多即是少：量子态对经典光压缩的启示

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31982.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！

多即是少：量子态对经典光压缩的启示。 导读

Less is more（少即是多）是英语文化中的一个成语，意思是大道至简，事物简单化能够带来更大的意义。那么反过来呢？近日，研究人员从量子压缩态中提炼出多即是少这一理念方法，用于指导经典光场的调控，取得了突破性进展。

光学研究中，量子光与经典光通常作为两个独立的方向。然而两者之间存在引人入胜的数学与物理性质相似性，如光子自旋与偏振，光子轨道角动量与光学涡旋相位，量子纠缠与不可分矢量光（经典纠缠）等等。这些相似性衍生出了量子光与经典光的交叉研究——量子-经典类比（quantum-classical analogy），推动了光学前沿的发展。

量子-经典类比是指量子现象、经典现象之间具有相似的数学模型，并表现出相似的物理行为。结构光因其丰富的可调谐自由度（强度、相位、偏振等），为量子-经典类比提供了一个广阔舞台，如涡旋光模拟量子猫态、矢量光模拟量子隐形传态等。然而，这些研究主要集中于离散变量的量子态，围绕连续变量量子态的经典类比研究非常匮乏。

量子压缩态是一种典型的连续变量量子态，其测量噪声可低于标准量子极限（真空噪声），如图1a所示，因而在光学精密测量、引力波探测等领域具有重要应用。清华大学柳强教授、付星副教授团队与新加坡南洋理工大学申艺杰助理教授等合作，首次提出了量子压缩态的结构光类比（经典压缩态光场），系统构建了经典压缩态光场理论模型，实验上突破了新型光场的定制和探测技术，揭示了该光场的独特压缩行为。同时，研究人员发现新型光场在紧聚焦条件下，产生了可调谐超振荡光场结构，推动了结构光在精密测量、超分辨成像等重要领域的创新应用。

该研究成果以Structured light analogy of quantum squeezed states为题在线发表于Light: Science Applications期刊。通讯作者为清华大学精密仪器系、时空信息精密感知技术全国重点实验室、光子测控技术教育部重点实验室付星副教授、柳强教授，新加坡南洋理工大学申艺杰助理教授，第一作者为清华大学博士生王朝阳。该工作得到了北京市杰出青年科学基金、新加坡国家研究基金等项目的支持。

经典压缩态光场的理论模型：数学上，量子压缩态可以表示为一系列数态的叠加，通过在真空态上叠加数态的方式，实现了降低噪声水平的目标。这个违反直觉的多即是少过程如图1a所示。图中描绘了量子态在相空间的概率分布，可见，量子压缩态在相空间中沿垂直方向的概率分布减小，代价则是沿水平方向的概率分布变大。本创新工作中，研究人员采用经典结构光的本征模式，进行量子数态的类比，即经典压缩态光场可表示为一系列本征模式的叠加，通过在高斯基模上叠

加本征模式，实现了多即是少的光斑压缩效果。如图1b所示，与高斯基模的强度分布相比，经典压缩态光场横截面上，沿垂直方向表现出光束尺寸压缩，代价则是沿水平方向的光束尺寸变大。可见，经典压缩态结构光的强度分布，与量子压缩态的相空间概率分布之间具有高度相似性。

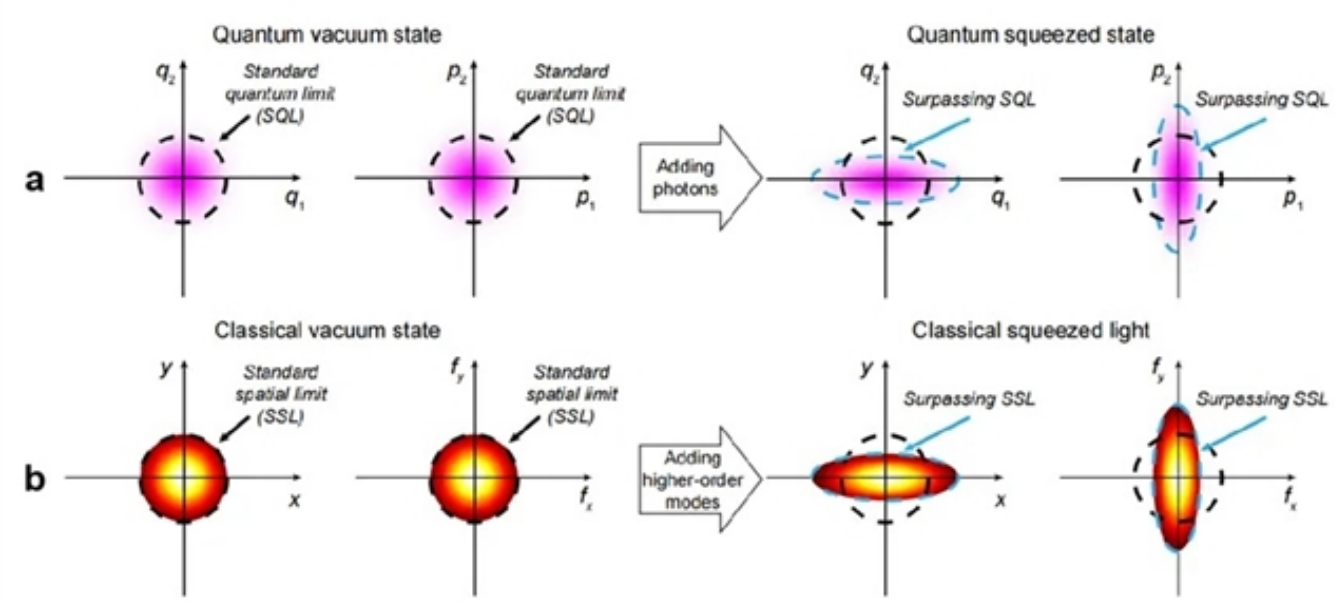


图1：量子态压缩机制对经典光压缩的启示

经典压缩态光场的产生、探测方法：类比于量子压缩态的产生和探测技术，本工作提出了经典压缩态光场的定制、探测方法。量子压缩态一般通过非线性晶体中的自发参量下转换过程产生（图2a），而在经典压缩态结构光的生成装置中，空间光调制器取代了非线性晶体（图2b）。量子压缩态的探测过程中，采用分束器、光子计数器进行光子数相关测量（图2c）；与之相比，经典压缩态结构光采用空间光调制器、相机进行模态谱测量。探测结果表明，经典压缩态结构光的模态谱，与量子压缩态的光子数关联之间具有高度相似性。

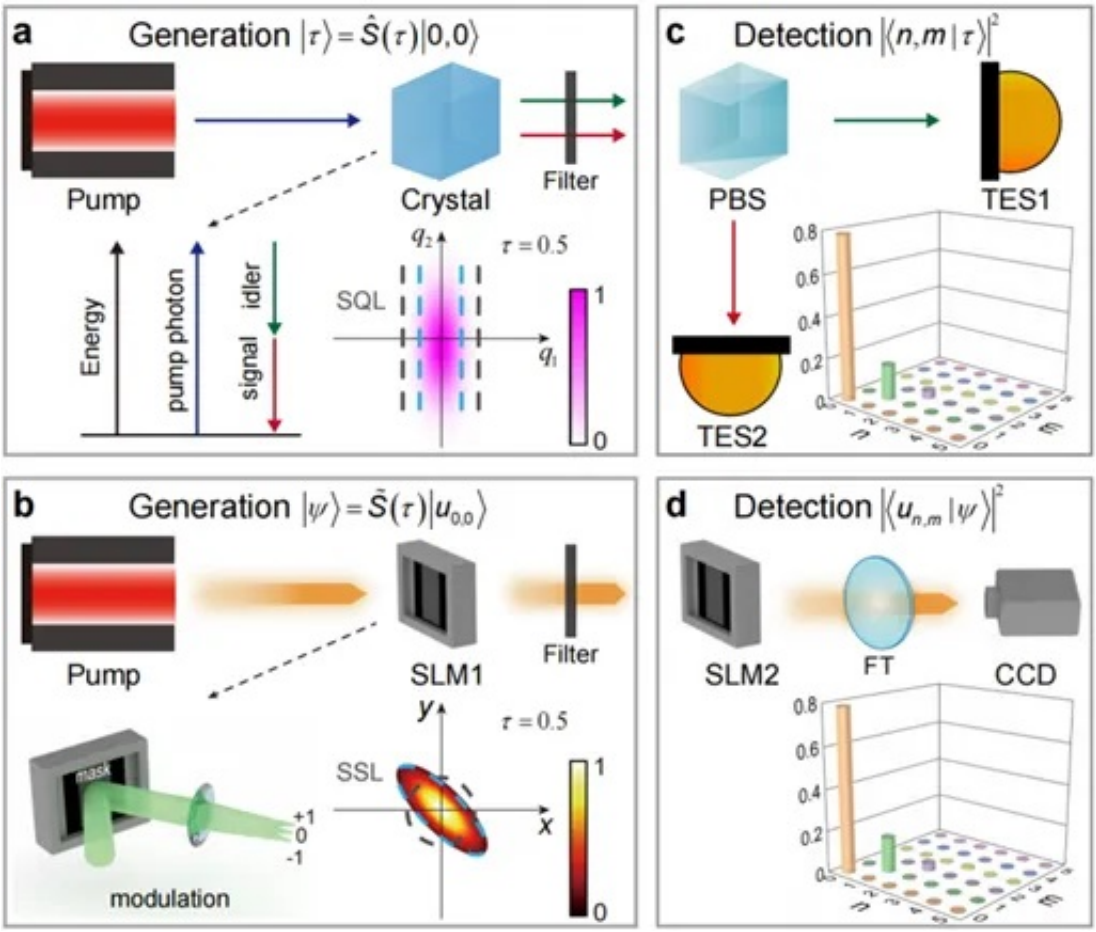


图2：量子（a）与经典（b）压缩态光场的产生与探测方法

可调谐超振荡结构：如图3所示，紧聚焦条件下，经典压缩态结构光的光斑半峰全宽可由1.27λ压缩至0.87λ，接近光学衍射极限；其局域波矢的半峰全宽可由λ/10量级压缩至λ/100量级(λ为波长），大幅超越光学衍射极限，为精密测量与超分辨成像等应用提供了突破性工具。

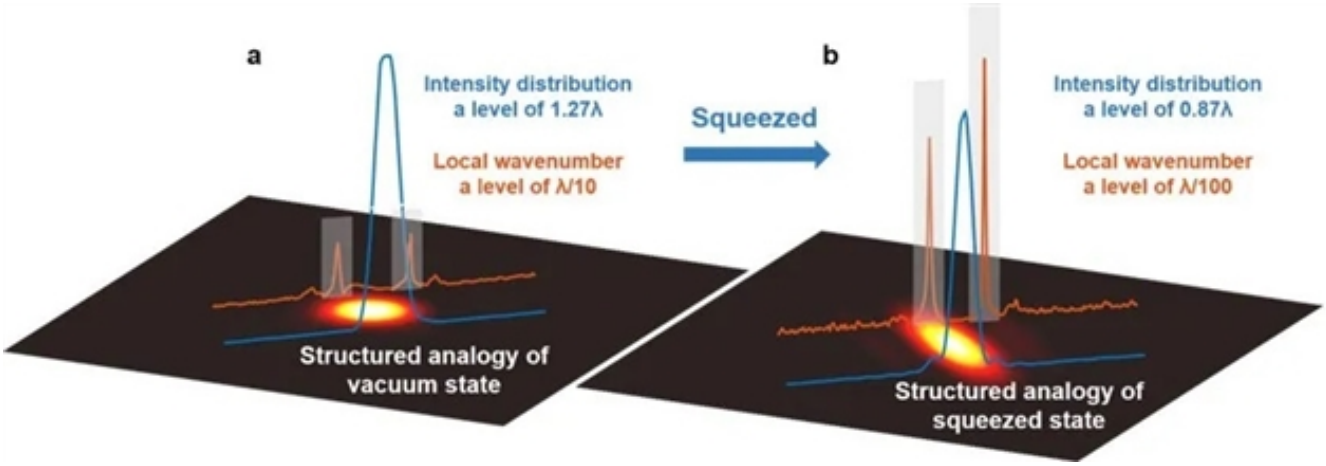


图3：经典压缩态光场在紧聚焦条件下的超振荡结构（与真空态对比）

前景展望

本工作首次提出了量子压缩态的经典光类比，构建了经典压缩态光场的理论模型，提出了该新型光场的定制、探测方法，进一步揭示了紧聚焦条件下经典压缩态光场的可调谐超振荡结构，展现出新型光场在精密测量、超分辨成像等领域的重大应用潜力。本工作利用厄米-高斯模式来构建经典压缩态光场，未来可利用其他结构光模式（如拉盖尔-高斯模式、恩斯-高斯模式、贝塞尔-高斯模式等），探索更丰富的量子-经典类比现象。（来源：中国光学微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-024-01631-x

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等事宜，请与我们接洽。
作者：付星等 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转发