光操控离子的手性加热与冷却

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/29098.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！

光操控离子的手性加热与冷却。 导读

近日，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院冯芒团队首次观察到量子系统在刘维尔奇异点（LEP）附近的参数空间中做动力学演化会引起与系统手性相关的加热与冷却，这一研究成果发表在国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》上，题目为Chiral quantum heating and cooling with an optically controlled ion。研究人员利用离子阱中稳定囚禁的单个超冷40Ca+离子，通过激光的精准操控，发现在LEP附近（并不需要围绕LEP）会出现手性现象，并伴随着系统的热量和净功的变化。这为理解量子体系的热力学特性，LEP和手性之间的相关性提供了重要的实验证据。

研究背景

利用激光精准操控离子来探索非厄米体系中的动力学演化是量子信息科学和量子控制领域的一个重要研究方向。光与离子的相互作用驱动量子系统在LEP附近的演化可以导致新颖的物理现象，手性（chirality）就是其中的一个重要现象。手性涉及物理系统的对称性和不对称性，具有手性特征的量子系统能够展示出与非手性系统完全不同的物理行为，其独特的物理特性可用于模拟复杂的量子系统，理解量子相变、拓扑相和其它复杂的物理现象。在研究手性特征时，量子系统还伴随着量子热力学中的吸放热、系统对外界做功和外界对系统做功的过程，表现出手性加热与冷却的特性，这些性质可用于开发新型光学器件，如手性激光器、手性滤波器等，有望在光通信和光信息处理方面展现应用前景。

之前的相关研究都是基于哈密顿量奇异点（HEP）开展，没有考虑量子体系衰减时的量子跳跃（quantum jump）过程,因而不能完整地反映出量子系统的动力学特性。例如，已有结论（Nature 537,76-79(2016)）表明在参数空间中动力学环绕HEP一周会发生手性态转换。而另一篇工作（Nature 605，256-261（2022））指出，不围绕HEP时也能观察到手性行为。最近一篇论文（Physical Review Letters 128，110402（2022））揭示了在参数空间中动力学围绕LEP一周也会发生手性态转换。但是，不围绕LEP的情况下，动力学演化是否也会出现手性态转换？冯芒团队基于囚禁离子体系对此做了研究，并探讨了在此过程中伴随的热力学效应。

利用光操控离子来实现完美的手性态转换和展现量子系统演化过程中的加热与冷却需要实验体系非常稳定。离子阱能提供近乎理想的孤立环境，囚禁于其中的超冷离子在激光的精准操控下能最大限度地展现出量子特性。其中，初态的制备和离子的内态翻转可以通过与聚焦到几微米的激光相互作用来精准实现；量子态的测量可以通过共振荧光和电子搁置放大的方法来高品质的完成。

研究亮点

1.利用离子阱实验系统构建的非厄米体系

该团队选取离子阱中单个40Ca+离子的塞曼子能级构建带有耗散的非厄米体系（如图1）。通过精确调控729 nm和854 nm激光的频率、功率和相位使离子按照设定的参数进行动力学演化。

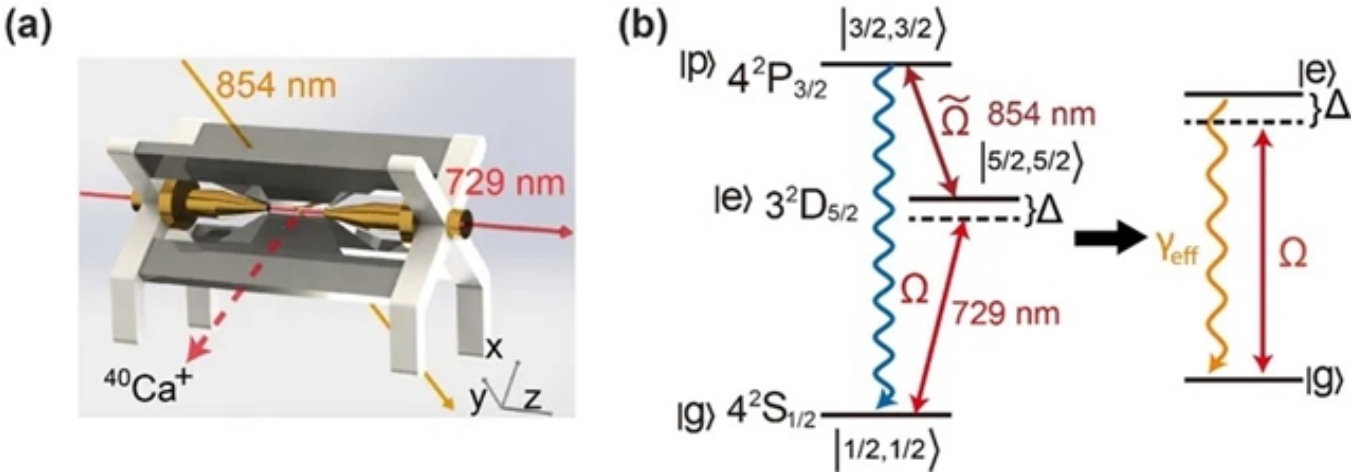


图1.（a）线形离子阱装置图。（b）40Ca+离子能级示意图。在合适的激光参数下，三个能级的构型可以形成一个有效的二能级体系，表示一个驱动和耗散都可控的量子比特。

2.光控制离子在LEP附近的动力学演化和手性现象

让离子分别从初态：ψ+〉=(e〉+g〉)/√2和ψ-〉=(e〉+g〉)/√2出发，分别做顺时针参数循环和逆时针参数循环的演化。研究人员发现，无论初态是制备到ψ+〉或ψ-〉，只要经过顺时针的参数循环，量子系统的末态就一定会回到ψ+〉。反之，只要经过逆时针的参数循环，量子系统的末态就一定回到ψ-〉（如图2）。这种现象被称为手性态转换或不对称模式转化，这样的量子系统具有手性特征。

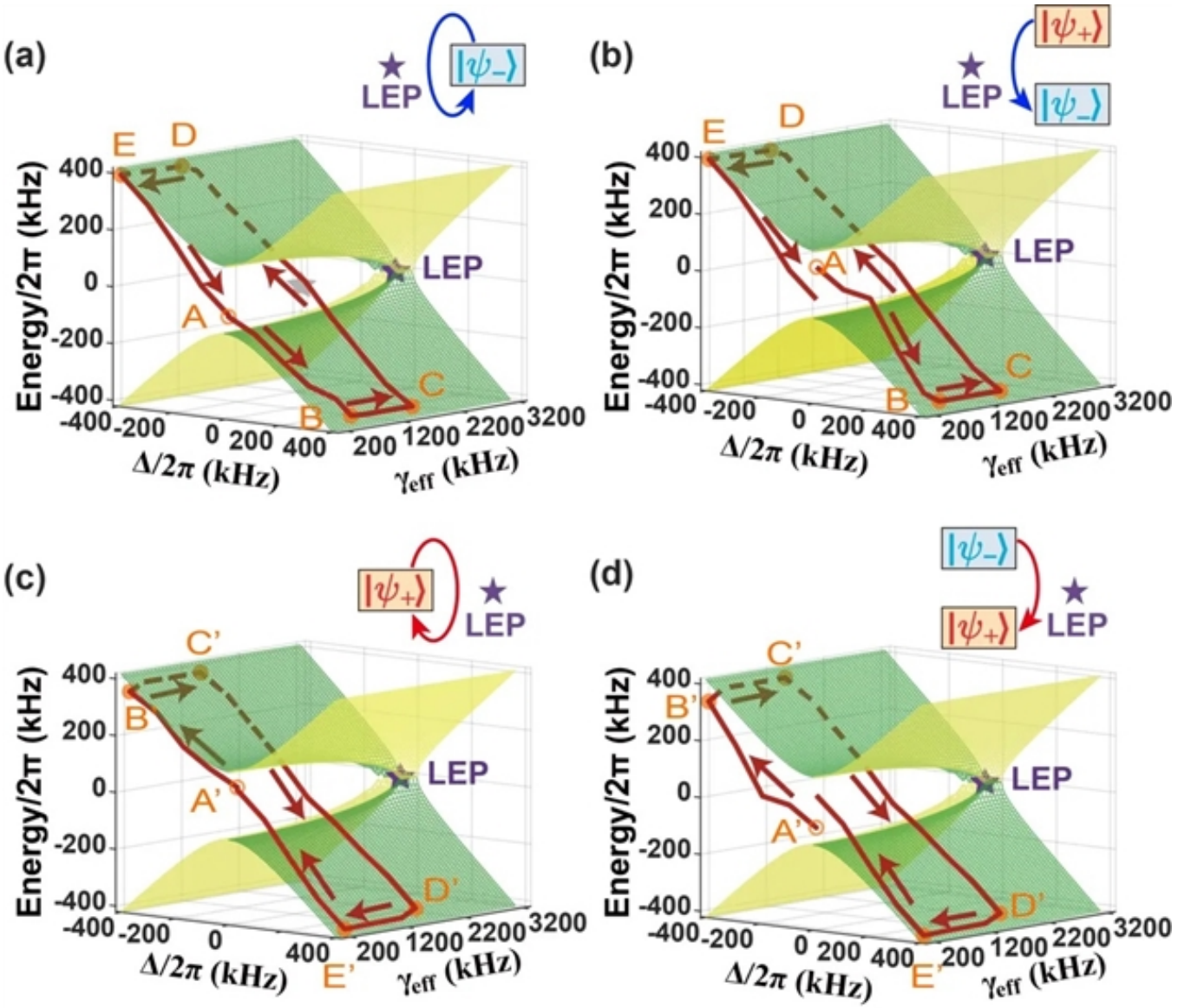


图2. 单离子量子热机在LEP附近的参数空间中做环绕；（c-f）是在LEP附近（但不围绕LEP）的四种不同情况所对应黎曼面的轨迹，其中Δ，γeff分别是能级与激光之间的失谐量以及系统的有效耗散率，图中的星号表示LEP，点A处的空心圆圈表示环绕的起始点。

3.手性态转换伴随的量子加热与冷却

对于没有模式转换的封闭参数循环，量子系统的末态可以回到起始点，整个演化过程包含五个冲程。当系统从ψ-〉出发，逆时针经过参数循环，最终回到了ψ-〉，整个过程净功小于0，是量子冷机循环。当系统ψ+〉从出发，顺时针经过参数循环，最终回到了ψ+〉，整个过程净功大于0，是量子热机循环（如图3）。

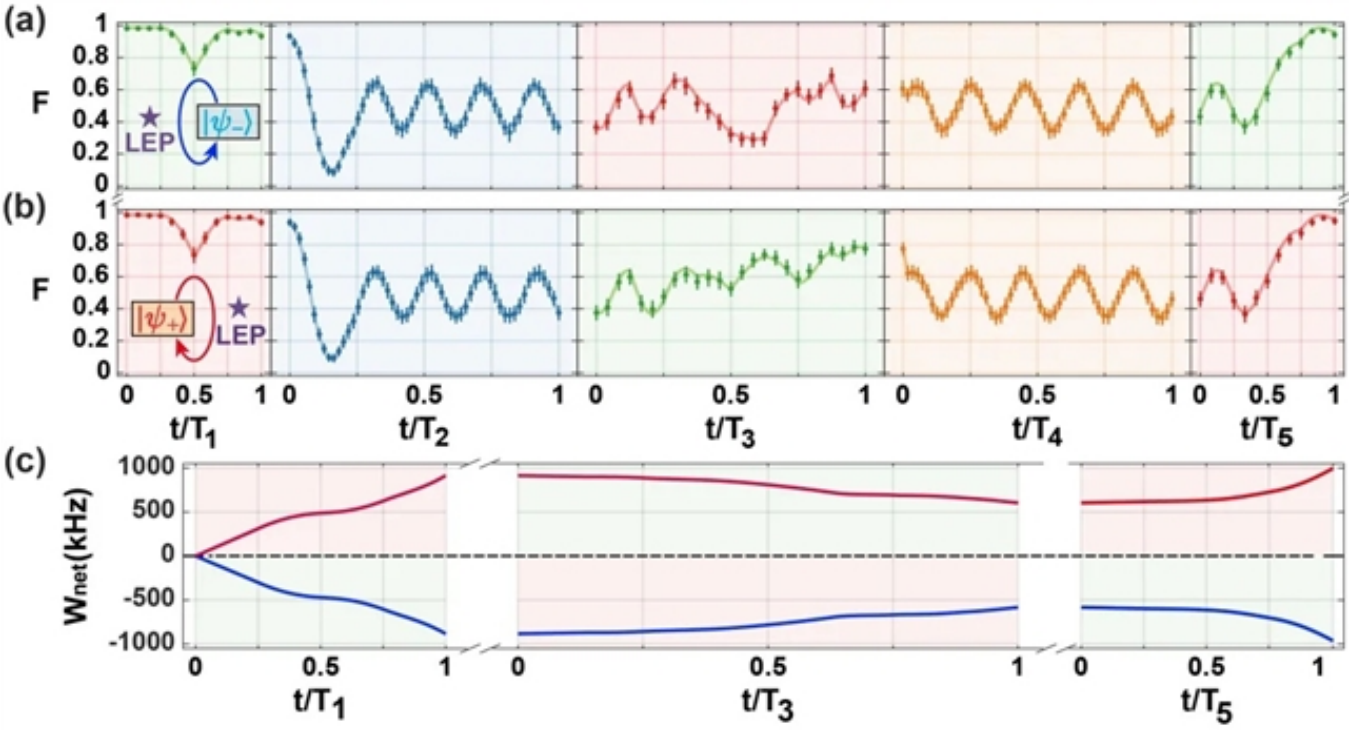


图3. 没有模式转换的封闭参数循环。（a）和（b）分别表示从ψ-〉出发的逆时针循环和从ψ+〉出发的顺时针循环的五个冲程中保真度的变化；（c）蓝色和红色实线分别表示（a）和（b）的净输出功随时间的变化（本图仅展示了与做功相关的三个冲程）。

4. LEP对于手性现象的必要性分析

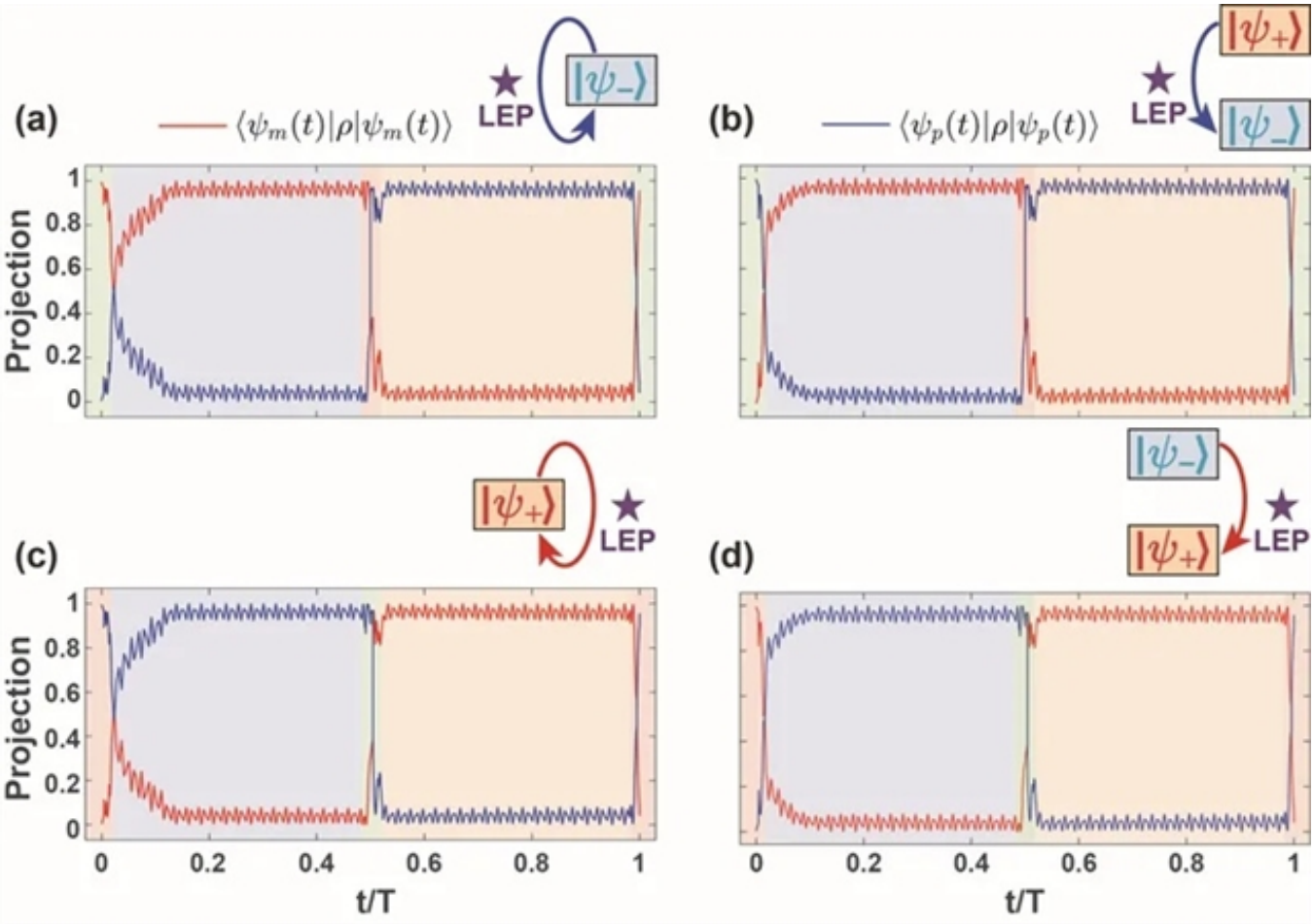


图4: 不同初态和循环方向下末态布居随γmax/4Ω的变化。

为了证明LEP是以上手性现象出现的必要条件，研究人员做了理论模拟。结果证明，只有当γmax≥0.05时（γmax：最大耗散速率；Ω：耦合强度），手性态转换才一定会发生（如图4），这是由于增加的耗散导致非绝热跃迁的产生，才出现手性现象。

总结与展望

该团队设计并对比了不围绕LEP，但在LEP附近从不同初态出发沿不同环绕方向的动力学演化，见证了环绕不封闭的情况下体系的手性行为，也揭示了封闭的环绕所引起体系的 的热力学现象。这项研究有助于理解量子非厄米系统的手性与拓扑行为之间的联系，并建立了手性与热力学之间的桥梁。该团队正致力于研究LEP诱导产生的具有手性特征的纠缠态以及研究手性特征对量子热机效率的影响。这些工作将进一步深化对于手性在量子系统中角色的理解，并揭示其在量子信息处理和量子热力学中的潜在应用。这不仅有助于推动基础量子物理学的发展，还将为设计更高效的量子设备和技术提供新的理论支持和实验依据。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01483-5

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等事宜，请与我们接洽。
作者：冯芒等 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转发