精密测量院等实现基于非厄米体系奇异点的拓扑量子热机

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/22489.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！

精密测量院等实现基于非厄米体系奇异点的拓扑量子热机。

近日，中国科学院精密测量科学与技术创新研究院冯芒研究团队与广州工业技术研究院、湖南师范大学、美国宾夕法尼亚州立大学等合作，利用超冷$^{40}Ca^{+}$离子实验平台（图1），实验实现了国际上首个基于刘维尔奇异点的拓扑量子热机并展现了其动力学行为。该热机的工作物质是一个开放的（非厄米）单比特量子体系.这样的体系中存在本征能量的简并点（即本征态和本征能量塌缩到一点），称“刘维尔奇异点”（LEP）。研究通过改变量子热机做功冲程的变频范围，对比环绕与不环绕LEP的两类热机循环，实验见证了“刘维尔奇异点所引起的拓扑性质可以增强量子热机的输出功和效率”，为探索量子热机的新奇特性和应用潜力提供了重要的实验证据。3月17日，相关研究成果在线发表在《物理评论快报》上。

热机是利用工作物质从热库吸热并对外输出可用功的一类机械。最早的热机出现在18世纪中叶。随后，英国工程师瓦特对蒸汽型热机的改良促成了第一次工业革命的出现，人类从此迈入工业化时代。进入21世纪，得益于微纳加工技术和实验技术的迅猛发展，热机的尺寸也从厘米量级缩小到微纳量级，尤其是量子性质的引入有可能使热机的效率超越传统热机的最高效率。因此，探寻具有更高热机效率的微纳型量子体系是科学前沿问题，更是一项技术挑战。由于量子热机循环过程中吸热、放热冲程都是通过工作物质与外部环境发生相互作用来完成，如何精准巧妙地操控工作物质的非厄米量子性质显得尤为重要。

在该实验中，研究人员运用离子阱量子操控技术实现了环绕与不环绕LEP的两类量子热机循环。离子阱系统是世界上公认的在相干时间、量子态制备、（单比特和两比特）量子态操作、量子态测量等关键参数全面超过量子容错计算阈值的系统，是目前最有希望展现量子技术应用优越性的物理系统之一。冯芒团队长期致力于开发基于$^{40}Ca^{+}$离子的精密操控关键技术，不仅实现了对自旋量子态的精准操控，而且可以精确开合量子体系的耗散通道并调节耗散的大小，由此能够可控地展现非厄米量子系统的所有新奇特征。该团队曾报道利用LEP来调控量子热机的可能性，展现了不同冲程中的量子相干性对热机的功输出和效率有重要影响【*Nature Communications* 13，6625 (2022)】。LEP的存在导致由破缺相到精确相的拓扑相变，但拓扑相变本身是否具有热力学效应却是悬而未决的问题。

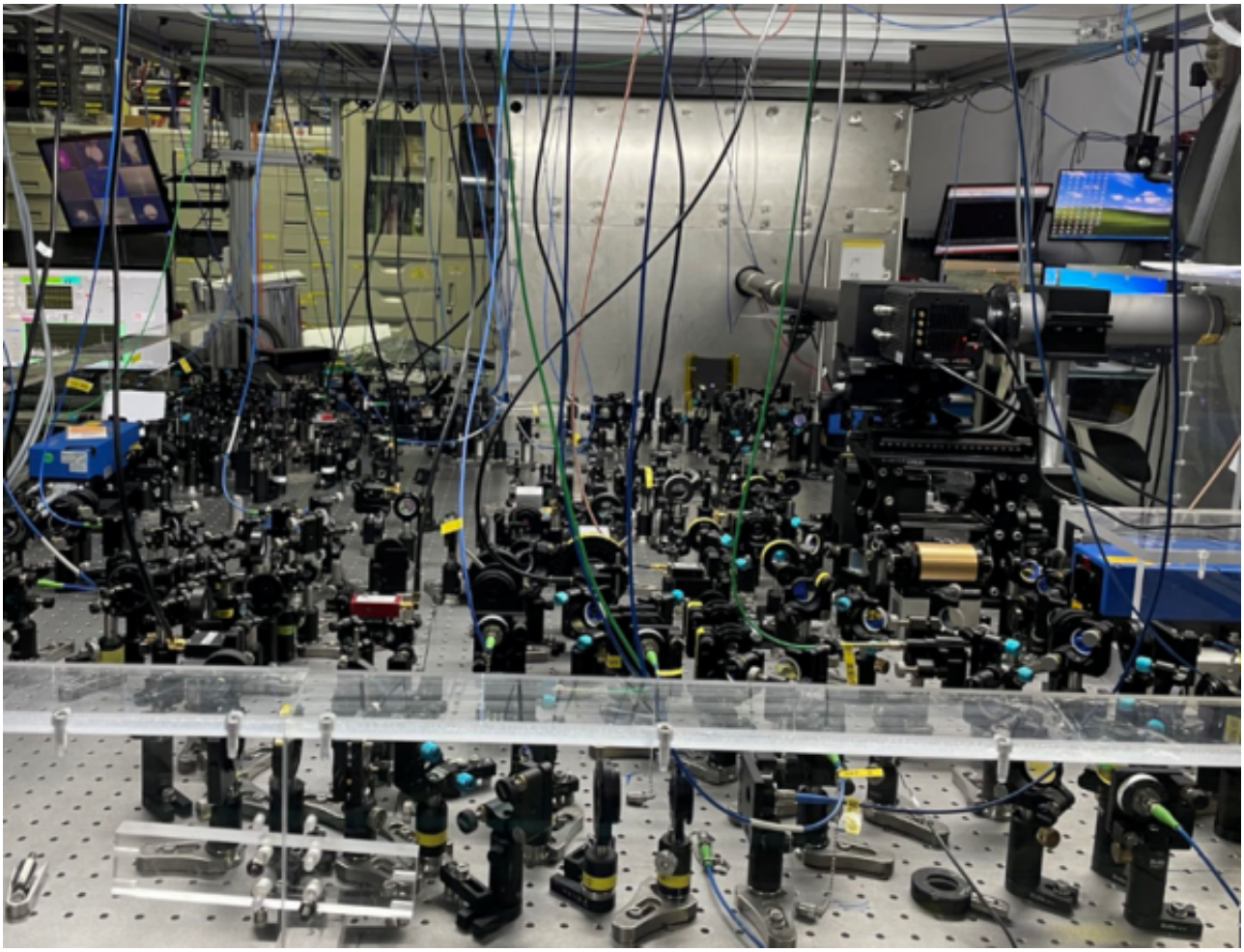
本工作借助单个超冷$^{40}Ca^{+}$

离子的三能级结构，精准地确定了LEP及其精确相和破缺相的实验参数；通过调控外加光场的频率失谐量，实现了环绕与不环绕LEP的两类量子热机循环。实验所演示的量子热机包含等耗散压缩、等失谐加热、等耗散膨胀和等失谐冷却等四个冲程，其中，等耗散压缩处于破缺相，等耗散膨胀处于精确相（图2）。多次实验的结果显示，不环绕LEP的量子热机循环有可能做负功；而环绕LEP的量子热机循环则始终做正功（图3）。基于严格的数据分析并与数值模拟比对，研究最终确认LEP相关的拓扑性质具有热力学特性，可以应用于有效增强量子热机的输出功和效率。

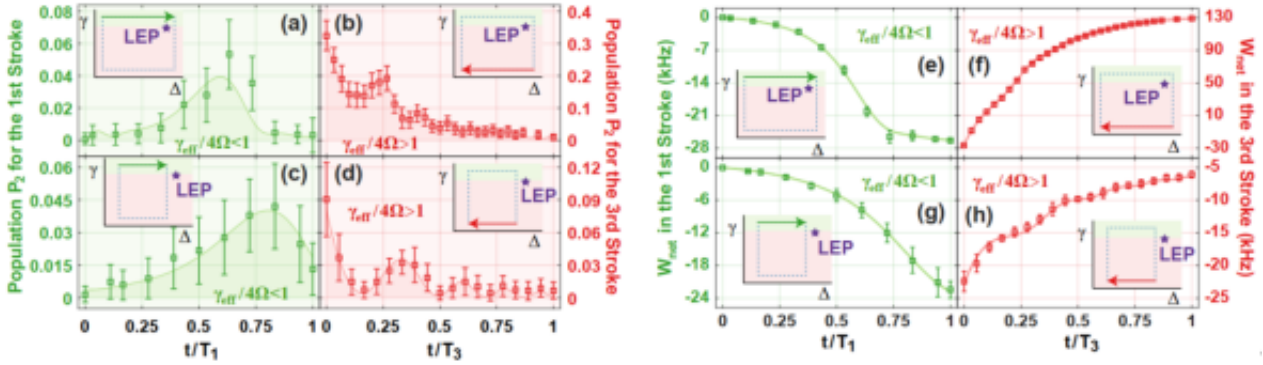
该研究在原子层次的非厄米量子体系中精确展现了国际上第一个基于刘维尔奇异点的拓扑性质的量子热机，见证了拓扑性质所带来的热力学效应。该研究的结论和所展现的技术有望应用于开发分子马达、纳米机器人等微型智能装置。该研究首次揭示了Landau -Zener-St ü ckelberg过程、拓扑相变和量子热机效率三者之间的特殊关系，但其更深刻的物理意义有待进一步探讨。

研究工作得到国家自然科学基金重点项目、广东省重点领域研发计划重大专项和广州市重点实验室项目等的支持。

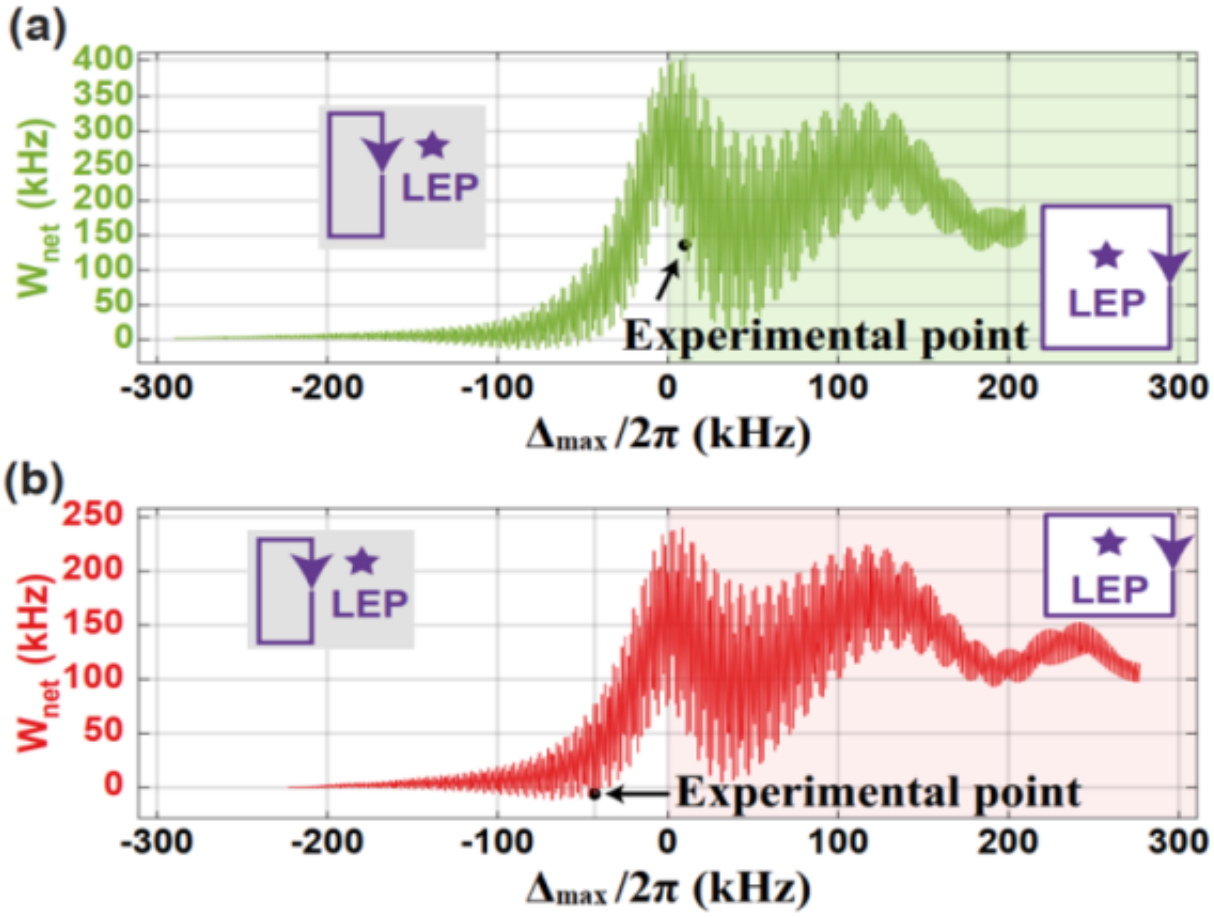
论文链接



超冷$^{40}Ca^{+}$离子实验平台，囚禁离子的离子阱处于磁屏蔽装置（即照片后方银白色的金属箱子）保护中。其余的光学设备用以辅助激光系统操作离子，完成量子热机所需的各个冲程。



实验数据及其对应的输出净功变化。（a、b）环绕奇异点的等耗散冲程所对应的激发态布居数随时间的变化。（c、d）不环绕奇异点的等耗散冲程所对应的激发态布居数随时间的变化。（e、f）环绕奇异点的等耗散冲程所对应的净功变化。（g、h）不环绕奇异点的等耗散冲程所对应的净功变化。图中，绿色线条和阴影区域代表处于破缺相的等耗散压缩，红色线条和阴影区域则代表处于严格相的等耗散膨胀



环绕和不环绕LEP的净功输出。（a）环绕LEP的热机循环不仅确保热机循环始终输出正功，且可以增强净功输出。（b）不环绕LEP的热机循环的输出功有正有负。

研究团队单位：精密测量科学与技术创新研究院

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