, 2040 (2022)、Sci. Adv. 9, eabp8943 (2023)、Photon. Res. 13, 87 (2025)] 之后，在合成维度平台上取得的又一重要进展。该工作不仅首次实验证实非厄米系统中半整数拓扑不变量的存在，还进一步揭示了其对应边界态的物理图像，为未来非厄米拓扑物理的探索和器件化应用奠定了重要基础。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01909-8>

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：李传锋等 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