

量子体系中实现动力学环绕非厄米奇异点

荣星^{1,2,3} 杜江峰^{1,2,3,†}

(1 中国科学技术大学 合肥微尺度物质科学国家研究中心 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学 中国科学院微观磁共振重点实验室 合肥 230026)

(3 中国科学技术大学 量子信息与量子科技前沿协同创新中心 合肥 230026)

2021-05-21 收到

† email: djf@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210606

非厄米量子物理具有许多不同于传统厄米量子物理的新奇性质,对量子计算、量子精密测量、拓扑物理等领域产生了重要的影响,成为近年来的研究热点^[1, 2]。奇异点是非厄米哈密顿量的能级简并点,在能谱图中,奇异点附近有独特的拓扑结构,引发了一系列新奇的物理现象和应用^[3, 4]。对奇异点相关物理的实验研究最早是在光学、波导等经典体系展开的,并取得了诸如单模激光^[5, 6]、单向传输^[7]、基于奇异点的探测灵敏度提升^[8, 9]等重要成果。最近,在量子体系对非厄米哈密顿量的研究也进展迅速,超冷原子^[10]、金刚石氮—空位色心^[11]、超导^[12]、光子^[13]等体系都实现了非厄米演化。

上述研究都是在奇异点附近开展的,奇异点一些更加独特的性质则需要通过环绕来展示。研究发现当准静态地环绕奇异点时,哈密顿量的本征能量和本征态在环绕一圈之后会发生交换^[14, 15]。而动力学地环绕奇异点,由于非厄米系统增益,耗散性质的引入,则会呈现出丰富的物理现象。本征态之间会依据环绕起点处在不同的宇称时间相而发生对称或者非对称的转换^[16, 17]。这类本征态转换在量子控制领域有应用潜力,具有重要的研究意义^[18]。实验上实现动力学地环绕奇异点需要对非厄米哈密顿量进行含时调控,非常具有挑战性,因而此前的研究均是在经典体系展开模拟实

验^[19-22]。近日,我们基于此前发展的实现非厄米哈密顿量的普适扩展方法,成功地在自旋量子体系实现了动力学环绕奇异点,并观测到了拓扑保护的本征态转换^[23]。

我们用 $H_s(t) = \lambda[(\delta(t) + i\gamma)\sigma_x + g(t)\sigma_z]$ 的非厄米哈密顿量模型来阐述动力学环绕奇异点诱导的本征态转换现象。其中 λ 是描述哈密顿量整体能标的常数, $\gamma = 1$ 是非厄米项, δ 和 g 分别是失谐与耦合, σ_x 和 σ_z 是泡利算符。这个模型的两个奇异点分别位于 $\delta = 0, g = \pm 1$ 。在参数空间动力学环绕奇异点是通过含时调控失谐和耦合来实现的,哈密顿量的能谱结构和环绕奇异点的路径如图1所示。在图1(a)和(b)中,环绕起点 A 处在宇称时间对称相,环绕初态分别制备到哈密顿量的本征态 $|\alpha_A\rangle$ 和 $|\beta_A\rangle$ 。我们依据态矢演化过程中与哈密顿量瞬时本征态之间的保真度在能谱面上标注出了态矢的动力学演化轨迹。图1(a)中,轨迹是顺时针环绕奇异点的,在环绕一圈之后,本征态 $|\alpha_A\rangle$ 和 $|\beta_A\rangle$ 均会演化到本征态 $|\beta_A\rangle$ 。图1(b)中展示

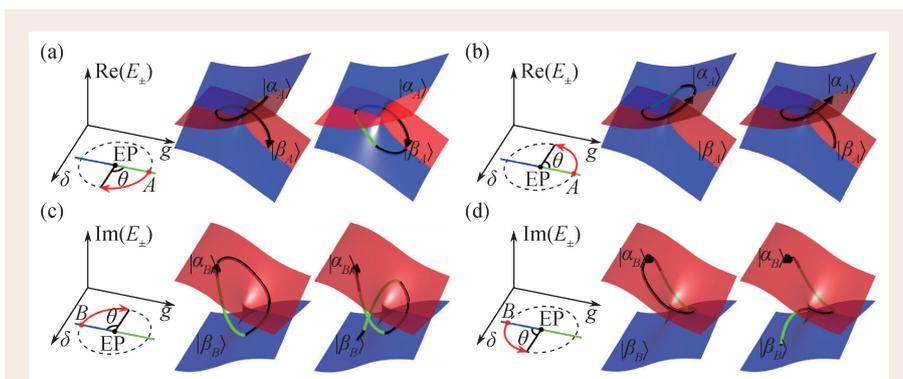


图1 奇异点的能谱结构以及动力学环绕奇异点导致的本征态转换^[23] (a, b)宇称时间对称相开始顺时针(a)和逆时针(b)环绕奇异点,结果表现为非对称的本征态转换;(c, d)宇称时间对称破缺相开始顺时针(c)和逆时针(d)环绕奇异点,结果表现为对称的本征态转换

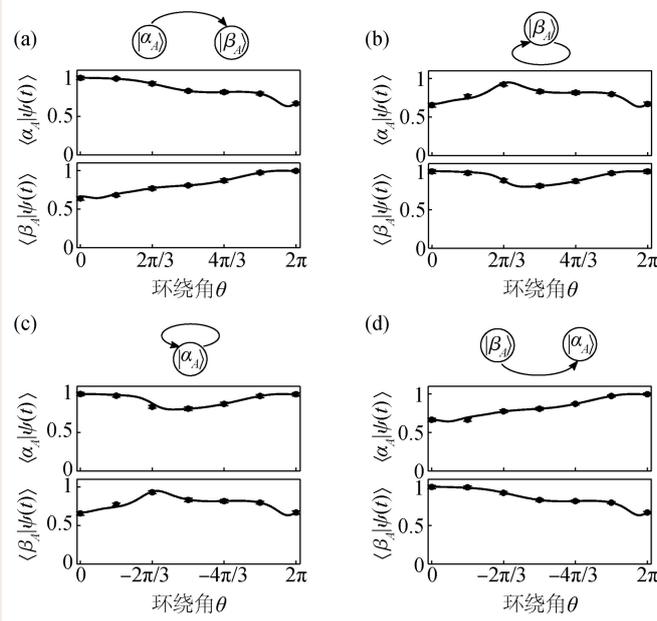


图2 环绕起点处在宇称时间对称相时非对称的本征态转换^[23] (a, b) 分别从本征态 $|\alpha_A\rangle$ (a) 及 $|\beta_A\rangle$ (b) 开始顺时针环绕奇异点的演化轨迹; (c, d) 分别从本征态 $|\alpha_A\rangle$ (c) 及 $|\beta_A\rangle$ (d) 开始逆时针环绕奇异点的演化轨迹

的是逆时针环绕奇异点的结果, 本征态 $|\alpha_A\rangle$ 和 $|\beta_A\rangle$ 均会演化到本征态 $|\alpha_A\rangle$ 。环绕末态和初态无关, 由环绕方向决定, 因此从宇称时间对称相开始动力学环绕奇异点得到了非对称的本征态转换。在图 1(c)和(d)中, 环绕起点 B 处在宇称时间对称破缺相, 环绕初态为哈密顿量的本征态 $|\alpha_B\rangle$ 或 $|\beta_B\rangle$ 。演化轨迹表明无论是顺时针还是逆时针环绕奇异点, 态矢最终都会演化到本征态 $|\alpha_B\rangle$ 。环绕末态和初态、环绕方向都无关, 因而起点处于宇称时间对称破缺相的本征态转换是对称的。

非厄米哈密顿量 $H_s(t)$ 是通过扩展的方法实现的。非厄米哈密顿量下态矢的演化可以描述为 $i\partial_t|\psi(t)\rangle = H_s(t)|\psi(t)\rangle$ 。一般量子体系的哈密顿量都是厄米的, 因此要实现非厄米演化 $|\psi(t)\rangle$ 很有挑战。我们通过引入一个辅助比特, 构造演化 $|\Psi(t)\rangle = |\psi(t)\rangle \otimes |-\rangle + \eta(t)|\psi(t)\rangle \otimes |+\rangle$, 其中 $|-\rangle$ 和 $|+\rangle$ 是泡利算符 σ_y 的本征态, 构成辅助比特的一组正交基矢, $\eta(t)$ 是一个线性算符。通过将 $|\Psi(t)\rangle$ 投影到辅助比特状态为 $|-\rangle$ 的子空间, 就

能实现在非厄米哈密顿量 $H_s(t)$ 下的演化 $|\psi(t)\rangle$ 。 $|\Psi(t)\rangle$ 的演化由两比特哈密顿量 $H_{s,a}(t)$ 支配, $H_{s,a}(t)$ 是厄米的, 因此可在量子系统中构造实现。

我们在金刚石氮—空位色心量子体系来进行实验展示。氮—空位色心是金刚石中的一种点缺陷, 其中的电子自旋与核自旋可构成一个两比特量子系统。氮—空位色心在室温下就有很长的相干时间, 是良好的量子计算与模拟平台。我们选择核自旋为辅助比特, 电子自旋为系统比特。通过施加两路改变幅度和相位的微波选择性脉冲来分别调控不同核自旋子空间内电子自旋的跃迁, 并选择合适的旋转坐标系, 两比特哈密顿量 $H_{s,a}(t)$ 可被构造出来。实验中, 先施加激光脉冲对氮—空位色心进行初始化, 然后依次施加射频和微波脉冲来制备两比特系统的初态, 接下来施加上述提到的两路选择性微波脉冲让态矢进行环绕奇异点的演化, 最后通过对两比特态矢的读出来验证不同形式的本征态转换。

图 2 展示了环绕起点在宇称时间对称相时非对称的本征态转换的实验结果。图中横坐标是环绕奇异点的转角 θ , 纵坐标我们用环绕态和本征态 $|\alpha_A\rangle$ 及 $|\beta_A\rangle$ 重叠度的大小来刻画环绕奇异点的演化过程。图 2(a)和(b)环绕奇异点的方向为顺时针。在图 2(a)中, 制备的初态与 $|\alpha_A\rangle$ 的重叠度大小为 1.00(2), 意味着我们很好地制备了本征态 $|\alpha_A\rangle$ 。同时初态和本征态 $|\beta_A\rangle$ 的重叠度也达到了 0.64(2), 这体现出了非厄米哈密顿量两个本征态不正交的独特性质。环绕末态和 $|\beta_A\rangle$ 的重叠度为 1.00(2), 说明在环绕奇异点一圈之后, 本征态 $|\alpha_A\rangle$ 会演化到 $|\beta_A\rangle$ 。在图 2(b)中, 初态制备为本征态 $|\beta_A\rangle$, 环绕一圈之后, 末态依旧保持为 $|\beta_A\rangle$ 。图 2(c)和(d)为逆时针环绕奇异点的结果, 从本征态 $|\alpha_A\rangle$ (图 2(c)) 和 $|\beta_A\rangle$ (图 2(d)) 开始环绕, 末态都演化到了本征态 $|\alpha_A\rangle$ 。这些结果也展示了当环绕起点处在宇称时间对称相时, 环绕末态和初态无

关。

关, 只取决于环绕方向, 也即本征态的转换是非对称的。

我们还测量了当环绕起点处在宇称时间对称破缺相时本征态转换的行为。实验结果表明环绕奇异点的末态始终为哈密顿量的本征态 $|\alpha_B\rangle$, 和环绕初态以及环绕方向均无关, 呈现出对称形式的本征态切换, 这也和理论预期一致。

这项工作量子体系实现了动力学环绕奇异点, 观测到了对称和非对称两种形式的本征态转换。这类本征态转换是受拓扑保护的, 对环绕路径上的噪声有很强的鲁棒性, 为量子控制提供了全新的思路。而在量子系统对含时非厄米哈密顿量的展示, 也为进一步研究非厄米系统的新奇物理, 如环绕高阶的奇异点、探索非厄米拓扑性质等提供了基础。该研究成果最近发表在 *Physical Review Letters* 上^[23]。

参考文献

- [1] El-Ganainy R *et al.* Nat. Phys., 2018, 14: 11
- [2] Feng L, El-Ganainy R, Ge L. Nat. Photonics, 2017, 11: 752
- [3] Miri M A, Alù A. Science, 2019, 363: eaar7709
- [4] Özdemir S K *et al.* Nat. Mater., 2019, 18: 783
- [5] Feng L *et al.* Science, 2014, 346: 972
- [6] Hodaei H *et al.* Science, 2014, 346: 975
- [7] Lin Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 213901
- [8] Hodaei H *et al.* Nature (London), 2017, 548: 187
- [9] Chen W *et al.* Nature (London), 2017, 548: 192
- [10] Li J *et al.* Nat. Commun., 2019, 10: 855
- [11] Wu Y *et al.* Science, 2019, 364: 878
- [12] Maghiloo M *et al.* Nat. Phys., 2019, 15: 1232
- [13] Xiao L *et al.* Nat. Phys., 2020, 16: 761
- [14] Heiss W D. Phys. Rev. E, 2000, 61: 929
- [15] Gao T *et al.* Nature (London), 2015, 526: 554
- [16] Gilary I *et al.* Phys. Rev. A, 2013, 88: 010102(R)
- [17] Hassan A U *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 093002
- [18] Pick A *et al.* Phys. Rev. Research, 2019, 1: 013015
- [19] Doppler J *et al.* Nature (London), 2016, 537: 76
- [20] Xu H *et al.* Nature (London), 2016, 537: 80
- [21] Yoon J W *et al.* Nature (London), 2018, 562: 86
- [22] Zhang X L *et al.* Phys. Rev. X, 2018, 8: 021066
- [23] Liu W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 170506



The poster features a blue and red background with a central circular graphic resembling a lens or camera module. At the top left is the CIOE logo (China International Optics and Photonics Expo). The main title is '光学全产业链展示及交流平台' (Optics Full Industry Chain Display and Exchange Platform). Below it, the specific exhibition is '精密光学展 镜头及摄像模组展' (Precision Optics, Lens & Camera Module Expo). The dates are '2021年9月1-3日' (September 1-3, 2021) and the location is '深圳国际会展中心 (宝安)' (Shenzhen International Convention and Exhibition Center, Bao'an). A QR code is provided for registration. At the bottom, there is a section for '同期展会' (Concurrent Exhibitions) listing: 信息通信展 (Information and Communication Expo), 激光技术及智能制造展 (Laser Technology and Intelligent Manufacturing Expo), 红外技术及应用展 (Infrared Technology and Applications Expo), 智能传感展 (Intelligent Sensing Expo), and 光电子创新展 (Photonics Innovation Expo). The main event is '第23届中国国际光电博览会' (23rd China International Optics and Photonics Expo) with 160,000M² exhibition area, 95,000+ professional audience, and 3,000+ participating companies.



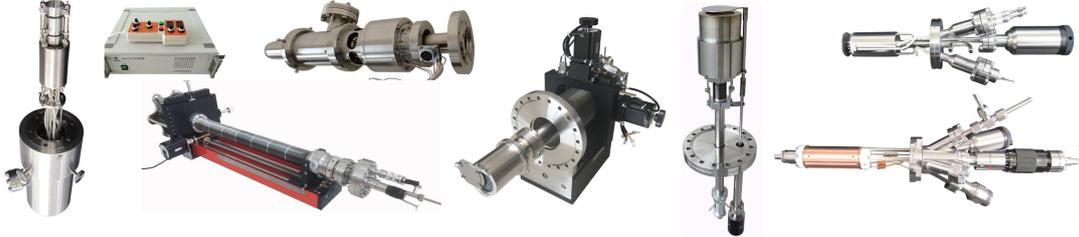
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。



北京欧普特科技有限公司

Golden WAY SCIENTIFIC

专心/专注/专业

二十年的默默耕耘, 风雨兼程, 铸就了欧普特人“专心”, “专注”, “专业”的风格和品质, 孜孜不倦地对创新和品质的追求, 让欧普特具备了全线条覆盖低、中、高, 超高功率激光光学元件的加工生产和检测能力。

伴随中国激光行业的蓬勃发展, 欧普特愿与您共同进步, 砥砺前行, 为中国光电事业的发展 and 进步共同尽一份心力和责任。

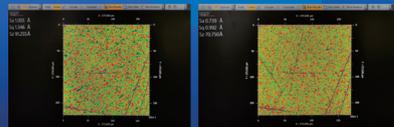
精密光学元件

1. 球面透镜
2. 柱面&非球面透镜
3. 光学棱镜
4. 反射镜(玻璃&金属)
5. 光学窗口
6. 偏振&消偏元件
7. 滤光片
8. 光栅

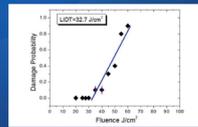


激光器件

1. 扫描场镜(紫外-红外)
2. 线扫镜头
3. 紫外远心镜头
4. 中继镜
5. 扩束镜



(熔石英基材, 直径50.8mm光学窗口)



(单晶硅基材, 1070nm高反膜)



北京市朝阳区酒仙桥东路
1号M7栋东五层



www.goldway.com.cn
Email: optics@goldway.com.cn



Tel: +86-(0)10-8456 0667
Fax: +86-(0)10-8456 9901