

纳米尺度光和物质相互作用中的磁场选择性控制

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35076.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！

纳米尺度光和物质相互作用中的磁场选择性控制。 导读

近日，法国国家科学研究中心（CNRS）Mathieu Mivelle教授团队实现了纳米尺度下磁场与物质相互作用的精准控制，特别是通过设计等离激元纳米天线，在近场范围内实现了磁场与电场的空间解耦，并利用此特性选择性地激发了固态发光体（如掺铕纳米颗粒）中的磁偶极跃迁。此外，研究揭示了光激发与发射过程中光路径差异对互易定理的挑战，为纳米光子学中磁场的主动调控提供了新视角。

该研究成果以Nearfield Control over Magnetic Light-Matter Interactions为题发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》上。论文通讯作者为法国国家科学研究中心（CNRS）的Mathieu Mivelle，第一作者为Benoît Reynier。

研究背景

- 1、磁场在光和物质相互作用中的重要性：尽管电场在传统光和物质相互作用研究中起到主导作用，但磁场在多个重要研究领域（如手性光学、光子雪崩、禁阻光化学）也具有不可替代的作用。例如，三价铕离子（Eu³⁺）的磁偶极跃迁对磁场高度敏感，但因其强度较弱，传统方法难以高效激发和探测。
- 2、近场磁场调控的挑战：在纳米尺度下，磁场与电场的空间分布高度耦合，传统光学手段（如远场聚焦）难以实现选择性激发。等离激元纳米结构可通过局域表面等离激元共振（LSPR）增强近场电磁场，但其磁场增强机制与电场存在显著差异，需通过结构设计实现空间解耦。
- 3、互易定理的局限性：互易定理认为激发与发射过程遵循对称性，但在近场实验中，由于激发（通过光纤）与发射（通过物镜收集）的光路径不同，传统互易性假设可能失效，需重新审视磁光相互作用的物理机制。

研究亮点

本研究中所使用的实验装置和铕离子（Eu³⁺）的能级跃迁特性，如图1所示。通过聚焦离子束（FIB）在近场扫描光学显微镜（NSOM）的光纤尖端加工了铝纳米盘天线（直径550 nm）。将Eu³⁺掺杂的Y₂O₃纳米颗粒（直径150 nm）嵌入PMMA薄膜，确保单颗粒水平的近场相互作用。其中，作用强度相当的磁偶极（MD）与电偶极（ED）跃迁（如7F₀→5D₁和5D₀→7F₁

）被选择性激发与探测。通过超连续光源激发纳米天线，利用高数值孔径物镜收集发射光，为磁场与电场的近场解耦提供实验基础。

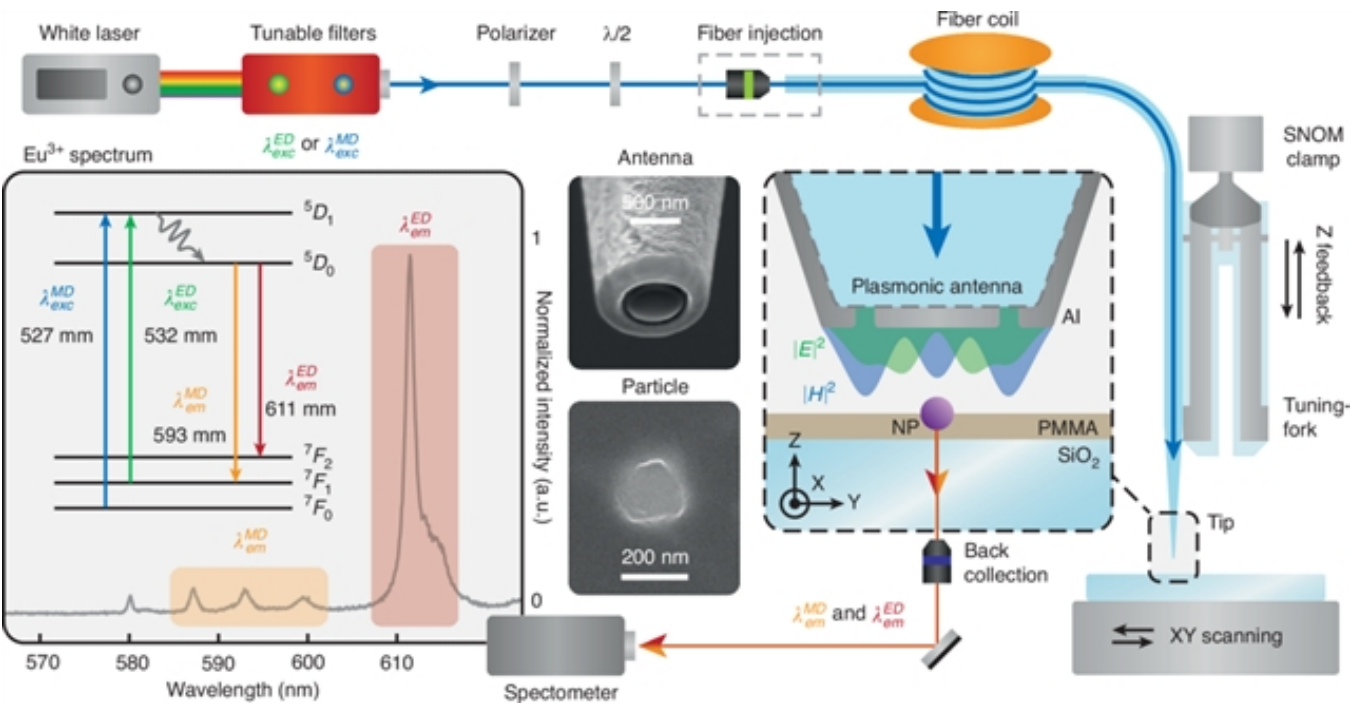


图1. 实验装置与Eu3+能级跃迁示意图

通过FDTD模拟与实验数据对比，验证了铝纳米盘天线对磁场与电场的空间解耦能力，如图2所示。模拟结果显示，电场分布（532 nm）呈双瓣分布，集中于纳米盘边缘；磁场（527.5 nm）呈三瓣结构，中心磁场局域在盘内（亚波长区域）。实验通过扫描Eu3+纳米颗粒的发光信号，发现ED激发时发光强度与电场分布一致，MD激发时与磁场分布吻合。这一结果首次实现了纳米尺度下磁场与电场的独立调控，为选择性激发磁偶极跃迁提供了直接证据。

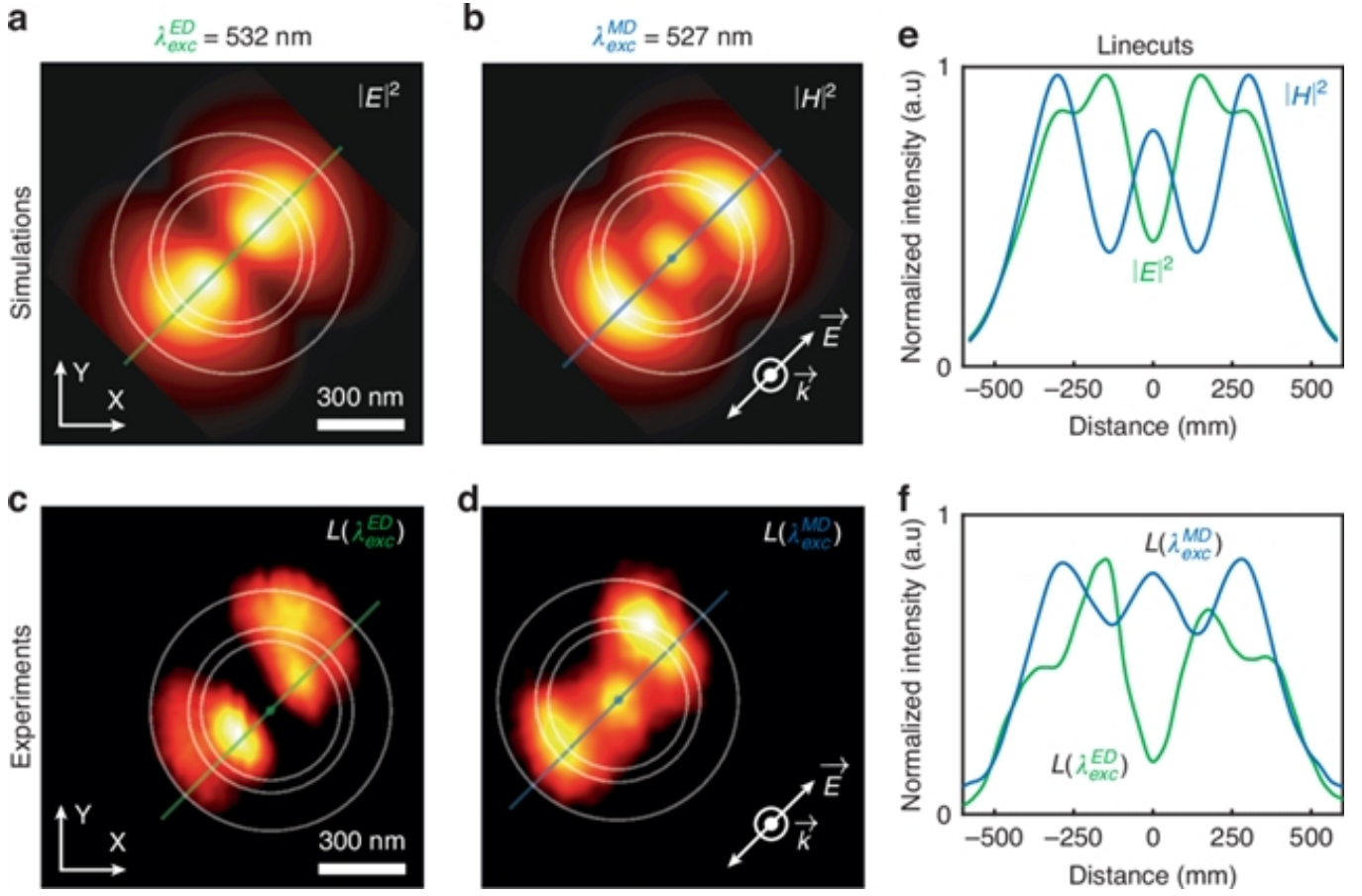


图2. 磁场与电场的近场空间解耦

进一步地，本研究揭示了局域态密度（LDOS）的非互易性矛盾，如图3所示。实验通过ED/MD发光强度比值来映射电/磁局域态密度（ELDOS/MLDOS），发现ELDOS最大值位于天线中心，而模拟结果预测此处应为MLDOS主导。这一现象违背传统互易定理，其根源在于激发（光纤入射）与发射（物镜收集）的光路径差异：激发光自上而下入射，发射光自下而上收集，导致波矢方向不对称。这一发现挑战了互易定理在近场磁光作用中的普适性，强调了光路径设计对纳米光子器件的重要性。

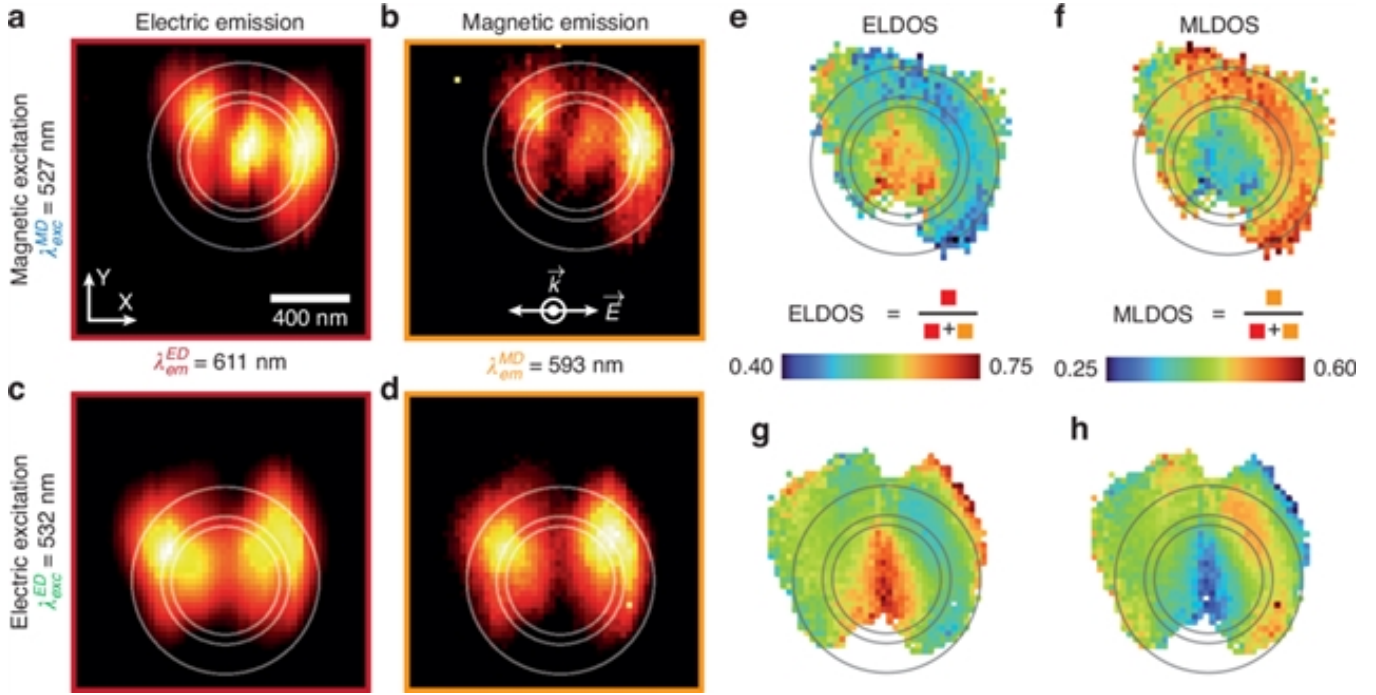


图3. 局域态密度 (LDOS) 的非互易性

光谱重建前，需要对器件进行预定标：扫描并记录工作光谱范围内的散斑图案（图3a），并构建基于压缩感知算法的光谱-空间数据映射模型。为评估光谱仪的普适性，实验选取单峰、多峰复合光谱及高斯背景叠加的单峰光谱作为测试样本集。并通过对比商用光谱分析仪的测量结果进行相对误差分析（图3b）。可以看出，无论是简单的单峰光谱还是复杂的混合光谱，所制备的光谱仪都能实现高精度重建，证明了该器件通用的光谱测量能力和高准确性。

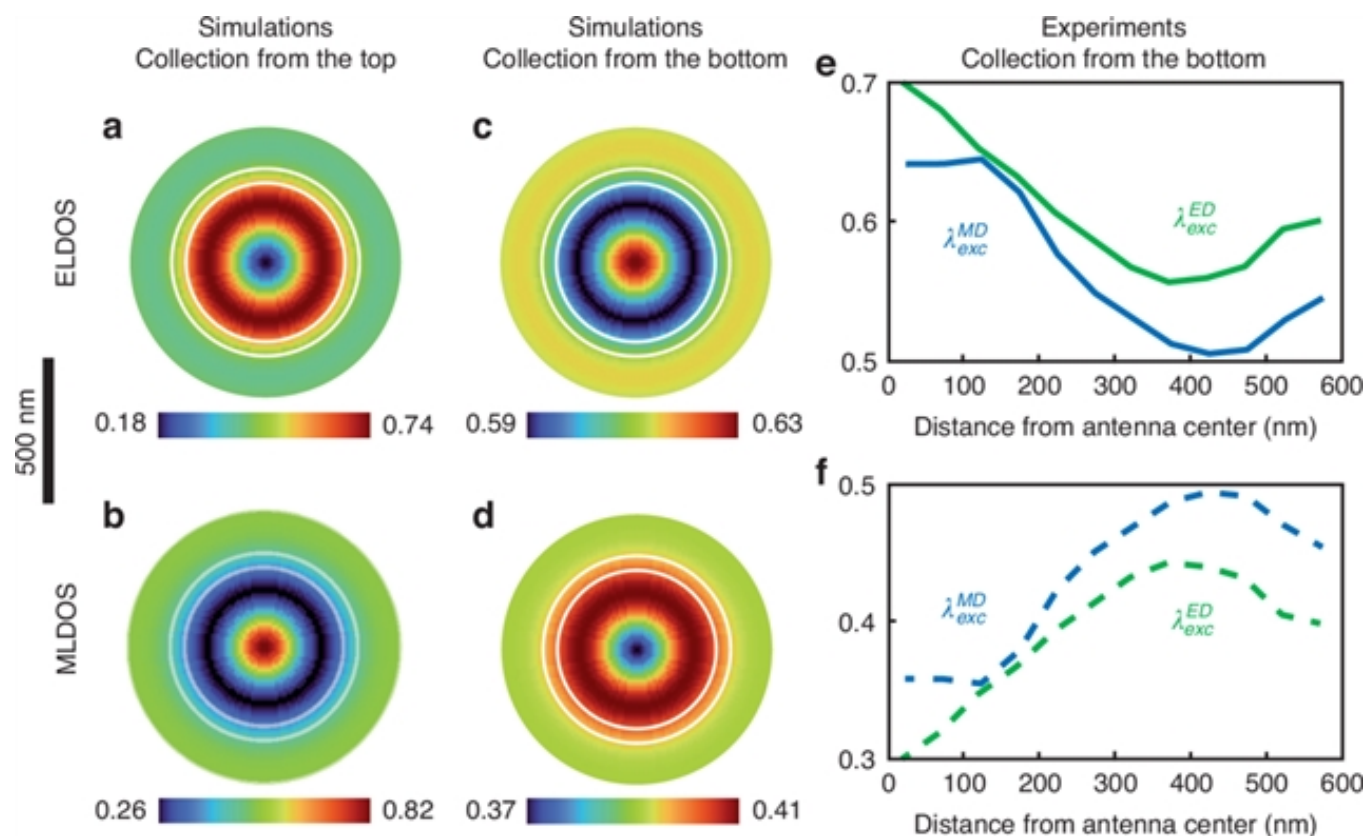


图4. 辐射方向对LDOS的影响

前景展望

本研究通过创新性的纳米天线设计与近场光学技术，首次实现了磁场与电场的空间解耦，并揭示了光路径差异对磁光互易性的影响。这一成果不仅深化了对近场磁光相互作用的理解，还为量子技术、非线性光学和生物医学检测提供了新的工具和思路。未来研究可进一步探索多模态纳米天线的设计，以实现磁场与电场的动态协同调控，推动纳米光子学向更高维度的功能化发展。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01807-z>

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事宜，请与我们联系。

作者：Mathieu Mivelle 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