
高阶涡旋光束助力超分辨成像

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35081.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！

高阶涡旋光束助力超分辨成像。 导读

近日，新加坡国立大学生物医学工程系黄志伟教授领导的生物光子学团队在最新研究中提出，通过在最小光通量（MINFLUX）成像技术中引入高阶涡旋光束，可显著提升成像系统的测量精度，从而进一步突破传统光学成像的分辨率极限。该成果以 MINFLUX Nanoscopy Enhanced with High-Order Vortex Beams 为题发表于《Light: Science Applications》，团队成员谭潇颀博士为第一作者，黄志伟教授为通讯作者。

研究背景

近年来，超分辨成像在生物医学研究领域取得了长足进步，其中最具突破性的进展即是MINFLUX成像技术。该技术结合了受激辐射损耗和单分子定位原理，采用空芯光束作为激发，能在有限的照明通量下对荧光分子进行精准定位。自2017年问世以来，MINFLUX就以其亚纳米级分辨率的优越表现而备受关注，并被广泛应用于各种生物医学观测之中。

典型的MINFLUX系统通常利用一阶涡旋光束构建环形激发光斑，其分辨率受到光场中心区域近二次强度分布特性的限制。为进一步提升MINFLUX的分辨率，有必要对系统的传递函数进行更为精确的调控。

内容亮点

本研究首次将高阶涡旋光束引入MINFLUX成像系统，并系统分析了其对MINFLUX成像性能的增强效果。与一阶涡旋光束相比，高阶涡旋光束具备多重螺旋相位并携带更高阶的轨道角动量，其奇点附近的光场强度呈现出高次非线性分布（图1a），因此可用于生成具有高次非线性特征的点扩散函数。研究表明，此类高次非线性点扩散函数能够显著提升单分子定位的灵敏度，并在相同光子数和噪声水平下，有效降低单分子定位的不确定度（图1b）。

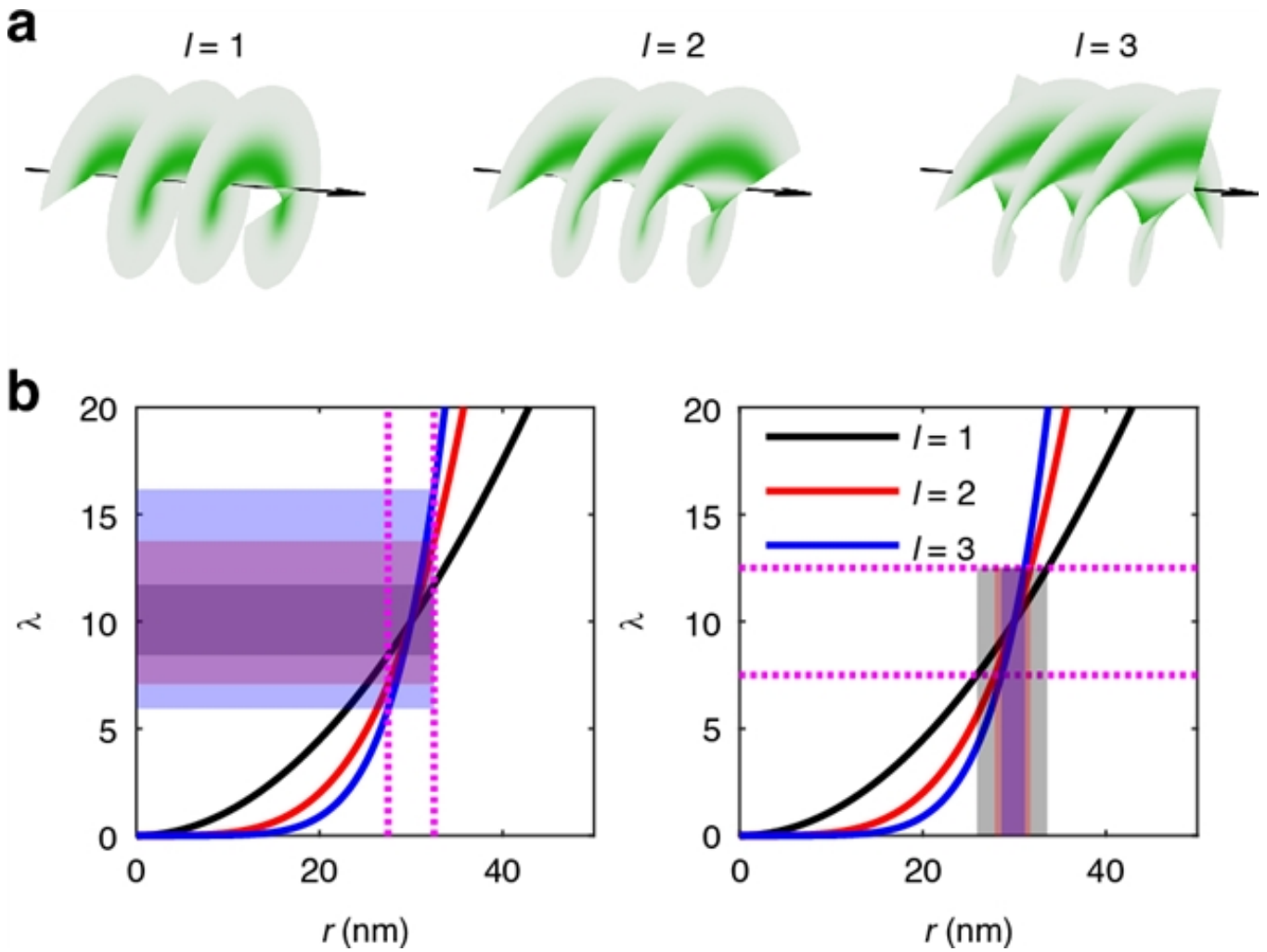


图1. 高阶涡旋光束提高定位灵敏度及降低定位误差

无偏参数估计的方差受限于Cram é r – Rao下界。对该界限的分析显示，采用高阶涡旋光束可显著降低MINFLUX的误差下界（图2）。具体而言，在常规四点靶向坐标的MINFLUX模式下，随着涡旋阶数的增加，中心区域的定位误差呈反比例下降，从而极大提高了迭代定位的精度。而在栅格扫描模式（RASTMIN）下，应用高阶涡旋光束不仅可以保持较低的定位误差，还能够拓宽成像视野，使大范围的高精度成像成为可能。此外，高阶涡旋光束在散射或扰动介质中表现出更为稳定的传播特性，从而更有利于深层生物组织的成像。

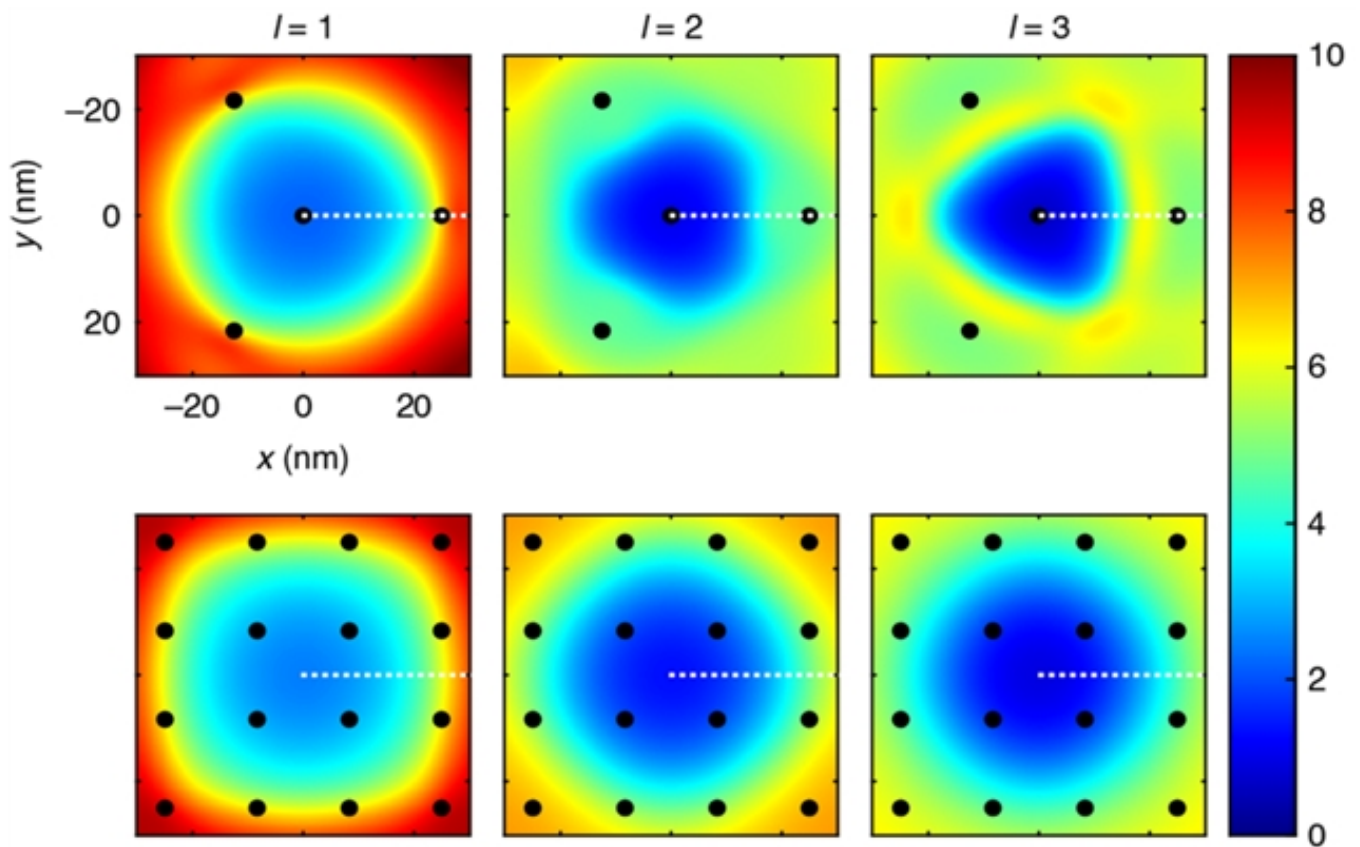


图2. 不同涡旋光束下Cramér-Rao下界的分布

作为验证，研究团队模拟演示了不同涡旋光束条件下MINFLUX对荧光分子的定位过程（图3）。结果表明，高阶涡旋光束在提升光源分辨能力方面具有明显优势，其定位误差较低阶涡旋光束大幅降低，并且受到Cramér-Rao下界的有效约束。研究团队还详细探讨了多种因素对MINFLUX成像性能的影响，为优化该技术在不同应用场景下的表现提供了可靠依据。

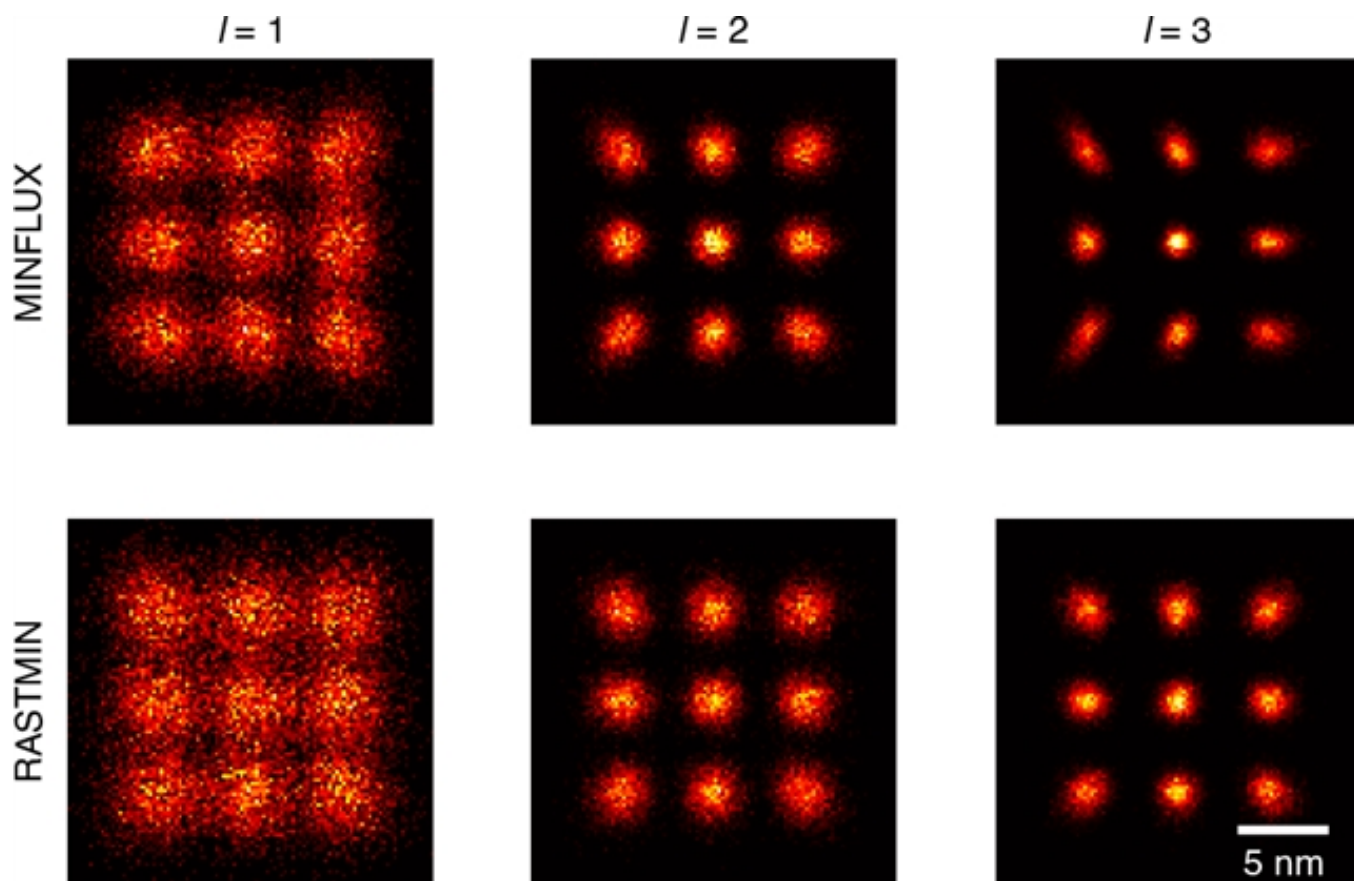


图3. 不同涡旋光束对荧光分子阵列的成像效果

总结与展望

这项研究证明了高阶涡旋光束对MINFLUX成像性能的提升作用，拓展了涡旋光束的应用范围，也为超分辨成像技术的进一步发展提供了新的思路。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01822-0>

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：黄志伟等 来源：《光：科学与应用》

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

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