

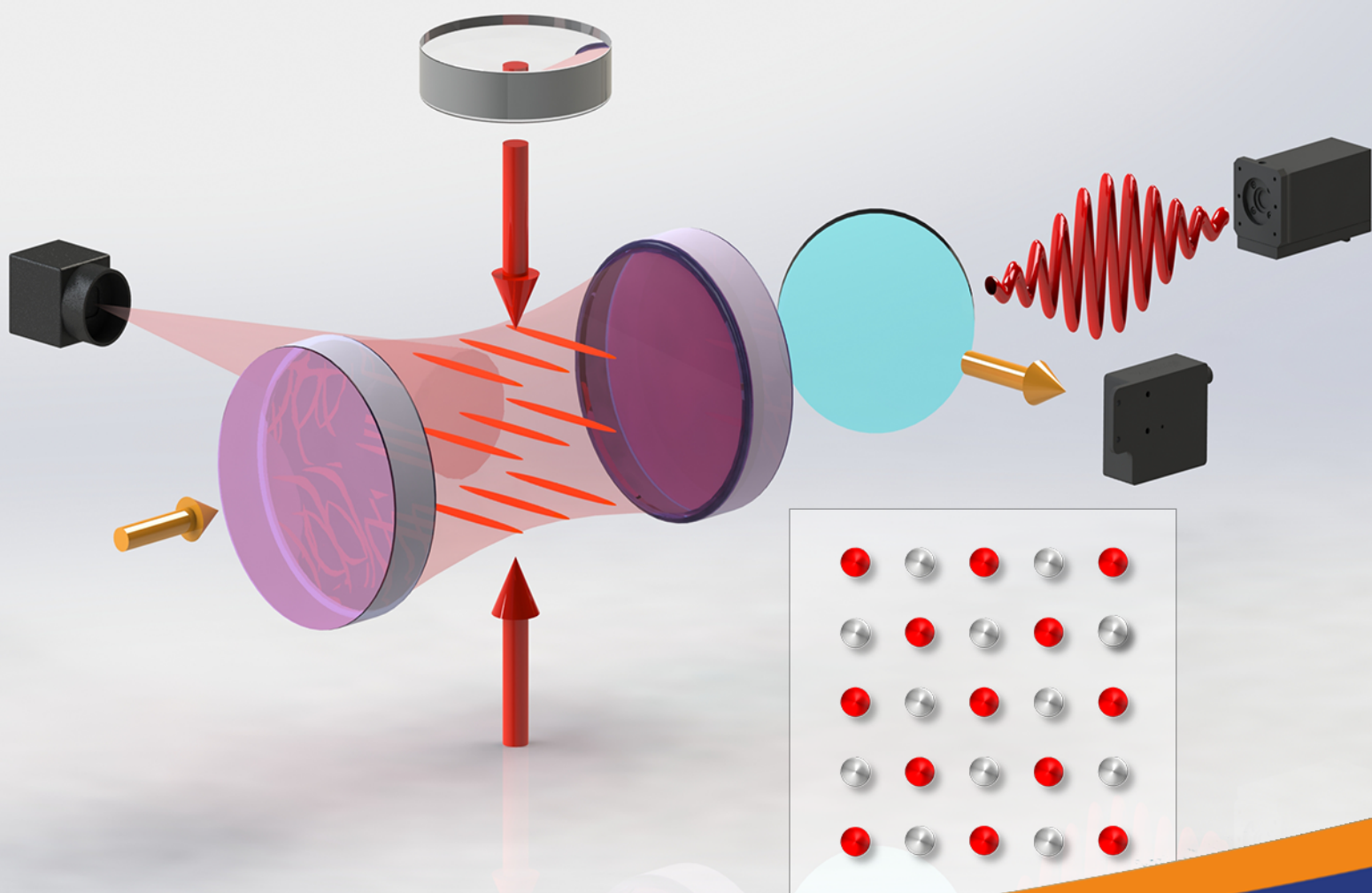
# 实验室通讯

## SKLPS COMMUNICATIONS

No.02

2021/10, Oct.

2021年02总第2期



LPS

精密光谱科学与技术国家重点实验室 (华东师范大学)  
State Key Laboratory of Precision Spectroscopy (East China Normal University)

# 目录



## 科研进展

- 01 费米超辐射相变
- 02 基于量子压缩光探测多维四波混频信号
- 03 双层C<sub>3</sub>N电子性质调控及其应用
- 04 多功能全光量子态传输机
- 05 全光N到M量子克隆
- 06 轨道角动量复用的量子密集编码
- 07 超流费米气体中光诱导时空模式
- 08 中红外光调制光学频率梳：可移动式高精光谱测量
- 09 中红外单光子边缘增强成像
- 10 被动锁模光纤激光器中的呼吸子分子复合物
- 11 片上集成的掺铟铌酸锂波导放大器
- 12 空间多尺度奇异态是大脑节律多样性的内在原因？
- 13 光谱立体压缩超快成像：超快现象的五维观测新方法
- 14 隧道结纳腔中的CoTPP分子膜电致发光

## 学术报告

- 15 学术报告一览

## 科研项目

- 17 实验室20项项目获得国家自然科学基金资助立项

## 研究生培养

- 19 实验室2021年“优秀大学生暑期夏令营”圆满举行  
追光启程 | 精密光谱科学与技术国家重点实验室迎来2021级新生

# 费米超辐射相变

超冷量子气体与腔量子电动力学相结合为研究新奇的多体物理相变提供了一个理想的系统。一个标志性例子是著名的Dicke模型，其描述了光场和原子之间的集体相互作用，在强耦合下可出现一个从正常到稳态超辐射相的二阶量子相变。超辐射量子相变自1973年提出以来，一直没有在实验上被观察到，直到2010年在玻色爱因斯坦凝聚体中利用超冷原子的动量态才实现了Dicke相变。2014年三个理论小组预测了简并费米气体中存在稳态超辐射相，其中原子量子统计和光晶格的嵌套起着重要的作用。然而由于实验研究具有极大的挑战性，量子统计对超辐射相变的影响一直没有在实验上被观察到。

近期，实验室武海斌教授的研究小组观察到了费米气体中的超辐射相变。该研究被评审人评价为“这是一个重要的里程碑，为实现利用光子媒介的相互作用来探索长程相互作用费米子多体物理的量子模拟铺平了道路。”

研究中，一个驻波激光场在横向泵浦光学腔内的超冷费米原子。当泵浦光功率增加到阈值以上，腔内的光场突然形成，同时原子密度的波动诱发超辐射量子相变，原子自发组织形成棋盘格图案的密度分布。根据泡利不相容原理，费米原子散射泵浦光的概率并不相等，只有耦合到终态未被粒子数占据的费米子才能经历自组织形成相变。因此其阈值和原子数的标度取决于费米能量，表现出与玻色爱因斯坦凝聚和热原子不同的标度率：在高温下，相变阈值和原子数的标度率为 $N^{-1}$ （ $N$ 为原子数）；而在低温下，其标度率为 $N^{-1/2}$ 。

该团队经过多年的努力，克服了量子气体复杂系统中光学腔的频率精密控制技术，发展了精密调控光学腔内超冷费米气体温度的操控手段，首次观察到了费米原子的超辐射量子相变，更重要的是第一次揭示了原子统计在超辐射量子相变中的作用。相关研究结果发表在Science, 373, 1359 (2021)。

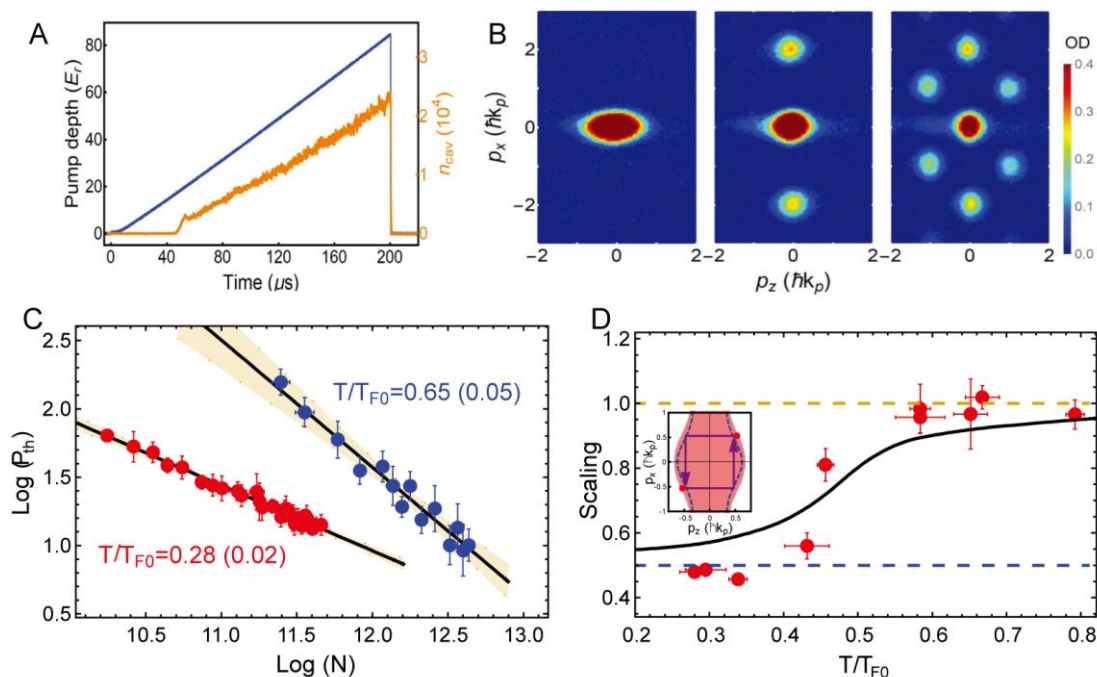


图1 (A) 超辐射相变产生的光场；(B) 原子经历从正常到超辐射相变过程中的自组织；(C) 高低温下相变阈值和原子数的标度率；(D) 标度率随温度的变化；

## 基于量子压缩光探测多维四波混频信号

非线性光谱学是一门通过经典光场研究复杂多体材料系统的科学。通过测量非线性光谱可以获得系统能级结构、能级跃迁速率、系统波动以及退相干。而量子关联是一种非常重要的非经典效应，它可以大幅降低系统的量子噪声，从而显著提高系统的信噪比和灵敏度。与经典非线性光谱相比，量子光谱具有更高的信噪比和抗噪性。因此，研究基于量子关联的非线性量子光谱十分重要。

Konstantin E. Dorfman、Frank Schlawin和Shaul Mukamel教授之前共同提出了基于量子光源实现非线性光谱的理论方案。而荆杰泰教授团队之前的研究表明原子系综四波混频过程可以高效地产生一对量子关联的探针光和共轭光。因此，荆杰泰教授团队和Konstantin E. Dorfman、Frank Schlawin和Shaul Mukamel教授合作开展了基于四波混频过程产生的量子光源实现量子光谱探测的实验研究。

如图1(a)所示，在实验中，该合作团队首先通过光学分束器对激光进行分束。其中较强的一束用来作为四波混频过程的泵浦光，另外较弱的一束通过声光调制器产生实验所需的探针光。之后，泵浦光和探针光在铷原子蒸气池中心交叉并发生四波混频过程，从而产生具有量子关联的探针光和共轭光。

接着，将产生的探针光和共轭光分别打入光电探测器进行对四波混频增益以及量子关联的测量。探针和共轭光束之间的量子关联以及四波混频过程的增益携带了光谱信息。这些信息包括电偶极矩、能级跃迁和斯塔克能移。之后，该合作团队改变四波混频过程的单光子失谐、双光子失谐和泵浦光强度进行增益以及量子关联测量，从而得到了图1(b)基于增益以及量子关联的二维光谱实验数据。在得到实验结果之后，该团队还进行了相应的理论模拟。通过使用微观模型计算了三阶非线性极化率，其中包括强泵浦引起的斯塔克能移。该模型基于对强泵浦的非微扰处理，并同时保持了探针光场和共轭光场的最低阶微扰展开。非线性极化率的共振结构包含有关热铷-85谱线、跃迁偶极矩、线宽展宽以及斯塔克能移的信息。该模型还考虑了量子光场在原子池中的损耗，拟合结果如图1(b)所示。可以看出，量子二维光谱中包含了由铷原子蒸气中的斯塔克能移产生的交叉共振峰。当考虑光损耗时，光谱显示出不同的共振结构，并提供了一个对三阶响应的独特探针手段。该结果表明，量子光谱通过使用量子关联提供了比经典光谱更多的信息。该研究成果发表于PNAS 118, e2105601118 (2021)。

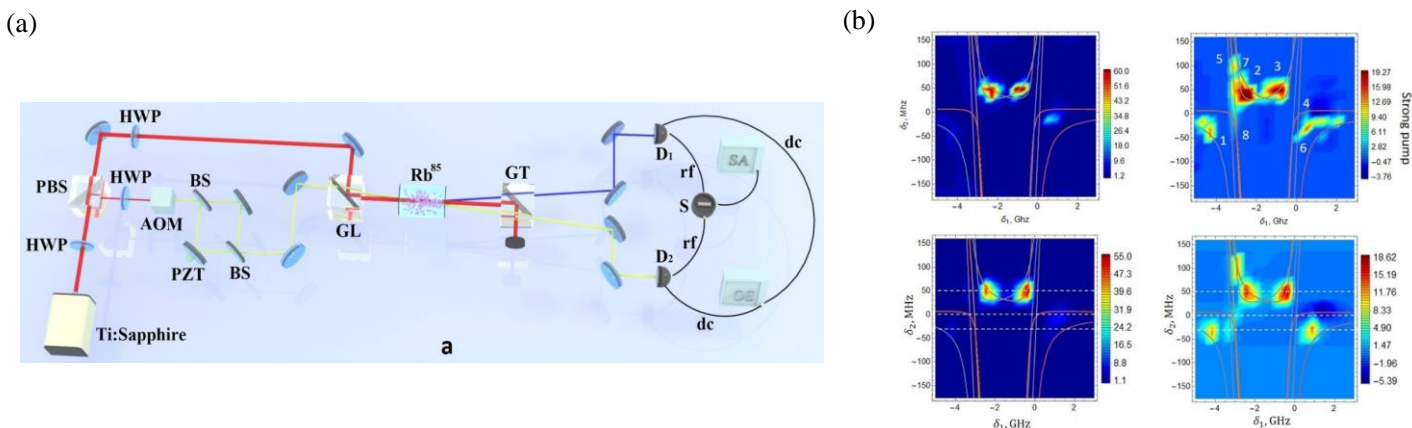


图1: (a)实验装置图。(b)基于增益以及量子关联的二维光谱实验以及相应的理论拟合结果。

## 双层C<sub>3</sub>N电子性质调控及其应用

随着半导体集成电路的发展，传统硅基晶体管性能正在逐步接近其物理极限，特别是当微电子工业走到8 nm 技术节点时，可能不得不放弃继续使用硅材料作为晶体管核心材料。新型二维半导体材料的发展为后硅时代电子器件的发展提供了可能。C<sub>3</sub>N新近合成的二维材料，具有类石墨烯蜂窝状无孔有序结构。该材料不仅具有与碳纳米管和石墨烯相媲美的电学、光学、热学和力学性能，同时还具有与硅材料接近的半导体带隙。

近日，袁清红研究员与中科院微系统信息技术研究所的实验团队合作，运用物理模型、第一性原理计算和实验表征相结合的方法，对双层C<sub>3</sub>N的电子性质及其调控进行了系统的研究。理论研究发现通过控制双层C<sub>3</sub>N结构的堆垛方式，可以实现大范围能带宽度调控。并揭示了双层结构带隙变化的本质原因是两层C<sub>3</sub>N之间p<sub>z</sub>轨道的强耦合导致的费米能级附近的能带劈裂大小可以用价带顶和导带底波函数的重叠数目进行定量计算。其

中AA和AA'排列的双层C<sub>3</sub>N的能带劈裂值分别是AB和AB'排列的双层结构的两倍。基于理论预测结果，实验研究团队成功制备出了AA'及AB'堆垛的双层C<sub>3</sub>N，利用扫描隧道谱等实验表征方法证实了上述理论预测，并发现不同堆垛结构的双层C<sub>3</sub>N的电子性质呈现显著差异。研究还发现施加外部电场可以有效地调控双层C<sub>3</sub>N的带隙。理论结果表明，在1.4 V nm<sup>-1</sup>的外加电场下，AB'堆垛的双层C<sub>3</sub>N的带隙可减少0.6 eV，基本实现从半导体到金属性的转变。实验合作团队通过测量不同双门电栅下C<sub>3</sub>N的电阻以及吸收光谱，得出了与理论预测一致的结论。

该研究揭示了新型碳基二维半导体材料C<sub>3</sub>N具有大范围可调带隙、高载流子迁移率，高开关比等性质，为双层C<sub>3</sub>N在电子、光电器件领域的应用奠定了基础，同时也为下一代电子、光电器件材料的研究和应用提供了新思路。相关研究结果发表在 *Nat. Electron.* 4, 486 (2021).

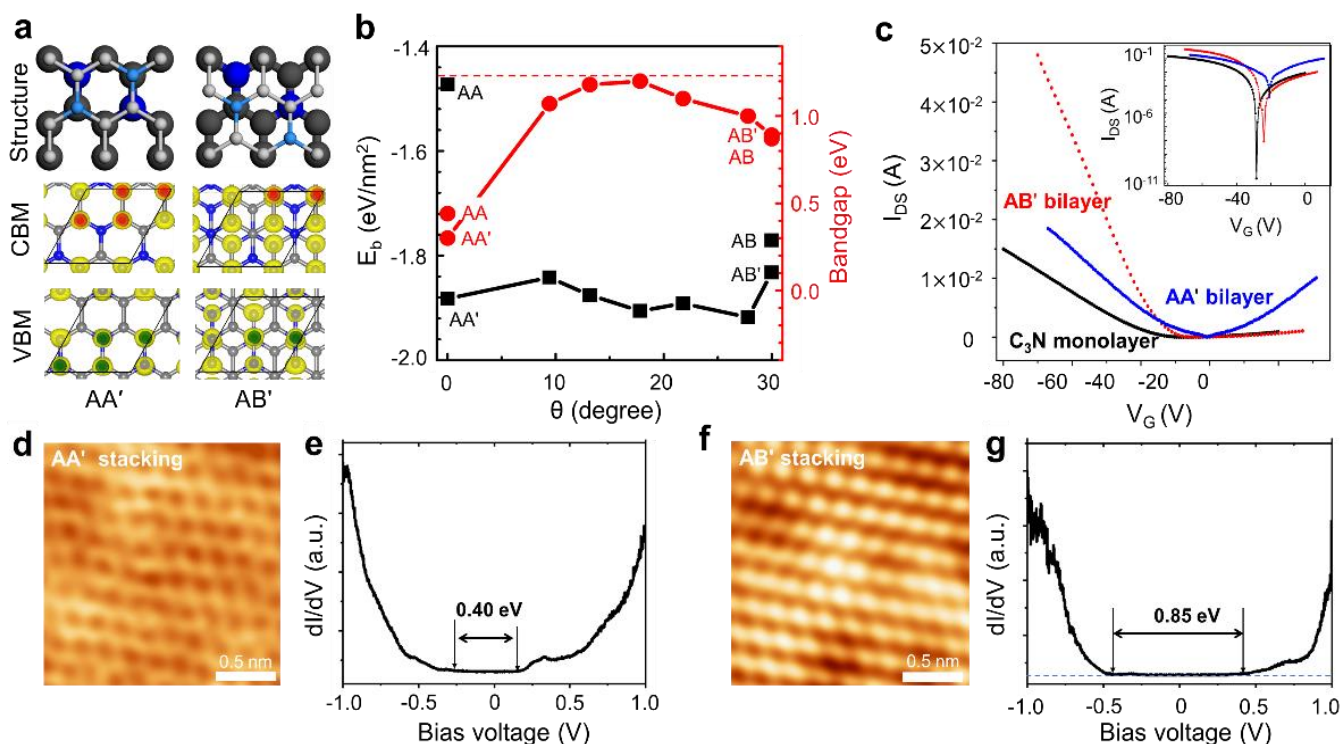


图1. 双层C<sub>3</sub>N的热力学稳定性和电子性质的预测及表征结果图。

## 多功能全光量子态传输机

量子信息协议旨在利用量子物理学的基本原理，开发出超越经典信息系统的高安全性、大容量信息传输以及处理方式。目前，随着对量子信息科学研究的不断深入，具有不同功能的量子信息协议已经被提出并实验实现，例如量子隐形传态协议、量子密集编码协议、量子秘密共享协议和量子克隆协议。这些协议所实现的功能在经典信息系统中是无法实现的。

通常的量子信息系统一般只能执行单一的量子信息协议，然而量子信息任务不可能一成不变，因此开发一个兼容多种量子信息协议的多功能平台对于未来量子信息技术的实际应用至关重要。

在本研究工作中，荆杰泰教授团队实现了一种多功能全光量子态传输机，它由一个增益可调参量放大器，一个光学分束器和一个Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠源组成。该多功能全光量子态传输机可以实现三种不同功能的全光量子信息协议，包括全光量子隐形传态协议、部分无实体全光量子态传输协议以及全光量子克隆协议。另外，该团队实验证明了部分无实体全光量子态传输协议可以显著提升量子态传输的保真度。

如图1(a)所示，在实验中，该团队首先利用基于原子系综四波混频过程的可调增益参量放大器、分光比可调分束器和基于原子系综四波混频过程的EPR量子纠缠态构建了多功能全光量子态传输机的实验装置，并通过平衡零拍探测来测量态传输的保真度。当参量放大器的增益远大于1时，多功能全光量子态传输机执行全光量子隐形传态协议；当参量放大器的增益不满足远大于1条件时，多功能全光量子态传输机执行部分无实体全光量子态传输协议；当不使用量子纠缠态时，多功能全光量子态传输机执行全光量子克隆协议。具体实验结果如图1(b)所示。另外，该团队实验证明了多功能全光量子态传输机的宽带特性，其可以实现1 MHz到3.8 MHz的量子态传输。更重要的是，该团队证明了在相同的纠缠强度下，与全光量子隐形传态协议相比，部分无实体全光量子态传输协议可以显著提升量子态传输的保真度，实验实现了态传输保真度从0.62增强至0.80。该多功能全光量子态传输机为构建多功能连续变量量子信息系统开辟了道路。该研究成果发表于Phys. Rev. Lett. 126, 210507 (2021)。

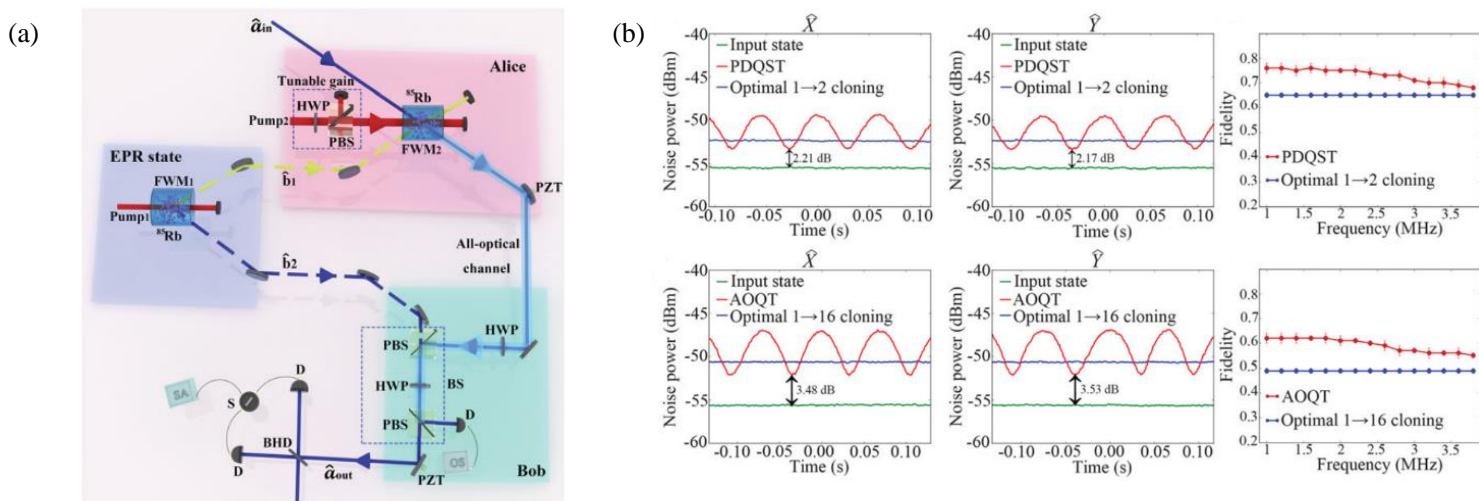


图1: (a)多功能全光量子态传输机示意图。(b)全光量子隐形传态协议、部分无实体全光量子态传输协议和全光量子克隆协议的典型实验结果。

## 全光N到M量子克隆

依据量子力学的基本原理，完美地克隆出未知量子态是不可能的。尽管如此，量子力学的基本原理并不禁止对未知量子态的非完美克隆，这使得实现量子克隆成为可能。量子克隆的概念自1996年被提出以来，受到了全球众多科学家的广泛关注，并在分离变量和连续变量领域都取得了极大的进展。在量子克隆的研究中，量子克隆保真度是衡量量子克隆性能的一个重要指标。量子克隆的克隆保真度与量子密码的安全性息息相关。因此，如何有效地提升量子克隆保真度成为了一个亟待解决的关键性问题。

在连续变量领域，人们已经提出了一种基于低噪声线性放大器和光学分束器的全光最优化N到M量子克隆协议。全光最优化N到M量子克隆协议不仅可以避免之前连续变量量子克隆中所必须的光电和电光转换，而且可以显著地提升量子克隆保真度。因此，实验实现全光最优化N到M量子克隆十分重要。

在本研究工作中，荆杰泰教授团队利用基于四波混频过程的低噪声线性放大器和光学分束器，在实验上实现了相干态的全光最优化N到M量子克隆。在此基础上，实验演示了全光最优化N到M量子克隆的克隆保真度随着原始副本数N的增加而增加，以及全光最优化N到M量子克隆的克隆保真度随着克隆

数M的减少而增加。通过改变原始副本数N以及克隆数M，该团队最高实现了克隆保真度为93.3%的量子克隆。这些实验结果证明了通过全光最优化N到M量子克隆可以有效地增加量子克隆保真度。该工作为大幅提升量子克隆保真度提供了坚实的实验基础。

在实验中，如图1(a)所示，该团队首先通过态制备装置（由一套光学分束器构成）来制备量子克隆中的N个原始副本，并通过能量集中装置（由一套光学分束器构成）完成对原始副本的能量集中。之后利用一个基于四波混频过程的低噪声光学参量放大器将能量集中后的态进行参量放大，并按照克隆份数M将放大后的态进行能量分配，从而完成对多个原始副本的全光量子克隆。最后利用一系列平衡零拍探测器来测量态的保真度，从而实现全光量子克隆机的刻画。为了在实验上展示全光量子克隆机在提升量子克隆保真度方面的能力，该团队详细研究了原始副本数N以及克隆份数M对保真度的影响，实验结果如图1(b)所示。结果表明，增加原始副本数N以及减小克隆份数M均可以显著提升量子克隆机的克隆保真度，并最终实验实现了保真度高达93.3%的4→5相干态量子克隆。该研究成果发表于Phys. Rev. Lett. 126, 060503 (2021)。

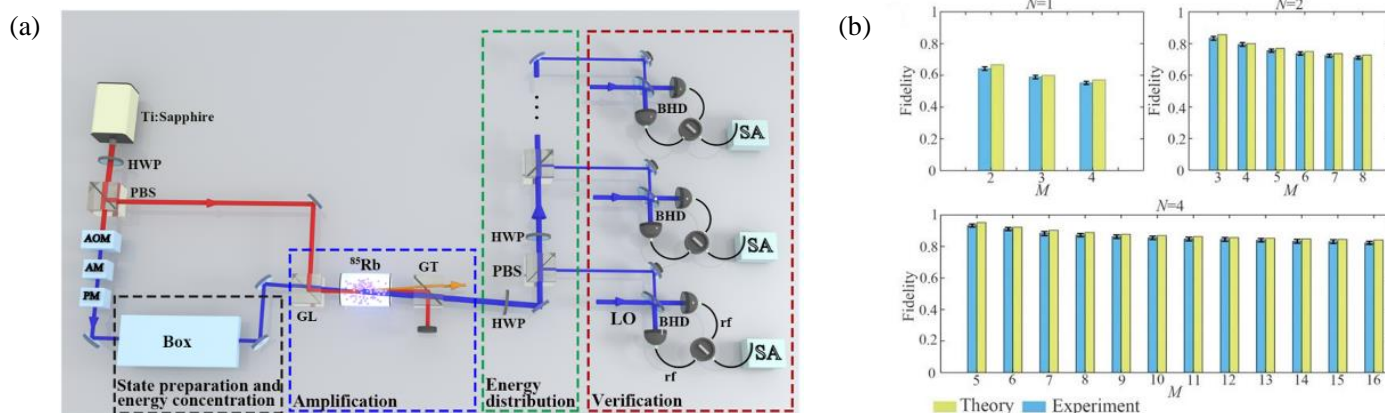


图1: (a)全光量子克隆机实验装置示意图。(b)调控量子克隆保真度的实验结果。

## 轨道角动量复用的量子密集编码

基于量子纠缠实现的量子信息协议可以完成经典协议无法完成的信息任务。因此，量子信息协议在信息处理方面具有巨大的优势。量子密集编码是量子信息中的一种基本协议，它在原则上可以将通道容量扩大一倍。在该协议中，如果发送方和接收方事先共享了一对纠缠的量子比特，则可以通过发送一个量子比特的量子信息来传输两比特的经典信息。

一个自然的问题是，量子密集编码方案的通道容量是否已经是在固定量子资源下通道容量的极限。在离散变量系统中，在四维双光子纠缠源的帮助下，基于二维双光子纠缠的量子密集编码通道容量极限已经被突破。在连续变量系统中，高维纠缠的对应物是多路复用纠缠源。因此，在固定量子资源的连续变量系统中，使用多路复用纠缠源来突破传统量子密集编码方案的通道容量是很有希望的。作为最基本的物理量之一，光学轨道角动量在原则上可以提供无限多个模式，已被用于实现多路复用。这种多路复用的资源有望展示高容量的量子信息协议。

在本研究工作中，荆杰泰教授团队基于四波混频过程在实验上实现了轨道角动量复用的量子密集编码方案。该团队将 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)

纠缠源编码在轨道角动量叠加模式上，并用此轨道角动量复用的纠缠源来实现轨道角动量复用的量子密集编码方案。通过对不同方案信噪比的测量，得到不同方案的通道容量并进行了明确的对比。该团队发现轨道角动量复用的密集编码方案的通道容量相比于使用相干态的传统经典方案提高了 2.7 dB。而在相同资源下，传统密集编码方案要实现这样的通道容量提高需要制备出超高水平压缩的纠缠源。该团队的实验结果清楚地显示了轨道角动量多路复用能够显著提高连续变量量子信息协议的通道容量。

在实验中，如图1(a)所示，该团队首先利用空间光调制器产生基于四波混频过程的轨道角动量复用 EPR 纠缠源，之后将  $EPR_1$  传给 Alice。Alice 在  $EPR_1$  的正交振幅和正交相位分量上编码经典信息，并将其传给 Bob。Bob 在  $EPR_2$  的帮助下利用平衡零拍探测进行解码。该团队通过测量各个方案的信噪比来得到对应方案的通道容量。实验结果如图1(b)所示，轨道角动量复用的密集编码方案通道容量显著提高，相比于使用相干态的经典方案有 2.7 dB 的增强。该研究成果发表于 Phys. Rev. Lett. 127, 093601 (2021)。

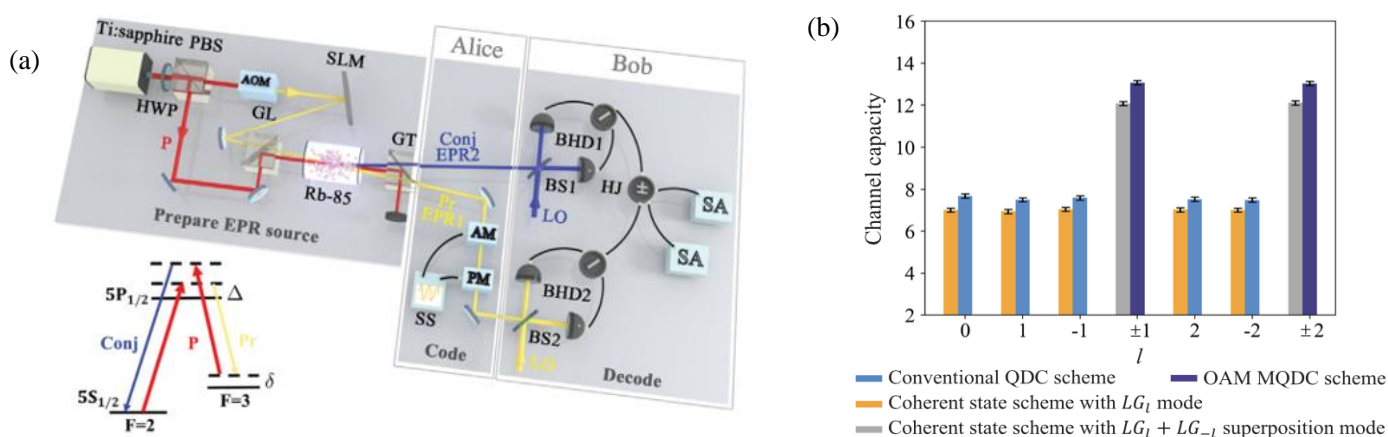


图1: (a) 轨道角动量复用的量子密集编码实验装置示意图。(b) 不同方案中纠缠源编码于不同轨道角动量模式的通道容量的实验结果。



## 超流费米气体中光诱导时空模式

调制不稳定性 (MI) 是物理学的一个重要研究课题, 由其非线性作用产生的各种随机波动模式在光学和玻色-爱因斯坦凝聚体中得到了广泛的研究, 比如孤子链、法拉第波、时空晶体等。然而, 尽管许多理论工作表明超冷费米气体中也可以观测到类似法拉第波的时空模式、且其动力学过程受相互作用调控, 实验上并没有观测到这一动力学行为。

实验室武海斌教授团队采用空间调制的红失谐激光激励成功观测到了超流费米气体中的时空模式, 研究了相互作用在模式的形成和传播中发挥的作用。激光束的纵向空间调制引起了两种不同模式的自发产生: 对于强相互作用的费米气体, 由于非线性耦合, 伴随声子激发的诱导模式在频率和波矢之间表

现出“X”型色散关系, 这种色散关系可以拓展至BEC和BCS渡越区域, 且其传播速度与声速有关, 与平均场以及Monte Carlo理论计算相一致; 在无相互作用的费米气体中观察到的模式没有声子激发, 传播过程中未观测到空间畸变而且有着更长的寿命。

超流费米气体中光诱导时空模式的研究提供了一种新的非线性操控手段, 有助于进一步探索超冷费米气体的物理特性, 本系统可以很容易地推广到费米物质波放大、光波量子气体混合、自发光介导磁性和孤子等研究中, 研究结果发表于*Sci. China Phys. Mech. Astron.* **64**, 294212 (2021)。

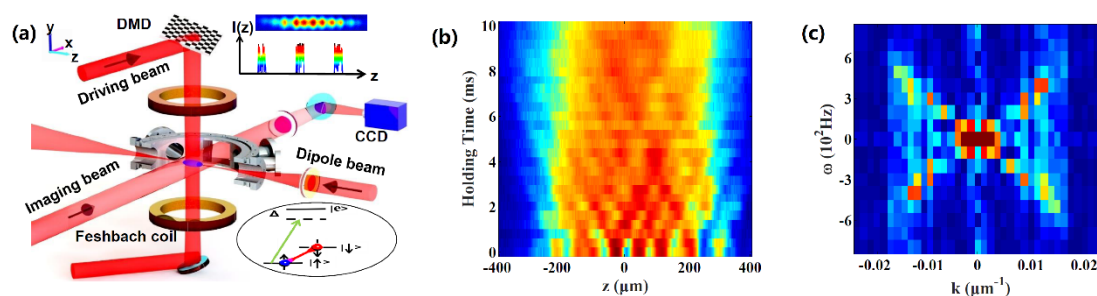


图 强相互作用超冷费米气体的时空模式图。(a) 实验装置图, (b) 原子气体一维密度分布的动力学演化图, (c) 原子时空模式的傅里叶谱。

# 中红外光调制光学频率梳：可移动式高精光谱测量

实现高精度、高灵敏度的分子光谱测量，建立“分子指纹光谱数据库”，是研究物质微观结构与宏观组成的重要基础。进入21世纪以来，超高时频域精度和准确度的光学频率梳技术得到了迅速的发展，革新了传统的光谱测量手段。目前，传统的光学频率梳系统需要进行复杂的主动反馈锁定并工作在实验室环境下，以保证光学频率梳光源的相干性和稳定性，这极大程度上限制了光梳光谱仪的户外实际应用与发展，如大气环境监测、燃烧诊断、生物医疗等。

李文雪研究员团队创新性地提出被动高稳定光调制光学频率梳概念，成功研制具有良好的被动相干特性和抗干扰能力的新型宽带中红外双光梳光源，实现可移动式布置，并成功应用于燃烧室尾气户外实际测量工作，是一项具有极大发展前景的光学频率梳新技术。中红外连续激光器具有窄线宽单根频率梳齿，具有良好的频率稳定性，经飞秒脉冲多纵

模级联光参量作用，产生的中红外光梳表现为以中红外连续激光器频率为中心，泵浦源重复频率为间隔向测量拓展的梳状结构，其光学频率被动参考在中红外连续激光器上。该方案无需主动的载波包络相位锁定过程，即可实现高相干中红外光梳的产生，极大简化了系统结构，为光梳技术走向户外提供了解决方案。

基于该光调制双光梳光源，开展了多分子精密光谱并行测量研究，光谱分辨率达百MHz，对有毒物质 $\text{H}_2\text{CO}$ 的测量灵敏高达40ppb，远远超越了传统的光谱和气体安全测量仪器。进一步对该系统开展了集成化和可移动式设计，在国内首次应用于航空发动机领域。相关研究成果发表在Photon. Res. 9, 1358-1368 (2021)上，并被选为当期的“Editor’s Pick”亮点文章，评价为“领域内具有代表性的、高质量的优秀工作”。

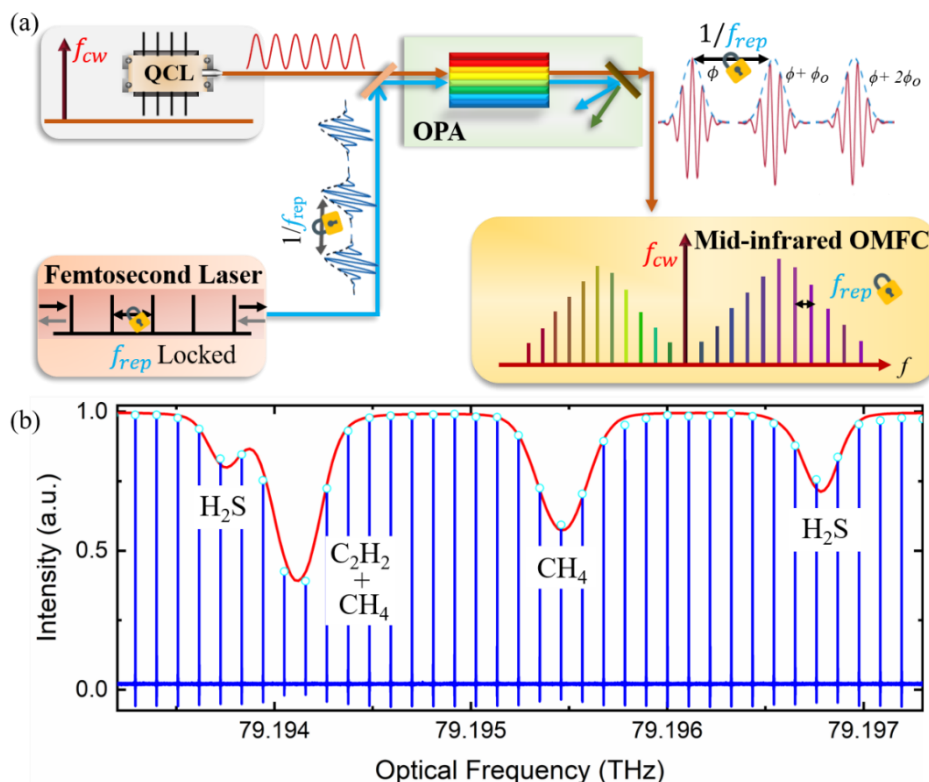


图1 被动锁定双光梳原理示意图与高分辨多分子吸收光谱测量结果。

## 中红外单光子边缘增强成像

边缘增强探测通过对物体轮廓识别，能够有效实现目标检测，在机器视觉与智能识别等领域具有重要应用，而螺旋相衬技术为实现边缘增强成像提供了一种有效途径。随着红外分子光谱、军事红外监测、无损伤无标记生物成像以及各种环境气体遥感等方面的迫切应用需求，将边缘增强成像的工作波长扩展到中红外波段显得尤为重要。

近来，曾和平教授团队搭建完成了基于非线性频率上转换的中红外单光子边缘增强成像系统，首次实现了超灵敏的中红外边缘增强成像，有机结合了螺旋相衬技术与频率上转换成像技术，将红外光场相干转换至可见光波段，并通过时频域精密控制的同步脉冲泵浦技术，显著提高了转换效率，降低了背景噪声，可以促进缺陷检测、天文观测、生物医学检查和国防监视中的各种微光级应用。

此外，该团队结合频率上转换技术和硅基电子

增强CCD (EMCCD)，首次展示了中红外为0.5光子时的高对比度成像。以及通过在三波混频过程中，泵浦光的涡旋光场将螺旋相位高保真地映射到傅里叶图像光谱分量上，从而实现了高保真单光子状态下的中红外边缘增强成像，该技术可实现室温工作下的超灵敏中红外边缘增强实时成像，在微光图像识别、远程红外传感、深度组织成像等领域都具有潜在的应用价值。

以上述系统为基础，结合绝热转换技术，可在宽带光谱范围内制备高保真涡旋相位掩模，从而解决中红外消色差滤波器的技术难题。此外，通过宽带泵浦、热梯度操作或非线性晶体的角度旋转等方法，可进一步拓展中红外上转换成像的视场范围。

相关工作得到了华东师范大学武愕研究员与上海理工大学梁焰副教授和郝强副教授的支持，发表于*Laser Photonics Rev.* 2100189, (2021).

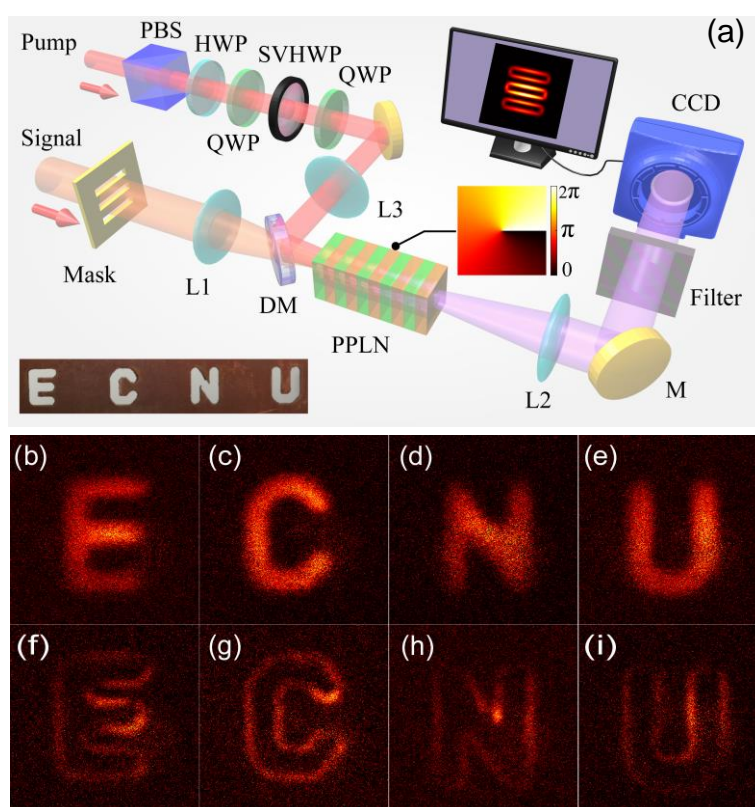


图 (a) 中红外单光子边缘增强成像装置图。(b-e) 基于非线性频率上转换的中红外单光子实验成像结果，图中红外信号脉冲的入射平均光子数为0.5，累积时间为7 s。(f-i) 基于非线性涡旋滤波的中红外单光子边缘增强实验成像结果，图中红外信号脉冲的入射平均光子数为5，累积时间为10 s。每个图的尺寸为4 mm。

## 被动锁模光纤激光器中的呼吸子分子复合物

呼吸子是一种能量局域化振荡的非线性波。与孤子类似，耗散系统中的呼吸子可以形成稳定的束缚态，表现出类似分子的动力学行为，通常被称为呼吸子分子。到目前为止，光学呼吸子分子的实验观测及其动力学实时检测仅限于双原子分子（两个呼吸子的束缚态）。光学呼吸子分子能否像物质分子一样存在更复杂的形态一直不清楚。

曾和平教授团队在超快光纤激光器中观察到了三种呼吸子分子复合物包括多呼吸子分子（下图）、两个呼吸子对（2+2）构成的复合物以及一个呼吸子对和单个呼吸子（2+1）构成的呼吸子分子复合物。这种呼吸子分子复合物的分子间的间距达到数百皮

秒，比对应的孤子分子复合物高出一个数量级以上，表明其是长程相互作用。最近的理论研究表明，相距较远的呼吸子可以通过尾翼的色散波交换能量从而通过谐波同步束缚在一起，这正是呼吸子分子长程相互作用的内在机制。

此外，研究人员还研究了呼吸子分子复合物的非平衡态动力学，包括呼吸子的非弹性碰撞和湮灭行为。最后，由Ginzburg-Landau方程描述的激光模型的数值模拟证实了实验现象。这项工作开启了以呼吸子为基本结构的多体动力学研究的可能性。该工作发表在Laser Photon. Rev.上。

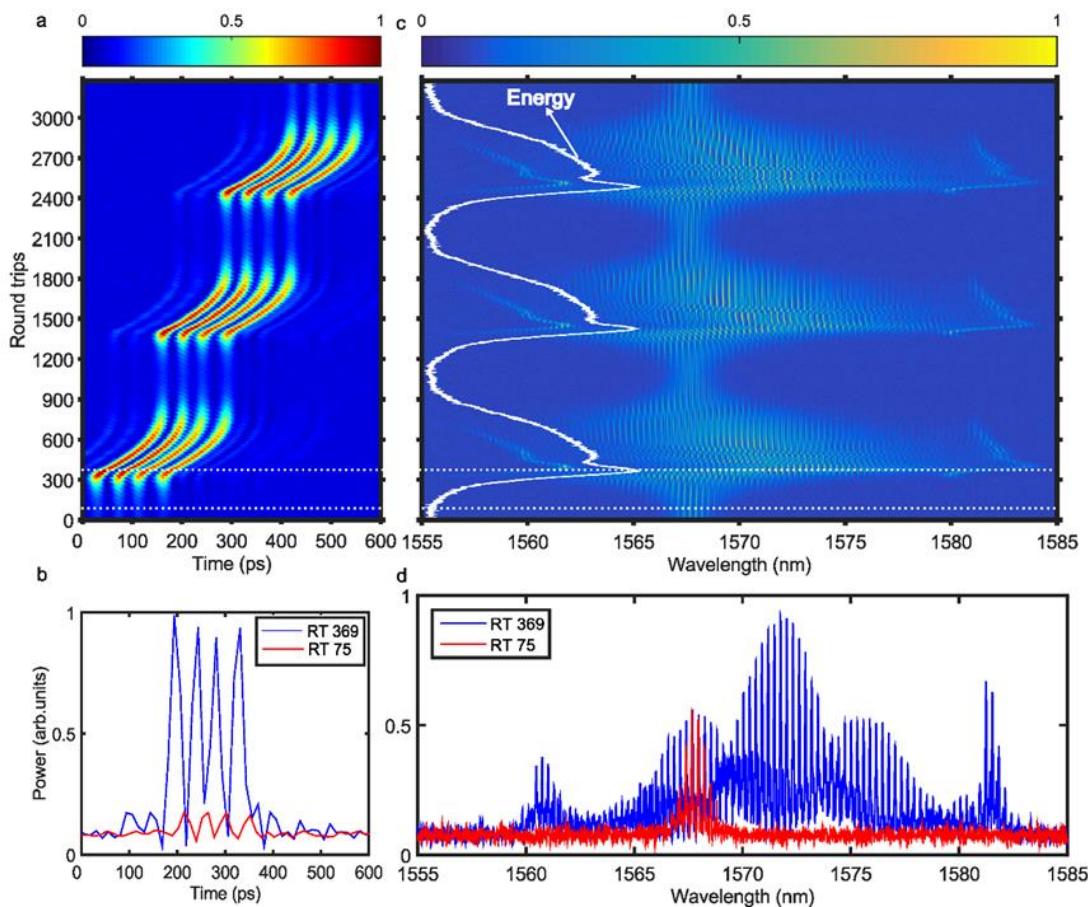


图1 四个呼吸子组成的呼吸子分子。a) 呼吸子分子强度随时间的周期演化（三阶色散引起脉冲右移）。b) 呼吸子分子光谱随时间周期变化。c) 一个周期内最强和最弱的呼吸子的强度图d) 一个周期内最宽和最窄光谱图（宽度相差7倍）

## 片上集成的掺铒铌酸锂波导放大器

铌酸锂晶体具有诸如宽的光学透明窗口、高的非线性系数、高的折射率和大的电光效应等一系列优点，又得益于绝缘体上铌酸锂薄膜的产业化，使其已经成为光子芯片衬底材料的重要候选者，因此被称为“光子学中的硅”。近十几年来，基于铌酸锂薄膜的无源光子元件的设计和制造取得了重大进展，已经应用到非线性光学、高速电光信号转化、量子信息和精密测量等领域。值得关注的是最近一年内在掺铒铌酸锂薄膜上已经制备出基于微谐振腔的片上微型激光器，初步显示出在铌酸锂薄膜平台上实现高性能可扩展光源的潜力。然而，基于铌酸锂薄膜的片上波导放大器还尚无报道。华东师范大学程亚教授课题组利用飞秒激光直写结合化学机械抛光技术成功在Z切600 nm厚的掺铒铌酸锂薄膜上制备出光波导放大器，制备完成的掺铒铌酸锂波导为螺旋线结构，总长3.6 cm（图1.a和b）。我们这里采用双向泵浦的方式对掺铒铌酸锂波导放大器的增益

效果进行表征，使用的泵浦光源为波长980 nm的半导体激光器，信号光源为波长1520 nm- 1570 nm 的可调谐激光器。首先我们测得掺铒铌酸锂波导在C波段和泵浦激光的传输损耗分别约为0.16 dB/cm和6.77 dB/cm。我们在波长1530 nm和1550 nm的信号光进行增益表征分别获得18 dB和8 dB的净增益（图1.c）。通过观察增益曲线发现当信号光功率不变时只增加泵浦光功率时增益会趋向饱和（图1.d），同样当泵浦光功率固定时只增加信号光功率增益曲线也会趋向饱和。我们继续测量了在固定泵浦光功率时不同波长的信号光增益曲线发现曲线形状和信号光荧光光谱基本拟合。除此之外，我们还测量了掺铒铌酸锂波导放大器的增益偏振依赖性，通过测试信号光和泵浦光在掺铒铌酸锂波导的不同偏振发现只有在信号光与泵浦光在掺铒波导内都是TE模式时产生的增益最大。相关结果发表在Laser & Photonics Reviews 上。

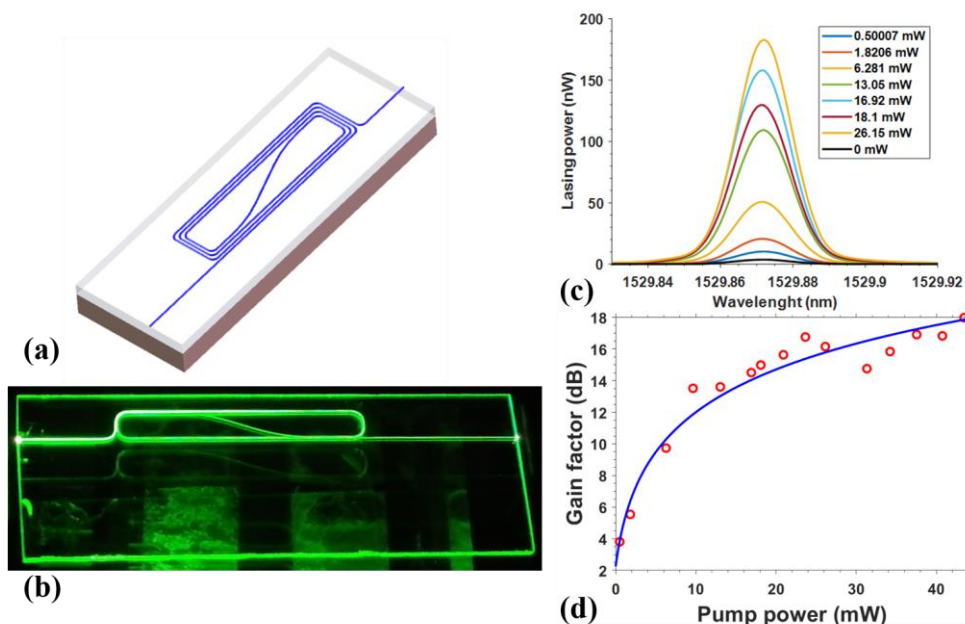


图1. 波导放大器示意图；(b)波导放大器实验图；(c)在不同泵浦光下波导放大器的增益光谱图；(d)波导放大器在1530nm的信号光随着泵浦光增大的增益谱线。

## 空间多尺度奇异态是大脑节律多样性的内在原因？

人类的大脑经过亿万年的演化已发展出最复杂、最独特、且能支持最强脑功能的网络结构。现已知道，这个网络具有一系列的结构特征如小世界、无标度、社区结构、及富人俱乐部等。然而，这些结构特征如何确保大脑的强大功能或者脑功能的微观机制是什么，对此我们依然知之甚少。最近，来自华东师范大学的刘宗华教授研究团队(霍思宇博士、田昌海博士、郑木华博士、管曙光教授、周昌松教授、刘宗华教授)在《国家科学评论》(*National Science Review* 8: nwaa125 (2021)) 发表研究论文，指出真实的大脑结构网络具有一种新的奇异态——空间多尺度奇异态，其形成与网络局部连接的对称性有密切的关系。

不同于传统的人为构造的复杂网络模型，课题组从真实的人脑结构网络出发，将各脑区中大量神经元的集体行为近似为神经元集群质量模型描述的平均场活动，来研究两种不同大小的大脑网络上（一个是将大脑神经网络简化为989个节点，另一个为64个节点）的动力学行为。作者发现，依赖于不同的耦合强度与延迟时间，大脑网络可表现出一种

惊奇的行为——整体平庸但局部为部分同步化的奇异态。此外，作者还揭示出了整体与局部同时存在奇异态的状态，并将其命名为空间多尺度奇异态（如下图）。

为了探究空间多尺度奇异态的形成机制，作者进一步研究了每个脑区在拓扑结构上的对称性，发现其与该脑区的动力学同步程度呈正相关，即那些拓扑对称性特别高的脑区在大脑中扮演着中继站的作用。作者还研究了网络的结构树集团划分与功能树集团划分，并从它们的对比中发现，大脑的结构与功能之间存在着密切的关系：在不同的大脑状态下（正常或异常的），结构树中不同集团或集团组合的激活可以导致不同的大脑动态模式，从而实现不同的节律输出如 $\delta$ ,  $\theta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 与 $\gamma$ 波等。

空间多尺度奇异态的发现可用于解释大脑活动具有多节律特征这一实验事实，并可对应不同的认知斑图，因此，从网络结构的局部对称性程度来探讨动力学斑图的形成机制这个新思路有望成为理解大脑宏观认知功能的微观机制的新方法。

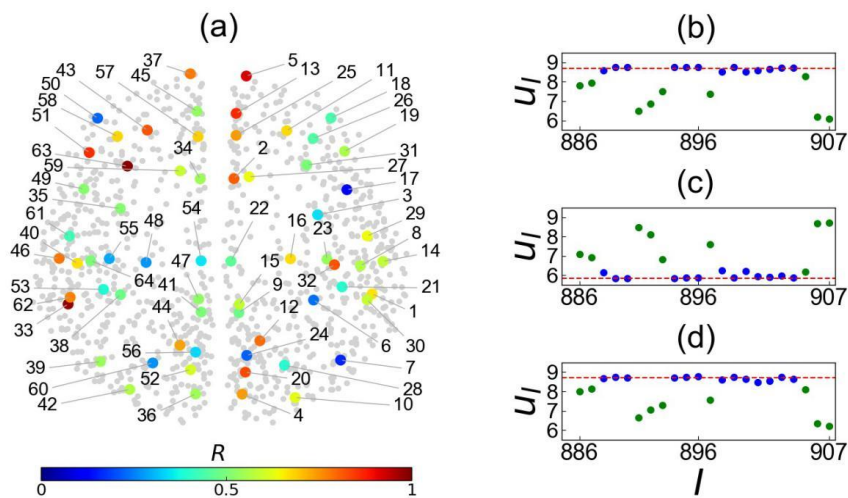


图1 空间多尺度奇异态. (a) 64个脑区上的序参量; (b)-(d)局部奇异态斑图的演化快照。

# 光谱立体压缩超快成像：超快现象的五维观测新方法

光学成像作为一种能够提供丰富信息的可视化方法，在人类探索未知世界的历程中发挥着不可替代的作用。超快光学成像作为光学成像中一种具有超高时间分辨的成像技术，可以捕获皮秒乃至飞秒量级时间尺度的超快动力学场景，因此在物理、化学和生物等超快现象研究领域中获得了广泛的应用。而近些年超快光学成像已经获得迅速的发展，研究人员已经提出并发展了多种多维超快成像方法，包含了空间立体分布或者光谱分辨能力。但目前还没有一种能够同时获取时间-空间-光谱 ( $x, y, z, t, \lambda$ ) 五维信息的单次超快成像技术。

张诗按研究员团队创新性地提出了一种光谱立体压缩超快成像(SV-CUP)，该技术可以在相机单次曝光下，同时捕获动态场景的空间(三维)，时间(一维)，

光谱(一维)的五维信息。在该实验系统中， $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的空间分辨率分别达到了0.39、0.35和3 mm (8.8 mm x 6.3 mm x 15 mm视场下)，时间帧间隔为2 ps，光谱帧间隔为1.72 nm。他们还通过对一个表面涂有量子点的立体人偶模型进行光致发光动力学成像，在实验上验证了该技术的五维成像能力。

SV-CUP巧妙地将飞行时间压缩超快成像(ToF-CUP)和高光谱压缩超快成像(HCUP)两种技术有机地结合，从单次测量的结果中获取五维信息。其中ToF-CUP用于提取动态场景的空间三维信息( $x, y, z$ )，HCUP用于记录空间-时间-光谱四维信息( $x, y, t, \lambda$ )。再根据时间映射关系，将ToF-CUP和HCUP的重构结果进行数据耦合，恢复出完整的五维信息( $x, y, z, t, \lambda$ )。相关研究结果发表在 *Adv. Photonics* 3, 045001 (2021)。

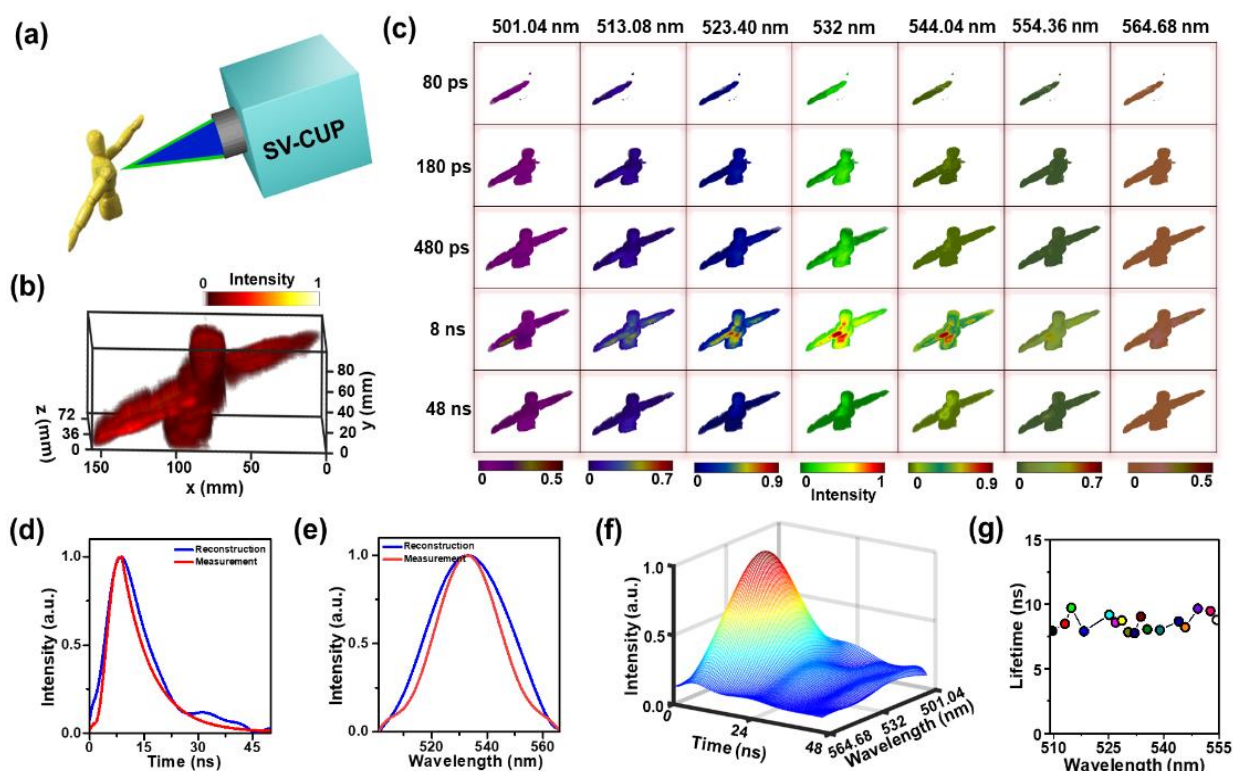


图1 光谱立体压缩超快成像系统拍摄五维动态场景结果及分析。

## 隧道结纳腔中的CoTPP分子膜电致发光

扫描隧道显微镜诱导发光技术 (STML) 融合了高分辨的形貌表征和高灵敏的单光子探测, 利用STM金属探针高度局域化的隧穿电子激发隧道结中的分子发光。前期研究表明, 当隧道结中纳腔等离激元模式与分子特定荧光的对应能量匹配时, 分子荧光与纳腔等离激元能够实现相互激发和调制, 并借助于多层分子膜、卤化物、氧化物等间隔层结构的脱耦合作用, 在荧光产率较高的分子体系中获得局域的、分子本征的电致荧光。

金庆原教授研究团队将STML研究体系拓展到荧光产率极低的、具有开壳层顺磁性电子结构金属离子的CoTPP薄层分子膜。通过改变偏压极性调控隧穿电子对局域电子态密度及分子轨道的影响, 在1到5层的分子膜样品上, 发现样品负偏压能够减弱Co离子对卟啉环的作用, 有助于卟啉环共轭特性的

恢复, 利于分子偶极振荡对纳腔等离激元的增强, 相较于正偏压能够获得更高的纳腔等离激元发光产率。不仅如此, 随着分子层数的增加, 下层分子的脱耦合作用逐渐增强, 纳腔等离激元共振增强分子荧光的作用开始显现, 进而获得常规荧光产率极低的CoTPP分子的局域电致荧光信号, 实验结果与通过求解密度矩阵运动方程获得的理论计算结果符合得很好。

研究结果有助于揭示纳腔等离激元环境中电子、激子、等离激元、光子等基本量子间的耦合和转化机制, 对拓宽纳米尺度光电器件的材料选择以及等离激元光子学和单分子光电子学的发展具有基础而深远的意义。相关研究结果发表在*J. Phys. Chem. Lett.* 12, 5349-5356 (2021)。

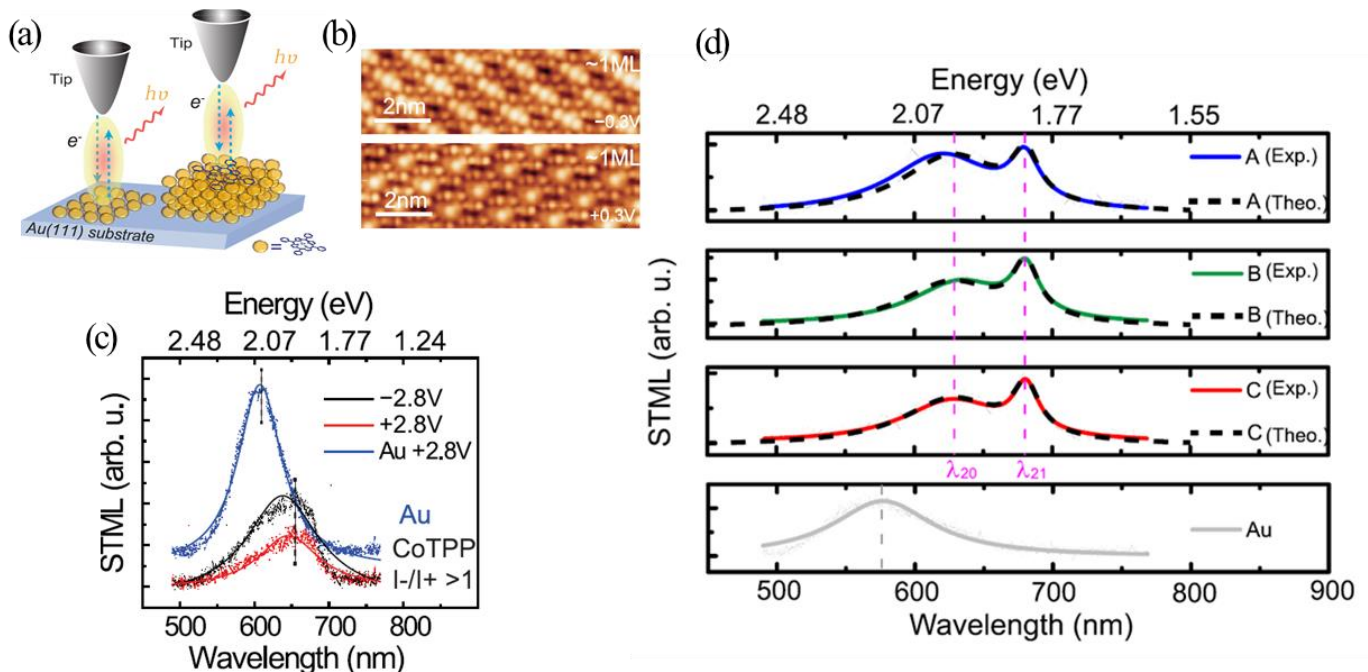


图1 (a) 实验方案示意图; (b) 单层CoTPP/Au的STM形貌图;  
(c) 纳腔等离激元光谱; (d) CoTPP多层膜和Au单晶的STML光谱。



## 学术报告一览

### 讲座题目: Understanding High-Temperature Chemical Reaction on Metal Surface

主讲人: 李震宇 教授  
 时间: 2021.10.11 14:00  
 单位: 中国科学技术大学  
 地点: 光学大楼B325会议室 + 腾讯会议 (ID: 681 914 254)

### 讲座题目: Spin, Charge, and Phonon Coupling Effects in 2D Materials

主讲人: Prof. Dr. Xiaodong Xu  
 时间: 2021.10.11 09:00  
 单位: University of Washington Seattle  
 地点: 光学大楼B325, zoom会议id: 6108034229

### 讲座题目: 超高品质因子微腔光学

主讲人: 肖云峰 教授  
 时间: 2021.10.09 14:00  
 单位: 北京大学  
 地点: 光学大楼A508会议室

### 讲座题目: 碳量子点在光催化领域的应用

主讲人: 康振辉 教授  
 时间: 2021.09.27 14:00  
 单位: 苏州大学  
 地点: 光学大楼B225会议室+腾讯会议(ID: 494 609 342)

### 讲座题目: 自由基的低温光谱探测与反应

主讲人: 曾小庆 教授  
 时间: 2021.09.25 09:30  
 单位: 复旦大学  
 地点: 光学大楼B325会议室

### 讲座题目: 高功率超快碟片激光器

主讲人: 张金伟 教授  
 时间: 2021.09.24 14:00  
 单位: 华中科技大学  
 地点: 光学大楼B325会议室

### 讲座题目: A route to attosecond science

主讲人: Tran Trung Luu 助理教授  
 时间: 2021.09.24 10:30  
 单位: 香港大学  
 地点: 光学大楼B325会议室, Zoom会议, ID: 91691709584

### 讲座题目: Probing Elementary Molecular Events by Ultrafast Multidimensional X-ray Spectroscopy and Diffraction

主讲人: Prof. Shaul Mukamel  
 时间: 2021.09.24 10:00  
 单位: 美国加州大学Irvine分校  
 地点: 腾讯会议 ID: 369 152 863

### 讲座题目: 强场物理和超快成像中的量子干涉效应

主讲人: Carla Figueira de Morisson Faria 教授  
 时间: 2021.09.23 17:00  
 单位: 英国伦敦大学学院  
 地点: 光学大楼B325会议室、Zoom93103961432

### 讲座题目: Strong light-matter interaction in 2D semiconductors

主讲人: Prof. Dr. Vinod Menon  
 时间: 2021.09.22 9:00  
 单位: 纽约城市学院&纽约市立大学  
 地点: 光学大楼B325会议室、zoom会议id: 6108034229

**讲座题目: Superfluids of light**

主讲人: Prof. Dr. David Snoke  
 时间: 2021.09.15 10:00

单位: 匹兹堡大学  
 地点: 光学大楼B325会议室、zoom会议id: 8794412 2341

**讲座题目: Advanced attosecond optical spectroscopy and its application to solid physics**

主讲人: Matteo Lucchini 教授  
 时间: 2021.09.10 15:00

单位: 意大利米兰理工大学  
 地点: Zoom会议ID: 96307678464

**讲座题目: Strong-field physics and chemistry with nanospheres**

主讲人: Matthias F. Kling 教授  
 时间: 2021.09.09 15:10

单位: 慕尼黑大学  
 地点: zoom会议id: 85489085859

**讲座题目: Semiconductor moiré materials**

主讲人: Prof. Dr. Kin Fai Mak  
 时间: 2021.09.08 9:00

单位: 康奈尔大学  
 地点: zoom会议Meeting ID: 610 803 4229

**讲座题目: 计算成像及燃烧诊断**

主讲人: 蔡伟伟 研究员  
 时间: 2021.08.11 14:00

单位: 上海交通大学  
 地点: 腾讯会议ID: 987 302 502

**讲座题目: 动力学蒙特卡洛在真实时空尺度模拟中的应用**

主讲人: 李浩源 教授  
 时间: 2021.07.26 14:30

单位: 上海大学  
 地点: 光学大楼B225会议室

**讲座题目: 非线性光学中的色散冲击波**

主讲人: A. Kamchatnov 教授  
 时间: 2021.07.26 14:30

单位: 俄罗斯科学院光谱学研究所  
 地点: (zoom), Room id: 93952850591

**讲座题目: 基于量子互联网的量子中继研究**

主讲人: 曹明涛 副研究员  
 时间: 2021.07.23 14:30

单位: 中国科学院国家授时中心  
 地点: 光学大楼B225会议室

**讲座题目: 准相位匹配晶体中非线性结构光场调控**

主讲人: 周志远 副教授  
 时间: 2021.07.23 13:00

单位: 中国科学技术大学  
 地点: 光学大楼B325会议室

**讲座题目: 激光驱动离子加速及其医学应用探索**

主讲人: 宾建辉 研究员  
 时间: 2021.07.15 14:00

单位: 中国科学院上海光机所  
 地点: 光学大楼B325会议室

**讲座题目: 量子传感理论与方法**

主讲人: 蔡建明 教授  
 时间: 2021.09.24 10:00

单位: 中国科学技术大学  
 地点: 光学大楼B325会议室

**讲座题目: 冷原子的多体量子效应与精密测量**

主讲人: 李朝红 教授  
 时间: 2021.07.06 10:00

单位: 中山大学  
 地点: 光学大楼B225会议室

## 实验室20项项目获得国家自然科学基金资助立项

根据近期国家自然科学基金委已经公布的项目评审结果，精密光谱科学与技术国家重点实验室成员们申请的项目喜讯频传。

批准号	负责人	项目名称	项目类别
12134004	李文雪	非线性相干光频梳光谱	重点项目
12122404	宫晓春	原子分子强场超快动力学精密测量	优秀青年科学基金项目
12174112	谢 微	辐射偶极子系综宏观偶极矩扰动响应研究	面上项目
12174111	孙 政	二维范德瓦尔斯晶体中带电玻色子的光电性质研究	面上项目
22173031	袁清红	在金属硼化物上实现大面积、层数可控单晶六方氮化硼生长的可行性理论研究	面上项目
12174104	袁 翔	第二类外尔半金属的红外磁光谱学研究	面上项目
12174110	刘胜帅	轨道角动量复用型全光学量子纠缠交换的实验研究	面上项目
62175064	黄 坤	超灵敏高分辨的中远红外上转换高光谱实时成像	面上项目
12174109	陆培芬	超流氦纳米液滴环境下分子转动波包演化的实时探测研究	面上项目
62175067	潘海峰	激光雷达系统中单光子探测器的性能和可靠性评估技术研究	面上项目
12174115	夏 勇	光学轨道角动量的高分辨、高带宽、高准确率识别及其在光通信领域中的应用	面上项目
12174114	张三军	新型原子精确配体保护金属纳米团簇激发态动力学与其结构相关性研究	面上项目
12174105	邓书金	强相互作用均匀费米气体的动力学研究	面上项目
62175066	邓联忠	多维度精密调制超快激光场及其稀土纳米颗粒上转换发光调控的应用研究	面上项目

## 实验室20项项目获得国家自然科学基金资助立项

根据近期国家自然科学基金委已经公布的项目评审结果，精密光谱科学与技术国家重点实验室成员们申请的项目喜讯频传。

批准号	负责人	项目名称	项目类别
12174108	冯东海	胶体量子点与手性分子耦合体系的相干自旋动力学	面上项目
62105102	周敏	镱原子低能态间光频跃迁的绝对频率测量和超精细结构研究	青年科学基金项目
12104162	罗大平	新型平面光谱编码双光梳三维成像技术	青年科学基金项目
62105101	姚云华	基于超快光场精密调控的稀土离子价态转化研究	青年科学基金项目
12104158	王杰	铷原子超窄线宽能级跃迁的绝对频率精密测量	青年科学基金项目
12104160	高健	纳米颗粒表面等离子体共振增强高次谐波辐射的研究	青年科学基金项目

## 实验室2021年“优秀大学生暑期夏令营”圆满举行

相聚云端，追光逐梦。2021年7月7日至7月8日，华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室2021年“优秀大学生暑期夏令营”以线上形式顺利举行。来自华师大、华中师大、华东理工、山西大学等的92名同学脱颖而出，相聚云端，共同学习。

本次夏令营的主题为“精密光谱科学前沿问题及其在高技术发展中的应用”。围绕这一主题，实验室在两天的时间里组织了实验室介绍、学术报告、经验交流、优秀营员面试等活动，向来自全国各地的优秀大学生们展示了精密光谱科学与技术国家重点实验室的发展历程、师资力量、学术成果和人才培养模式，也让营员们深切感受到了实验室精湛的科研团队、良好的科研条件和浓厚的学术氛围。营员们纷纷表示收获满满，也感谢实验室老师们的精心安排，期待九月能线下来到实验室参观学习。本次夏令营活动虽然以线上形式开展，但通过前期安排，为营员们提供了和导师交流学习的机会，展现了实验室的科研实力和人文关怀。



## 追光启程|实验室迎来2021级新生

金秋送爽喜迎八方学子，2021年8月31日，精密光谱科学与技术国家重点实验室在美丽的樱桃河畔迎来了116名2021级全日制硕士和博士研究生新生。为帮助新生入学后尽快融入校园环境、增进师生和同学们之间的感情、全心投入专业学习，9月1日至3日，实验室开展了新生入学教育，2021级新生正式开启他们的追光之旅！新生教育期间，实验室组织新生参与实验室开学典礼、校史讲座、实验室、校园安全教育讲座、心理健康教育讲座、素质拓展、导师见面会、新生班会等活动，尽可能让大家了解熟悉学校和实验室的相关制度规定，做好科研准备，尽快融入师大生活。





华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室  
State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University

地址：上海市闵行区东川路500号光学大楼A229（200241）

电话：021- 54836023

邮箱：lps@phy.ecnu.edu.cn

Optics Building A229

Minhang Campus: 500 Dongchuan Rd., Shanghai 200241

Tel: 021-54836023

Email: lps@phy.ecnu.edu.cn



官方微信公众号



实验室招生群