

超材料前沿研究一周精选



2026年5月1日-2026年5月10日

索引:

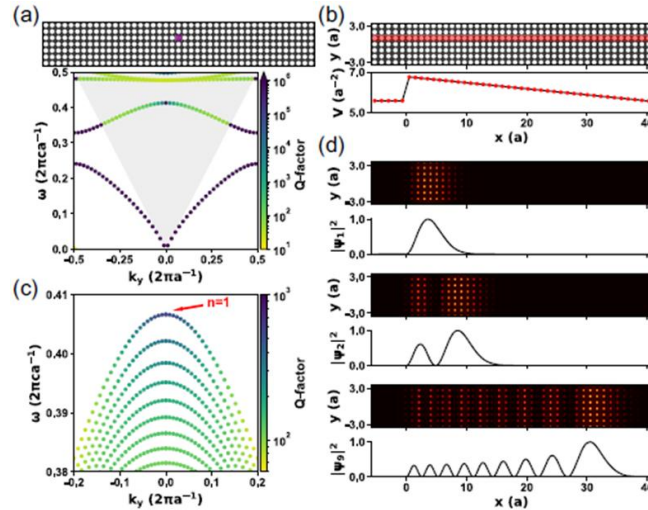
- 1、光子晶体超势中的艾里共振
- 2、连续谱束缚态实现的长程非辐射偶极能量传输与时空相干性
- 3、核跃迁与表面声波的耦合
- 4、电子电路中的 PT 对称性与 EP 点
- 5、通过几何相位调控高次谐波产生中的自旋-轨道相互作用
- 6、三层范德华异质结构中的不对称热传输
- 7、MoTe₂/WSe₂ 莫尔异质结中重费米子的热电效应
- 8、受测量量子动力学中量子信息寿命的标度定律

1、光子晶体超势中的艾里共振

艾里函数是含线性势的定态薛定谔方程的本征态。在光学中，空间分布呈艾里函数形式的激光束被称为艾里光束。由于其具有无衍射、加速传播和自愈等特性，艾里光束已被广泛用于突发自聚焦、微粒光操控等领域。在晶格体系中，艾里光束已被理论预言可在光子晶体中实现，并已在波导阵列中得到理论和实验验证。相比之下，艾里共振是波函数可由艾里函数描述的局域共振态，通常出现在具有线性势的系统中。尽管艾里光束研究较多，艾里共振尤其在光子学中仍较少探索。此前虽已在光子腔中实现艾里共振，但其体系尺寸仅限于一维方向上数个晶胞的腔模。

近日，宾夕法尼亚州立大学 Mikael C. Rechtsman 教授团队，利用线性超势在二维硅光子晶体板中直接观测到艾里共振，并从实验上验证了其三个典型特征：艾里模式的频率分裂及线宽、艾里本征态的空间分布，以及艾里模式辐射在自由空间中的弯曲传播。由于复有效质量引起的非厄米性，艾里共振具有有限线宽，并会通过多个共振态的干涉显著改变光子晶体的响应。该体系为研究非厄米性与外部势场的相互作用提供了新平台，并可用于亚毫米尺度、位置可调的片上艾里光束产生。作者还建立了光子晶体超势的一般理论框架，可推广至光子、声子等缓变非周期结构的共振调控。

相关工作发表在《Physical Review Letters》上。（刘帅）



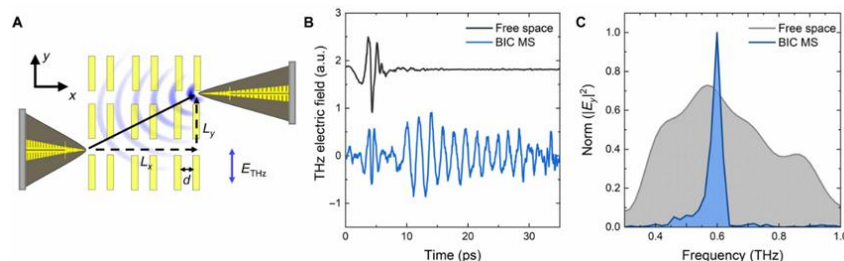
文章链接: <https://doi.org/10.1103/2746-1fgh>

2、连续谱束缚态实现的长程非辐射偶极能量传输与时空相干性

偶极-偶极相互作用是能量输运、量子通信以及光-物质耦合中的核心机制。传统的 Förster 共振能量转移依赖近场非辐射耦合，其效率会随距离快速衰减，因此通常只能发生在深亚波长尺度内。这种天然的距离限制严重制约了大规模集成光子与量子器件的发展。近年来，研究者开始尝试借助人工光学结构调控电磁环境，以增强偶极间的能量传输。其中，连续谱束缚态因具有高品质因子、强局域场以及与辐射连续谱解耦等特性，被认为是实现低损耗长程耦合的重要候选机制。然而，在有限尺寸超构表面中，边界散射与结构缺陷会使理想束缚态退化为准束缚态，其对能量传输距离与时空相干性的影响仍缺乏系统研究。

近日，荷兰埃因霍芬理工大学的 Jaime Gómez Rivas 教授和 Jie Ji 博士研究团队，在太赫兹超构表面中实现了由连续谱束缚态介导的毫米尺度非辐射偶极能量传输。研究采用双探针太赫兹近场时域显微系统，将微探针分别作为点偶极激发源与探测器，从而直接测量束缚态介导下的能量传输过程。实验结果表明，连续谱束缚态能够在特定方向上维持长距离且保持相位稳定的能量传播，而在垂直方向则迅速衰减，表现出明显的方向各向异性。进一步研究发现，能量传输效率在超构表面中心区域最强，因为该区域受到的边界散射最小；靠近边界时，则会出现反向散射与相位扰动，使相干性减弱。理论与实验均表明，这种长程耦合来源于整个阵列的集体响应，而非单个散射单元的局域作用。该工作证明了连续谱束缚态不仅能够突破传统近场能量传输的距离限制，还能够在长距离范围内保持时空相干性，为片上量子通信、集成纳米光子学以及仿生能量输运提供了新的实现思路。

该研究发表于《Science Advances》。（刘梦洋）



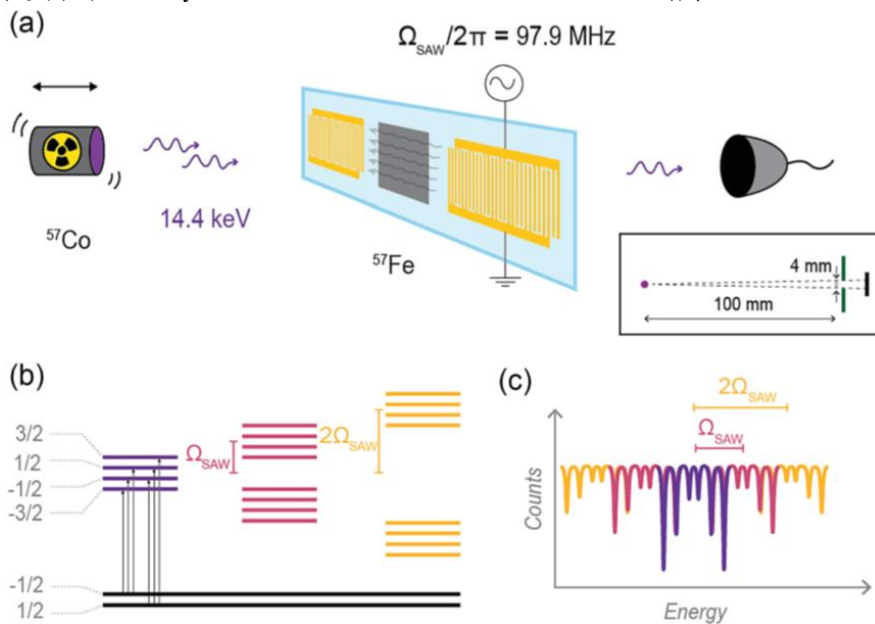
文章链接: <https://doi.org/10.1126/sciadv.adx2005>

3、核跃迁与表面声波的耦合

当低能核 γ 跃迁发生在某些固体中时,反冲动量可由整个晶格相干吸收,从而产生无反冲跃迁,并表现出极窄的谱线,这一现象称为穆斯堡尔效应。自 1958 年发现以来,它曾被用于验证广义相对论预言的引力红移。如今,穆斯堡尔谱学已成为化学和材料科学中探测局域电、磁和结构环境的重要工具。除精密谱学外,穆斯堡尔效应也是核量子光学和 X 射线量子光学的重要平台。通过外磁场或机械调制实现的核系综相干控制,已推动无反冲 γ 光子波形整形和同步辐射脉冲谱线窄化等研究。

近日,斯坦福大学 Lorenzo Magrini 教授团队,在单片集成器件中,将富集的原子核与频率为 97.9 MHz 的行进表面声波耦合。相比于传统的体声压电驱动薄膜方案,这一方法具有三方面重要优势:它能够以远高于核跃迁线宽的频率调制核共振,从而将可实现的调制带宽扩展到传统压电驱动方案之外;表面声波器件的制备工艺成熟、可控且易于扩展,并具有一定的设计灵活性;同时,表面声波本身也是一种成熟的固态平台,其在量子体系中的行为已有深入理解,并且可与多种量子系统兼容。实验中观察到了核跃迁的 Floquet 边带,其强度随调制强度呈现典型的贝塞尔函数依赖关系。这是迄今报道的最高频率声子驱动穆斯堡尔共振调制,也是首次在单片集成器件中实现该效应。这一工作建立了一种对核共振进行高带宽、时间分辨机械控制的新方法。

相关工作发表在《Physical Review Letters》上。(刘帅)



文章链接: <https://doi.org/10.1103/tc97-98f7>

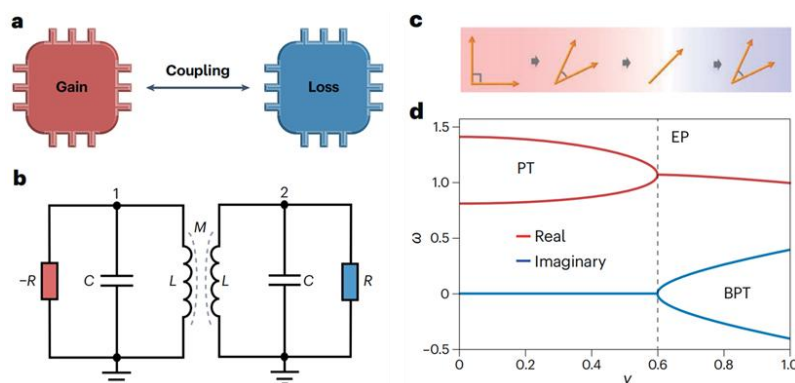
4、电子电路中的 PT 对称性与 EP 点

具有实谱的 PT 对称哈密顿量最初是在量子力学和量子场论框架下提出的,如今已被广泛拓展至光学、声学、电路等经典波动系统。PT 对称系统(以及更广泛的非厄米系统)可通过增益、损耗或开放环境表现出复谱、非正交本征态以及

EP 点等性质。其中，EP 点是 PT 对称系统以及更广义非厄米系统中最具代表性的奇异结构：在该点处，两个或多个本征值及其对应本征矢同时汇聚，导致系统本征基发生坍塌。过去，损耗和衰减通常被视为需要抑制的不利因素；而 PT 对称性和 EP 点物理的发展表明，非厄米性也可以成为一种可设计、可调控并可用于实现新型功能的物理资源。近年来，这些概念被进一步引入电子电路体系，催生了高灵敏传感、无线遥测、硬件加密、无线能量传输和非互易传输等一系列可实验实现的应用场景。

近日，Wesleyan 大学 Tsampikos Kottos 教授和 Saint Louis 大学 Ramy El-Ganainy 教授团队系统综述了 PT 对称性与 EP 点在电子电路中的发展。电子电路为研究非厄米物理提供了高度灵活的平台：损耗可由普通电阻引入，增益可通过负电阻或有源电路实现，而电容、电感、电阻及回转器等元件又可用于构造多种耦合方式。与光学谐振器相比，电子谐振器由可独立调控的集总元件组成，因此更便于精确设计、动态调制和集成实现。该综述从 PT 对称电子电路的基本原理与实现方法出发，重点介绍了其在遥测、传感、硬件加密、无线能量传输以及 Floquet 调制电路等方向的关键应用，并展望了非厄米电子系统在集成微波器件、拓扑电路和量子电路中的未来发展方向。

相关内容发表于《Nature Electronics》上。（金梦成）



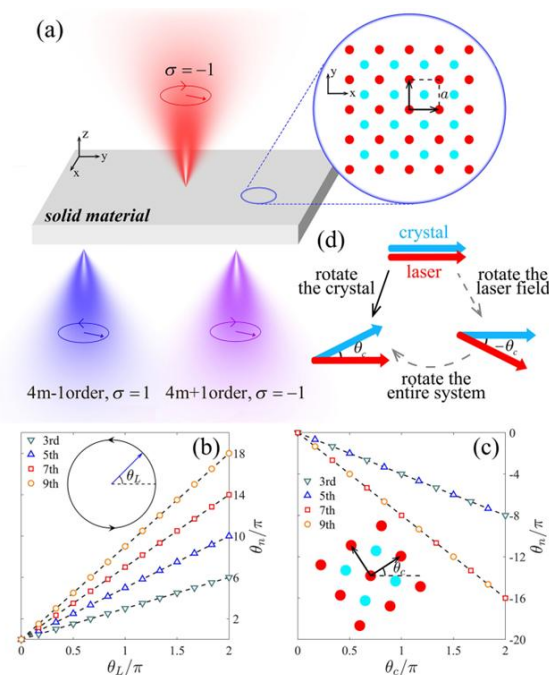
文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41928-026-01623-2>

5、通过几何相位调控高次谐波产生中的自旋-轨道相互作用

强激光与物质相互作用所产生的高次谐波，是阿秒科学与超快光谱的重要基础，其不仅能够产生极紫外甚至软 X 射线波段的超短脉冲，还为探测电子动力学、能带结构以及超快非平衡过程提供了关键手段。近年来，随着结构化光场与拓扑光学的发展，光的自旋角动量与轨道角动量逐渐成为调控非线性光学过程的重要自由度。尤其是在携带涡旋相位的光场中，轨道角动量能够赋予光束螺旋波前，从而在信息编码、光学通信以及超分辨成像等方向展现出独特优势。然而，在传统均匀介质中，自旋角动量与轨道角动量通常彼此独立守恒，两者之间难以实现高效耦合。尽管几何相位已在偏振调控、超表面以及线性光学中得到广泛应用，但其在强场非微扰高次谐波过程中的作用仍缺乏系统研究。因此，如何在高次谐波产生过程中引入几何相位，并进一步实现对谐波波前、自旋与轨道角动量的协同调控，成为超快光场操控领域中的重要问题。

近日，北京大学的彭良友教授和德国马克斯·玻恩研究所的 Mikhail Ivanov 教授、Olga Smirnova 教授联合研究团队，提出通过具有空间变化晶轴取向的超表

面结构，实现对固体高次谐波的波前与角动量的精确操控。研究表明，在具有局域晶格各向异性的晶体中，圆偏振驱动光能够诱导谐波获得额外几何相位，而这一相位来源于晶体旋转对谐波发射过程的调制。基于这一机制，研究进一步构建了具有空间旋转对称性的超表面，使不同空间位置的谐波获得可设计的相位分布，从而实现驱动光自旋角动量向谐波轨道角动量的转换。数值结果显示，高次谐波能够形成具有不同拓扑荷的涡旋结构，并保持清晰的远场传播特征。除此之外，该工作还展示了几何相位在矢量化偏振整形、巨型光子自旋霍尔效应以及高次谐波金属透镜中的应用。这一研究表明，几何相位不仅能够极端非线性条件下保持有效，还为阿秒尺度下的光场整形与超快信息调控提供了新的设计框架。该研究发表于《Physical Review Letters》。（刘梦洋）

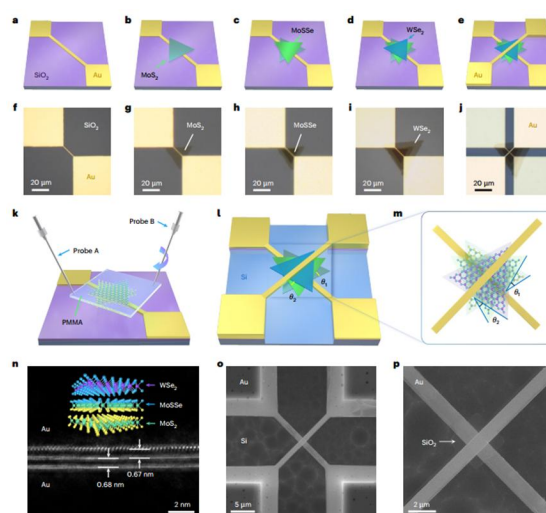


文章链接: <https://doi.org/10.1103/tlww-cyrl>

6、三层范德华异质结构中的不对称热传输

随着人工智能、高性能计算与三维集成芯片的快速发展，器件功耗密度不断攀升，热管理已成为制约下一代电子技术发展的核心瓶颈之一。在现代三维集成电路中，芯片内部产生的大量热量需要沿垂直方向快速传导至外部封装，而外界高温又可能反向侵入芯片内部，导致热敏感器件失效。因此，如何实现“单向优先”的热传输，即让热量能够高效地从芯片内部向外散热，同时阻止外界热量反向回流，成为国际热科学领域长期追求的重要目标。传统热整流器大多依赖微米级结构设计，例如特斯拉阀、纳米孔阵列或人工超材料等，但这些方案通常尺寸较大、只能调控面内热流，难以满足纳米尺度芯片集成需求。近年来，具有上下结构不对称特征的 Janus 二维材料为热运输调控带来了新的可能。其中，二维 Janus 材料 MoSSe 由于上下原子层不同，天然具备垂直方向的结构非对称性，被认为有望实现真正的纳米尺度非对称声子输运。然而，如何在超薄范德华体系中实现可调控、高效率的垂直热整流，并揭示其中的声子输运机制，仍然是国际前沿难题。针对这一挑战，清华大学曹炳阳教授、王海东研究员以及北京大学刘开辉教授团

队构筑了由 MoS_2 / MoSSe / WSe_2 组成的三层范德华异质结构，并提出一种“热 Janus 晶体”概念，实现了超薄尺度下可调控的非对称热输运。研究人员通过精确调控 MoS_2 / MoSSe 与 MoSSe / WSe_2 界面的扭转角，成功将热输运非对称性从 23% 提升至 104%，实现了目前二维范德华体系中极为显著的垂直热整流效应。为准确测量垂直方向热导，团队自主设计了悬浮式 X 型纳米传感器，实现了不同热流方向下界面热导的高精度测量。实验发现，当热量从 MoS_2 流向 WSe_2 时，界面热输运明显增强，而反向传热则受到抑制。进一步结合非平衡分子动力学模拟与频谱热流分解分析，研究团队揭示： MoSSe 的 Janus 结构导致上下两个界面在高频与低频声子耦合上存在显著差异，不同方向热流对应的面内与面外声子贡献不同，从而产生明显的热输运非对称性。为了验证其器件应用潜力，团队还将该异质结构集成于场效应晶体管之上，利用热反射成像技术发现，在 58 mW 加热功率下，两种堆叠方向可产生 3.9 K 的表面温差，证明该结构能够实现“热量易出难进”的智能热管理功能。该工作为二维材料中的单向热输运调控提供了全新思路，也为未来高集成芯片、热逻辑器件以及智能热界面材料的发展开辟了重要方向。相关内容发表于《Nature electronics》上。（张琰炯）



文章链接：<https://doi.org/10.1038/s41928-026-01620-5>

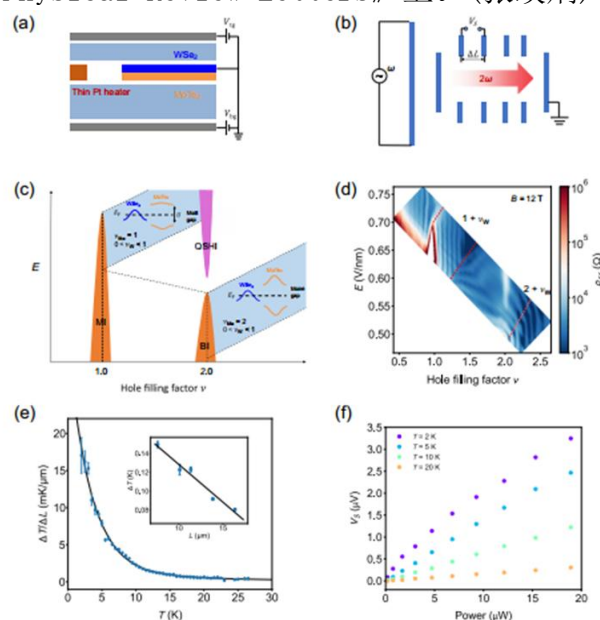
7、 MoTe_2 / WSe_2 莫尔异质结中重费米子的热电效应

近年来，强关联量子材料研究不断取得突破，其中“重费米子”体系因其能够产生超导、电荷有序以及量子临界等丰富物理现象而备受关注。在传统重费米子材料中，电子会因与局域磁矩发生强烈耦合而表现出远大于自由电子的“有效质量”，这种行为通常源于 Kondo 效应。然而，传统重费米子体系大多存在于复杂金属化合物中，材料参数难以连续调控，限制了人们对其微观机制的深入理解。近年来，随着二维范德华材料和莫尔超晶格体系的发展，研究人员发现，通过堆叠不同二维材料形成的莫尔结构，可以在人工晶格中模拟强关联电子行为，为研究重费米子物理提供了全新的“量子模拟平台”。特别是 MoTe_2 / WSe_2 莫尔双层体系，由于层间周期性势场和强电子关联作用，可以形成可电场调控的 Kondo 晶格，从而实现“人工重费米子”。不过，此前研究主要集中在电输运与磁输运性质，对于能够直接反映电子熵与关联强度的热电输运测量仍十分缺乏，而热电系数恰恰是理解重费米子形成、演化及其量子相变的重要探针。因此，在莫尔强关联体系

中实现高精度热电测量，并揭示其中隐藏的重费米子热力学信息，成为当前国际凝聚态物理领域的重要前沿方向。

近日，美国康奈尔大学 Jie Shan 教授课题组与 Kin Fai Mak 教授课题组合作，研究团队利用角度精确对准的 $\text{MoTe}_2/\text{WSe}_2$ 莫尔双层结构，首次系统实现了莫尔重费米子体系中的定量热电测量。研究人员通过双栅极结构精确调控载流子浓度与垂直电场，在 Kondo 晶格区域成功观测到 Seebeck 系数（塞贝克系数）随温度和磁场发生符号反转的重要现象：低温下体系表现为电子型重费米液体，而当温度升高超过 Kondo 相干温度后，Kondo 单态被热激发破坏，体系重新转变为空穴型费米液体。与此同时，在外加磁场作用下，研究团队还观察到了 Kondo 单态发生 Zeeman 破缺时对应的巨大热电峰值以及显著的熵积累行为，揭示了莫尔重费米子体系中的量子相变特征。为了完成这一实验，团队设计了高灵敏度二维热电测量平台，通过交流加热与二次谐波检测技术，实现了对超小尺度温差和热电压的精准测量。研究表明，热电系数不仅能够反映费米面的重构，还能直接探测重费米子形成与破坏过程中的电子熵变化。

相关内容发表于《Physical Review Letters》上。（张琰炯）



文章链接：<https://doi.org/10.1103/1qvv-2vrw>

8、受监测量子动力学中量子信息寿命的标度定律

量子测量是量子力学区别于经典物理的核心特征之一。传统上，测量常被视为破坏量子相干性、导致信息丢失的重要因素。然而，随着可编程量子平台和中途测量技术的发展，测量不仅是读取系统状态的手段，也可以成为制备量子态、调控多体动力学以及实现量子信息处理的重要资源。特别是在监测量子电路中，系统在么正演化过程中不断受到局域投影测量，其纠缠结构可随测量强度发生从体积律到面积律的转变，即测量诱导相变。这一方向已经成为量子信息、统计物理和凝聚态物理交叉领域的重要研究主题。

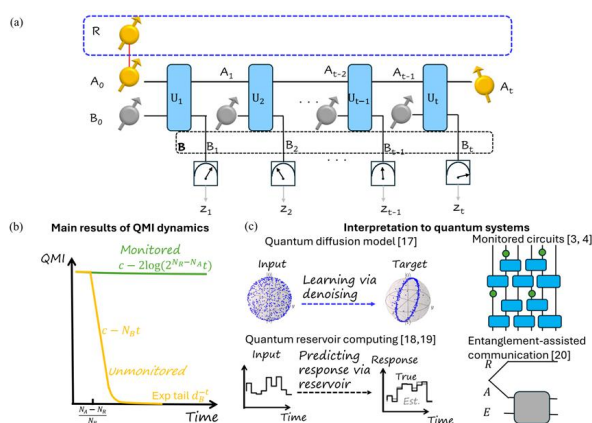
在量子科技应用中，理解测量如何影响量子信息寿命具有重要意义。对于量子纠错而言，中途测量是提取纠错综合信息、维持逻辑量子态相干性的关键步骤；在超导量子比特等平台中，基于测量结果的条件操作也被认为是实现可扩展量子计

算的重要路径。此外，中途测量还可用于量子算法中辅助比特的重复利用，从而降低物理资源开销。因此，量子信息在反复测量和环境耦合下能够保持多久，成为一个兼具基础意义和应用价值的重要问题。

这一问题在量子机器学习场景中同样突出。例如，在量子去噪扩散概率模型中，中途测量既提供生成学习所需的量子随机性，又可通过测量结果引导态集合向目标分布演化；在量子储备池计算中，部分量子比特被反复测量并重置，未测量部分则承担记忆功能。因此，量子信息寿命直接关系到模型的学习效率、记忆时间和可利用的动力学资源。

近日，南加州大学 Quntao Zhuang 教授团队研究了受监测量子动力学中量子信息寿命的标度规律。作者考虑系统与环境浴反复相互作用的量子动力学过程，并通过中途测量环境浴来追踪信息流动。研究发现，量子信息是否快速衰减，并不只取决于系统是否受到测量，更关键地取决于测量结果是否被记录。当环境浴被连续监测且完整测量轨迹被保留时，量子互信息仅随时间对数衰减，从而使信息寿命可随系统尺寸指数增长；相反，若测量轨迹被丢弃，信息寿命通常至多随系统尺寸线性增长，甚至退化为常数。进一步地，在部分监测情形下，系统表现出双尺度转变：在微观时间尺度上呈对数衰减，而在宏观时间尺度上则转变为线性衰减。该研究表明，测量记录本身可以作为一种重要的信息资源，显著改变开放量子系统中的信息保持能力。

相关内容发表于《PHYSICAL REVIEW X》上。（金梦成）



文章链接: <https://doi.org/10.1103/7717-1mw2>

(来源: 两江科技评论)