

“听风辨器”——关联电子系统中的太赫兹光回波与元激发时空干涉

多数物理实验技术通过线性响应来探测材料的物理性质，而新发展起来的非线性谱学则是通过探测材料的非线性响应来获得体系更多的信息。这类新谱学技术的代表之一是二维相干光谱学——该技术运用多个光脉冲激发体系，然后测量体系的非线性响应。在红外、可见光、与紫外波段，这一强有力的谱学手段被广泛应用于化学、生物学等领域，用来精细刻画原子分子体系的电子结构、化学反应，乃至生命过程【1】。

最近涌现出来的太赫兹二维相干光谱学将该技术拓展到了半导体异质结、超导体、量子磁体、电子玻璃等关联电子系统的能量尺度，打开了一扇认知关联电子系统的全新窗口【2】。然而，人们对关联电子系统的非线性光学性质尚缺乏认识。一方面，人们还不清楚这类体系的非线性光学响应与其物理性质是否存在直接的联系。另一方面，现有理论使用能级跃迁的语言来描述非线性光学过程，它适用于原子分子等少体系统，却并不便于分析多体系统。寻找关联电子系统非线性光学响应与其物理性质的直接联系，并探索描述多体系统非线性光学响应的新语言，构成了领域的两大理论挑战。

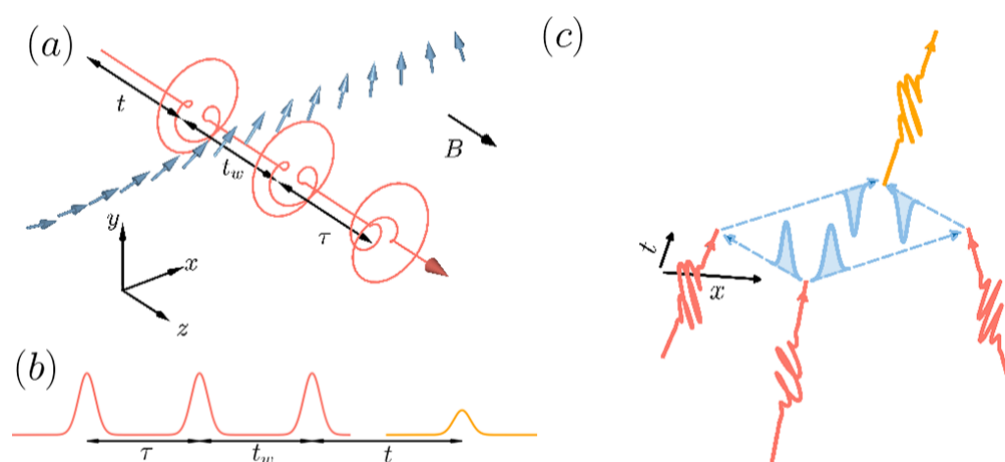


图1. (a)为模型的具体设置。其中蓝色箭头代表自旋，红色箭头代表引起体系非线性响应的圆偏振光脉冲。(b)为光回波的示意图。红色实线为光脉冲， $t=\tau$ 时回波信号出现（橙色实线）。(c)为“透镜效应”图像的示意图。

为了应对这些挑战，中国科学院物理研究所/北京凝聚态物理国家研究中心理论与计算实验室万源副研究员的团队与合作者率先开展了对关联电子系统中二维相干光谱与相关超快动力学过程的理论探索【3】。最近，这一团队在该方向取得了新成果。万源副研究员指导的博士生李子龙、东京大学物性研究所押川正毅教授研究了一种典型的强关联电子系统的非线性光学响应——广泛存在于一维量子自旋链中的朝永-拉廷格液体 [图1(a)]，并发现了一种独特的超快动力学现象【4】。

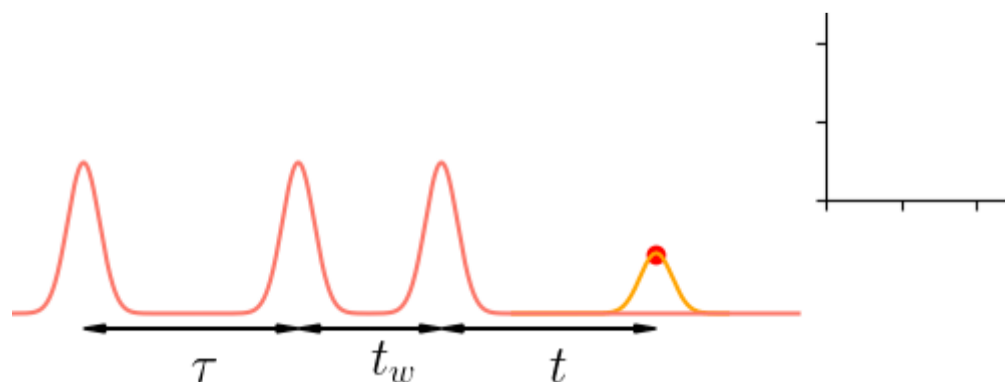


图2. 动画展示回波信号随脉冲间距增加而衰减。

他们通过解析计算发现，这种无能隙的多体体系中存在着光子回波现象——当体系受到三个时间间隔分别为 τ 与 t_w 的光脉冲激励后，光子回波体现为 $t=\tau$ 时非线性信号的突然增强[图1(b)]。这一现象与回声现象类似——声源传播到回音壁的时间 τ 与声音反射后传播的时间 t 总是相等。回声的强度随着声源与回音壁距离的增加而减小。与此类似，光子回波信号强度随脉冲间距 τ 的增加而衰减[图2]。

他们发现回波信号来自于体系中拓扑分数激发的一种独特的超快动力学过程，并将之命名为分数激发的“透镜效应”：第一个光脉冲分别激发一个向左和向右传播的分数激发，第二和第三个光脉冲改变两个分数激发的传播方向与拓扑荷。随后两个分数激发在同一时空点重逢[图1(c)]。这一过程宛如分数激发的世界线在被一面“时空透镜”重新汇聚。耗散和色散会阻碍分数激发的自由传播，从而压制“透镜效应”。因此，分数激发的耗散与色散直接体现为回波信号的衰减，从而被敏感地检测出来。这些信息往往难以通过常规光谱学方法提取。

在原子分子等少体系统也存在类似的光子回波现象，来自于时间维度上的量子干涉效应。朝永-拉廷格液体中拓扑分数激发的“透镜效应”表明，多体系统中的光子回波可以来源于更广泛的，属于整个时空范畴的量子干涉现象。这一发现从概念上拓展了光子回波的物理机制。他们的工作为非线性谱学在强关联体系的应用提供了新的理论基础，也揭示了非线性谱学的巨大潜力。

相关工作发表在Physical Review X。本项目受到国家自然科学基金与中国科学院战略性先导科技专项资助。

参考文献

1. S. Mukamel, Principles of Nonlinear Optical Spectroscopy (Oxford University Press, 1995); P. Hamm and M. Zanni, Concepts and Methods of 2D Infrared Spectroscopy (Cambridge University Press, 2011); 翁宇翔, 陈海龙等, 《超快激光光谱原理与技术基础》(化学工业出版社, 2013).
2. M. Woerner *et al.*, New J. Phys. **15**, 025039 (2013); J. Lu *et al.*, Phys. Rev. Lett. **118**, 207204 (2017); F. Mahmood *et al.*, Nat. Phys. **17**, 627 (2021).
3. Y. Wan and N. P. Armitage, Phys. Rev. Lett. **122**, 257401 (2019).
4. Z. Li, M. Oshikawa, and Y. Wan, Phys. Rev. X **11**, 031035 (2021).

[PRX 11, 031035 \(2021\).pdf](#)

[电子所刊](#) [公开课](#) [微信](#) [联系我们](#) [友情链接](#) [所长信箱](#) [违纪违法举报](#)

