
超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术助力微观动力学研究

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/33456.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！

超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术助力微观动力学研究。 导读

近日，来自意大利的里雅斯特大学Daniele Fausti研究团队开发了一种新型的超快量子光谱学技术——超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术，用于研究复杂材料中超快非平衡动力学及量子涨落。该技术的核心在于，通过激光脉冲的载波包络相位（CEP）的不稳定性引入相位随机化，避免了对相位稳定性的严格要求，提高了测量的鲁棒性；并通过结合泵浦-探测实验和量子光学态层析成像，实现了在飞秒时间尺度上重建光场的量子态分布。这为研究量子材料中的非平衡量子动力学提供了一种全新的手段，这一技术不仅能够以超快时间分辨率捕捉物质的非平衡态动力学，还为研究更复杂的量子材料提供了新的可能性。

该工作以Ultrafast pump-probe phase-randomized tomography为题，发表在国际光学顶尖期刊《Light: Science Applications》。

研究背景

研究物质低能激发中的涨落是揭示材料非平衡响应本质的关键。在现代物理学中，量子材料如超导体、量子磁体和拓扑绝缘体等，在非平衡状态下能够展现出的独特物理现象及广泛的应用前景，因而备受关注。这些独特的现象包括光诱导超导、光诱导铁电性以及相干声子动力学等，通常发生在飞秒（10-15秒）甚至更短的时间尺度上，在热力学平衡态下难以观察到。

传统光谱学技术虽然能够提供物质的宏观信息，但在揭示微观量子现象时面临诸多挑战。量子光谱学的出现为这一领域带来了新的希望，它利用光的量子特性（如单光子态、纠缠态等）来探测物质的微观结构和动态过程。然而，将量子光谱学应用于超快非平衡现象的探测仍面临技术挑战。一方面，量子光谱学需要在弱光信号下工作，这使得信号检测变得极为困难；另一方面，由于相位的微小波动可能导致测量误差，因此，传统的泵浦-探测实验需要精确地控制光场相位。

近日，来自意大利的里雅斯特大学Daniele Fausti研究团队为解决以上问题，开发了一种新型的超快量子光谱学技术——超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术，用于研究复杂材料中超快非平衡动力学及量子涨落（如图1）。该技术的核心在于，通过激光脉冲的载波包络相位（CEP）的不稳定性引入相位随机化，避免了对相位稳定性的严格要求，提高了测量的鲁棒性；并通过结合泵浦-探测实验和量子光学态层析成像，实现了在飞秒时间尺度上重建光场的量子态分布。这为研究量子材料中的非平衡量子动力学提供了一种全新的手段，这一技术不仅能够以超快时间分辨率

捕捉物质的非平衡态动力学，还为研究更复杂的量子材料提供了新的可能性。

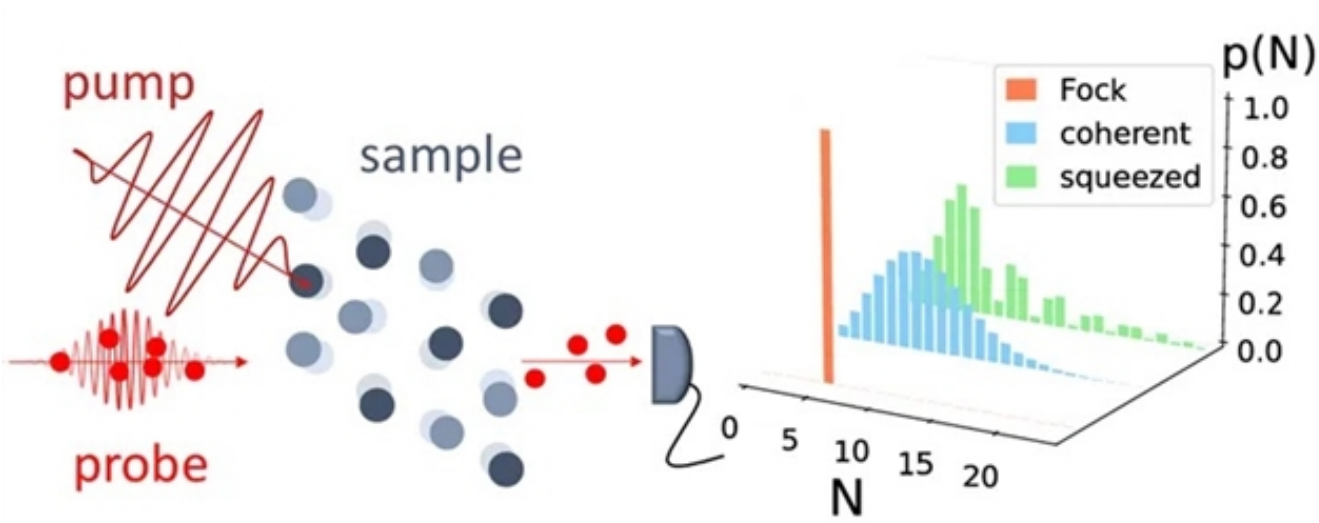


图1. 超快泵浦-探测相位随机层析成像技术原理

创新研究

团队首先详细展示了超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术的实验装置以及其实现方式（如图2），该装置结合了光学参量放大器（OPA）、二次谐波生成（SHG）和相位随机化技术。实验中，OPA的信号光和差频光被调谐至共振频率，通过SHG过程生成相位随机化的探测脉冲。这种相位随机化利用了激光脉冲的自然载波包络相位（CEP）波动，避免了传统实验中对相位稳定性的严格要求，提高了测量的鲁棒性。此外实验通过测量相位平均的光学四象限分布，并利用最大似然算法重建光子数分布。

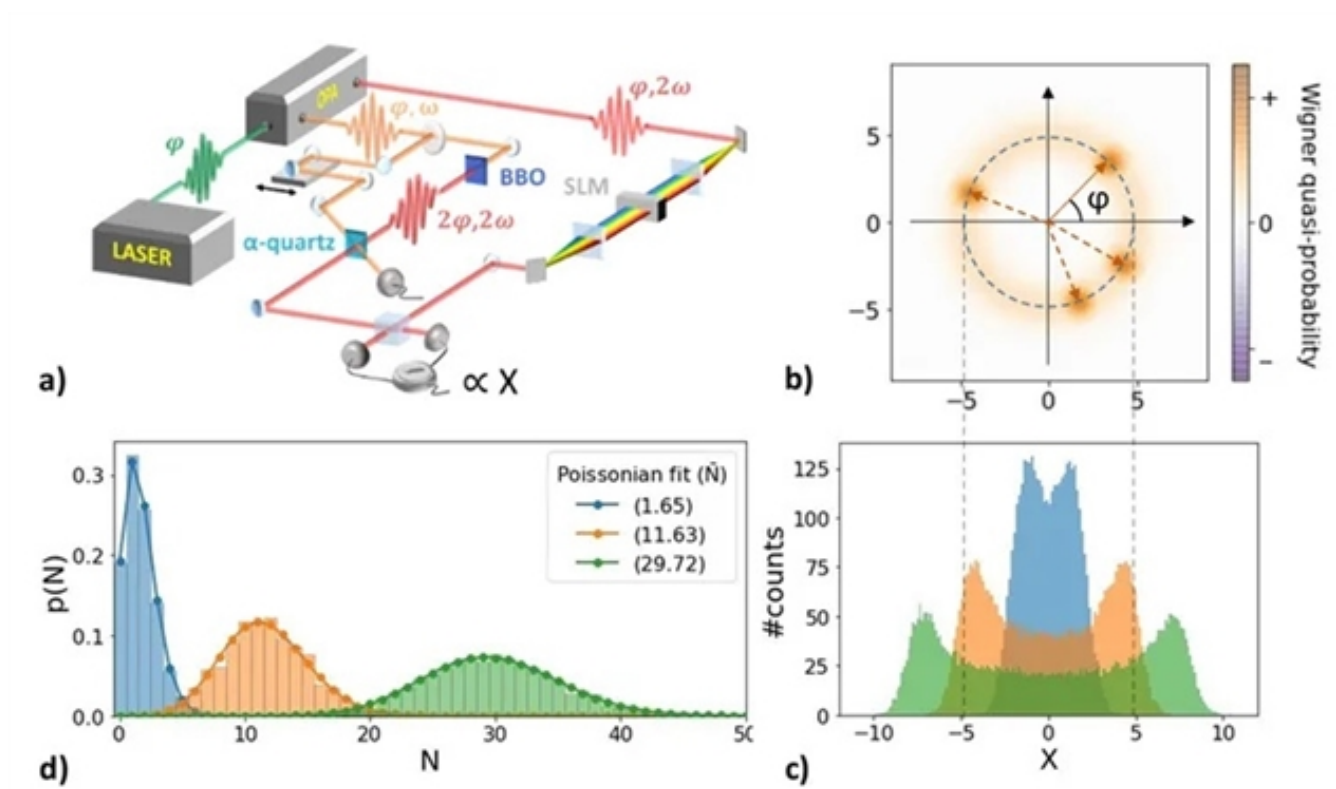


图2. 用相位随机泵浦探测实验重建光子数分布

随后，研究团队通过研究 α -石英中的相干声子动力学（如图3），呈现了在不同时间延迟下，探测脉冲的光子数分布随泵浦脉冲的激发而改变的情况。零延迟时由于泵浦脉冲与探测脉冲的相干叠加导致强烈响应，正延迟时声子激发引起光子数分布周期性振荡。通过相位平均层析成像技术，捕捉到了光子数分布随时间的演化，揭示了材料中相干声子的激发和弛豫过程。

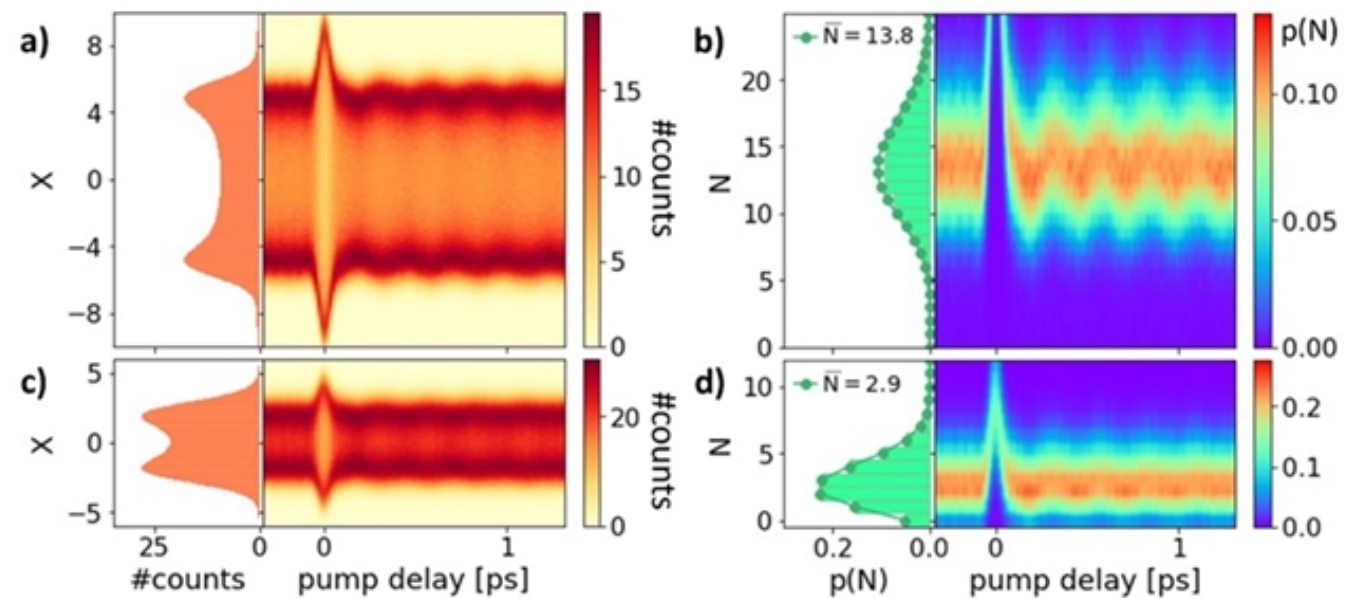


图3. 泵浦-探测调制实验中，相干声子激发引起的光子数分布

最后，研究团队进一步分析了光子数分布的平均值和方差随时间延迟的变化，并对比了不同的声子态（相干态、热态、压缩态）的理论模拟结果。对于相干态，光子数分布的方差与平均值接近，表现出泊松分布的特性，反映了系统的量子相干性；对于热态，方差大于平均值，表现出超泊松分布，反映了热激发下的经典噪声特征；对于压缩态，方差在某些时刻显著低于平均值，表现出亚泊松分布，反映了量子压缩特性。实验结果与理论模拟的相干态较为接近，表明在当前实验条件下，材料中的声子主要表现为相干激发，未观测到显著的量子压缩或热态特征，同时也证实该技术在区分不同的声子态的潜力(如图4)。

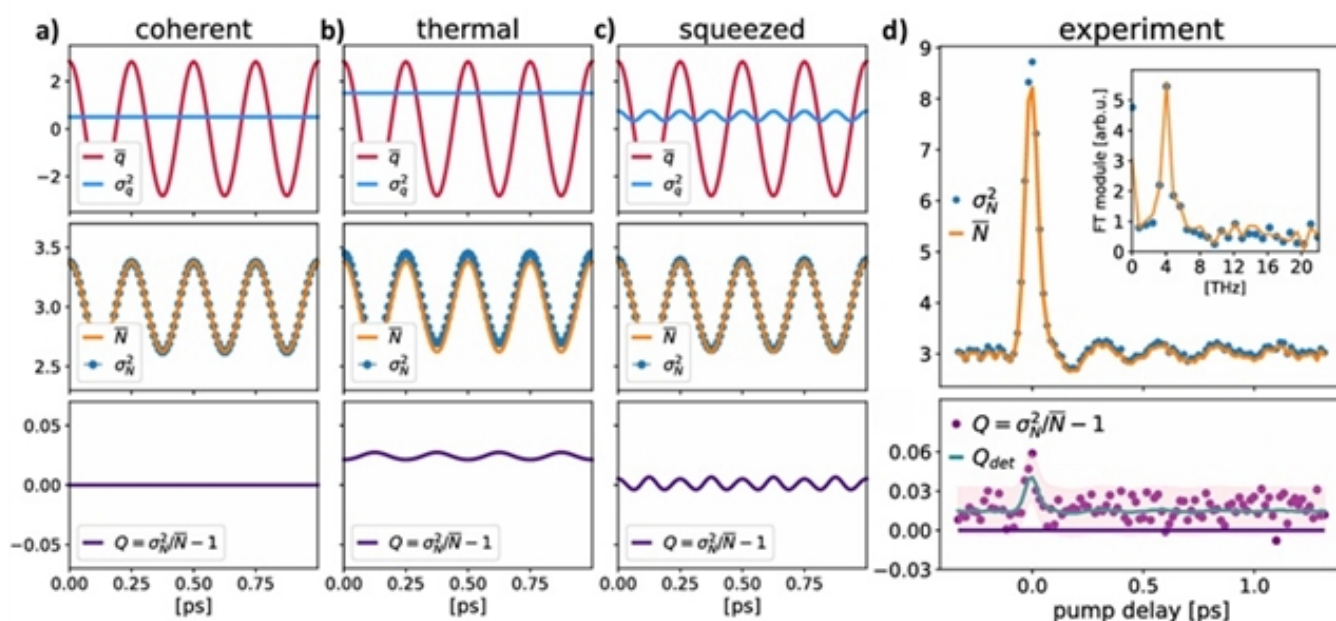


图4. 不同声子态下的光子数分布参数演化

应用与展望

研究团队开发了一种超快量子光谱学技术，该技术通过引入相位随机化超短激光脉冲，解决了相位不稳定性带来的测量不准确问题，提高了测量的鲁棒性；并通过结合泵浦-探测实验和量子光学态层析成像，实现了在飞秒尺度上重建光场的量子态分布。团队通过理论模拟及实验验证了超快泵浦-探测相位随机化层析成像技术在捕捉非平衡态量子动力学方面的有效性，同时展示了该技术在区分不同声子态方面的潜力。该技术为研究量子材料中的非平衡量子动力学提供了一种全新的手段，也为研究更为复杂的量子材料提供了新的可能性。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01789-y>

作者：Daniele Fausti 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://iikx.com)转发