

---

# 西安光机所光场非线性调控与量子非线性物理前沿理论研究取得系列进展

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/20084.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！

非线性科学是自二十世纪六十年代以来，在以非线性为特征的各分支学科的基础上逐步发展起来的综合性学科，其中1960年激光的发明和应用促进了非线性光学的诞生和长足发展。二十一世纪以来，非线性科学的研究呈现出明显的跨学科交叉性等特点，例如超冷原子分子非线性现象的研究就涉及原子分子与凝聚态物理、数学、化学、统计力学、流体力学、机器学习等，并与各种精密测量实验方法和操控技术（如光场调控技术）紧密结合。随着第二次量子革命的兴起和发展，新型量子技术可观测和操控量子物质（如原子分子、电子和光子）中的非线性行为，推动了量子非线性科学、极端非线性光学和非线性物理的蓬勃发展。近年来，光场的非线性调控及光在非线性介质中的传输和应用吸引了诸多基础和应用基础研究人员关注，成为非线性光学领域的前沿重点方向。

中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室副研究员曾健华团队长期从事非线性物理基础理论研究，近期在量子多体物理与光场非线性调控前沿理论方面取得三项研究进展，其中，两篇论文以 *One-dimensional purely Lee-Huang-Yang fluids dominated by quantum fluctuations in two-component Bose-Einstein condensates* 和 *Overcoming the snaking instability and nucleation of dark solitons in nonlinear Kerr media by spatially inhomogeneous defocusing nonlinearity* 为题发表在《混沌、孤子与分形》（*Chaos, Solitons Fractals*）上，另一项研究成果以 *Nonlinear localized modes in one-dimensional nanoscale dark-state optical lattices* 为题发表在《纳米光子学》（*Nanophotonics*）上。

“李黄杨修正项”（Lee-Huang-Yang correction）是指物理学家杨振宁与合作者于上世纪五十年代将赝势法和双碰撞方法用于稀薄玻色子多体系统相互作用研究中得到的基态能量修正项，它用来描述超冷原子的量子涨落现象，在冷原子动力学本征方程中，量子涨落效应对应于微弱的“李黄杨修正项”，当将所有原子产生的量子涨落作用力相加，原子之间的吸引力就会强于排斥力，从而使原子相互制约和聚集，并形成量子液滴。由于量子涨落极其微弱，因此形成的量子液滴就成了最稀薄的液体，比水还稀薄一亿倍。2021年，曾健华团队将费希巴赫共振技术应用到一维量子液滴的非线性调控中，从理论上研究了类孤子形状的小液滴、由几个孤子组成的中液滴和具有平顶形状的大量子液滴的形成和稳定情况，发现量子液滴的稳定区域得到了极大扩展。2018年，丹麦奥胡斯大学联合研究团队的理论预测发现，在两组分超冷玻色原子系统中，选择合适的原子密度和相互作用强度使得组分内吸引力和组分间排斥力相互抵消，存在一种完全由“李黄杨修正项”描述的三维稀薄液体，并冠之以“李黄杨流体”；该研究团队于2021年在实验上观测到了这一崭新的物质形态。然而关于低维纯“李黄杨流体”的理论模型仍然亟待建立，其动力学行为的研究和调控是量子非线性物理的重要前沿课题。

---

为此，曾健华团队从第一性原理出发，在一维量子液滴的工作基础上，推导了描述一维纯“李黄杨流体”的非线性动力学模型，通过解析解找到了基态模，结合直接数值模拟和线性稳定性分析两种理论方法，研究了其动力学行为，找到了其在相应物理量中的稳定区域。同时，考虑在引入谐振子势的情况下，通过变分近似方法和数值方法，研究人员研究了“李黄杨流体”基模的非线性演化特性和稳定情况，从数学计算上研判了“李黄杨流体”高阶模式的稳定区域。此外，他们还研究了两个“李黄杨流体”之间的结合和准弹性碰撞动力学，揭示了丰富、有趣和深奥的低温碰撞物理学【*Chaos, Solitons Fractals* 160, 112240 (2022)】。

玻色-爱因斯坦凝聚体为在单粒子模型和量子多体模型中研究各种非线性物质波结构（比如物质波亮和暗孤子、带隙和矢量孤子、涡旋以及相应的物质波局域模）提供了一个干净、可控、多自由度调节的物理平台。其中物质波暗孤子的特性研究有待深入。在超冷原子实验中，通过使用相位刻印技术、密度操纵、干涉技术和激光微扰方法引入密度缺陷，科学家成功观测到了物质波暗孤子。曾健华团队此前将光晶格非线性调控技术应用于超冷原子系统中，从理论上研究了在低密度、高密度和同时具有两体-三体相互作用的玻色-爱因斯坦凝聚体中物质波暗带隙孤子的产生和操控。然而，在高维物理系统中，暗孤子存在横向调制不稳定性（蛇形不稳定性），携带旋量（涡度，拓扑荷）的暗涡旋和涡环将发生成核（涌现多个小涡旋）现象。为了克服这些问题，过往的应对方法是引入线性势垒。

近期，该团队借助纯非线性调控方法研究了二维空间非均匀自散焦非线性介质（以玻色-爱因斯坦凝聚体为例）中暗孤子的蛇形不稳定性和成核情况【*Chaos, Solitons Fractals* 156, 111803 (2022)】。通过变分近似和数值模拟方法，研究人员证实了所引入的理论研究模型在产生暗孤子方面具有极好的鲁棒性。他们采用波戈留波夫-德热纳分析方法和直接微扰动力学计算方法，得到了暗孤子条纹的稳定性谱图，发现通过增大非线性系数可以扩展其稳定性区域，从而较好地克服固有的蛇形不稳定性；引入谐振子势后，发现当粒子密度较小时，在非均匀自聚焦非线性介质中暗孤子条纹也能够稳定演化，这与前人发现稳定的暗孤子条纹只存在均匀自散焦非线性介质中的结论截然不同。进一步研究表明，均匀自散焦非线性介质中存在的暗孤子成核现象，在空间非均匀自散焦模型中得到了进一步抑制。研究成果有望应用于超冷原子物理和非线性光学实验，为克服暗孤子存在的固有不稳定性提供了一种非线性解决机制。

光晶格为全光干涉方法产生的人工周期性结构，具有易实现和易操控的特性，将冷原子束缚于光晶格中为研究各种物理特性和非线性动力学现象提供了易于实现和精确控制的物理平台。然而，此前研究工作主要集中在常规光晶格，即晶格周期为半波长，且空间尺度局限于光波长（数百纳米）。

近些年来，科学家相继提出了实现亚波长晶格结构的新方法，如拉曼相干引起的具有四分之一波长周期的绝热光势、利用多光子跃迁形成亚波长晶格势等。特别是，奥地利科学院量子光学与量子信息研究所研究人员于2016年从理论上提出在三能级冷原子系统中可以产生几十纳米尺度的亚波长光学周期性势垒（即纳米尺度暗态光晶格）。这一结果于2018年得到了美国联合量子研究所科研人员的实验验证。纳米尺度暗态光晶格为超冷原子的非线性和量子操控提供了全新的技术手段，相关研究成果不断涌现，为纳米尺度下量子非破坏性测量、量子相变研究、人工规范势调控和具有前所未有分辨率的原子密度显微术的发展和研究打开了新的通道，而囚禁于纳米光晶格中的物质波局域理论是前沿非线性物理领域亟待阐明的关键科学问题。

基于此，曾健华团队近期在平均场理论框架下导出了描述一维纳米尺度暗态光晶格中物质波波函数的动力学模型，揭示了将玻色-爱因斯坦凝聚体囚禁于一维纳米尺度暗态光晶格中的物质波非线性带隙局域模的产生和稳定机理。为了准确解释物质波带隙孤子的产生，研究团队描绘了纳米

尺度暗态光晶格的带隙结构，发现带隙的宽度随带隙阶数的增加而增加，深纳米暗态光晶格对应的布洛赫带比较平缓。这些奇异的带隙结构特性与常规光晶格大不相同，是该研究的重要发现。此外，研究团队采用牛顿迭代、线性稳定性分析和数值模拟方法分别探究了浅和深纳米尺度暗态光晶格中基本和偶极物质波带隙孤子的产生、稳定性、传播特性，主要结论有：1、纳米尺度暗态光晶格的第一、第二和第三带隙中均存在稳定的基本带隙孤子，且带隙阶数越高，不稳定区间越大；2、在深纳米尺度暗态光晶格中，基本物质波带隙模式的边带空间调制（布拉格散射）很小，且稳定性区间大大增加，例如囚禁于浅晶格的不稳定局域模会快速坍塌；而对于深晶格来说，不稳定的局域模在演化过程中不会发生坍塌现象。为了验证各种局域带隙模式的稳定性，研究团队利用含微扰的直接数值模拟方法开展了深入研究，发现稳定区域内的物质波带隙孤子均具有较好的抗干扰性。

该研究成果把光晶格技术对超冷原子的非线性操控从可见光波段推进到亚波长尺度，在光场非线性调控前沿理论研究方面具有引导性。研究成果不仅扩展和丰富了周期性系统中的非线性波局域理论，而且对冷原子或热原子中纳米尺度暗态光晶格技术实验的开展提供了理论基础。

此外，该团队在《混沌、孤子与分形》上报道了题为“具有四阶色散的非线性周期介质中的一维暗带隙孤子”的研究成果，同时还与湖北科技学院研究人员合作在该杂志报道了题为“自旋轨道耦合玻色-爱因斯坦凝聚体中的三维量子液滴”的理论成果。

论文链接：[1](#)、[2](#)、[3](#)、[4](#)、[5](#)

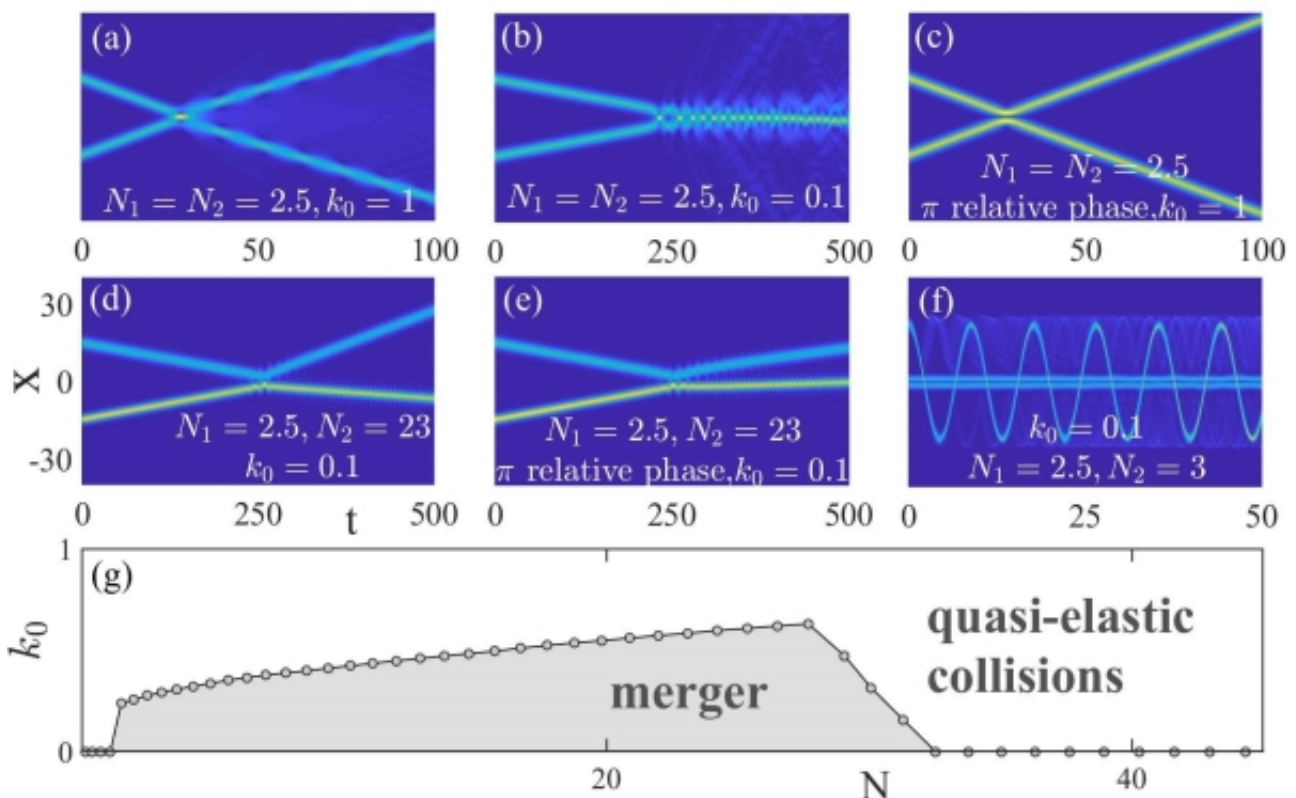


图1 “李黄杨流体”的碰撞物理示意图。(a) - (f) 不同初始条件的碰撞动力学演化图。(g) 碰撞相图。

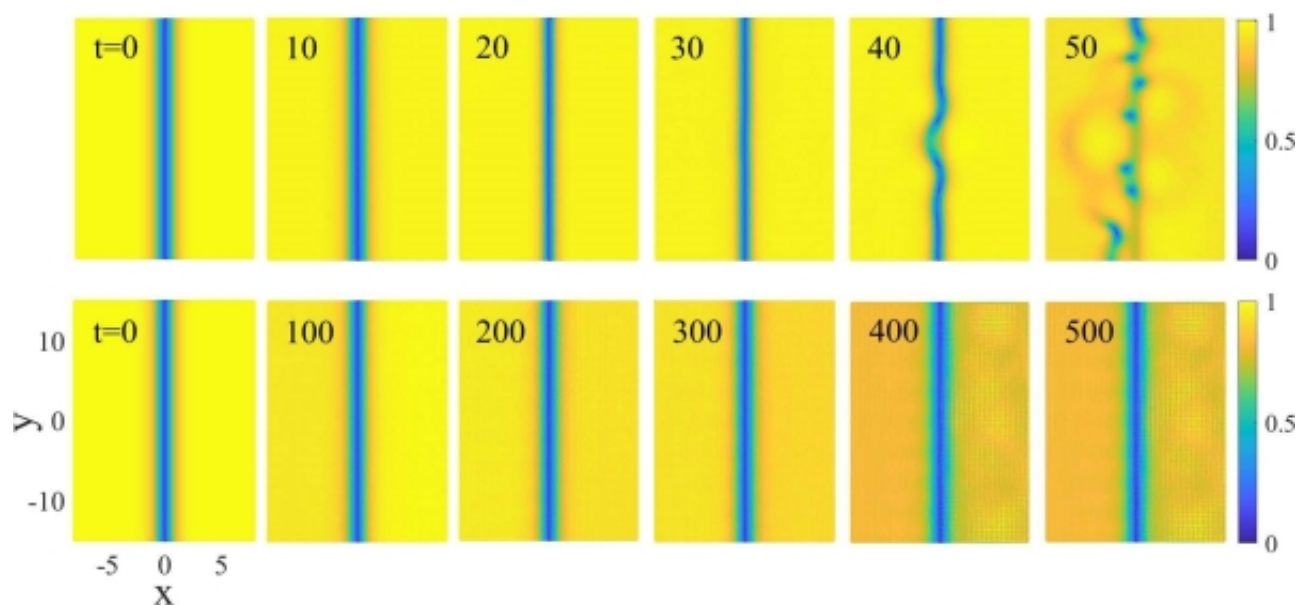


图2 暗孤子条纹（无谐振子势）的动力学演化图。上行：均匀自散焦非线性介质中存在蛇形不稳定；下行：纯非线性势阱调控方法可克服蛇形不稳定。

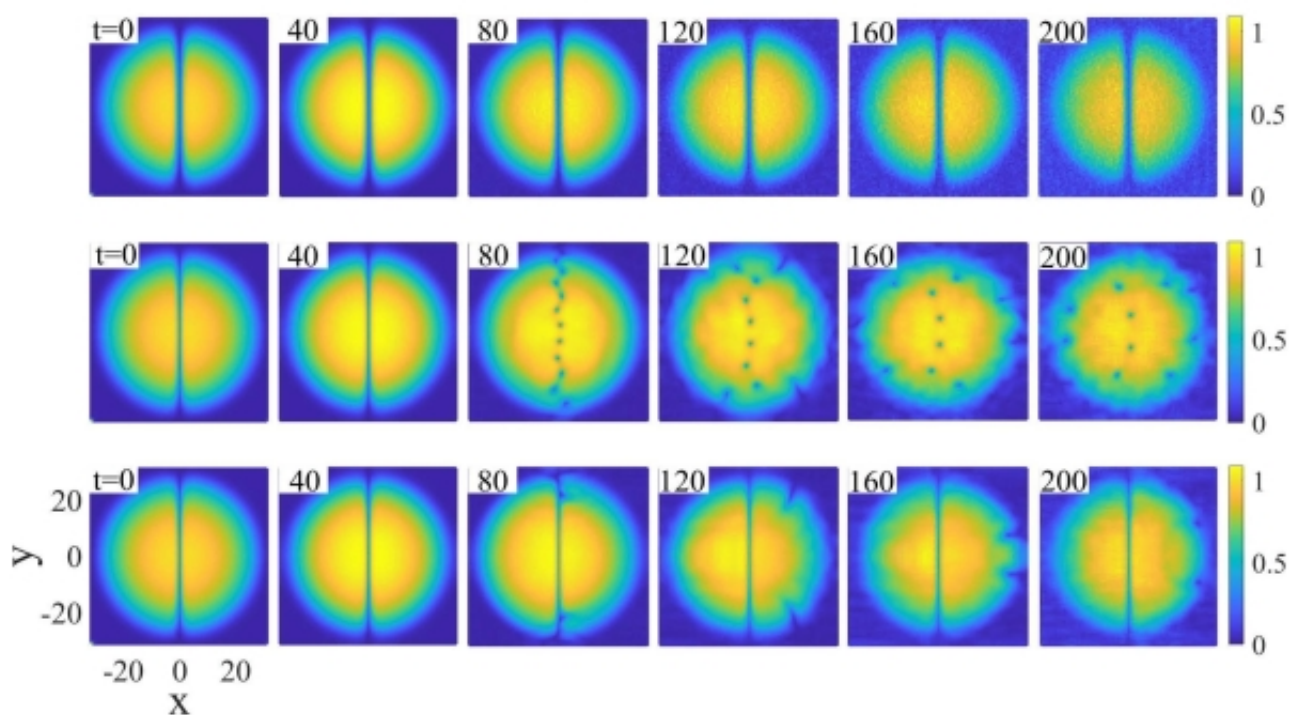


图3 囚禁于谐振子势与非线性势阱中的物质波暗孤子条纹的动力学演化图。上行：自聚焦非线性调制形成稳定的暗孤子条纹；中行：自散焦非线性弱调制出现蛇形不稳定并发生成核现象；下行：自散焦非线性强调制形成较为稳定的暗孤子条纹。



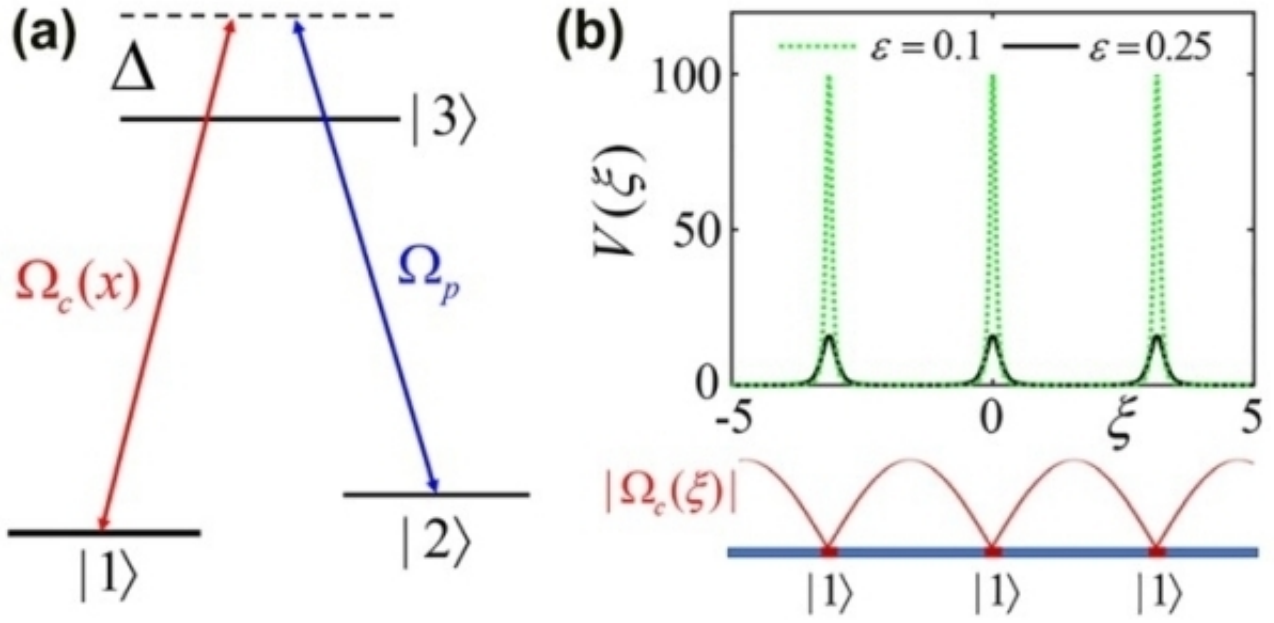


图4 三能级相干原子系统中纳米尺度暗态光晶格的产生方案。

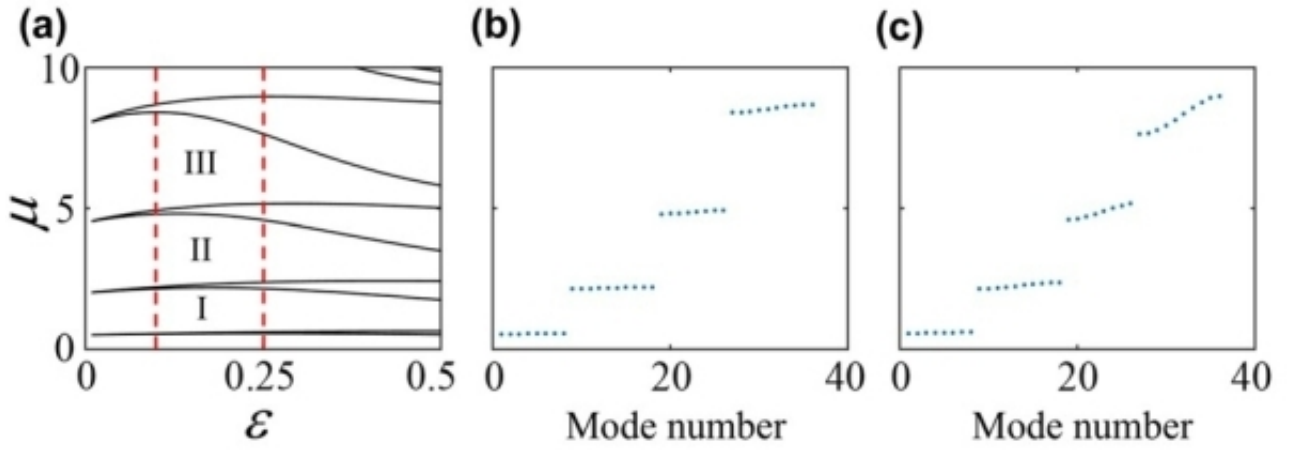


图5 一维纳米尺度暗态光晶格的能带结构，I、II、III代表第一、第二和第三带隙。

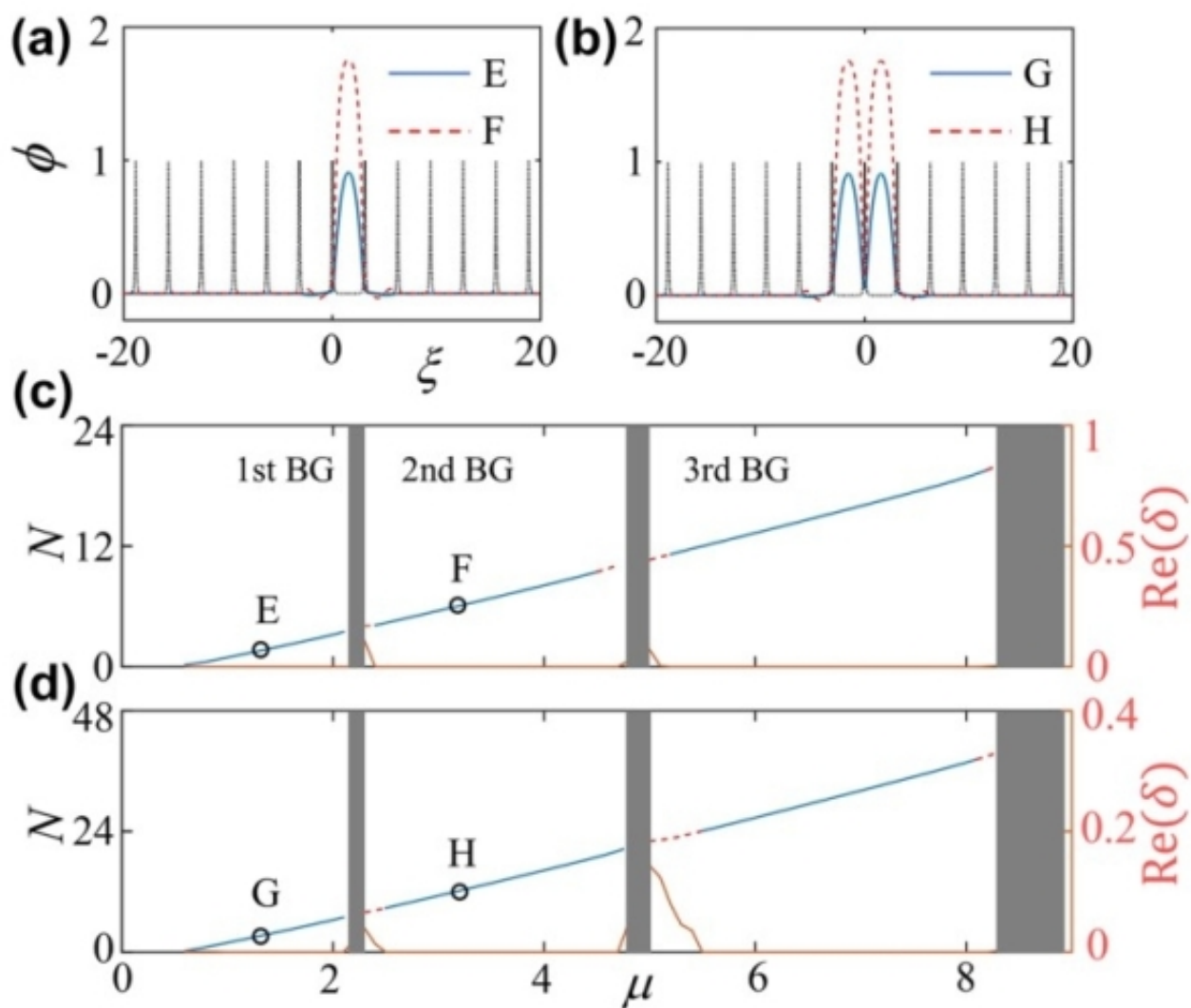


图6 深纳米暗态光晶格中的一维基本物质波带隙孤子。非在位 (a) 和在位 (b) 带隙孤子及其对应的原子数与化学势相图和稳定性谱图 (c, d)。

研究团队单位：西安光学精密机械研究所

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](https://www.iikx.com)转发