

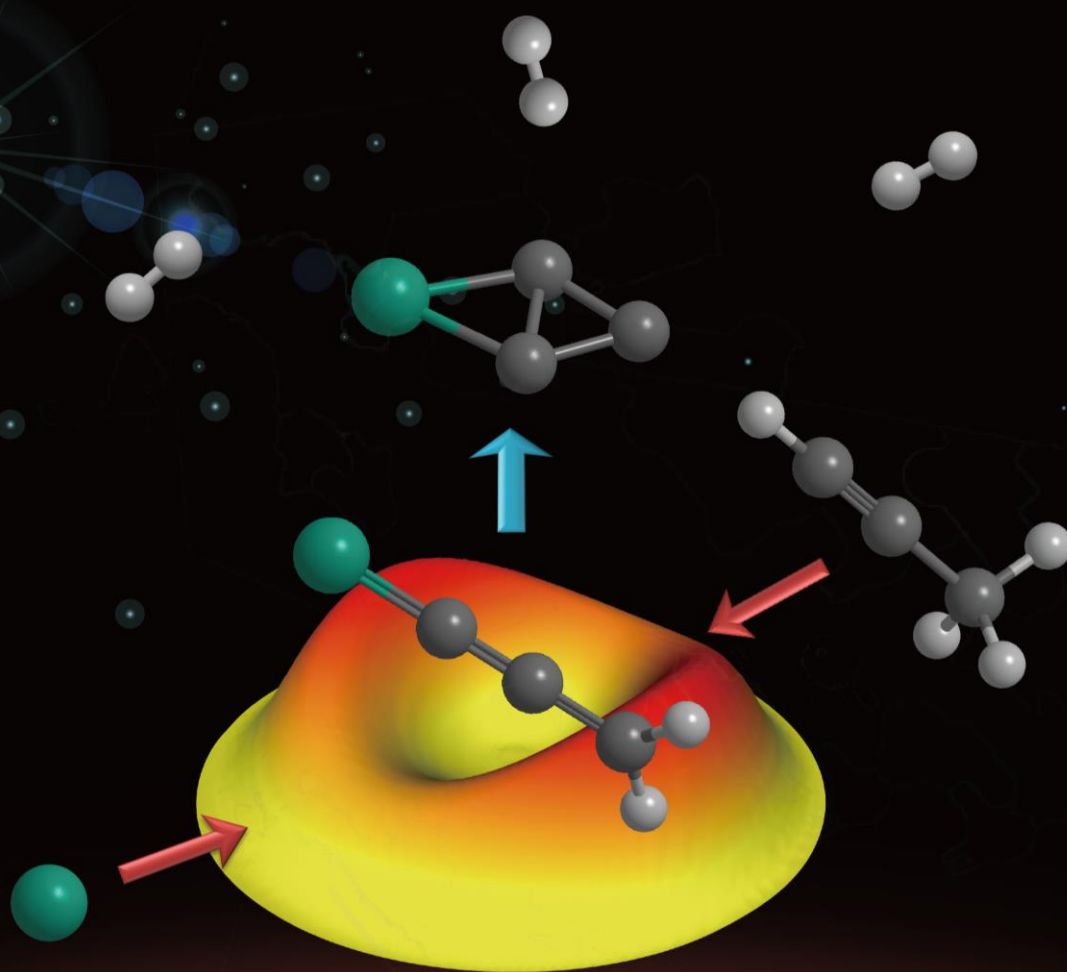
# 实验室通讯

## SKLPS COMMUNICATIONS

No.02

2019/09, Sept.

2019年02总第2期



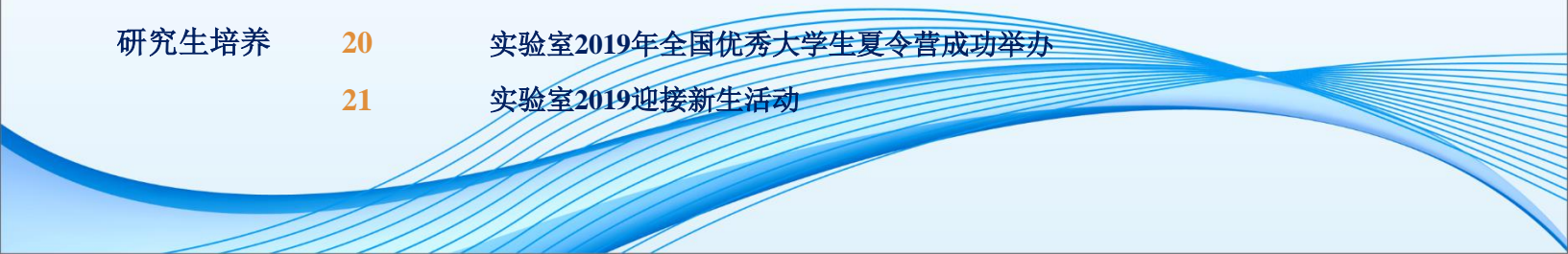
LPS

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)

[www.lps.ecnu.edu.cn](http://www.lps.ecnu.edu.cn)

# 目录

## Contents

- 
- |       |    |   |
|-------|----|---|
| 科研进展  | 01 | c-SiC <sub>3</sub> 分子在AGB星周包层中的机理研究取得进展 |
|       | 02 | 光学轨道角动量复用的连续变量纠缠                        |
|       | 03 | 相敏放大器中的干涉诱导量子压缩增强                       |
|       | 04 | 超冷里德堡原子气体中高维非线性光脉冲的传播及其操控               |
|       | 05 | 利用冷原子四波混频产生 $10^{-18}$ 频率不稳定性窄线宽激光的理论探索 |
|       | 06 | 利用玻色-爱因斯坦凝聚体中的孤子扩散探测声学黑洞的霍金辐射           |
|       | 07 | 基于自参量放大的三态耗散孤子激光器                       |
|       | 08 | 稀土离子间多光子激发能量转移的调控                       |
|       | 09 | 通过控制荷电状态阐释CdSe胶体量子点中两个拉莫尔进动频率的起源        |
|       | 10 | 通过电子自旋相干测量实验揭示CdSe胶体量子点中超长寿命光致负电荷态      |
|       | 11 | 用量子光的单分子衍射监测自发电荷密度涨落                    |
|       | 12 | 氟化镁分子磁光囚禁的理论研究                          |
|       | 13 | 双薄膜腔光力系统                                |
| 学术报告  | 14 | 2019年3月-2019年7月实验室学术报告一览                |
| 科研项目  | 16 | 实验室11项项目获得国家自然科学基金资助立项                  |
| 开放运行  | 17 | 2019年度精密光谱科学与技术国家重点实验室4项开放课题立项          |
| 实验室搬迁 | 18 | 实验室搬迁整体概况                               |
|       | 19 | 光学大楼各项工作正常运行                            |
| 研究生培养 | 20 | 实验室2019年全国优秀大学生夏令营成功举办                  |
|       | 21 | 实验室2019迎接新生生活活动                         |
- 
- 

## c-SiC<sub>3</sub>分子在AGB星周包层中的机理研究取得进展

AGB星是演化到晚期的恒星。它们以星风的形式不断向其星周抛射气体分子和尘埃，形成一个致密而温暖的星周包层，是宇宙中著名的“分子工厂”，尤其是距离地球最近的富碳AGB星IRC+10216。迄今为止，太空中已发现约200种星际分子，其中一半以上都可以在IRC+10216这一颗AGB星的星周探测到。近年来，AGB星周分子的相关研究引起了越来越多的科学关注。近日，实验室杨涛研究员与美国加州大学伯克利分校、美国夏威夷大学、中科院新疆天文台的研究人员合作，共同攻关了AGB星周包层中特殊环状分子c-SiC<sub>3</sub>的形成机制，修正了c-SiC<sub>3</sub>、SiC<sub>4</sub>等分子的天体观测丰度与理论不符的历史争议，并发表在国际学术期刊Proceedings of the National Academy of Sciences of USA 116, 14471-14478 (2019)。

实验中，研究人员制备了Si(<sup>3</sup>P)、Si(<sup>1</sup>D)和SiH(X<sup>2</sup>Π)三种原子和分子束，通过激光诱导荧光光谱标定量子态以及精确控制气相分子动力学的方法，研究了Si(<sup>1</sup>D)与CH<sub>2</sub>CCH<sub>2</sub>或CH<sub>3</sub>CCH的反应能与势垒、中间态分子结构等重要信息及各种可能的反应，最终发现H<sub>2</sub>解离的通道为最主要的反应通道。量化计算方面，通过ωB97X-V密度泛函与cc-pVTZ基组对反应物、中间态、和最终产物的结构进行了几何优化和频率计算，而对过渡态的搜索，则使用freezing

string方法生成一个初始态结构与Hessian矩阵，之后使用P-RFO eigenvector following方法对过渡态结构进行优化再通过频率计算确认最终的过渡态。通过高精度的量化计算，甄别出了H<sub>2</sub>C=C=C=Si等主要分子的产物通道，以及在Lyman-α光子作用下生成c-SiC<sub>3</sub>(X<sup>1</sup>A<sub>1</sub>)等分子的光解通道。天体模拟方面，研究人员将实验和量化计算所得到的反应结果成功应用于AGB星周化学反应网络模型，细致研究了c-SiC<sub>3</sub>分子、SiC<sub>4</sub>分子、SiC<sub>3</sub>H<sub>2</sub>分子、CH<sub>3</sub>CCH分子及其同分异构体在IRC+10216星周的空间分布、形成和解离机制并给出了它们的丰度和柱密度等信息，为未来可能的天文观测提供重要依据。

近年来，射电天文领域进展迅速，高灵敏度和分辨率的望远镜不断建成并成功运行，极大的促进了深空探索领域的迅速发展。高性能的射电望远镜包括中国贵州的500米口径球面射电望远镜(FAST)、上海天文台天马(65米口径)望远镜、新疆天文台未来的QTT(110米口径)全向可动射电望远镜、欧洲太空总署的Herschel望远镜、智利的ALMA望远镜等等。中国以及世界的天文观测领域正面临着一个蓬勃发展的“黄金时代”，物理实验模拟与量化计算结合多波段射电观测之间的交叉融合将成为重要趋势。

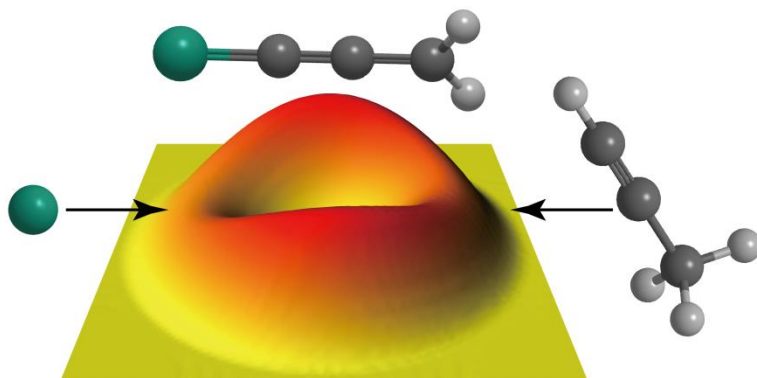


图1. 质心坐标下Si(<sup>1</sup>D)与CH<sub>3</sub>CCH分子的单分子碰撞截面示意图

## 光学轨道角动量复用的连续变量纠缠

近期，实验室荆杰泰教授团队在量子信息领域取得重要进展。该团队利用光学轨道角动量自由度，在实验上实现了一种光学轨道角动量复用的连续变量量子纠缠体系，该成果发表在国际物理学重要学术期刊Physical Review Letters 123, 070506 (2019)上。

近年来，量子信息领域发展迅速，其中量子纠缠是非常重要的量子资源，提高量子通讯体系中的纠缠容量，从而提高量子通讯的信道容量对于实现大尺度量子信息网络至关重要。一方面，复用（Multiplexing）是提高经典通讯系统信息承载能力的重要手段。而另一方面，光学轨道角动量（Orbital Angular Momentum）作为一个重要的物理量，引起了广泛的研究兴趣，由于光学轨道角动量具有无限带宽，螺旋波前等性质特点，已经被成功的应用于经典光通讯以及光学操控微粒等领域。荆杰泰教授团队把复用的概念和光学轨道角动量自由度相结合，并应用于连续变量纠缠体系，从而提出了一种通过复用光学轨道角动量的不同模式来大幅度增加量子通讯体系纠缠容量的方案，并且最终在实验上得以实现。

在实验中，该团队利用热铷原子系综中的四波

混频过程产生了两个量子关联的孪生光束。在这两个孪生光束通道中，系统同时确定性地产生13对两两纠缠的拉盖尔高斯（Laguerre-Gaussian）模式，即 $LG_{l,Pr}$ 和 $LG_{-l,Conj}$ ，其中 $l$ 为LG模式对应的光轨道角动量拓扑荷数，Pr和Conj代表两个孪生光束通道。该团队发展了基于LG模式的量子纠缠探测方案，并利用这一探测方案成功在实验上验证了这些对应模式之间的量子纠缠特性。同时该工作还验证了系统中 $LG_{-l,Pr}$ 和 $LG_{-l,Conj}$ 模式（ $l \neq 0$ ）之间不存在量子纠缠，从而从连续变量体系的角度证明了在四波混频过程中，非线性相互作用遵守光学轨道角动量守恒定律。此外，该工作还研究了四波混频系统中三种不同的光轨道角动量相干叠加模式情况下的量子纠缠特性。最后，该工作系统地研究了泵浦光场的腰斑直径大小对光学轨道角动量模式复用数目的影响，发现复用数目随着泵浦腰斑的增加而有效增加。该工作首次提出了将光学轨道角动量复用的概念应用于连续变量量子体系，实现了光学轨道角动量复用的连续变量量子纠缠，从而大幅度提高了系统的纠缠容量。该工作为连续变量量子通讯研究提供了一个崭新的平台和思路。

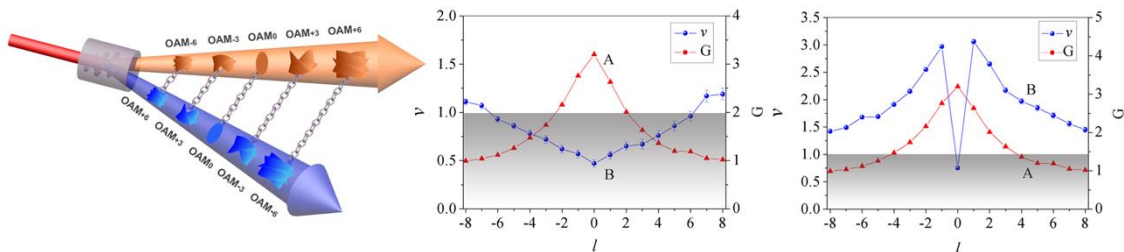


图1. 光学轨道角动量复用的连续变量纠缠系统实验图、13对量子纠缠判定以及光学轨道角动量守恒验证的相关实验结果。

## 相敏放大器中的干涉诱导量子压缩增强

近期，实验室荆杰泰教授团队在量子精密测量领域取得重要进展。荆杰泰教授团队在实验上利用干涉（Interference）效应，在连续变量量子体系中实现了两光束间以量子压缩(Quantum Squeezing)表征的量子关联的增强。该成果发表在国际物理学重要学术期刊 *Physical Review Letters* 123, 113602 (2019)。

量子压缩是一种非常重要的非经典效应，它与量子物理中的“不确定性原理”密切相关，因此对于量子物理的基础研究具有重要的科学价值。同时由于量子压缩光可以大幅降低系统的量子噪声，从而显著提高光学系统的信噪比和灵敏度，因此它又在量子精密测量当中具有重要的应用价值。例如，量子压缩可以用来提高激光干涉仪引力波天文台（LIGO）、原子磁力仪和光机磁力仪的灵敏度。此外，量子压缩还可以应用于激光束定位、旋转角测量以及时间传递等方面。量子压缩的程度直接决定了它对物理系统性能的提升程度。因此，增强量子压缩对于量子精密测量是至关重要的。

近年来，基于原子系综四波混频过程的非相敏放大器被证明是产生量子压缩的一种有效方法。由该系统产生的强度差压缩光束在量子成像、量子纠缠延迟以及非线性干涉仪等领域得到了重要的应用。与此系统不同，该团队另辟蹊径，在实验上实现了利用相敏放大器中的干涉效应提高量子压缩的方案。

在实验中，该团队分别测量了相同实验条件下非相敏放大器和相敏放大器产生的强度差压缩光束的量子关联。实验结果显示相敏放大器产生的关联光束的量子压缩度（突破10 dB）要显著优于非相敏放大器。研究发现这种量子压缩的增强来源于理论预测中的一个干涉项，因此该团队在实验上详细分析了这一干涉项中系统增益、注入光强度比例以及干涉相位点对量子压缩的调控作用。这些研究清晰的表明相敏放大器中的量子压缩增强来源于其内在的干涉本质。该工作是一种增强量子压缩的有效方法，因此预计在提高量子测量的精度方面具有潜在的应用价值。

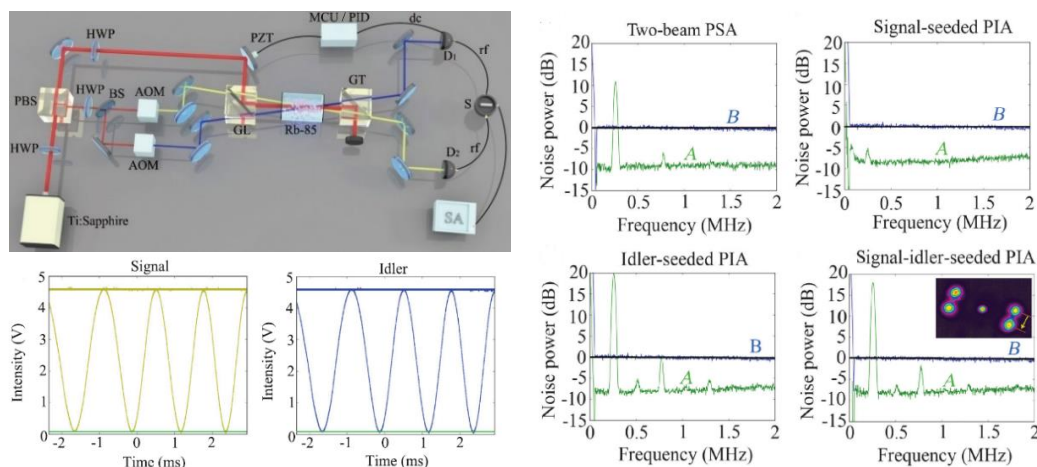


图1. 双光束相敏放大器系统、输出端的干涉条纹以及干涉诱导的量子压缩增强实验结果。

## 超冷里德堡原子气体中高维非线性光脉冲的传播及其操控

激光冷却技术的发明与成功应用使得里德堡原子的研究进入了一个崭新的发展时代。超冷里德堡原子具有的若干优点（特别是原子之间的长程相互作用在十一个数量级范围内主动可调），使得其在精密光谱与精密测量、量子计算与量子信息处理等的研究提供了强有力的平台，也为量子非线性光学的研究开辟了新的方向。由于其丰富的物理内涵及潜在的应用前景，实现稳定的高维非线性光脉冲（也称为时空光子弹）一直是人们长期追求的目标。一般而言，这样的非线性脉冲只有在具有非局域非线性响应的光学材料中才能实现。迄今为止所使用的材料的非局域非线性光学响应速度都很慢，所以一直未能得到稳定传播的单个时空光子弹。

近年来，实验室黄国翔教授研究小组对超冷里德堡原子气体中非线性与量子光学效应开展了系列的理论研究。他们基于电磁诱导透明（EIT）方案计算了三阶和五阶非线性光学极化率，证明了里德堡原子系综中的非局域非线性光学效应的响应时间比传统体系快得多，而且非局域的非线性光学极化率与局域的非线性光学极化率具有相近的响应速度。研究所揭示的这些有趣特性为进一步开展基于里德堡原子的非局域量子非线性光学打下了基础。

在上述工作的基础上，在博士生白正阳等人的共同努力下，他们对三能级里德堡原子系综中的高维光脉冲的非线性传播进行了深入的研究。用超出平均场处理的理论方法，从Maxwell-Bloch方程出发，在EIT条件下导出了探测场包络所满足的(3+1)维包络方程。该方程包含了色散、衍射、耗散、局域和非局域非线性等物理效应。通过求解该方程得到了强非局域、弱非局域、局域几种情况下的各种(3+1)维非线性光脉冲解。研究表明，利用 EIT 可大大抑制体系的光吸收，通过原子-原子相互作用可实现的光 Kerr效应的极大增强。不同于通常具有非局域非线性光学系统（如向列液晶，热非线性材料等），基于里德堡原子的快速克尔非线性响应可在较短的时空距离内形成稳定的传播单个(3+1)维时空光孤子与光涡旋（见图1）。这些高维光孤子与涡旋不仅具有很慢的传播速度，而且具有极低的产生功率。通过调节体系的参数，可对这些高维时空孤子进行主动控制，包括实现它们的高效的存储与读取等。所得研究结果有望应用于弱光水平下的光与量子信息处理与传输。相关研究结果发表于 *Optica* 6, 309-317 (2019)。

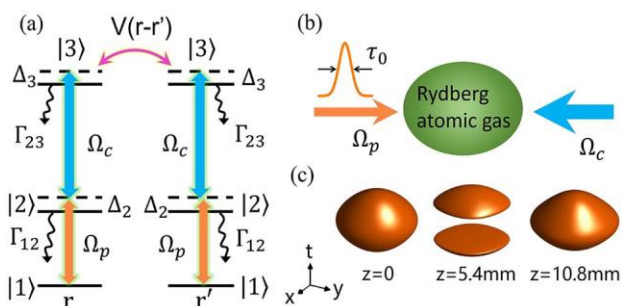


图1. (a) 光与三能级原子气体相互作用模型。能级 $|3\rangle$ 为里德堡态，探测光场的拉比频率为 $\Omega_p$ ，控制光场的拉比频率为 $\Omega_c$ 。(b) 系统的几何光路。(c) 高维时空光子弹的存储与读。

# 利用冷原子四波混频产生 $10^{-18}$ 频率不稳定性窄线宽激光的理论探索

超窄线宽稳频激光具有频谱分辨率高、频率稳定度高、频率噪声低的特点，它是原子光钟、高分辨光谱、引力波探测、低噪声微波源和光学频率合成器等研究的关键器件。窄线宽稳频激光的性能决定了光谱的分辨率、精密测量的精度与灵敏度以及频率合成的噪声水平，因此国际上许多研究小组正不断努力提高稳频激光的性能：利用室温下30-40 cm长的光学参考腔已获得频率不稳定性在 $1 \times 10^{-16}$ 的窄线宽激光（1秒平均时间），这些激光的性能受限于室温下的光学参考腔热噪声；为了降低参考腔的热噪声，德国的PTB和美国JILA实验室联合研制成21 cm长、温度稳定在124 K的单晶硅参考腔，并实现将1.5  $\mu\text{m}$ 激光锁定于该低温参考腔上，获得了频率不稳定性为 $4 \times 10^{-17}$ （1秒平均时间）的窄线宽稳频激光；美国JILA实验室还研制成6 cm长、温度在4 K的单晶硅光学参考腔，获得 $6.5 \times 10^{-17}$ （0.8-80秒平均时间）的窄线宽稳频激光。上述这些稳频的性能都受限于各自参考腔的热噪声，为了绕开光学参考腔的热噪声对稳频激光频率稳定度的影响，许多研究小组也提出了利用原子本身非常窄的跃迁谱线实现窄线宽稳频激光的方案，其中包括主动光钟

方案和冷原子窄线宽跃迁谱线鉴频的激光稳频方案等，目前利用主动光钟方案已在实验上获得 $6.5 \times 10^{-16}$ 的稳频激光。

上述方法要获得 $10^{-18}$ 频率不稳定性稳频激光，在技术上是一大挑战。自2010年以来，实验室的马龙生课题组、黄国翔课题组和同济大学的朱成杰教授就开始讨论获得频率不稳定性在 $10^{-18}$ 的途径。经过多年讨论、计算与分析，终于在2018年获得了理论计算结果：当线宽为1 Hz的三束入射激光（功率稳定度在 $10^{-4}$ ），作用于囚禁在光晶格中的Sr原子，通过四波混频可产生pW功率、线宽为4 mHz、频率不稳定性为 $2 \times 10^{-18}$ 的混频光。在该过程中，冷原子系统非常窄的跃迁谱线决定了四波混频的效率。因此即使入射光的线宽在Hz量级，冷原子系统的窄线宽能级也会自动滤出mHz量级的激光。如何减小冷原子的能级移动或者展宽是关键。根据计算，可通过选择合适的入射光的频率失谐量和功率，并控制入射光功率起伏，可望获得上述高频率稳定度的混频光。该项研究工作发表在Applied Physics Letters, 114, 051104 (2019)上，为下一步开展实验研究提供了理论依据。

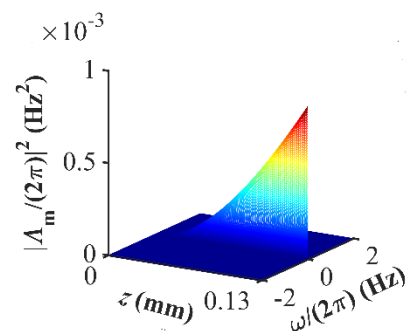
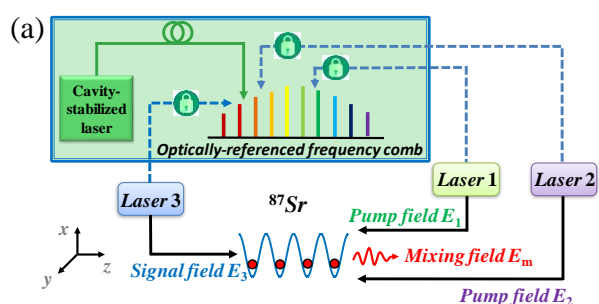


图1. (a) 利用冷原子四波混频获得稳频激光的实验装置示意图。入射的三束激光场通过锁定到一个Hz线宽的光学频率梳，获得位相相干与频率稳定度。在三束入射光的相干极化作用下，产生混频光；(b) 混频光功率谱随传播距离 $z$ 的变化。

# 利用玻色-爱因斯坦凝聚体中的孤子扩散 探测声学黑洞的霍金辐射

1916年，德国天文学家史瓦西通过计算得到了爱因斯坦引力场方程的一个严格解。此解表明，若将大量物质集中于空间某一小区域，则任何物体一旦进入该区域也将无法逃逸。这种奇妙的天体后来被美国物理学家惠勒命名为“黑洞”。由于黑洞的引力极强，似乎不可能存在任何辐射现象。然而，1974年英国物理学家霍金结合广义相对论和量子力学导出了一个非常重要的理论结果，即黑洞表面可能存在电磁辐射（后来被命名为霍金辐射）。但是要想在真实宇宙中检测到霍金辐射的可能性很小，原因是黑洞表面的温度通常远低于宇宙微波背景辐射的温度。因此，多年来科学家们试图在其它物理系统中模拟天体黑洞，并研究与此有关的霍金辐射。

近年来，实验室黄国翔课题组与美国纽约大学 G. Gregory 教授合作开展了模拟霍金辐射问题的研究。他们考虑激光冷却下的玻色原子气体，当温度很低时原子气体进入玻色-爱因斯坦凝聚状态。通过调节凝聚体横向囚禁势，并在凝聚体中产生一个背景流动，可使囚禁势能较高的区域（上游）的流动速度较慢（小于声速），而在囚禁势能较低的区域（下游）流动速度较快（大于声速）。由于下游凝聚体

具有捕获辐射声子的能力，可用来模拟声学黑洞。另外，在凝聚体的上游与下游之间形成了一个界面，可模拟黑洞的“事件视界”。当一对声子出现在凝聚体上游靠近视界的位置时，其中的一个声子将透过视界进入凝聚体的下游（即进入声学黑洞），而另一个声子则会远离视界（即远离声学黑洞），此现象即声学黑洞的霍金辐射。

为了检测声学黑洞的霍金辐射，他们假设体系的温度很低（几纳开尔文量级），并在凝聚体的上游远离视界处制备一个物质波暗孤子。受霍金辐射的影响，物质波孤子会产生扩散运动（即布朗运动），导致孤子振幅的明显减小、宽度变大，由此可间接测量体系的霍金辐射。由于孤子的质量远大于霍金辐射粒子（声子），对孤子的测量要比直接测量霍金辐射所产生的声子灵敏得多。该研究为利用超冷原子的玻色-爱因斯坦凝聚探测模拟黑洞及其霍金辐射提供了新的思路，也为研究非线性随机系统中非线性激发的布朗运动提供了新的理论方法。相关研究成果发表在 *Physics Letters B* 793, 390–395 (2019) 上，实验室杭超研究员为论文的第一作者。

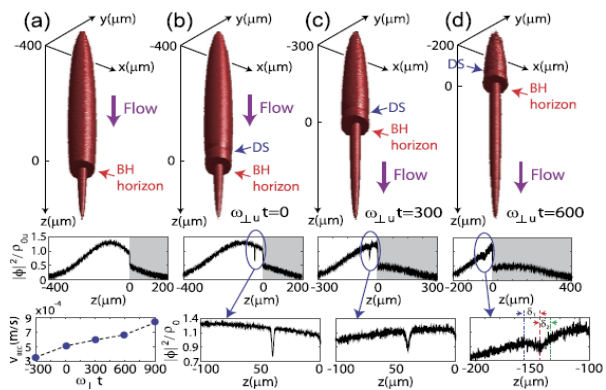


图1. 玻色-爱因斯坦凝聚体中的声学黑洞以及物质波孤子在声学黑洞霍金辐射影响下发生的扩散运动。



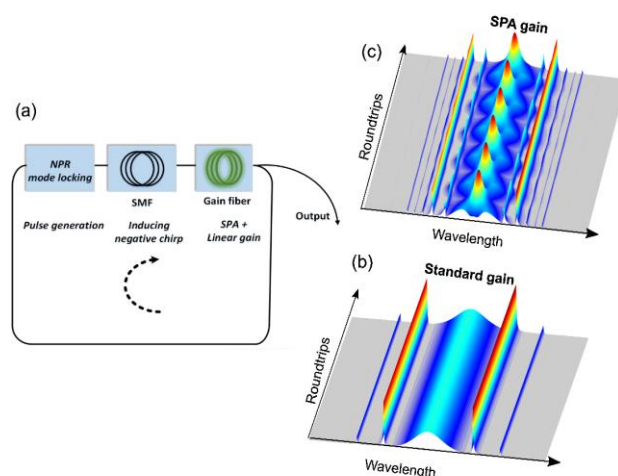
## 基于自参量放大的三态耗散孤子激光器

一般飞秒脉冲在光纤中传输以后由于自相位调制其光谱会展宽。自参量放大是一类反常的非线性现象，该现象是指带负啁啾的超短脉冲在正常色散光纤中传输后其光谱宽度会变窄。这一反常非线性现象对设计高光谱亮度的飞秒光纤激光器具有重要意义，然而这一现象和激光器的边界条件相违背。如何在激光器中激发这一非线性现象是一个难点。

实验室曾和平教授团队通过理论和实验首次发现通过同时管理激光器的啁啾和色散，激光器内的耗散孤子可以调节自身参数激发自参量放大现象。特别地，该飞秒激光器可周期性输出三种光谱完全不同的耗散孤子。第一种孤子光谱有两个峰源于自相位调制，但是该孤子在激光器内循环一圈后由于自参量放大，之前的两个峰会慢慢靠近变成一个峰（第二种孤子）。第二种孤子继续传输后光谱宽度不变但是强度会由于增益而变强（第三种孤子）。

第三种孤子由于强度变强在腔内继续循环后自相位调制会导致光谱分裂成两个峰即又会变成第一种孤子，激光器内的孤子就这样不断地切换下去。

该激光器有广泛的应用前景。过强的自相位调制对飞秒激光器来说是有害的，传统的减弱自相位调制的方法依赖于大模场直径的光纤，这带来了其它问题比如降低了激光器的集成度和脉冲质量，增加了成本等。我们的研究成果表明可以利用自参量放大来减弱自相位调制的影响。的确，实验清晰地展示了自相位调制引起的光谱分裂可以通过自参量放大整形为无分裂高质量的单峰光谱。此外，该激光器的动力学行为和Fermi–Pasta–Ulam悖论以及脉动孤子相似，有助于理解这两类复杂的非线性现象。该工作发表于Physical Review Applied 11, 044068 (2019)。



图a. 激光器光路；图b. 无自参量放大时激光器输出同一种孤子；图c. 当自参量放大增益（SPA: self-parametric amplification）被激发后，激光器输出三种孤子。

## 稀土离子间多光子激发能量转移的调控

在能量转移过程中，敏化剂离子吸收一个或多个光子，并被激发到更高的能级，然后将它的能量转移到受体离子，最后受体离子被泵浦到更高的激发态。能量转移过程作为稀土离子掺杂发光材料的一种有效发光方式，在很多领域有着广泛的应用，如彩色显示，生物标签，新型光源等。

$\text{Tm}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ 共掺材料作为一种常见的能量转移体系已经被广泛研究。由于 $\text{Yb}^{3+}$ 离子简单的能级结构和在近红外相对较大的吸收截面，在近红外连续激光的激发下，通常被用作敏化剂向 $\text{Tm}^{3+}$ 离子传递能量。两种不同离子间的能量转移效率通常通过改变掺杂浓度，材料结构，激发光源能量密度，激光脉冲重复频率，激光脉冲宽度等参数来实现。

实验室的张诗按研究员课题组利用基于基因遗传算法的自适应优化反馈控制系统，证明了 $50\text{SiO}_2-20\text{Al}_2\text{O}_3-30\text{CaF}_2-3\text{TmF}_3-1\text{YbF}_3(\text{mol.}\%)$ 的微晶玻璃在 $800\text{nm}$ ，重复频率 $1\text{kHz}$ ，脉宽 $50\text{fs}$ 的飞秒光的激发下，是由 $\text{Tm}^{3+}$ 离子传递到 $\text{Yb}^{3+}$ 离子的相反途径，并且首次提出利用相位整形的飞秒激光场控制从 $\text{Tm}^{3+}$ 离子到 $\text{Yb}^{3+}$ 离子的多光子能量转移过程。

在基于基因遗传算法自适应优化反馈控制系统中，空间光调制器的每个像素的电压值被编码，设置选定发光峰的强度增强或抑制为目标，遗传算法将自动搜寻合适的电压值，经过反复迭代搜寻后，算法达到收敛，实现了整形后的脉冲激发样品后达到目标效果，实验结果如图1所示。设置 $\text{Yb}^{3+}$ 离子特征发光峰 $975\text{nm}$ 处发光强度增强为目标，图1(a-1)是遗传算法适应度收敛图，最终发光强度约为极限脉冲下的1.6倍。图1(b-1)是发光增强光谱(蓝)与极限脉冲光谱(红)，由于 $\text{Yb}^{3+}$ 本征发光为单光子荧光过程，不受脉冲整形调制影响，所以其发光增强来源于整形后 $\text{Tm}^{3+}$ 离子布居数增加，增加了能量转移过程的几率。同样，设置该峰发光强度抑制为目标，图1(a-2)是遗传算法抑制适应度收敛图，显示整形脉冲下的 $975\text{nm}$ 发光峰强度约为极限脉冲下的30%，图1(b-2)是发光抑制光谱(蓝)与极限脉冲光谱(红)，可见其能量转移过程随着 $\text{Tm}^{3+}$ 布居数的抑制而被完全消除。

本工作拓展了控制稀土离子掺杂荧光材料能量转移过程的新方法，相关研究结果发表在*Photonics Research*, 2019, 7(4):486-492。

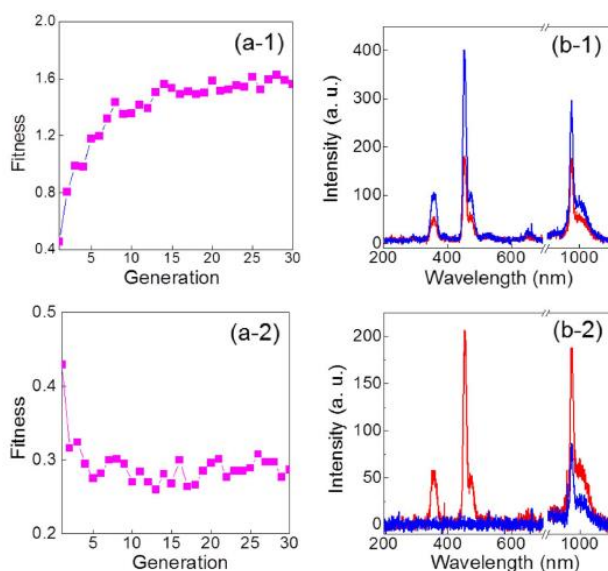


图1. (a-1)和(a-2)分别为 $975\text{ nm}$ 发光增强和抑制适应度收敛图，(b-1)和(b-2)分别为优化增强和抑制光谱(蓝色线)以及极限脉冲光谱(红色线)。

# 通过控制荷电状态阐释CdSe胶体量子点中两个拉莫尔进动频率的起源

半导体量子点中局域的电子自旋态有利于固态量子信息处理。室温下，胶体量子点系综具有相对较长的自旋相干寿命。相比于分子束外延量子点，胶体量子点制备价格更加廉价，形状、尺寸和结构更加容易控制。胶体量子点较大的比表面积对其光电性质有着巨大的影响，在过去的研究中也暗示着量子点表面状态会对其中电子自旋的性质有影响，但是目前还远没有系统的研究这一问题。CdSe胶体量子点的电子自旋相干动力学通常存在两个拉莫尔进动频率。该现象早在1999年就被发现，之前的研究认为两个不同的拉莫尔进动频率分别起源于电子自旋和激子自旋，但这两个进动频率的起源迄今仍没有定论。

最近实验室的固态体系自旋调控研究小组利用超短激光脉冲泵浦-探测技术测量其自旋动力学，结合化学处理方法，即通过添加空穴俘获剂或者电子俘获剂有机分子，或者添加无机壳层包裹量子点修饰量子点表面来控制CdSe胶体量子点的电荷分离，重新探讨这两个自旋频率的起源。利用该技术，研究了一系列不同尺寸的CdSe胶体量子点的自旋动力学并分析了其对应的自旋进动频率，实验结果表明胶体CdSe量子点普遍具有两个自旋进动频率，即对应两个自旋 $g$ 因子值。这些 $g$ 因子值是与量子点尺寸有关，但与实验温度和测量波长无关。对比研究包裹无机壳层的CdSe/ZnS和原装CdSe胶体量子点的自旋动力学，核壳结构CdSe/ZnS量子点中两个自旋频率的信号都非常弱，排除了两个自旋进动频率起源于激子自旋的可能。额外添加一束预泵浦脉冲光，更小的自旋进动频率显著增强，改变预泵浦光和泵浦光之间的延时时间，得到更小自旋进动频率对应

的光致荷电态寿命可以达到几百微秒。另外，添加不同种类的俘获剂将选择性地增强两个自旋频率其中之一的信号，这些现象表明，两个自旋频率都不可能来自于激子自旋，只能是带电量子点中的电子自旋。进一步分析表明，量子点中存在两类电子，一类电子只受量子点限域势的作用，其自旋频率值较小；而另一类电子除了量子点限域势，还额外的局域在量子点表面附近，导致其自旋频率值较大。

该项研究解决了存在已久的CdSe胶体量子点自旋相干动力学中两个自旋进动频率起源的问题。与中性量子点相比，光致荷电的量子点中的自旋相干时间大大延长。清楚的理解两个自旋进动频率的起源有助于控制和利用胶体量子点来实现量子信息处理。相关研究成果发表在 *Journal of Physical Chemistry Letters* 10, 3681-3687 (2019)。

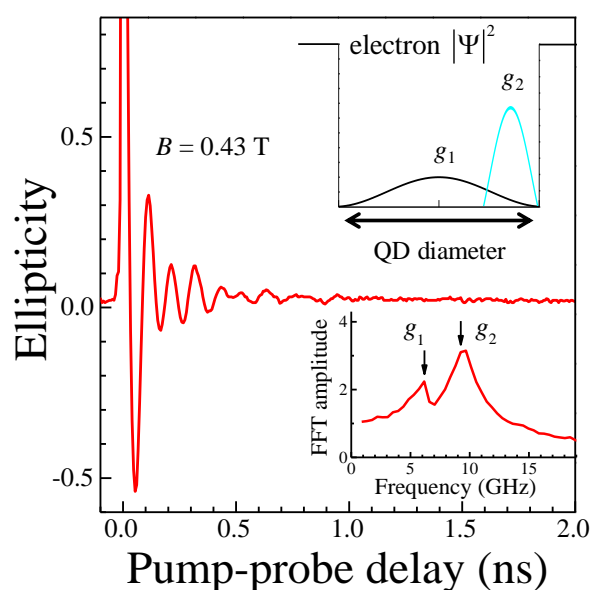


图1. 原装CdSe胶体量子点自旋信号。上插图：CdSe胶体量子点中电子波函数分别示意图。下插图：自旋信号对应的快速傅立叶变换谱。

# 通过电子自旋相干测量实验揭示CdSe 胶体量子点中超长寿命光致负电荷电态

胶体量子点中，由于较大的比表面积，表面不饱和键的存在所导致的电子-空穴空间分离是一种常见的现象。基于电荷分离，光致荷电或者光掺杂法可以用来获得带正电荷或者带负电荷的量子点。稳定的光致负电荷，也叫n型光掺杂，对于零阈值光增益，光催化和光伏电池的应用具有很重要的意义，且可以在很大程度上延长自旋寿命，有利于量子点在量子信息的储存和处理方面的应用。在过去的研究中，已经报道的胶体量子点中稳定的负光致荷电态通常都是在厌氧环境下实现的，一旦暴露到空气状态下，由于光氧化作用，导带中电子被移除，量子点的光致负电荷电态很快消失。以往鉴定光致负电荷电态都是通过吸收光漂白测量，但这种测量手段很难区分不同类型的导带电子。

实验室的固态体系自旋调控研究小组长期从事胶体量子点自旋动力学测控方面的研究。发展了基于电子自旋相干测量的新型瞬态探测技术，利用此技术，实验上通过操控电子自旋监测CdS胶体量子点中空穴表面俘获动力学[J. Phys. Chem. Lett. 5, 4310-4316 (2014)]，还在国际上首次发现CdS胶体量子点中光致负电荷电态到光致正电荷电态的演化[Nano Lett. 17, 2844-2851 (2017)]。另外，应用这一技术已经成功的发现中性量子点和荷电态的量子点的电子自旋信号有着很大的区别[J. Phys. Chem. Lett. 10, 3681-3687 (2019)]。

基于此前发展超短激光脉冲自旋相干探测技术研究CdSe胶体量子点中光致荷电现象。通过向CdSe胶体量子点溶液中添加1-辛硫醇有机分子，研究了量子点的光致荷电动力学的演化过程，以及泵浦-探测光探测位置、氧气环境和空穴俘获剂浓度对量子

点中光致负电荷电态的影响，首次在实验上观测到空气环境下稳定的光致负电荷电态，寿命可以长达几个小时。氮气环境下，添加1-辛硫醇有机分子，可以观察到寿命长达一个月之久的光致负电荷电态。1-辛硫醇不仅可以充当空穴俘获剂，还可以有效的减少由于氧气存在导致的光氧化作用，从而形成了空气下稳定的光致负电荷电态。通过电子自旋相干测量并分析自旋进动频率发现光致负电荷电态存在两种不同类型的导带电子，也意味着存在两种不同类型的光致负电荷电态。两种不同类型的光致负电荷电态所对应的自旋进动频率和寿命都不同。这些实验现象对胶体量子点中光物理过程的深入理解有着重要的作用。

该项研究中观测到的超长寿命的电荷分离态非常有利于低阈值激光器，光催化和自旋电子学的发展和應用。相关研究成果发表在Journal of Physical Chemistry Letters 10, 4994-4999 (2019)。

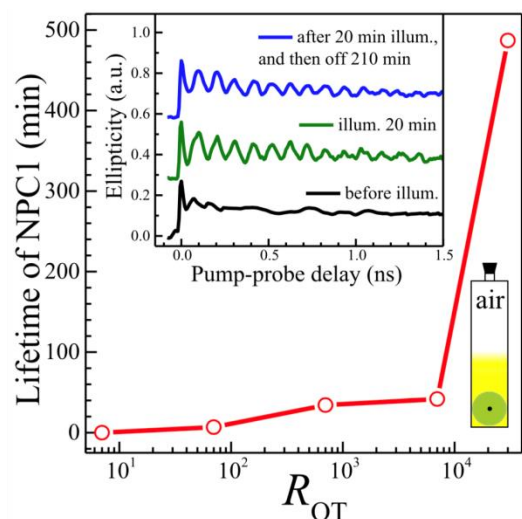


图1. 空气环境下，CdSe胶体量子点中第一种光致负电荷电态寿命随 $R_{OT}$  (1-辛硫醇分子和量子点之间的摩尔比值)变化关系图。右插图：量子点样品状态示意图。上插图： $R_{OT}=30000$ 时，不同光照条件下，量子点自旋信号。

## 用量子光的单分子衍射监测自发电荷密度涨落

量子探测理论所描述的光子计数，与辐射模式的湮灭有关。光子数量的任何可探测变化都需要至少两个光-物质相互作用过程。因此，经典光源对量子物质的衍射是光-物质相互作用中的二阶过程。现在存在低光子通量或短波长（可以检测光子数变化）的实验设置，则需要考虑光的量子性质。

多维衍射可以通过将分子置于脉冲序列中获得的光子符合计数来测量。潜在的物质信息是由控制自发电荷涨落的电荷密度的多点相关函数给出的。由于场和电荷密度的量子性质和经典响应理论，场和电荷密度的响应和自发涨落是混合的。然而，该过程是因果的，并且不适用。因此，包含几个微扰然后进行一次测量的多维光谱，从根本上不同于多

维衍射，它由一系列测量组成，因此可能不能简单地通过对经典信号的数据处理来恢复。多维衍射携带着与自发电荷涨落有关的新信息，经典光无法获取这些信息。

实验室康司坦丁·多尔夫曼教授研究小组从理论上研究了非经典X射线源的非共振衍射，并探索了衍射的相位相关量子修正，并包含单个光-物质相互作用过程。场强测量表明，探测器的局域量子涨落与探测模式耦合，在电荷密度上产生线性信号。相干（类似经典光）或单光子态提供更高的空间和光谱分辨率，而n光子数态则产生更低的分辨率。相关科研结果已发表在在 *Journal of Physical Chemistry Letters* 10, 768 (2019).

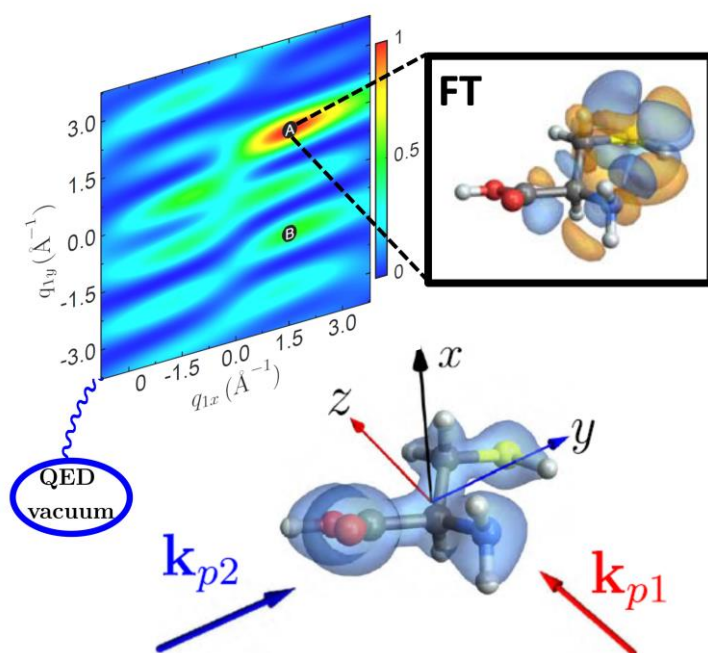


图1. 多维量子衍射原理图，利用傅里叶变换提取的相位依赖电荷密度

## 氟化镁分子磁光囚禁的理论研究

冷分子因其具振动、转动自由度，以及永久电偶极矩，在精密测量，多体物理，冷化学操控以及量子模拟与计算等领域具有广泛的应用前景。然而，分子复杂的内态能级结构，使得制备超冷分子困难重重。MgF分子具有较小的激发态g因子 ( $g_e = -0.0002$ ) 和较大的跃迁辐射速率 ( $\Gamma = 2\pi \times 22\text{MHz}$ )，其能否被有效的磁光囚禁并冷却是一个值得探讨的问题。印建平小组利用三维的速率方程，对MgF分子磁光阱中所涉及的十六能级泵浦跃迁进行了模拟。考虑了每个基态的塞曼能级分裂，亥姆霍兹线圈产生的空间梯度磁场，以及分子基态超精细能级间隔导致的双频效应。分别对三频率、四频率和更多频率分量模型进行了最佳激光偏振与失谐的优化。研究结果发现三频率分量模型的囚禁力大约是四频率分量的一半，而其阻尼力是四频率分量的1.5倍；虽

然存在着激发态g因子较小的问题，但是理论计算发现两种模型均可用来实现MgF分子的磁光阱。前者的最佳失谐是 $-\Gamma$ ，且捕获速度为 $\sim 23\text{ m/s}$ ，后者的失谐比较复杂，由两种失谐分量组成，分别是 $-0.5\Gamma$ 和 $-0.15\Gamma$ ，且最大捕获速度为 $\sim 26\text{ m/s}$ 。此外，如果加上一束额外偏振的激光，发现对四能级模型影响不大，而对于三能级模型，其捕获速度下降到 $\sim 17\text{ m/s}$ ，此时囚禁力和阻尼力能同时满足最大化，从而有效实现MgF分子磁光囚禁。MgF分子(3+1)能级模型下的囚禁力和阻尼力加速度曲线如图1所示。研究成果发表在Physical Review A 99, 033408 (2019)。MgF是目前国际上除了SrF、CaF和YO分子外又一理论论证可行的激光冷却并磁光囚禁的分子。

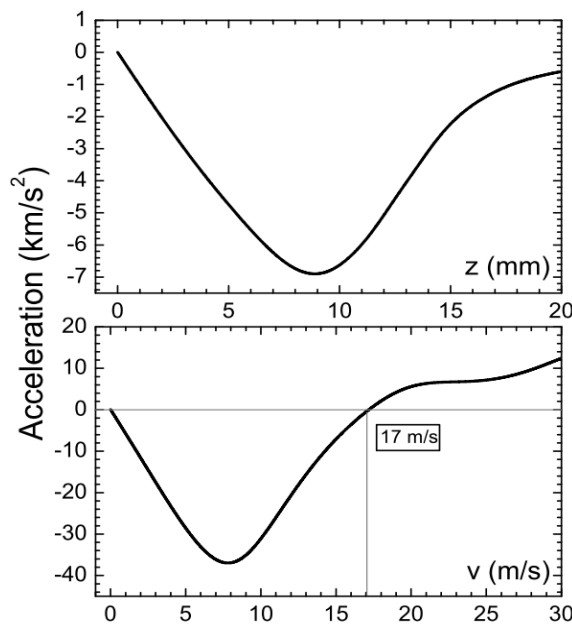


图1. MgF分子(3+1)能级模型下的囚禁力和阻尼力加速度曲线

## 双薄膜腔光力系统

腔光力学在精密测量、微纳光子学、量子信息和量子计算等领域具有广泛的应用前景，同时还提供了一条在宏观尺度上验证量子力学基本问题的崭新道路，成为深入探索微观事物本质以及联系宏观世界的理想研究平台，近年来引起了人们广泛的兴趣和关注。腔体光学作为一个新兴领域，到目前为止，绝大部分实验研究都聚焦于最基本的腔光力系统，也就是单一光场和单一机械振动模式耦合的光力系统。多模光力系统是指两个或两个以上光学或机械振动模式耦合的光力系统，相比单一光场和单一机械振子耦合的系统，可以研究更多新奇的物理现象，以及实现许多单模腔光力系统难以达到的条

件，如声子纠缠、能量传递、同步现象等。近期，我们在实验中实现了在法布里-珀罗腔内放置两个微纳薄膜的腔光力系统，同时在该系统中开展了两个机械振子与单一光场耦合的相关研究，验证了在该系统中，光学腔的共振频率以及薄膜的本征频率可以用压电陶瓷经行单独控制和调谐。该实验平台对系统参数具有很强的可控性，并且可以进一步推广到两个以上的光力阵列系统。这类可控的多模腔光力系统为研究具有多个机械振荡器的光力系统中的非线性和量子动力学现象提供了一个非常有前途的平台。相关研究结果发表在 *Physical Review A* 99, 023851 (2019)。

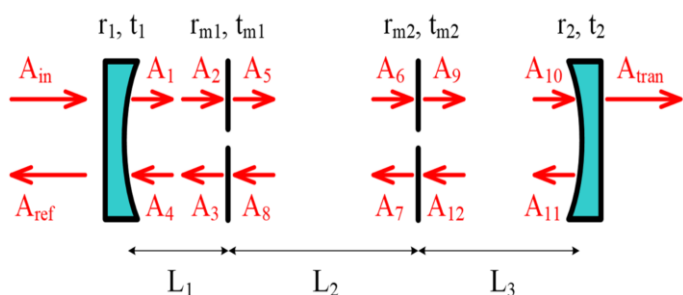


图1. 双薄膜腔光力系统示意图

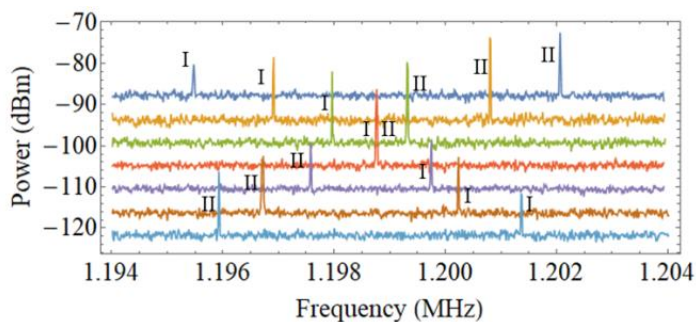


图2. 薄膜振子本征频率的操控

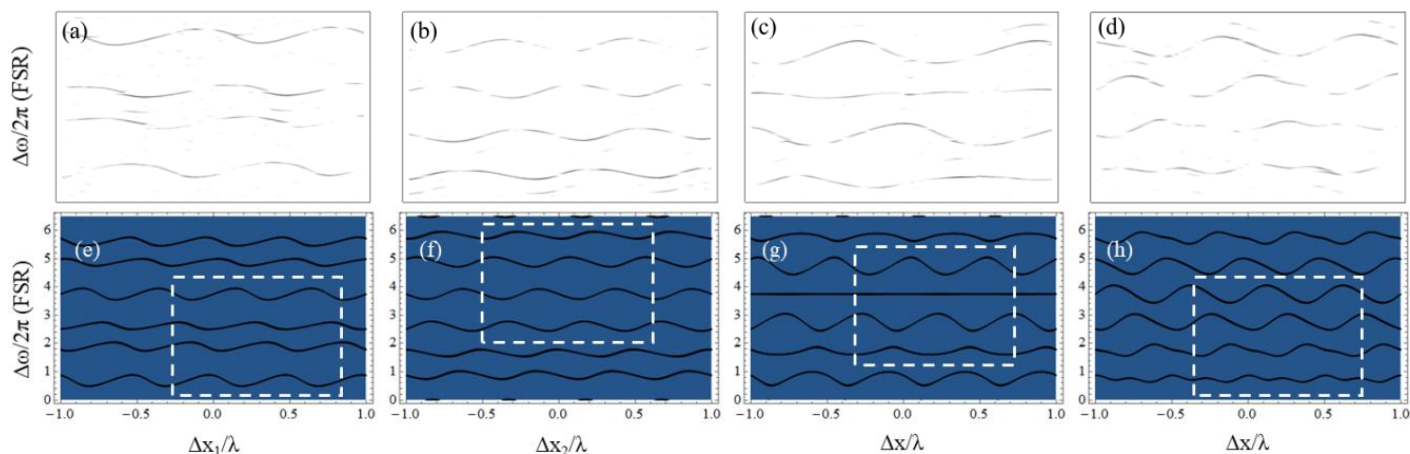


图3. 光学腔模随薄膜位置的变化。(a) 实验结果；(b) 理论模拟。

## 近期学术报告一览

**讲座题目: Growth and Assembly of Advanced Shaped Perovskite Nanocrystals for Photoelectronic Applications**

主讲人:	郑伟威 博士	单位:	雪城大学
时间:	2019.07.22 15:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: 钙钛矿材料光生载流子动力学**

主讲人:	龙闰 教授	单位:	北京师范大学
时间:	2019.07.01 10:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: Spatio-temporal probe and control of optical properties of low-dimensional materials**

主讲人:	江涛 博士	单位:	University of Colorado Boulder
时间:	2019.06.25 10:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: From Optical Near-Field Control to Nanoscale Quantum Control**

主讲人:	Prof. Walter Pfeiffer	单位:	Bielefeld University
时间:	2019.06.13 10:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: Precision measurements beyond standard quantum limit in atomic vapor**

主讲人:	肖艳红 教授	单位:	复旦大学
时间:	2019.06.12 10:30	地点:	理科大楼A207室

**讲座题目: 全局神经网络势函数方法和合成气转化催化应用**

主讲人:	刘智攀 教授	单位:	复旦大学
时间:	2019.05.28 10:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: 基于双光子态的量子傅立叶变换的实验研究**

主讲人:	金锐博 教授	单位:	武汉工程大学
时间:	2019.05.28 08:30	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: OF BOSE CONDENSATES, SQUEEZED LIGHT and BLACK HOLES**

主讲人:	Prof. Marlan Scully	单位:	Texas A&M and Princeton Universities
时间:	2019.05.23 10:00	地点:	理科大楼A814室

**讲座题目: Quantum Optics with X-rays: Dynamical Control of Resonant Interaction**

主讲人:	Prof. Olga Kocharovskaya	单位:	Texas A&M University
时间:	2019.05.20 10:00	地点:	理科大楼A508室

**讲座题目: 超高功率飞秒激光技术与研究现状现状**

主讲人:	Prof. Olga Kocharovskaya	单位:	中科上海光机所
时间:	2019.05.16 15:30	地点:	理科大楼A804室





## 实验室11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
11927810	马龙生	高精度光学频率合成器	国家重大科研仪器研制项目
11975098	黄国翔	基于超冷里德堡原子的非局域量子非线性光学效应研究	面上项目
11974115	盛继腾	腔光力学中多机械振子非线性动力学研究	面上项目
11974112	黄延伟	基于高压技术调控全无机钙钛矿材料光谱性能和电输运性能研究	面上项目
11974113	魏启	强激光场中Kramers-Henneberger原子和分子的反应动力学研究	面上项目
11974114	宫晓春	原子分子及团簇内电子阿秒超快动力学研究	面上项目
11974117	杭超	原子非厄米周期介质与电磁感应光栅中的非线性光学效应研究	面上项目
21973030	莫燕	植物光系统捕光超分子复合物中激发能传递动力学的研究	面上项目
11904103	倪宏程	亚周期非偶极隧穿电离超快动力学研究	青年科学基金项目
11904104	白正阳	基于里德堡原子的非线性量子光学及量子通讯研究	青年科学基金项目
11904105	顾澄琳	新型光调制双光梳光谱技术	青年科学基金项目

## 2019年度精密光谱科学与技术国家重点实验室 4项开放课题立项

根据《精密光谱科学与技术国家重点实验室开放课题管理条例》，实验室在2019年5月-8月分别在网站和邮件中发布《精密光谱科学与技术国家重点实验室2019年开放课题基金申请指南》。根据学术委员会专家评审意见，精密光谱科学与技术国家重点实验室决定对以下4项课题进行资助，执行期限自2019年9月至2020年12月。获得资助的课题如下：

课题编号	负责人	单位	课题名称
SKLPS-KF201901	丁蓓	上海交通大学	蛋白质超快电子转移反应中的振动弛豫研究
SKLPS-KF201902	张利剑	南京大学	基于非线性干涉仪的动态信号精密测量
SKLPS-KF201903	Pilkyung Moon	上海纽约大学	二维准晶体的物理学
SKLPS-KF201904	周朴	国防科技大学	高能量飞秒脉冲光纤激光合成装置的研究

## 实验室搬迁整体概况

闵行校区实验室大楼正式名称为“光学大楼”，经过近三个月全体实验室师生的共同努力，搬迁各项工作按计划顺利完成：1) 办公室家具、布线、窗帘全部安装到位，同时对办公室进行了保洁、绿化、空气检测；2) 会议室、教室及报告厅准备完毕，可投入使用；3) 理论课题组师生顺利搬迁，第一批实验课题组顺利完成搬迁；4) 全部新生顺利进驻闵行校区。

截至目前为止，实验室孙真荣、张诗按、贾天卿、冯东海、程亚、徐建华、陈缙泉、张三军、吴光、武愕、Tim、董光炯、杭超、王加祥、康斯坦丁、袁清红、刘金明、梅晔课题组全部搬迁至闵行校区，191名学生（总人数329，占比58%）开始在新校区学习生活，实验室实现半数搬迁，新校区各项工作开始进入正常运转，仪器设备逐步恢复运作，搬迁工作取得阶段性胜利。



## 光学大楼各项工作正常运行

新学期实验室在两校区运行，目前，新大楼日常行政工作已开始正常运转，办公室老师协调解决日常办公及材料盖章等事宜。会议室、教室及报告厅等正式投入使用。电子实验室、化学实验室开始运行，已搬迁课题组仪器设备逐步恢复实验，各项工作顺利进行。



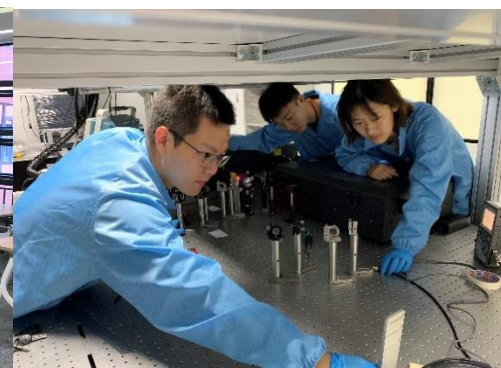
行政办公室



报告厅



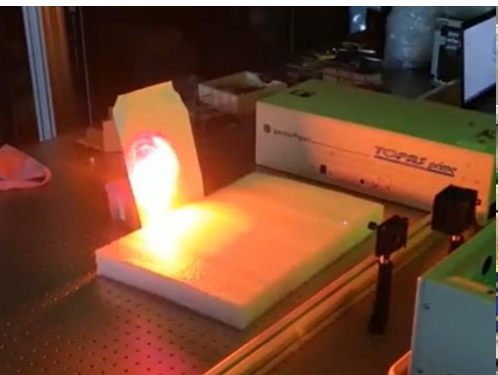
会议室



实验系统重建



电子实验室投入使用



激光器出光恢复使用



化学实验室投入使用

## 实验室2019年全国优秀大学生夏令营成功举办

7月15日至17日，精密光谱科学与技术国家重点实验室2019年全国优秀大学生夏令营在中山北路校区顺利举行。来自全国部分高校的48名优秀大学生共同参加学习。

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，实验室在三天的时间里组织了学术报告、经验交流、实验室参观等一系列活动，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，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，营员们纷纷表示此行收获满满，并表达了努力学习、明年相见的美好愿望。



图1 营员合影留念



图2 优秀营员颁奖

## 实验室2019迎接新生活活动

2019年9月1日，精密光谱科学与技术国家重点实验室共迎来95名2019级全日制硕士和博士研究生新生报到注册。9月3日下午，精密光谱科学与技术国家重点实验室的开学典礼如约而至，实验室主任兼党总支书记吴健、副主任武海斌、副主任郑利娟、辅导员杨欣怡、教师代表贾天卿、老生代表张文斌共同参加了开学典礼，开学典礼由实验室党总支副书记马玲主持。实验室领导首先对本届新生的到来表示热烈欢迎，同时也对新生们提出了三点希望，希望他们诚实守信、珍惜时间、用坚韧不拔的意志坚持科研、不断探索，鼓舞大家在新的起点奉献青春，收获美好未来。

新生教育周期间，实验室安排了全体新生参观实验室平台、新生素质拓展、导师见面会、新生班会等活动，组织新生参与全校开学典礼、校史讲座、图书馆资源利用讲座、实验室安全教育讲座、心理健康教育讲座等活动，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。



图1 迎新报到现场



图2 新生破冰活动



图3 实验室新生开学典礼



图4 校史讲座



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

上海市中山北路3663号理科大楼A803(200062)

电话: 021-62232453 传真: 021-62232056

邮箱: [lps@phy.ecnu.edu.cn](mailto:lps@phy.ecnu.edu.cn)

Science Building A803,

3663 Zhongshan Road (N.), Shanghai, 200062, China

Tel: 021-62232453 Fax: 021-62232056

Email: [lps@phy.ecnu.edu.cn](mailto:lps@phy.ecnu.edu.cn)



官方微信公众号



实验室招生群