

随机散斑光场中的非相干拓扑纽结

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/35077.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！

随机散斑光场中的非相干拓扑纽结。 导读

纽结独特而稳定的拓扑结构在物理学、生命科学、光与物质相互作用等领域扮演着重要角色，以纽结为代表的拓扑结构光场调控为新型光场的构建提供了新思路与新自由度。光学奇点是构建纽结拓扑结构的重要途径，如常见的相位、偏振奇点。相干奇点作为光学奇点的新类型，对应非相干光场统计关联零点，其分布可精密调控，与光场的空间相干性紧密相关，已在湍流中的光信息加密及鲁棒探测中展现出重要应用价值。然而，由相干奇点构建的高维结构光场尤其是拓扑结构光场尚未得到充分探索。

近日苏州大学赵承良教授团队联合南开大学陈志刚教授、山东师范大学蔡阳健教授提出了非相干纽结这一概念，即由非相干光场的相干奇点构成的三维纽结拓扑结构。有趣的是，尽管非相干光场的瞬时电场呈散斑分布且随机涨落，非相干纽结的拓扑结构仍保持稳定。这项研究成果以Topological links and knots of speckled light mediated by coherence singularities为题发表于国际顶尖光学期刊《Light: Science Applications》。苏州大学王卓异博士和卢兴园讲师为论文共同第一作者，苏州大学赵承良教授、南开大学陈志刚教授和山东师范大学蔡阳健教授为论文的共同通讯作者。

研究背景

作为研究几何图形或空间在连续变形下不变性质的理论，拓扑学已在流体力学、量子场论、波色爱因斯坦凝聚等领域被广泛研究，并在物理系统中展现出了几何结构拓扑稳定性的独特优势，为高质量通信或数据存储提供了技术依据。其中，纽结作为典型的拓扑结构，在数学上被定义为三维空间中缠绕的闭合曲线。这些结构不仅在数学领域具有重要研究价值，还在多个物理系统中得到观测和验证，如流体纽结、液晶纽结等。

在完全相干光场中，基于相位奇点构建稳定光学纽结的概念最早由Berry和Dennis于2001年提出。随后，Leach等人基于完全相干拉盖尔高斯光束的线性叠加，成功在实验上构造了这类光学纽结。在此基础上，研究者们进一步提出偏振结构的奇点线，基于偏振奇点构建偏振纽结。在上述光学纽结的构造过程中，完全相干光场一直是主要研究和应用的对象。然而，除了相位和偏振特性以外，相干性也是光场的基本属性之一。在完全相干光场中，具有零强度且相位不确定的点称为相位奇点。在偏振维度上，偏振矢量无法定义的点称为偏振奇点。而相干奇点则隐藏在非相干光场的统计特性中，对应相对参考点相干度为零的点。

图1展示了非相干光场中的相干奇点：随机散斑场的瞬时强度及相位分布随机，但由于统计平均

效应，随机散斑构成的非相干光场强度分布趋于均匀。借助杨氏干涉表征相对参考点各点的空间相干度大小，例如选中心点为参考点，条纹清晰对应相干度较高，反之条纹对比度消失对应相干度为零，即相干奇点。由相干性调控引起的光学奇点及其对应的三维拓扑结构光场调控尚未得到系统研究。

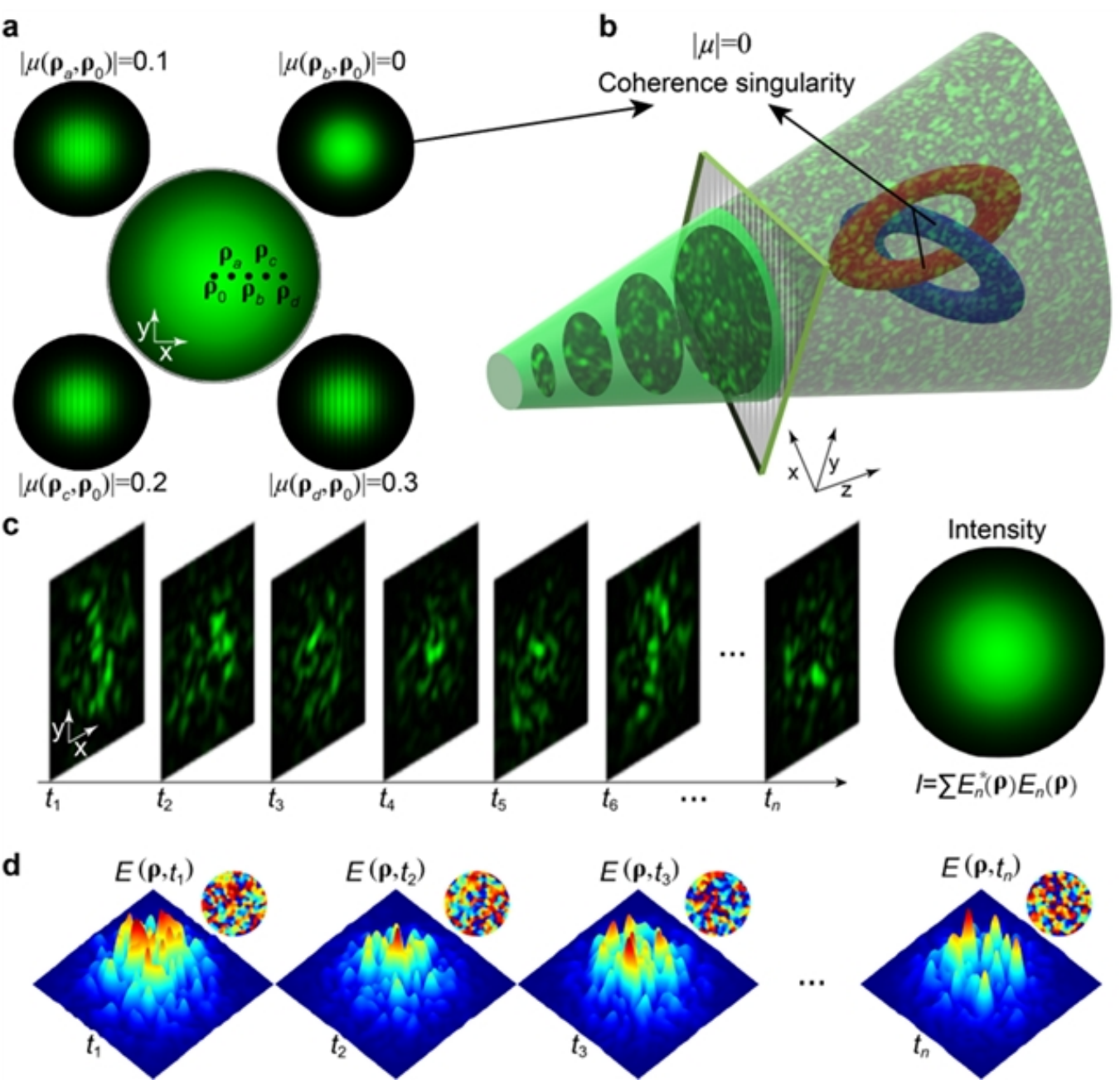


图1. 散斑光场模拟与相干奇点构建的非相干拓扑结构示意图。

创新研究

该研究团队提出并产生了由相干奇点构建的全新三维拓扑结构——非相干纽结。即使光场瞬时电场呈随机散斑分布，得益于光场平稳的统计特性，相干奇点及其构建的非相干纽结的拓扑结构保持稳定。在实验研究中，非相干纽结光场由一系列统计平稳的动态散斑场经过全息图调制产生。测量表征则由非相干模式分解技术实现，借助测量所得的一系列非相干模式及其传输至其他平面

的模式，成功重构了非相干纽结的拓扑结构。研究结果表明，瞬时光场中的强度零点具有较大的波动性，经过一段时间的统计平均，强度零点消失。相反，相干奇点表现出极强的稳健性，由其构建的非相干纽结结构也保持稳定分布。这一发现不仅拓展拓扑光场的研究范畴，还可能在多个领域激发新的研究兴趣和应用探索，例如抗湍流的三维拓扑结构光束、非相干光与物质相互作用以及高维光学信息编码等。

图2. 非相干纽结的实验结果。

非相干拓扑纽结的结果如图2所示。实验中，完全相干光照射粗糙表面散射后形成散斑场，当粗糙表面发生振动或旋转，会产生一系列动态散斑场。这些散斑场的非相干叠加构成非相干光场，当满足统计平稳条件，其相干结构振幅可初步呈现高斯分布。通过全息图（图2b）调制可在光场传输过程中引入特定的相位信息，在散射后的三维空间中，相干奇点可以出现在特定的平面区域及位置，并进一步演化形成纽结拓扑结构。如图2a所示，此时光场无强度零点且暗区分布平滑，仅相干度的零点稳定存在，尤其是相干度函数的相位分布，可清晰定位相干度零点位置。当光场

相干性降低，包含相干奇点的相干结构外包络将收缩，但包络以内的相干奇点仍稳定存在，由其构建的非相干纽结拓扑结构保持不变（如图2e所示），该结果进一步凸显了非相干拓扑结构的稳定性。

应用与展望

光场中的纽结作为一种独特的三维拓扑结构，已经引发了广泛的实验和理论研究兴趣。非相干拓扑纽结概念的提出及其生成、演化与控制不仅拓展对拓扑光场的理解，也将推动光学纽结在精密测量、光学传输、量子信息等方向的应用研究。这项工作中，研究团队基于非相干模式叠加精密调控光场的相干奇点分布，并由此构建非相干拓扑纽结与链环结构光场，尽管光场瞬时分布剧烈波动，与光场统计特性紧密相关的非相干拓扑结构仍保持稳定，这为高维光学信息编码提供一种全新的实现方式。未来研究可以进一步从非相干拓扑信息编码应用的实现、拓扑结构转化及其与物质相互作用等方面深入，基于非相干拓扑结构在噪声及波动环境下的稳健性，基于此类结构光场的信息编码有望提升光通信系统的安全性及传输效率，在未来的光学信息处理与通信技术中具有重要应用潜力。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41377-025-01865-3>

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：赵承良等 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