

专题: 超冷原子分子物理

基于腔冷原子系统的量子光力调控进展*

李柏军¹⁾ 卢天祥²⁾ 王婕³⁾ 景辉^{3)4)†}

1) (湖州师范学院, 量子物理研究中心, 湖州 313000)

2) (赣南师范大学物理与电子信息学院, 赣州 341000)

3) (国防科技大学理学院, 长沙 410073)

4) (湖南师范大学物理系, 低维量子结构与量子控制教育部重点实验室, 量子效应与应用协同创新中心, 长沙 410081)

(2026年2月28日收到; 2026年4月13日收到修改稿)

腔光力学是量子科技领域的重要前沿方向, 其核心是研究电磁场与机械运动之间的相互作用, 并在此基础上实现精准调控与应用拓展. 该领域以量子力学为理论基础, 通过对光学微腔与机械振子的结构设计与参数调控, 实现光场与机械振动模式之间的高效耦合与精确操控, 进而产生并利用各类新奇量子效应. 近年来, 腔光力学已迅速发展成为融合量子光学、凝聚态物理与量子精密测量的交叉前沿学科, 在基础物理研究与量子信息科学等领域展现出重要应用价值. 腔冷原子系统凭借优异的环境隔离特性、长量子相干特性以及强光-物质相互作用, 成为实现强光力耦合、开展量子光力学研究的理想平台之一. 本文系统综述了基于腔冷原子系统的量子光力调控研究最新进展, 重点阐述腔光力学基本原理、腔冷原子体系中光力非线性的实验实现, 以及该系统在量子传感、量子存储与非经典量子态制备等方向的典型应用, 并对该领域未来发展与挑战进行了展望.

关键词: 腔光力学, 腔冷原子系统, 量子效应

DOI: 10.7498/aps.75.20260289

CSTR: 32037.14.aps.75.20260289

1 引言

17世纪, 开普勒的彗星运行观测佐证了光子的动量特性, 但受限于光辐射压力强度微弱, 光压引发的显著物理效应在早期未能被有效观测与探究. 20世纪60年代激光技术的诞生^[1], 以及后续微纳加工技术的不断进步^[2], 推动了高品质光学微腔的发展, 可将光子局域在微小空间内循环反射, 显著增强光辐射压力效应, 促使腔光力学快速发展, 并成为量子光学与精密测量领域极具潜力的研究方向. 腔光力学已在两大核心研究方向展现出重要应用: 1) 利用辐射压力实现光学与力学自由度

的高效耦合与调控, 有望在量子尺度实现机械运动调控与非经典态制备; 2) 实现微弱力、位移、质量、加速度等物理量的超高灵敏度探测, 为量子精密测量提供优异平台. 过去二十年间, 腔光力学取得了重要进展: 力学振子基态冷却的实现^[3-6]标志着腔光力学进入量子领域, 这一成果不仅是量子力学基础研究的重要里程碑, 更为各类量子技术的落地奠定了基础; 光力诱导透明效应的观测^[7,8]为快慢光调控及光存储技术的发展提供了重要支撑; 单光子态^[9]、压缩态^[10-12]、纠缠态^[13-16]、叠加态^[17,18]等非经典态的理论预言与实验验证, 进一步加强了腔光力学在量子信息技术领域的应用基础. 在超高灵敏度传感领域, 2017年诺贝尔物理学奖表彰的引力

* 量子科学与技术-国家科技重大专项 (批准号: 2024ZD0301000)、国家重点研发计划 (批准号: 2024YFE0102400)、国家自然科学基金 (批准号: 12421005, 12205054, 12565001, 12347136) 和湖南省科技重大专项 (批准号: 2023ZJ1010) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jinghui73@foxmail.com

波探测实验, 便部分依托腔光学原理. 此外, 该系统在弱力传感^[19]、位移传感^[20]、质量传感^[21]、加速度传感^[22]、磁力计^[23] 等方向均取得了重要进展, 展现出广阔的应用前景. 得益于力学振子可与微波、原子等多种物理体系实现高效耦合, 腔光学系统还可作为量子信息接口, 如可实现光学与微波波段的量子态转换^[24]. 凭借其在基础物理学、精密计量学及量子信息领域的巨大应用潜力, 腔光学已被 *Nature* 列为光学发展史上的 23 个里程碑之一. 迄今为止, 腔光力学的核心相互作用在两种不同方式的实验系统中得到验证, 一种是“自上而下”方式, 包括法布里-珀罗 (Fabry-Pérot, FP) 腔系统^[25]、回音壁模式微盘腔系统^[26] 和微球腔系统^[27]、光子晶体系统^[28-30]、悬浮系统^[5,6,31-33]、光波导系统^[34]; 第二种是“自下而上”方式, 如腔冷原子系统^[35-40] 等. 不同类型的光力系统可适配于不同的应用场景, 系统参数区间亦存在差异. 其中, 基于腔冷原子的光力系统具备独特优势, 其光力耦合强度可灵活调控, 能够接近甚至达到强耦合区域, 且力学振子免疫热噪声, 为深入探究量子光力学及开发新型量子器件提供了理想平台.

腔冷原子领域是量子光学、腔量子电动力学与原子分子物理交叉融合的前沿研究方向之一, 其核心是冷原子系综与光学微腔的耦合, 这一研究体系极大拓展了人类对光-物质相互作用本质的理解. 通过将冷原子系综囚禁于高品质因子光学微腔中, 结合微腔对光场的强约束特性与激光冷却、原子操控的技术优势, 实现了原子系综与腔场的高效耦合及原子气体的精密调控. 凭借腔冷原子系统独特的物理特性, 成为研究量子相干、量子模拟及量子多体物理的理想实验平台. 腔原子耦合系统的物理基础源于腔量子电动力学. 早期腔量子电动力学致力于研究存在边界时的原子辐射特性^[41], 而腔冷原子始于对腔增强相互作用的探索. 实验发现, 通过高品质光学微腔中俘获冷原子, 可显著增强光-物质耦合强度^[42]. 通过调控光学腔参数、原子密度及激光场配置等参数, 可灵活实现原子-光场的弱耦合、强耦合到超强耦合. 在多数实验场景中, 原子系综与腔场的有效耦合强度与原子数的平方根成正比^[43-46]. 利用这类系统腔增强原子-光子纠缠已经实现^[47]. 对于激光驱动的腔原子系综而言, 单个原子所感受到的腔场局部强度依赖于其他原子的空间分布^[48], 这可以产生有效的长程或全局原

子间相互作用^[49]. 最近在铯原子系综与高精度光学腔中观察到由光学腔介导的远距离交换相互作用, 并导致了单轴扭曲动力学^[50]. 在横向驱动的腔-原子系综系统中, 这种长程相互作用可诱发自组织相变, 使原子以棋盘格状有序排列, 可最大化地将散射光耦合至腔模^[51,52]. 激光冷却与原子俘获技术的突破^[53-55] 为腔冷原子领域的快速发展提供了关键支撑, 借助这类技术可制备处于高度可控状态的超冷原子系综乃至玻色-爱因斯坦凝聚体 (Bose-Einstein condensate, BEC)^[56-58]. 玻色-爱因斯坦凝聚体与光学微腔的结合, 进一步丰富了腔冷原子系统的物理内涵与研究维度. 超冷原子自身具有长相干时间、高原子密度及与腔强相互作用等特性, 为探索量子相变等新型量子态提供了有利条件. 例如, 将激光驱动的 BEC 与腔真空场耦合, 可实现超流体相与自组织相之间的量子相变^[59,60]; 该系统还可用于模拟具有可调长程相互作用的量子多体模型, 如 Dicke 模型及其量子相变^[61-64]. 值得关注的是, 在激光驱动腔 BEC 模型中, 可实现腔场与 BEC 集体运动模式的强耦合, 为腔光学领域的拓展研究搭建了重要桥梁. 腔 BEC 系统中原子集体运动模式可等效为机械振子, 其与腔场的耦合为光力相互作用的本质探究及新型调控方式提供了全新视角. 目前基于腔 BEC 系统的腔光学已在多个实验平台中验证^[35-40]. 相较于传统固体光力系统, 基于超冷原子的腔光力系统凭借原子体系的独特量子特性, 展现出不可替代的优势: 其一, 作为机械模式的 BEC 集体密度激发或超冷原子集体质心运动, 原子系综处于量子基态或极低温状态, 有效抑制热噪声干扰, 为量子光力效应奠定了基础. 其二, 光子与机械振子之间的耦合强度可通过灵活调控系统参数实现宽范围调谐, 可达到强耦合区间, 甚至超强耦合, 使得单光子引起的力学位移能够从量子零点涨落中区分, 为单光子层面的光力调控提供了可能. 得益于其优势, 大量重要的效应在该系统中被理论预言或实验实现, 如宏观或微观非经典态的制备^[65-67]、机械模式基态冷却^[38]、高灵敏度旋转传感^[68]、量子态高效转移^[69]、量子存储^[70] 及多稳态振荡^[71]. 该系统可为腔光学与冷原子物理的交叉融合和各类前沿应用研究的开展提供良好的基础. 本文将综述基于腔冷原子系统的量子光力调控研究的最新进展.

2 腔光力系统基本原理与基于腔超冷原子系统实验实现

2.1 腔光力系统基本原理

腔光力系统的核心物理本质是利用光辐射压力实现光学自由度与力学自由度的耦合与调控, 其最典型的体系为 FP 腔光力系统, 其典型结构如图 1 所示. 该系统主要由一对平行放置的高反射镜组成标准的 FP 光学微腔, 其中两镜面的间距即为腔长. 在该系统中左侧镜固定, 确保腔结构的稳定性; 右侧镜子是可移动的, 可沿腔轴方向做往复振动, 同时具有高的反射率, 能够对腔内光场实现近全反射, 最大限度减少光场能量损耗, 增强光与力学振子的相互作用. 当一束激光作为驱动光输入该系统时, 激光将通过固定镜进入光学腔, 在两平行镜面间发生多次循环反射, 形成稳定的驻波腔模. 当腔内光子撞击可动镜面时, 会与镜面发生动量交换. 在辐射压力的驱动下, 右边镜将沿腔轴方向做简谐振动. 可动镜的移动会导致腔长发生变化, 进而导致腔模共振频率发生偏移. 因此, 在辐射压力作用下, 光学模式频率与力学振子位置形成依赖关系, 最终实现光场自由度与力学自由度之间的有效耦合.

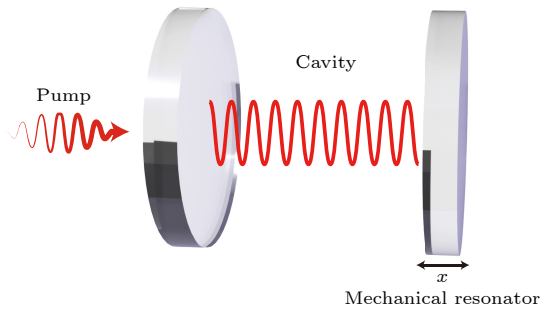


图 1 典型的腔光力系统示意图 (法布里-珀罗腔光力系统)
Fig. 1. A typical schematic diagram of cavity optomechanical system (Fabry-Pérot (FP) optomechanical system).

当右侧可动腔镜处于静止状态时, 设此时腔的有效长度为 L , 要使入射激光在腔内形成稳定驻波并实现共振, 需严格满足驻波共振条件, 即腔的有效长度等于激光半波长的整数倍. 通过频率和波长的关系, 可得出谐振腔模式的共振频率为 $\omega_c = n\pi c/L$, 其中 n 为整数, c 是真空中光速. 在光辐射压力的作用下, 右侧可动腔镜将发生移动, 进而改变腔的有效长度, 即腔长由初始的 L 变为 $L + x$

(其中 x 为可动腔镜沿腔轴方向的位移), 腔长的这一微小移动将导致腔模共振频率发生偏移, 将腔长变化代入上述频率公式, 可得到变化后腔的共振频率为

$$\omega_c(x) = \frac{n\pi c}{L+x} = \omega_c \frac{1}{1+x/L}. \quad (1)$$

由于光的辐射压力很小, 右边镜的移动很小, x 远小于原始腔长 L , 相对于原始腔长 L 可以视为一个小量, 即 $x \ll L$. 对振子位移进行泰勒级数展开, 忽略高阶小项并将结果保留到一阶项, 腔频率进一步简化为^[72]

$$\omega_c(x) \approx \omega_c (1 - x/L). \quad (2)$$

可以发现, 腔模共振频率与可动腔镜的位移呈依赖关系, 这种力学位移调制腔场共振频率偏移, 正是力学自由度调控光学自由度的体现. 因此整个系统的哈密顿量可以表示为

$$\begin{aligned} H &= \hbar\omega_c(x)a^\dagger a + \hbar\omega_m b^\dagger b \\ &= \hbar\omega_c a^\dagger a + \hbar\omega_m b^\dagger b - \hbar\frac{\omega_c}{L} a^\dagger a x, \end{aligned} \quad (3)$$

这里 a (a^\dagger) 和 b (b^\dagger) 是光学微腔和力学振子的产生 (湮灭) 算符. 力学振子的位移可表示为 $x = x_{zpf}(b^\dagger + b)$, 其中 x_{zpf} 是力学振荡器的零点涨落. 基于上述定义, 光力相互作用的典型形式可写为 $\hbar g a^\dagger a (b^\dagger + b)$, 其中 g 是单光子耦合强度, 其典型取值范围为 10^{-3} — 10^6 Hz^[72]. 上述谐振腔模频率对振子位移依赖型的光力相互作用通常称为色散光力相互作用. 在腔光力系统中, 除色散型光力相互作用外, 耗散型光力耦合也是一种重要且常见的非线性耦合形式, 其核心原理是通过力学振子位移影响光学模式的损耗, 进而实现光场与力学自由度的耦合^[73-75]. 在传统的腔光力系统中, 耗散光力相互作用已被用于机械振子冷却与量子态制备与调控等研究^[76,77]. 通常情况下耗散光力耦合强度远小于色散光力耦合强度.

需要指出的是, 对于传统光力系统而言, 实现单光子强耦合仍面临较大挑战, 而腔冷原子光力系统凭借其独特的调控优势, 可为单光子强耦合的实现提供理想平台. 此外, 光力相互作用本质上属于典型的非线性相互作用, 这使得系统的动力学行为分析较为复杂, 线性化近似是目前处理该类问题的常用方案之一: 将光场与力学振子的相关算符分解为稳态平均值与一个平均值为零的微小涨落项

之和, 并且忽略涨落项的高阶交叉项, 可大幅简化系统动力学方程的求解过程, 从而实现了对系统基本物理特性的有效分析^[7].

2.2 光力模型在腔超冷原子系统中的实验实现

本节重点探讨利用量子气体的集体运动与单模光学微腔之间的色散耦合实现光力型相互作用 $\hbar g a^\dagger a (b^\dagger + b)$ 的实验方案与进展. 其中腔场主要感知原子系综的单一集体运动, 原子系综的集体运动扮演力学振子的角色. 迄今为止, 已通过两种不同的实验方案利用腔超冷原子体系实现了光力非线性. 其一, 以超冷原子系综的集体质心运动作为力学振子, 与腔场构建强耦合作用; 其二, 以 BEC 中的集体密度激发作为力学振子, 实现与腔场的强耦合.

超冷原子系综的质心运动作为力学振子. 2007 年, Gupta 等^[78] 利用 FP 腔耦合超冷铷 (^{87}Rb) 原子气体, 实现了线性光力耦合, 实验中成功观测到系统产生的折射非线性效应及双稳特性. 该实验中, 腔内光场施加的驱动使被囚禁原子发生位移, 进而调制原子系综与腔模之间的位置依赖型耦合强度, 形成调控. 2008 年, Murch 等^[36] 在高精度 FP 腔中, 制备了由 10^5 个 ^{87}Rb 原子构成的超低温原子气体 (图 2(a)), 验证了宏观超冷原子系综的集体运动可作为量子光力学的力学谐振子, 其中腔体所感知的集体位移等效于原子系综的质心运动, 证实了线性光力耦合的存在. 该系统中, 原子系综的单个集体运动自由度仅与腔场的单一模式耦合, 且定义了原子系综集体运动的坐标算符与动量算符. 得益于超冷原子被冷却至量子基态的优势, 该力学振子有效克服了热噪声的干扰, 实现了量子测量反作用效应的观测. 上述实验中, 原子并未被囚禁于单一势阱内, 而是被束缚在由多个势阱构成的一维光学晶格中, 且原子在光学晶格内占据了约 300 个相邻晶格位置. 2011 年, Schleier-Smith 等^[38] 在一个 FP 腔耦合原子系综模型中探究了原子系综的单个集体运动模式的边带冷却, 热传导最小值和观测到的冷却速率与光力学模型吻合较好. 除单振子腔光力系统外, 腔超冷原子体系还可拓展至多力学振子腔光力系统. 2015 年, Spethmann 等^[39] 在 FP 腔内囚禁两个 ^{87}Rb 冷原子系综 (图 2(b)), 成功构建了双力学振子腔光力系统. 该实验中, 他们将

约 900 个原子分别囚禁于两个相邻的超晶格势阱中, 利用深超晶格势垒有效抑制了两个原子系综之间的原子交换过程. 两个原子云的质心运动可分别作为独立的力学振子, 与泵浦光场形成线性耦合, 从而构成由两个力学振荡器组成的腔光力系统. 基于该系统, 研究人员实现了驱动光学腔内两个可寻址、空间分离的近基态力学振荡器之间的相干相互作用, 为多振子量子光力学调控提供了重要的实验基础.

除上述线性光力耦合外, 超冷原子体系亦可实现非线性光力耦合, 如二次光力耦合^[79-81]. 2010 年, Purdy 等^[40] 实现了一种可调谐腔光力系统 (图 2(c)), 该系统通过集成微制造原子芯片与 FP 腔组成. 实验中, 利用原子芯片产生的磁场与光学势阱相结合, 实现了冷原子的纳米级精度定位. 其中原子系综未局限于单个晶格点, 但多数原子仅占据不超过两个相邻晶格位置. 通过将原子气体定位在沿腔轴可变位置的亚微米区域, 并精确调控其沿腔轴的质心位置, 该系统可同时实现线性与二次光力耦合. 研究人员系统研究了可调谐耦合对光力双稳性及光力频移的影响规律, 并完成了二次耦合下光力学效应的定量表征, 为非线性量子光力学的研究提供了重要的实验支撑.

BEC 中的集体密度激发作为力学振子. 对于腔 BEC 系统, 已探索了实现线性光力的实验方案. 2008 年, Brennecke 等^[35] 在腔 BEC 系统中 (图 2(d)) 首次实现了线性腔光力系统. 该方案以 BEC 的集体密度激发作为力学振子, 利用 BEC 的量子特性有效抑制了振子的热激发. 实验中, 腔场耦合到 BEC 的一个集体密度激发模式, 且该密度激发模式与腔模的空间分布相匹配, 从而获得了较大的光力耦合. 实验采用由典型 1.2×10^5 个 ^{87}Rb 原子构成的 BEC, 与超高精细度光学 FP 腔进行耦合; 一束弱驱动场沿腔轴入射系统, 用于驱动腔场与 BEC 之间的耦合动力学过程. 在大失谐下, 原子的自发辐射被有效抑制. 在动量空间中, 初始状态下 BEC 主要宏观占据零动量态, 通过腔光子的吸收与受激辐射过程, 原子被散射到沿腔轴对称分布的动量态 $\pm 2\hbar k$. 宏观占据的零动量分量与反冲动量分量之间发生物质波干涉, 导致凝聚体密度呈现周期性空间调制, 其调制频率为 4 倍反冲频率^[82]. 当忽略更高阶动量模的散射效应时, 凝聚态场算符可近似为零动量模及其前两个侧模的线性组合, 此时

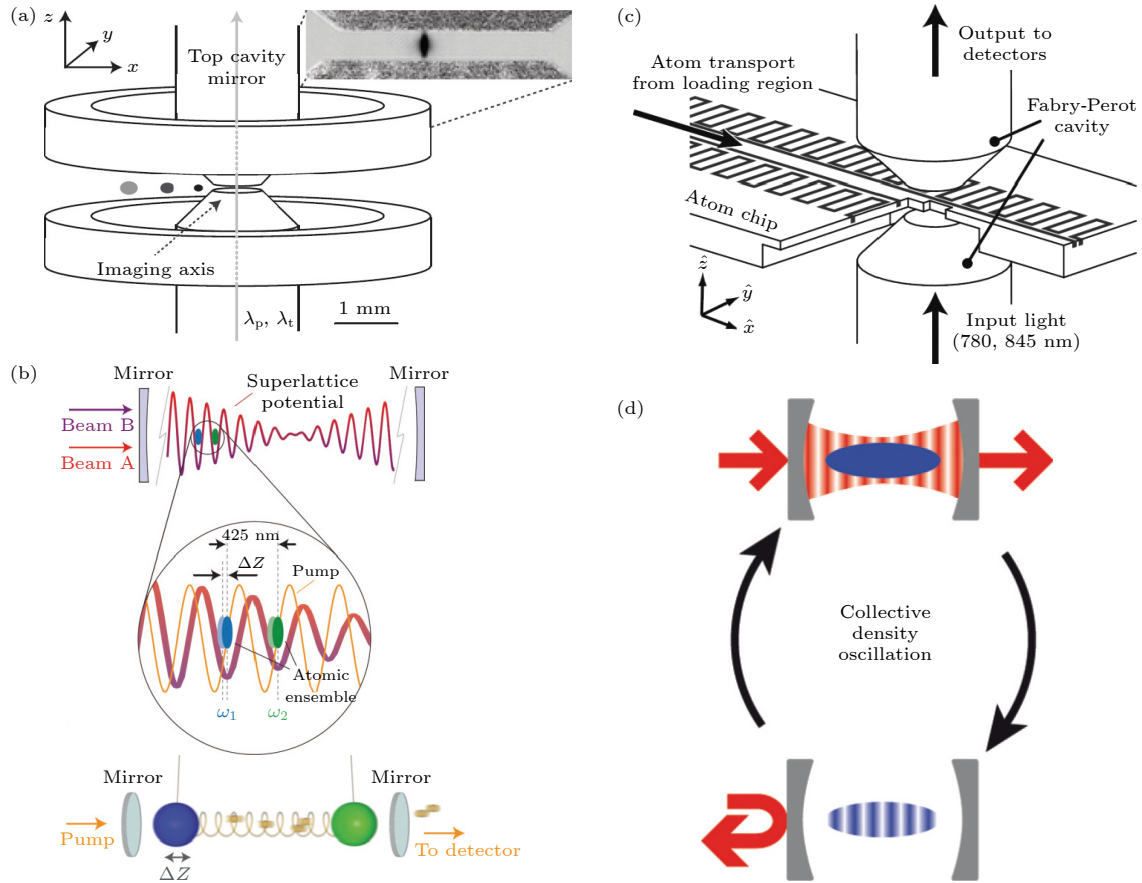


图 2 腔超冷原子系统实现腔光力系统的重要实验 (a) 铷 87 超冷原子系综被囚禁在 FP 腔中, 其中原子系综的质心运动可作为力学振子. 出自文献 [36], 已获得授权. (b) 两团铷 87 冷原子系综, 被囚禁在 FP 腔, 其中每个原子系综的质心运动分别构成一个力学振子, 构成双力学振子腔光力系统. 出自文献 [39], 已获得授权. (c) 铷 87 超冷原子系综被局域在 FP 腔中, 同时原子芯片用于在腔内传输和定位原子, 该系统可同时实现线性与二次光力耦合. 出自文献 [40], 已获得授权. (d) 铷 87 原子形成的 BEC 耦合到 FP 腔, 其中 BEC 的集体密度振荡作为力学振子实现线性光力系统. 出自文献 [35], 已获得授权

Fig. 2. Key experiments for realizing cavity optomechanical system (COMs) using cavity ultracold atom. (a) ^{87}Rb ultracold atoms ensemble is confined in a FP cavity. The center-of-mass motion of the atoms ensemble serves as a mechanical oscillator. Reproduced with permission from Ref.[36]. (b) Two ^{87}Rb atoms ensembles are confined in a FP cavity. The centers of mass of each ensemble form a mechanical oscillator, constituting a dual-mechanical-oscillator COMs. Reproduced with permission from Ref.[39]. (c) ^{87}Rb ultracold atoms ensemble is localized in a FP cavity, while an atomic chip is employed for atomic transport and positioning. This system enables realization of linear and quadratic COMs. Reproduced with permission from Ref.[40]. (d) A BEC formed from ^{87}Rb atoms is coupled to a FP cavity, where the collective density oscillations of the BEC act as a mechanical oscillator to realize a linear COMs. Reproduced with permission from Ref.[35].

该系统的动力学行为可由线性光力型哈密顿量进行描述, 其中声子模式对应于反冲动量模的集体激发, 其振荡频率为 4 倍反冲频率.

3 基于腔冷原子系统的光力调控

在“自上而下”的常规光力系统中, 光力调控已经在多个研究领域展现出显著优势. 2012 年, Dong 团队 [83] 利用光力调控实现了机械暗模, 如图 3(a) 所示, 暗模分数 (暗模态粒子数与总亮模和暗模粒子数之比) 可达 99%, 并利用暗模实现了两种光学模间的光场转移. 在非互易传输领域,

Dong 团队 2016 年通过光力调控实现无磁光隔离器 [84] (如图 3(b)), 随后进一步拓展至光力循环器、定向放大器和非互易频率转换 [85,86], 2021 年在级联光力系统中实现了机械振荡的冷却与放大效应 [87]. 此外, 研究人员还在单个光力腔中证实了合成规范场的存在 [88]. 在激光物理研究中, Grudinin 等 [89] 预言了声子激光. Jing 等 [90]、Zhang 等 [91] 和 Wu 团队 [92] 通过光力调控与奇异点的结合, 实现了超低阈值声子激光的理论探索与实验验证 (如图 3(c)). Jiang 等 [93] 与 Li 等 [94] 则进一步拓展至非互易声子激光的研究. 在非线性动力学研究中, Zhang 团

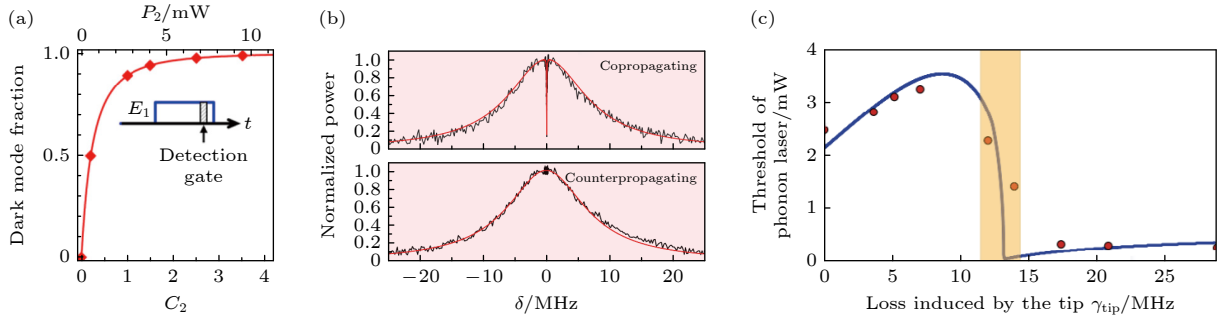


图3 “自上而下”光力系统的暗模、非互易性与超低阈值声子激光 (a) 暗模式分数与光力协同性, 出自文献 [83], 已获得授权; (b) 逆时与顺时传播信号发射功率谱与失谐, 出自文献 [84], 已获得授权; (c) 声子激光阈值功率与耗散, 出自文献 [91], 已获得授权
Fig. 3. Top-down optomechanical systems: dark modes, nonreciprocity, and ultralow-threshold phonon lasers. (a) Dark mode fraction versus optomechanical cooperativity. Reproduced with permission from Ref.[83]. (b) Emission power spectra of clockwise and counterclockwise signals versus detuning. Reproduced with permission from Ref.[84]. (c) Threshold power of phonon lasers versus dissipation. Reproduced with permission from Ref.[91].

队在光力系统中观测到混沌诱导的随机共振现象 [95], 随后进一步在光力系统中观察到力学孤子 [96]. Lü团队预言了超低驱动阈值混沌 [97], 并在非线性相互作用研究中进一步探究了压缩增强光力学 [98], 光力调控的力学压缩和声子阻塞效应 [12,99]. 最近, Sang 等 [100] 通过超材料与光力调控在电信波段实现了空间光学非互易. Li 等 [23,101] 实现了高精度磁场传感. Tang 等 [102] 在光力晶体腔内实现了两个 kHz 机械模式的同步频率锁定.

由于 BEC 凝聚物长寿命以及基于腔 BEC 光力系统强光力非线性、低热噪声以及多参数可调性的优势, 大量新奇的经典与量子效应在该系统中被理论探索. 下面将回顾最近基于腔冷原子系统的光力调控所产生的一系列重要效应.

3.1 基于腔环形 BEC 光力系统中的旋转量子传感与量子存储

环形囚禁超流体持续电流 [103] 是研究陀螺仪 [104]、宇宙学模拟 [105]、相位滑移 [106] 等量子循环现象的重要平台. 因此, 测量环形 BEC 的旋转态具有重要的意义, 对多个物理领域具有重要影响. 通常情况下, 旋转本征态的 BEC 的角动量信息承载于其相位, 以拓扑涡旋的绕数 (winding number) 形式体现. 然而迄今检测 BEC 绕数的方法需通过吸收成像技术观测环内原子, 因而会破坏 BEC 的凝聚状态.

2021 年, Kumar 等 [68] 利用腔光力学的原理, 提供了一种能够以最小破坏性、原位实时感知环形 BEC 旋转的方法, 该方案不涉及完全破坏性测量, 同时他们还展示了光可以通过光力纠缠持续电

流来主动操纵旋转的物质波. 他们考虑的模型如图 4(a) 所示, 一个原子 BEC 被限制在位于光学腔中心的环形阱中 [107]. BEC 可通过光学搅拌 [103]、利用射频场 [108]、淬火法 [109] 等多种方法实现旋转, 从而让 BEC 拥有绕数 L_p . 本文中的绕数 L_p 对应其宏观轨道角动量量子数, 二者呈正比对应关系, 物理意义一致, 因此对应的轨道角动量为 $\hbar L_p$ [68]. 两束频率简并, 携带轨道角动量 $\pm \hbar$ 叠加的驱动光注入系统去探测 BEC 信息. 这种相干叠加已被实验证明可在腔内围绕其轴线形成一个角晶格 [110]. 由于光晶格的存在, 凝聚态中部分原子会发生相干布拉格散射 [111], 从具有绕数 L_p 的旋转态散射到 $L_p \pm 2nl$ 态. 当偶极势较弱时, 可以只考虑一阶衍射, $L_p \pm 2l$. 类比于腔 BEC 光力模拟中的假设, 原子的场算符可以拟设为原始模式 (L_p) 以及由物质波衍射激发产生的两个侧向模式 ($L_p \pm 2l$) 之和. 由于弱的偶极势, 侧模中的原子数量较少, 所以绕数为 L_p 的模处于宏观占据状态. 在此假设下, 该系统可以转换为一个光力模型, 两个侧模分别作为两个不同频率的力学振子. 同时 BEC 的绕数被编码在力学振子的频率中, 腔内光场同样会被这两种力学振荡频率调制. 因此可以从光场信息中推断出原子的信息. 对腔输出场进行零差测量, 通过噪声谱分析, 清晰呈现出预期中的力学振子频率峰值, BEC 的绕数 L_p 可从峰值中提出. 此外, 通过误差传递公式计算系统灵敏度. 如图 4(b) 所示, 研究人员展示了轨道角动量数 l 与灵敏度的函数, 发现随着更多光晶格点与 BEC 相互作用, 敏感度随 l 值增加而提升. 在实际参数条件下, 基于腔光力调控方法对 BEC 相对于静止实验室旋转的最高灵

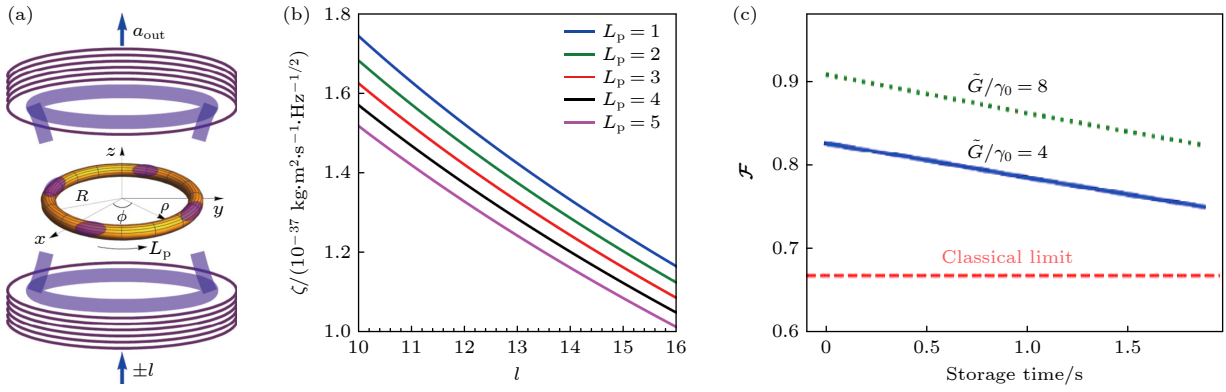


图 4 基于腔环形 BEC 光力系统中的旋转量子传感与量子存储 (a) 囚禁环形势阱的原子 BEC 被限制在光学微腔中心; (b) 旋转测量的灵敏度与轨道角动量函数; (c) 对于轨道角动量叠加态的存储与检索, 检索保真度与储存时间的函数. 图 (a), (b) 出自文献 [107], 图 (c) 出自文献 [70], 均已获得授权

Fig. 4. Rotation quantum sensing and quantum memory based on cavity ring BEC optomechanical system. (a) An atomic BEC confined in a toroidal trap located at the center of an optical cavity. Reproduced with permission from Ref.[107]. (b) Rotation sensitivity as a function of orbital angular momentum number (OAM) l . Reproduced with permission from Ref.[107]. (c) Retrieval fidelity as a function of storage time for the storage and retrieval of OAM superposition states. Reproduced with permission from Ref.[70].

灵敏度比现有实验水平 [112] 高出 3 个数量级, 且与基于完全破坏性测量 [104] 的理论预测相当. 最后, 研究人员还展示了光可以纠缠两个旋转的物质波侧向模式.

除了量子传感, 上述基于腔环形 BEC 的光力调控还可以实现长存储时间的光子轨道角动量量子存储器. 光子量子存储器件 [113,114] 可根据需要存储和提取光子态, 是量子信息科学的重要组成部分. 由于环形 BEC 的长寿命优势 [115,116], 可以将光子态映射到旋转 BEC 的持续电流模式上, 是实现长寿命的轨道角动量量子存储器的一种有效途径. 2026 年, Daloi 等 [70] 基于腔光力调控, 提出一种腔环形 BEC 量子存储平台, 用于存储和读取光的轨道角动量编码的光子态. 研究人员考虑模型与图 4(a) 类似, 囚禁在环形势阱的 BEC 被放置在 FP 腔中. 一束信号光和一束控制光分别输入腔中驱动系统, 两个场均被制备为携带轨道角动量 $\pm\hbar$ 的拉盖尔-高斯模的相干叠加态, 在腔轴周围形成环形光学晶格. 与 Kumar 等 [68] 的旋转传感的分析类似, 在只考虑一阶布拉格散射时, 该系统的哈密顿量可以表示成一个两力学振子光力模型, 其中力学模式为 BEC 的两个侧模. 根据标准光力存储器协议 [117], 研究人员实现了具有轨道角动量的单光子 Fock 态, 轨道角动量的相干叠加态, 以及具有轨道角动量的纠缠双光子态的存储和提取. 同时发现, 该系统能够实现高保真度提取, 如对于轨道角动量的相干叠加态保真度能达到 90% (图 4(c));

对于具有轨道角动量的纠缠双光子态保真度达到 80%.

3.2 基于腔一维雪茄型 BEC 光力系统中的非经典态制备

非经典源是量子科技 [118–120], 如量子通信、量子计算和量子精密测量的重要组成部分. 薛定谔猫态和单光子源 (态) 是非经典源的典型代表.

薛定谔猫态即宏观可区分的两个或多个态的相干叠加, 是量子系统的特有特征. 这种量子态对于量子技术具有重要的意义, 它可以从概念上探索经典和量子之间的边界 [121], 还可以为量子信息处理、量子传感等应用提供关键的容错量子资源 [122]. 由于其重要性, 介观尺度上物理平台上的薛定谔猫态已经被大量探索, 如光子 [123–125]、离子 [126] 和原子 [127] 等系统. 特别地, 最近研究者在一个 $16 \mu\text{g}$ 的机械谐振器中制备、观测并调控了薛定谔猫态 [18]. 光力系统 [17,128,129] 也展现出优越的能力去实现微观和宏观的薛定谔猫态. 然而, 就目前的腔光力系统而言, 达到超强单光子耦合仍然是一个很大的挑战, 因此它进一步阻碍了具有可区分薛定谔猫态的产生 [130]. 腔 BEC 光力系统由于具有大光力耦合低热声子噪声的优势, 是实现可区分薛定谔猫态的理想平台之一. 2012 年, Zhang 等 [65] 将一个被三维囚禁的原子 BEC 放置在单模单向环形高 Q 光腔内, 实现了反转的腔光力学. 在该模型中, 光场和物质波场的作用相反, 即物质波场充当光场的

作用, 而光场充当力学振子的作用. 在该模型中, 力学振子由于是光场模拟产生的, 即高 Q 腔中的单模光场, 该系统可以不受热噪声的影响. 研究人员发现该系统可以高效制备 BEC 的非经典态, 并可对其进行无损表征和重建 Winger 函数. 2023 年, Li 等 [66] 在一个标准的腔 BEC 光力模型中, 利用其优势探究了大尺寸的力学叠加态和可调控的光学多分量猫态. 如图 5(a) 所示, 研究人员考虑一个腔 BEC 系统, 其中一个雪茄形状的原子的 BEC 被囚禁在一个 FP 腔中. BEC 的集体密度激发可以等价为一个力学振子, 与光场形成腔光力系统. 基于此系统, 研究人员探究了宏观的力学叠加态和微观的光场薛定谔猫态. 基于强光力非线性的优势, 在基于腔 BEC 的光力系统中产生的薛定谔猫态中的相干态的最大振幅比在固态系统中获得的相干态的振幅高大约 3 个数量级, 达到可区分程度. 图 5(b) 展示了力学模式在固定时刻的 Winger 函数, 可以明显地看出相空间中的两个主峰, 分别代表真空态和相干态. 两个峰之间表现出明显的干涉条纹. 这种量子干涉是宏观上不同的叠加成分的明确证据. 此外, 研究人员也展示了 BEC 中可调性对光学猫态的影响, 可以调节系统的 s 波散射长度产生不同组分的光学猫态.

光子阻塞效应, 即在非线性腔中产生一个光子并使腔中产生另一个光子的概率几乎为零, 是产生单光子源的重要方式之一. 迄今为止光子阻塞效应已经在腔或微波 QED 系统被实验实现 [131-134]. 理论上也提出了诸多非线性腔 [135-140] 方案实现光子

阻塞现象. 腔光力系统中光子阻塞现象也被大量地研究 [9,141-143]. 然而对于常规的光子阻塞而言, 强光力非线性 (大于腔耗散) 是实现光子阻塞的一个条件. 腔 BEC 光力系统大的光力非线性可为光子阻塞的产生提供良好的条件. 2024 年, Zhai 等 [67] 在一个腔 BEC 系统中研究了光子阻塞, 并展示其优势. 研究人员考虑的系统与图 5(a) 类似, 即 BEC 被囚禁在光学微腔中, 一个弱驱动驱动该系统. 研究展示, 在强光力耦合下, 光子阻塞可以出现在该系统中. 同时在特定的参数下, 腔 BEC 系统可同时产生单光子阻塞与双光子阻塞效应, 而常规的光力系统则不会产生阻塞效应. 并且该系统拥有巨大的可调性: 通过 BEC 原子间的 s 波散射长度的调节, 可以实现光子诱导隧穿和阻塞之间的转换. 图 5(c) 展示了在不同的散射参数下, 二阶关联函数与失谐的函数, 发现可以实现光子阻塞与光子诱导隧穿的转换. 此外, 研究人员还展示了散射参数对光子阻塞的增强效应.

除了上述重要效应, 腔冷原子系统光力调控在诸多方面也具有重要作用. 2011 年, Dong 等 [71] 在一个双组分 BEC 与 FP 光学腔色散相互作用组成的系统, 展示了同时具有少光子水平的光学多重稳定性和涉及具有宏观原子数的物质波多重稳定性; 2011 年, Schleier-Smith 等 [38] 在一个 FP 腔耦合原子系综模型中探究了原子系综的单个集体运动模式的腔边带冷却; 2012 年, Singh 等 [69] 在一个原子 BEC 耦合一个光力系统中展示了 BEC 和光力学振子之间的量子态转移. 腔光力系统在自旋系综

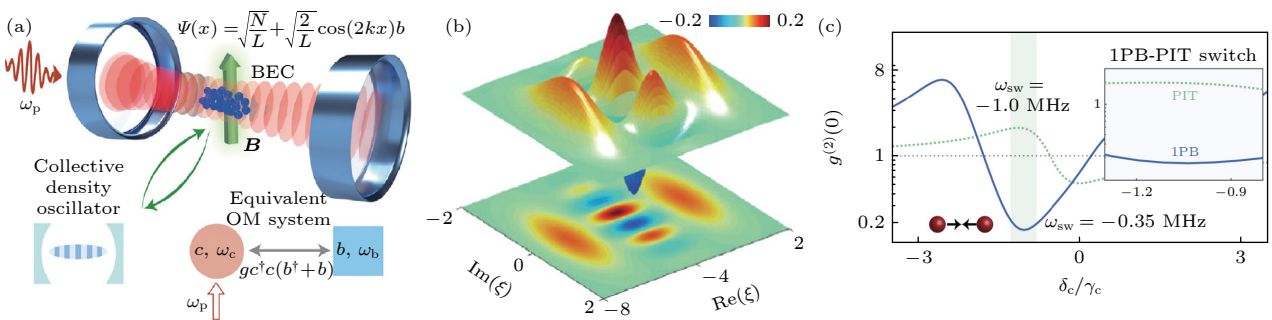


图 5 基于腔一维雪茄型 BEC 光力系统中的薛定谔猫态与光子阻塞效应 (a) 雪茄形状的原子的 BEC 被限制在光学微腔中, BEC 的集体密度激发可以等效成一个力学振子, 从而形成一个光力系统. (b) BEC 腔光力系统中力学模态的 Winger 函数. 图 (a), (b) 出自文献 [66], 已获得授权. (c) 不同 s 波散射长度下, 二阶关联函数与失谐的函数. 出自文献 [67], 已获得授权

Fig. 5. Schrödinger cat states and photon blockade in a cavity optomechanical system based on cavity cigar-shaped BEC. (a) The cigar-shaped atomic BEC is confined in an optical cavity. The collective density excitation of the BEC can be modeled as a mechanical oscillator, thereby equivalent to an optomechanical system. Reproduced with permission from Ref.[66]. (b) Wigner function of the mechanical mode in the cavity BEC system. Reproduced with permission from Ref.[66]. (c) Second-order correlation function versus detuning for different s scattering lengths. Reproduced with permission from Ref.[67].

上的模拟也已得到理论验证. 2010 年, Brahmns 等^[144]从理论上构建了由 N 个类氢原子气体与高精度度光学微腔构成的腔光力类比系统, 预言了腔-自旋双稳态、自旋光动力学压缩以及自旋相干放大与阻尼等一系列物理现象. 2011 年, Jing 等^[145]系统探究了反铁磁 BEC 的腔光力特性, 在一个 spin-1 BEC 和高 Q 因子光腔中探究了如何进行单转子模型描述, 揭示了扭转振荡器与单腔模之间的二次光力耦合形式类比关系.

4 结 论

超冷原子或 BEC 兼具长相干性、低温度特性和多参数可调控等优势, 与高品质光学腔耦合构建的腔超冷原子光力体系展现出独特的优越性: 1) 腔 BEC 光力体系的光力非线性具备从弱到强的宽范围可调性; 2) 体系天然处于低噪声的量子腔光力范畴, 热噪声水平极低; 3) 超冷原子与光学腔的耦合形式可为光力调控赋予更多自由度. 上述优势可为一系列重要量子光力效应的实现奠定坚实的实验基础, 尤其适用于腔光力系统中对强非线性存在明确要求的物理场景. 同时, 体系对热噪声的天然鲁棒性, 也为实现抗噪声量子效应提供了理想的物理平台. 基于此, 本文系统综述了腔超冷原子体系光力调控相关重要物理效应的最近研究进展, 如光子阻塞、宏观非经典态叠加的制备与调控、量子传感与量子储存等相关方面的研究进展. 腔超冷原子光力体系的研究领域仍存在广阔的发展空间与探索潜力, 如可利用体系的强光力非线性突破光力纠缠的现有极限^[146], 以及实现热噪声鲁棒的量子压缩效应和声子激光效应^[89,94]等, 相关研究成果可为量子科技领域的发展提供重要的理论与实验支撑.

尽管基于腔冷原子系统的量子光力调控已取得许多进展, 但该领域也存在一些机遇与挑战. 首先, 单模腔冷原子光力系统已进行了诸多探索, 但多模量子光力学及其与量子多体物理的交叉研究尚存在诸多空白. 其次, 将腔冷原子光力系统与量子信息应用相结合, 如实现高保真量子态转换、量子存储及量子网络接口, 也是未来的重要发展方向. 尽管超冷原子体系具有低热噪声优势, 但实验中仍存在技术噪声及原子损失等问题, 这对高精度量子调控提出了更高要求. 随着理论方案和实验技

术的不断发展, 腔冷原子光力系统有望在基础物理研究及量子科学技术中发挥更加重要的作用.

感谢湖州师范学院物理系董世海教授的讨论.

参考文献

- [1] Maiman T H 1960 *Nature* **187** 493
- [2] Vahala K J 2003 *Nature* **424** 839
- [3] Teufel J D, Donner T, Li D, Harlow J W, Allman M S, Cicak K, Sirois A J, Whittaker J D, Lehnert K W, Simmonds R W 2011 *Nature* **475** 359
- [4] Chan J, Alegre T P M, Safavi-Naeini A H, Hill J T, Krause A, Gröblacher S, Aspelmeyer M, Painter O 2011 *Nature* **478** 89
- [5] Piotrowski J, Windey D, Vijayan J, Gonzalez-Ballester C, de los Ríos Sommer A, Meyer N, Quidant R, Romero-Isart O, Reimann R, Novotny L 2023 *Nat. Phys.* **19** 1009
- [6] Troyer S, Fechtel F, Hummer L, Rudolph H, Stieckler B A, Delić U, Arndt M 2026 *Nat. Phys.* **22** 584
- [7] Weis S, Rivière R, Deléglise S, Gavartin E, Arcizet O, Schliesser A, Kippenberg T J 2010 *Science* **330** 1520
- [8] Safavi-Naeini A H, Alegre T P M, Chan J, Eichenfield M, Winger M, Lin Q, Hill J T, Chang D E, Painter O 2011 *Nature* **472** 69
- [9] Rabl P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 063601
- [10] Mancini S, Tombesi P 1994 *Phys. Rev. A* **49** 4055
- [11] Fabre C, Pinard M, Bourzeix S, Heidmann A, Giacobino E, Reynaud S 1994 *Phys. Rev. A* **49** 1337
- [12] Lü X Y, Liao J Q, Tian L, Nori F 2015 *Phys. Rev. A* **91** 013834
- [13] Vitali D, Gigan S, Ferreira A, Böhm H R, Tombesi P, Guerreiro A, Vedral V, Zeilinger A, Aspelmeyer M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 030405
- [14] Kotler S, Peterson G A, Shojaei E, Lecocq F, Cicak K, Kwiatkowski A, Geller S, Glancy S, Knill E, Simmonds R W, Aumentado J, Teufel J D 2021 *Science* **372** 622
- [15] Mercier de Lépinay L, Ockeloen-Korppi C F, Woolley M J, Sillanpää M A 2021 *Science* **372** 625
- [16] Cai Q, Fan B, Fan Y, Deng G, Wang Y, Song H, Guo G, Zhou Q 2023 *Phys. Rev. A* **108** 022419
- [17] Bose S, Jacobs K, Knight P L 1997 *Phys. Rev. A* **56** 4175
- [18] Bild M, Fadel M, Yang Y, von Lüpke U, Martin P, Bruno A, Chu Y 2023 *Science* **380** 274
- [19] Gavartin E, Verlot P, Kippenberg T J 2012 *Nat. Nanotech.* **7** 509
- [20] Anetsberger G, Arcizet O, Unterreithmeier Q P, Rivière R, Schliesser A, Weig E M, Kotthaus J P, Kippenberg T J 2009 *Nat. Phys.* **5** 909
- [21] Sansa M, Defoort M, Brenac A, Hermouet M, Banniard L, Fafin A, Gely M, Masselon C, Favero I, Jourdan G, Hentz S 2020 *Nat. Commun.* **11** 3781
- [22] Krause A G, Winger M, Blasius T D, Lin Q, Painter O 2012 *Nat. Photonics* **6** 768
- [23] Li B B, Bilek J, Hoff U B, Madsen L S, Forstner S, Prakash V, Schäfermeier C, Gehring T, Bowen W P, Andersen U L 2018 *Optica* **5** 850
- [24] Han X, Fu W, Zou C L, Jiang L, Tang H X 2021 *Optica* **8** 1050
- [25] Dorsel A, McCullen J D, Meystre P, Vignes E, Walther H

- 1983 *Phys. Rev. Lett.* **51** 1550
- [26] Jiang X, Lin Q, Rosenberg J, Vahala K, Painter O 2009 *Opt. Express* **17** 20911
- [27] Ma R, Schliesser A, Del' Haye P, Dabirian A, Anetsberger G, Kippenberg T J 2007 *Opt. Lett.* **32** 2200
- [28] Eichenfield M, Chan J, Camacho R M, Vahala K J, Painter O 2009 *Nature* **462** 78
- [29] Eichenfield M, Camacho R, Chan J, Vahala K J, Painter O 2009 *Nature* **459** 550
- [30] Safavi-Naeini A H, Alegre T P M, Winger M, Painter O 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 181106
- [31] Fonseca P Z G, Aranas E B, Millen J, Monteiro T S, Barker P F 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 173602
- [32] Millen J, Fonseca P Z G, Mavrogordatos T, Monteiro T S, Barker P F 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 123602
- [33] Delić U, Reisenbauer M, Grass D, Kiesel N, Vuletić V, Aspelmeyer M 2019 *Phys. Rev. Lett.* **122** 123602
- [34] Shelby R M, Levenson M D, Bayer P W 1985 *Phys. Rev. B* **31** 5244
- [35] Brennecke F, Ritter S, Donner T, Esslinger T 2008 *Science* **322** 235
- [36] Murch K W, Moore K L, Gupta S, Stamper-Kurn D M 2008 *Nat. Phys.* **4** 561
- [37] Camerer S, Korppi M, Jöckel A, Hunger D, Hänsch T W, Treutlein P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 223001
- [38] Schleier-Smith M H, Leroux I D, Zhang H, Van Camp M A, Vuletić V 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 143005
- [39] Spethmann N, Kohler J, Schreppler S, Buchmann L, Stamper-Kurn D M 2016 *Nat. Phys.* **12** 27
- [40] Purdy T P, Brooks D W C, Botter T, Brahm N, Ma Z Y, Stamper-Kurn D M 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 133602
- [41] Purcell E M, Torrey H C, Pound R V 1946 *Phys. Rev.* **69** 37
- [42] Domokos P, Ritsch H 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 1098
- [43] Tavis M, Cummings F W 1968 *Phys. Rev.* **170** 379
- [44] Raizen M G, Thompson R J, Brecha R J, Kimble H J, Carmichael H J 1989 *Phys. Rev. Lett.* **63** 240
- [45] Sauer J A, Fortier K M, Chang M S, Hamley C D, Chapman M S 2004 *Phys. Rev. A* **69** 051804
- [46] Tuchman A K, Long R, Vrijsen G, Boudet J, Lee J, Kasevich M A 2006 *Phys. Rev. A* **74** 053821
- [47] Wang X J, Yang S J, Sun P F, Jing B, Li J, Zhou M T, Bao X H, Pan J W 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 090501
- [48] Horak P, Ritsch H 2001 *Phys. Rev. A* **64** 033422
- [49] Münstermann P, Fischer T, Maunz P, Pinkse P W H, Rempe G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4068
- [50] Norcia M A, Lewis-Swan R J, Cline J R K, Zhu B, Rey A M, Thompson J K 2018 *Science* **361** 259
- [51] Domokos P, Ritsch H 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 253003
- [52] Black A T, Chan H W, Vuletić V 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 203001
- [53] Chu S 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 685
- [54] Cohen-Tannoudji C N 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 707
- [55] Phillips W D 1998 *Rev. Mod. Phys.* **70** 721
- [56] Morsch O, Oberthaler M 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 179
- [57] Dalfovo F, Giorgini S, Pitaevskii L P, Stringari S 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 463
- [58] Griffin A, Snoke D W, Stringari S 1996 *Bose-Einstein Condensation* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [59] Nagy D, Szirmai G, Domokos P 2008 *Eur. Phys. J. D* **48** 127
- [60] Baumann K, Guerlin C, Brennecke F, Esslinger T 2010 *Nature* **464** 1301
- [61] Dicke R H 1954 *Phys. Rev.* **93** 99
- [62] Hepp K, Lieb E H 1973 *Ann. Phys.* **76** 360
- [63] Dimer F, Estienne B, Parkins A S, Carmichael H J 2007 *Phys. Rev. A* **75** 013804
- [64] Nagy D, Kónya G, Szirmai G, Domokos P 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 130401
- [65] Zhang K, Meystre P, Zhang W 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 240405
- [66] Li B, Qin W, Jiao Y F, Zhai C L, Xu X W, Kuang L M, Jing H 2023 *Fundam. Res.* **3** 15
- [67] Zhai C, Lu W, Jiao Y, Kuang L 2024 *Ann. Phys.* **536** 2300465
- [68] Kumar P, Biswas T, Feliz K, Kanamoto R, Chang M S, Jha A K, Bhattacharya M 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 113601
- [69] Singh S, Jing H, Wright E M, Meystre P 2012 *Phys. Rev. A* **86** 021801
- [70] Daloi N, Gupta R, Ghosh A, Kumar P, Dhar H S, Bhattacharya M 2026 *Phys. Rev. Res.* **8** 013013
- [71] Dong Y, Ye J, Pu H 2011 *Phys. Rev. A* **83** 031608
- [72] Aspelmeyer M, Kippenberg T J, Marquardt F 2014 *Rev. Mod. Phys.* **86** 1391
- [73] Jayich A M, Sankey J C, Zwickl B M, Yang C, Thompson J D, Girvin S M, Clerk A A, Marquardt F, Harris J G E 2008 *New J. Phys.* **10** 095008
- [74] Xuereb A, Schnabel R, Hammerer K 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 213604
- [75] Huang J G, Li Y, Chin L K, Cai H, Gu Y D, Karim M F, Wu J H, Chen T N, Yang Z C, Hao Y L, Qiu C W, Liu A Q 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 051104
- [76] Machnes S, Cerrillo J, Aspelmeyer M, Wieczorek W, Plenio M B, Retzker A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 153601
- [77] Weiss T, Bruder C, Nunnenkamp A 2013 *New J. Phys.* **15** 045017
- [78] Gupta S, Moore K L, Murch K W, Stamper-Kurn D M 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 213601
- [79] Thompson J D, Zwickl B M, Jayich A M, Marquardt F, Girvin S M, Harris J G E 2008 *Nature* **452** 72
- [80] Sankey J C, Yang C, Zwickl B M, Jayich A M, Harris J G E 2010 *Nat. Phys.* **6** 707
- [81] Lee D, Underwood M, Mason D, Shkarin A, Hoch S, Harris J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6232
- [82] Ritsch H, Domokos P, Brennecke F, Esslinger T 2013 *Rev. Mod. Phys.* **85** 553
- [83] Dong C, Fiore V, Kuzuk M C, Wang H 2012 *Science* **338** 1609
- [84] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, Zou C L, Xiao Y F, Zou X B, Sun F W, Guo G C, Dong C H 2016 *Nat. Photonics* **10** 657
- [85] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, Sun F W, Zou X B, Guo G C, Zou C L, Dong C H 2018 *Nat. Commun.* **9** 1797
- [86] Shen Z, Zhang Y L, Chen Y, Xiao Y F, Zou C L, Guo G C, Dong C H 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 013601
- [87] Shen Z, Zhang Y L, Zou C L, Guo G C, Dong C H 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 163604
- [88] Chen Y, Zhang Y L, Shen Z, Zou C L, Guo G C, Dong C H 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 123603
- [89] Grudinin I S, Lee H, Painter O, Vahala K J 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 083901
- [90] Jing H, Özdemir S, Lü X Y, Zhang J, Yang L, Nori F 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 053604
- [91] Zhang J, Peng B, Özdemir ff K, Pichler K, Krimer D O, Zhao G, Nori F, Liu Y X, Rotter S, Yang L 2018 *Nat. Photonics* **12** 479
- [92] Zhang Q, Yang C, Sheng J, Wu H 2022 *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **119** e2207543119
- [93] Jiang Y, Maayani S, Carmon T, Nori F, Jing H 2018 *Phys.*

- Rev. Appl.* **10** 064037
- [94] Li B, Lu T X, Kuang L M, Jing H, Lee C 2025 *Phys. Rev. Appl.* **24** 044032
- [95] Monifi F, Zhang J, Özdemir S K, Peng B, Liu Y X, Bo F, Nori F, Yang L 2016 *Nat. Photonics* **10** 399
- [96] Zhang J, Peng B, Kim S, Monifi F, Jiang X, Li Y, Yu P, Liu L, Liu Y X, Alù A, Yang L 2021 *Nature* **600** 75
- [97] Lü X Y, Jing H, Ma J Y, Wu Y 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 253601
- [98] Lü X Y, Wu Y, Johansson J, Jing H, Zhang J, Nori F 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 093602
- [99] Zheng L L, Yin T S, Bin Q, Lü X Y, Wu Y 2019 *Phys. Rev. A* **99** 013804
- [100] Sang Y, Xu J, Liu K, Chen W, Xiao Y, Zhu Z, Liu N, Zhang J 2022 *Adv. Opt. Mater.* **10** 2201523
- [101] Li B B, Ou L, Lei Y, Liu Y C 2021 *Nanophotonics* **10** 2799
- [102] Tang J D, Xia Z W, Bin Q, Lü X M, Zeng L P, Chen P Q, Jiang Q Y, Wang Y, Song H Z, Zhou Q, Zhou H, Arutyunov K Y, Lü X Y, Huang Y J, Guo G C, Deng G W 2024 *Optica* **11** 1103 (in Chinese)
- [103] Ryu C, Andersen M, Cladé P, Natarajan V, Helmerson K, Phillips W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 260401
- [104] Ragole S, Taylor J M 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 203002
- [105] Eckel S, Kumar A, Jacobson T, Spielman I, Campbell G 2018 *Phys. Rev. X* **8** 021021
- [106] Wright K C, Blakestad R B, Lobb C J, Phillips W D, Campbell G K 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 025302
- [107] Guo Y, Dubessy R, de Herve M d G, Kumar A, Badr T, Perrin A, Longchambon L, Perrin H 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 025301
- [108] Sherlock B E, Gildemeister M, Owen E, Nugent E, Foot C J 2011 *Phys. Rev. A* **83** 043408
- [109] Corman L, Chomaz L, Bienaimé T, Desbuquois R, Weitenberg C, Nascimbène S, Dalibard J, Beugnon J 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 135302
- [110] Naidoo D, Aït-Ameur K, Brunel M, Forbes A 2012 *Appl. Phys. B* **106** 683
- [111] Muniz S R, Naik D S, Raman C 2006 *Phys. Rev. A* **73** 041605
- [112] Kumar A, Anderson N, Phillips W D, Eckel S, Campbell G K, Stringari S 2016 *New J. Phys.* **18** 025001
- [113] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W 2009 *Nat. Photonics* **3** 706
- [114] Heshami K, England D G, Humphreys P C, Bustard P J, Acosta V M, Nunn J, Sussman B J 2016 *J. Mod. Opt.* **63** 2005
- [115] Ramanathan A, Wright K C, Muniz S R, Zelan M, Hill W T, Lobb C J, Helmerson K, Phillips W D, Campbell G K 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 130401
- [116] Beattie S, Moulder S, Fletcher R J, Hadzibabic Z 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 025301
- [117] Fiore V, Yang Y, Kuzyk M C, Barbour R, Tian L, Wang H 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 133601
- [118] Scarani V, Bechmann-Pasquinucci H, Cerf N J, Dušek M, Lütkenhaus N, Peev M 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1301
- [119] Buluta I, Ashhab S, Nori F 2011 *Rep. Prog. Phys.* **74** 104401
- [120] Gu X, Kockum A F, Miranowicz A, Liu Y X, Nori F 2017 *Phys. Rep.* **718** 1
- [121] Zurek W H 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 715
- [122] Ku H Y, Lambert N, Chan F J, Emary C, Chen Y N, Nori F 2020 *npj Quantum Inf.* **6** 98
- [123] Ourjoumtsev A, Jeong H, Tualle-Brouiri R, Grangier P 2007 *Nature* **448** 784
- [124] Sychev D V, Ulanov A E, Pushkina A A, Richards M W, Fedorov I A, Lvovsky A I 2017 *Nature Photon.* **11** 379
- [125] Leghtas Z, Touzard S, Pop I M, Kou A, Vlastakis B, Petrenko A, Sliwa K M, Narla A, Shankar S, Hatridge M J, Reagor M, Frunzio L, Schoelkopf R J, Mirrahimi M, Devoret M H 2015 *Science* **347** 853
- [126] Lu Y, Zhang S, Zhang K, Chen W, Shen Y, Zhang J, Zhang J N, Kim K 2019 *Nature* **572** 363
- [127] Monroe C, Meekhof D M, King B E, Wineland D J 1996 *Science* **272** 1131
- [128] Qin W, Miranowicz A, Long G, You J Q, Nori F 2019 *npj Quantum Inf.* **5** 58
- [129] Lü X Y, Zhu G L, Zheng L L, Wu Y 2018 *Phys. Rev. A* **97** 033807
- [130] Liao J Q, Tian L 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 163602
- [131] Birnbaum K M, Boca A, Miller R, Boozer A D, Northup T E, Kimble H J 2005 *Nature* **436** 87
- [132] Müller K, Rundquist A, Fischer K A, Sarmiento T, Lagoudakis K G, Kelaita Y A, Sánchez Muñoz C, del Valle E, Laussy F P, Vučković J 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 233601
- [133] Lang C, Bozyigit D, Eichler C, Steffen L, Fink J M, Abdumalikov A A, Baur M, Filipp S, da Silva M P, Blais A, Wallraff A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 243601
- [134] Hoffman A J, Srinivasan S J, Schmidt S, Spietz L, Aumentado J, Türeci H E, Houck A A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 053602
- [135] Ferretti S, Andreani L C, Türeci H E, Gerace D 2010 *Phys. Rev. A* **82** 013841
- [136] Liao J Q, Law C K 2010 *Phys. Rev. A* **82** 053836
- [137] Miranowicz A, Paprzycka M, Liu Y X, Bajer J, Nori F 2013 *Phys. Rev. A* **87** 023809
- [138] Liew T C H, Savona V 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 183601
- [139] Bamba M, Imamoğlu A, Carusotto I, Ciuti C 2011 *Phys. Rev. A* **83** 021802
- [140] Li B, Zuo Y, Kuang L M, Jing H, Lee C 2024 *npj Quantum Inf.* **10** 75
- [141] Nunnenkamp A, Børkje K, Girvin S M 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 063602
- [142] Liao J Q, Nori F 2013 *Phys. Rev. A* **88** 023853
- [143] Li B, Huang R, Xu X, Miranowicz A, Jing H 2019 *Photonics Res.* **7** 630
- [144] Brahm N, Stamper-Kurn D M 2010 *Phys. Rev. A* **82** 041804
- [145] Jing H, Goldbaum D S, Buchmann L, Meystre P 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 223601
- [146] Yu H Y, Jiao Y F, Wang J, Li F, Yin B, Liu Q R, Jiang T, Jing H, Wei K 2026 *Phys. Rev. Lett.* **136** 013602

SPECIAL TOPIC—Ultracold atomic and molecular physics

Advances in quantum optomechanical control based on cavity cold-atom systems*

LI Baijun¹⁾ LU Tianxiang²⁾ WANG Jie³⁾ JING Hui^{3)4)†}1) (*Research Center for Quantum Physics, Huzhou University, Huzhou 313000, China*)2) (*College of Physics and Electronic Information, Ganman Normal University, Ganzhou 341000, China*)3) (*College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)4) (*Synergetic Innovation Center for Quantum Effects and Applications, Key Laboratory of Low-Dimensional Quantum Structures and Quantum Control of Ministry of Education, Department of Physics, Hunan Normal University, Changsha 410081, China*)

(Received 28 February 2026; revised manuscript received 13 April 2026)

Abstract

Cavity optomechanics represents a frontier research direction in quantum science and technology, centered on the control and exploration of interactions between electromagnetic fields and mechanical motion. Rooted in quantum mechanics, this field realizes efficient coupling and precise manipulation of optical fields and mechanical vibrations through the structural design and precise regulation of optical microcavities and mechanical oscillators, thereby revealing and harnessing novel quantum phenomena. In recent years, cavity optomechanics has evolved into an interdisciplinary frontier integrating quantum optics, condensed matter physics, and quantum precision measurement, exhibiting profound application in both fundamental physics research and quantum information science. With advancements in technologies such as nanomanufacturing and laser cooling, optomechanical interactions have been successfully demonstrated in various experimental systems. Among these platforms, cavity cold-atom systems stand out as one of the ideal platforms for implementing quantum optomechanics. Featuring exceptional environmental isolation, long quantum coherence times, and strong light-matter interaction, these systems provide a crucial testbed for exploring strong and even ultra-strong optomechanical coupling effects as well as rich nonlinear quantum phenomena. This paper reviews the recent progress in optomechanical control and manipulation based on cavity cold-atom systems. We first outline the fundamental principles of standard cavity optomechanical systems. Then, we describe the experimental realization of linear and nonlinear optomechanical couplings in cold-atom systems. After that, we focus on the representative applications of this platform in high-precision quantum sensing, quantum memory, and the preparation of macroscopic nonclassical states. Finally, we give an outlook and challenges in this field.

Keywords: cavity optomechanics, cavity cold-atom systems, quantum effects

DOI: [10.7498/aps.75.20260289](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260289)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260289](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20260289)

* Project supported by the Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2024ZD0301000), the National Key R&D Program of China (Grant No. 2024YFE0102400), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 12421005, 12205054, 12565001, 12347136), and the Science and Technology Major Project of Hunan Province, China (Grant No. 2023ZJ1010).

† Corresponding author. E-mail: jinghui73@foxmail.com



基于腔冷原子系统的量子光力调控进展

李柏军 卢天祥 王婕 景辉

Advances in quantum optomechanical control based on cavity cold-atom systems

LI Baijun LU Tianxiang WANG Jie JING Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 110301 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260289

CSTR: 32037.14.aps.75.20260289

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260289>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

含两能级原子系综的复合光力系统中的和边带效应

Sum sideband effect in hybrid optomechanical system with two-level atom ensemble

物理学报. 2025, 74(8): 084206 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241432>

多模光力系统中光力诱导透明引起的慢光效应

Slow light effect caused by optomechanically induced transparency in multimode optomechanical system

物理学报. 2023, 72(15): 154203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230663>

基于第一性原理的氢化锆量子效应与热散射律计算

First-principles investigation of quantum effects and thermal scattering laws of zirconium hydride

物理学报. 2026, 75(9): 154203 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251741>

量子点-双腔磁光机械系统中的磁振子双稳态

Magneton bistability in quantum dot-double cavity optomechanical coupling system

物理学报. 2025, 74(12): 124203 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250172>

双模光机械腔中冷原子的量子相变和超辐射相塌缩

Quantum phase transitions and superradiation phase collapse of cold atoms in a two-mode photomechanical cavity

物理学报. 2024, 73(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241103>

里德伯原子辅助光力系统的完美光力诱导透明及慢光效应

Perfect optomechanically induced transparency and slow light in an Rydberg atom-assisted optomechanical system

物理学报. 2023, 72(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222264>