

基于悬浮光力学的惯性传感颠覆性技术

胡慧珠¹, 尹璋琦², 李楠¹, 车双良¹, 舒晓武¹, 刘承¹

(1. 浙江大学光电科学与工程学院, 杭州 310027; 2. 清华大学, 北京 100084)

摘要: 悬浮光力学是光力学与量子光学结合的产物, 为微纳机械振子的控制和测量提供了一种全新的量子方法, 这种方法具有前所未有的观测精度, 可接近甚至突破标准量子极限, 具有广阔的发展和应用前景。目前国际上已在室温下利用此系统实现了力、力矩、位移、加速度等多个物理量的极高灵敏度测量。本文综述了悬浮光力学的研究现状及国内外在精密传感与测量方面的进展。作为近年来发展起来的一种前沿技术, 悬浮光力学已逐渐从基础研究走向应用, 特别是对惯性传感与精密测量领域有重要的应用前景。最后提出了发展基于悬浮光力学的惯性传感颠覆性技术的建议, 为我国惯性传感与量子精密测量技术发展规划的制定提供参考。

关键词: 光力学; 精密测量; 惯性传感; 颠覆性技术

中图分类号: TH823 **文献标识码:** A

Inertial Sensing Disruptive Technology Based on Levitated Optomechanics

Hu Huizhu¹, Yin Zhangqi², Li Nan¹, Che Shuangliang¹, Shu Xiaowu¹, Liu Cheng¹

(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Levitated optomechanics is the combination of optomechanics and quantum optics. It provides a new quantum method to control and measure micro-nano mechanical oscillator. This method has unprecedented observation accuracy, can approach or even break the standard quantum limit, and has broad development and application prospects. At present, the system has been used to measure the force, torque, displacement, acceleration and other physical parameters with high sensitivity at room temperature. In this paper, the research status of levitated optomechanics and its progress in precision sensing and measurement are reviewed. As a frontier technology developed in recent years, levitated optomechanics has gradually moved from basic research to application, especially in the field of inertial sensing and precision measurement. Finally, suggestions for developing the inertial sensing disruptive technology based on levitated optomechanics are put forward, which can provide reference for the development planning of inertial sensing and quantum precision measurement technology.

Keywords: optomechanics; precision measurement; inertial sensing; disruptive technology

收稿日期: 2018-10-25; **修回日期:** 2018-11-08

通讯作者: 胡慧珠, 浙江大学光电科学与工程学院, 研究员, 主要研究方向为光学惯性与传感技术; E-mail: huhuizhu2000@zju.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”(2017-ZD-10); 教育部联合基金(6141A02011604); 中央高校基本科研业务费专项资金(2016XZZX00401)

本刊网址: www.engsci.cn

一、前言

光力学是过去十余年光学与量子物理领域非常热门的研究方向。研究光力学的动机主要有两个方面，一方面，光与微纳力学振子耦合起来，可以灵敏地读出力学振子运动状态，从而实现了对微小的力、位移、质量等物理量的高精度的测量，具有前所未有的观测精度，并可接近甚至突破标准量子极限；另一方面，光又可以冷却和操控力学振子的运动，直到它达到量子区域，制备力学振子的宏观量子叠加态，从实验上探索经典物理与量子物理的边界。

人们公认，“薛定谔的猫”是最著名的宏观量子叠加态悖论，如图 1 所示。自从 1935 年薛定谔提出“薛定谔猫佯谬”之后，物理学家一直在寻找处于“薛定谔猫”态的宏观物体。虽然不可能一步到位地找到处于生与死叠加态的宏观量子系统，但人们已在电子、原子、小分子中看到“薛定谔猫”态。直到最近几年人们才在含有几百个原子的复杂大分子中找到了“薛定谔猫”态存在的证据。

找到“薛定谔的猫”的主要困难来自于量子系统与周围环境的相互作用所带来的退相干效应，而且退相干速率会随着粒子数的增加而急剧增大。于是在尝试观察某个系统是否处于量子叠加态之前，它已经塌缩到了某个经典的状态了。要解决这个问题，必须要找到一个完美的孤立系统，把系统与环境的耦合降到最低，降低退相干，来保证可以观测到“薛定谔猫”态的存在。要是可以把光力学系统中的纳米力学振子用光镊悬浮在高真空中，就可能把它与周围环境隔离开来。

早在 1970 年，Arthur Ashkin 等 [1] 就已经用激

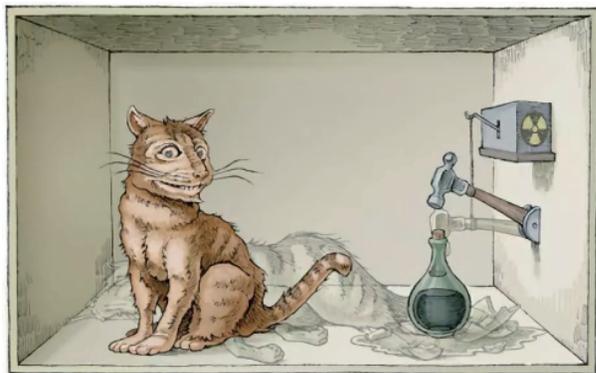


图 1 “薛定谔猫”思想实验示意图

光配合重力把微米玻璃球悬浮在真空中。1986 年，他在此技术的基础上与朱棣文等人合作发明了光镊 [2]，在水中把 25 nm~10 μm 的介电粒子用激光束束缚起来。该技术后来在生物科学领域和冷原子物理领域产生了广泛的应用，并为朱棣文和 Ashkin 分别赢得 1997 年和 2018 年诺贝尔物理学奖。2010 年，德国马克斯-普朗克研究所的 Romero-Isart 等 [3]，与加州理工学院的 Chang 等 [4] 同时各自独立地提出，用光镊把 100 nm 大小的介电粒子悬浮在真空中，通过与光学腔模的耦合，实现对其质心运动的量子基态冷却，进而制备宏观量子叠加态。纳米粒子中的原子数目有 10^8 个以上，可用于制备接近宏观尺度的“薛定谔猫”态，甚至制备纳米尺度的病毒生命体的量子叠加态，如图 2 所示。同年，美国德州大学奥斯汀分校的李统藏等，用光镊在空气中囚禁了微米玻璃珠，并直接测量了此玻璃珠做布朗运动的瞬时速度 [5]，并验证了麦克斯韦速度分布律。一年后，又基于该系统实现了微米玻璃珠质心运动的反馈冷却，将质心运动温度从室温降低到 1.5 mK [6]，拉开了悬浮光力学的研究大幕。

二、验证基础物理理论

悬浮光力学研究从一开始，就瞄准基本的物理原理与理论，比如说如何制备大质量物体的量子叠加态，观测其物质波干涉，进而更加深刻地理解经典与量子的边界问题。实现宏观量子态的第一步，就是冷却系统的热运动直到量子区域。这分为两个

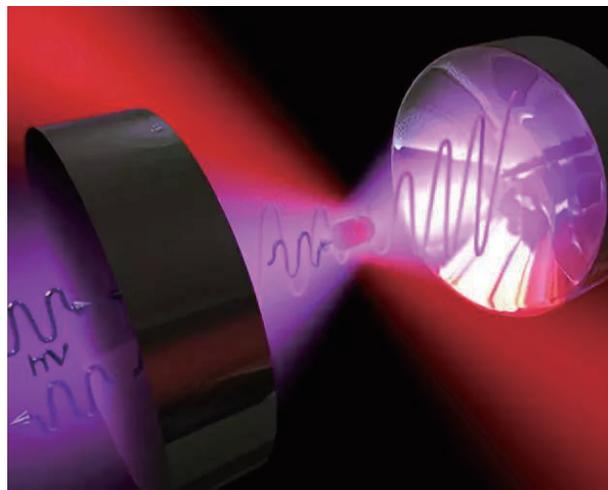


图 2 光悬浮生命体（病毒的量子叠加态）

阶段：①是反馈冷却，理论上可以把热声子冷却到10个左右；②是通过腔边带冷却到量子基态。第一阶段已经实现了，瑞士苏伊士联邦理工学院的Lukas Novotny组已把频率为140 kHz的光悬浮纳米粒子冷却到100 μK量级 [7]，对应于10个声子的量级。预计第二阶段边带冷却到量子基态也会在近几年实现。

与此同时，人们也在理论上探索制备宏观量子叠加态更高效的方案。2011年，德国马克斯-普朗克研究所的Romero-Isart等 [8] 提出基于光学腔与纳米粒子耦合实现等效的物质波双缝干涉实验。2013年，清华大学的尹璋琦等 [9] 提出通过梯度磁场耦合光束缚纳米金刚石与其内部的氮-空位中心电子自旋，如图3所示。此方案可制备质心位置的“薛定谔猫”态，并实现物质波的干涉。同年，英国伦敦大学学院的Bose组进一步提出在这个系统

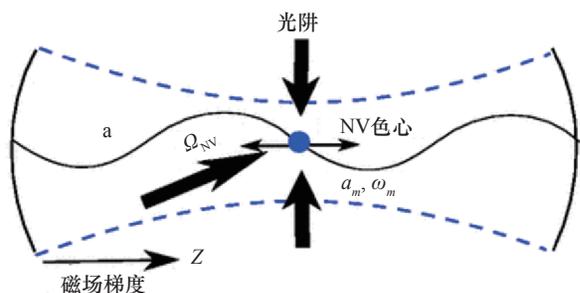


图3 制备质心位置的“薛定谔猫”态

注：a为光学腔模式； a_m 为纳米金刚石质心运动模式； ω_m 为质心运动频率； Ω_{NV} 为驱动微波场的拉比频率。

中实现物质波的 Ramsey 干涉 [10]，可将粒子质心热运动对干涉的影响消除掉。

在这些理论方案的启发下，最近几年有多个研究组在开展悬浮纳米金刚石色心的实验。纳米金刚石已经可以被悬浮在真空中，并观察到色心的电子自旋共振谱 [11]。还有实验组把掺杂了稀土元素离子的纳米晶体光悬浮在真空中，然后通过激光照射稀土离子，利用其与晶体内部声子的耦合，把纳米晶体内部的温度从室温冷却到100 K以下 [12]。

为了制备出更加稳定的宏观量子叠加态，进而完成长时间的物质波干涉实验，欧洲的50多位科学家联合起来，组成了MAQRO项目组 [13]，提出利用欧洲航天局预计于2025年发射的航空器，到拉格朗日点（日地引力平衡点）开展光悬浮纳米粒子的物质波干涉实验，有望验证引力导致的波函数塌缩等量子引力效应。如图4所示，由于拉格朗日点的引力近乎为零，且宇宙中的真空度很高，是理想的实验环境，所以物质波干涉可以持续很长时间。

从光悬浮微纳米粒子直接测量了布朗运动瞬时速度，进而验证麦克斯韦速度分布律开始，悬浮光力学系统就被广泛地用于验证热力学与统计物理，特别是非平衡态统计物理理论。由于光悬浮的粒子尺度在纳米级别，因此它可以用来实现纳米尺度的局域温度测量 [14]。最近，普渡大学与北京大学的研究人员合作，基于此系统做了一系列实验，

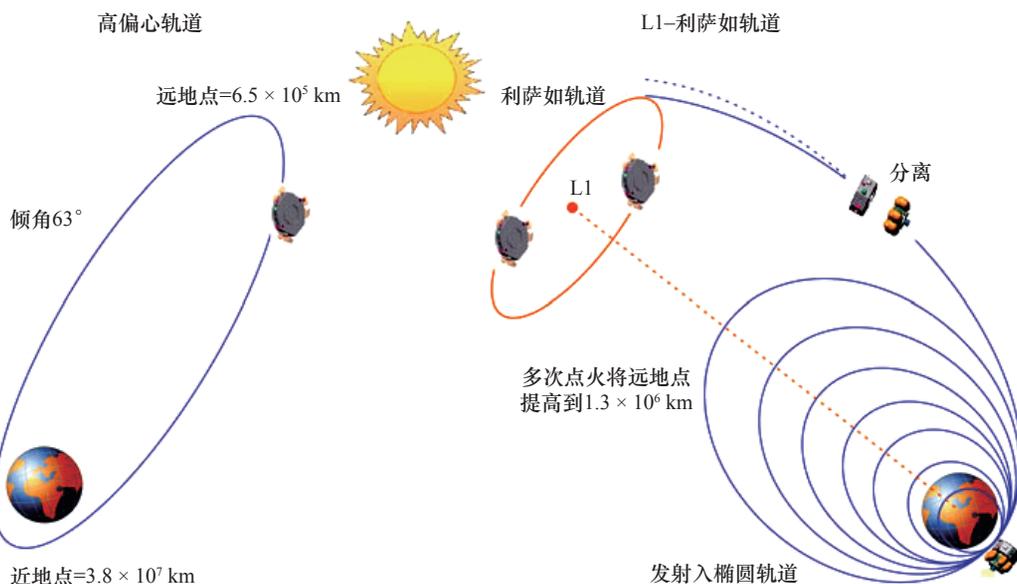


图4 发射卫星到拉格朗日点上开展物质波干涉实验

验证了非平衡统计物理的微分涨落定理和推广了的 Jarzynski 恒等式 [15], 并实现费曼棘轮实验 [16]。

三、迈向量子精密测量

作为光力学系统, 光悬浮的微纳米粒子在精密传感与测量方面可达到极高的精度。美国研究人员已经在室温下利用此系统实现 10^{-21} N 精度 [17] 的力的精密测量。这意味着此系统可以实现对单个分子质量的精密测量, 并对微小的力, 如卡什米尔 (Casimir) 力和力矩进行精密测量 [18]。悬浮光力学系统对加速度的测量灵敏度已经达到 $10^{-9}g$ (g 为重力加速度) 量级 [19], 测量稳定性达到 $10^{-6}g$ 量级, 并且实现了超过 1 个月的长时间工作, 部分实用化关键技术也取得了突破 [20~23], 这对于长时间自主精密导航技术具有重要的应用价值。

与通常的光力学系统不同, 光悬浮系统的囚禁频率完全可调, 而且其 6 个运动自由度均可与光耦合、被冷却、调控和精准的测量。因此, 它可以同时提取多个自由度的运动信息。普渡大学与清华大学合作在实验上首次观测到了光悬浮纳米金刚石的扭动模式 [24], 此系统在室温下对扭矩的测量精度有望达到 10^{-29} N·m, 可用于直接测量单个电子乃至单个核自旋在通常磁场 (如 0.1T) 下产生的扭矩。2018 年, 多个研究机构在此系统中实现了 1 GHz 的机械转子 [25], 是目前转速最快的固态转子, 有望用于实现新型的量子陀螺仪。

随着实验技术的发展, 研究人员正接近实现对悬浮光力学系统的量子基态冷却, 以及量子叠加态的制备。因此, 基于量子效应的精密测量技术也有望与悬浮光力学系统结合发展出比冷原子干涉精度更高的测量技术。比如说, 基于物质波干涉, 利用类似原子干涉仪的技术, 有望实现高精度的重力仪 [26]。由于纳米粒子的物质波波长远小于冷原子干涉仪, 可更精准地测出重力导致的相位移动, 从而使重力仪实现更加精确的测量。

四、面向惯性导航与传感探测的颠覆性技术

惯性传感技术经历了几百年的发展, 目前进入实用阶段的是机电式仪表和光学式仪表。近年来, 量子技术的理论和实践取得了突飞猛进的发展, 特

别是量子信息技术为信息科学的发展开创了新的空间, 其在惯性传感等技术领域展现出广阔的应用前景, 已成为世界强国竞相发展的前沿技术。进而发展出第三类惯性传感技术——量子式。

量子式惯性传感技术的特点是理论精度高, 目前国内开展较多研究的有两种: 一是基于冷原子干涉原理, 以冷原子重力仪、冷原子陀螺仪、冷原子加速度计为代表; 另一种是基于热原子自旋原理, 以核磁共振陀螺、无自旋交换弛豫 (SERF) 陀螺为代表。

近年来得到迅速发展的悬浮光力学是光力学与量子光学结合的产物, 为微纳机械振子的控制和测量提供了一种全新的量子方法, 也为量子操控的深入探索提供了理想平台。这种方法具有前所未有的观测精度, 可接近甚至突破标准量子极限, 在惯性与传感技术领域具有广阔的发展和应用前景, 有望形成区别于现有的冷原子干涉和热原子自旋的第三条量子惯性传感技术路线。

基于悬浮光力学的量子惯性传感技术的特点如下:

(1) 固态敏感介质。敏感介质为稳定悬浮的微纳固态介质, 可实现连续、实时和高动态测量。

(2) 超灵敏。光悬浮微纳固态介质的机械品质因数可达 10^{10} 以上, 其质心热运动等效温度可冷却至毫开以下, 因此其理论灵敏度远超经典固态惯性敏感器件。

(3) 高分辨率。分辨率极限为光子的动量反冲。如利用光悬浮 $10\ \mu\text{m}$ 直径的石英球进行加速度传感, 其单光子动量反冲为 $10^{-17}g$ 。

(4) 高稳定性。采用真空激光悬浮的微纳固态介质, 可完全避免机械支撑导致的应力时间效应这一固态传感器件的稳定性核心问题。

(5) 大量程。其传感测量的量程取决于光子动量闭环控制能力。如利用光悬浮 $10\ \mu\text{m}$ 直径的石英球进行加速度传感, 在闭环控制光功率 100 mW 的情况下, 其量程可达 10g 以上。

另外, 基于悬浮光力学系统将微纳机械振子制备到量子区域, 有望实现固态物质波干涉, 将惯性传感技术从光学干涉 (光学陀螺)、原子干涉 (冷原子重力仪、冷原子陀螺) 推进到固态物质波干涉的阶段, 对传感和精密测量领域将产生革命性的影响。

五、结语

作为近年来发展起来的一种前沿技术，悬浮光学已逐渐从基础研究走向应用，特别是对惯性传感和精密测量领域有重要的应用前景。美欧发达国家大力投入，推进研究。作为我国惯性传感技术领域探索性、创新性基础研究和前沿技术研究的重点机构，浙江大学光学惯性与传感技术国防重点学科实验室愿与国内外同行共同努力，抓住机遇，大力发展悬浮光学及其在惯性传感领域的应用研究，为推动我国惯性传感技术从机电、光学到量子的代际跨越贡献力量。

参考文献

- [1] Ashkin A, Dziedzic J M. Optical levitation by radiation pressure [J]. *Applied Physics Letters*, 1971, 19(8): 283–285.
- [2] Ashkin A, Dziedzic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(5): 288–290.
- [3] Romero-Isart O, Juan M L, Quidant R, et al. Toward quantum superposition of living organisms [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 12(3): 033015.
- [4] Chang D E, Regal C A, Papp S B, et al. Cavity opto-mechanics using an optically levitated nanosphere [J]. *The National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(3): 1005–1010.
- [5] Li T C, Kheifets S, Medellin D, et al. Measurement of the instantaneous velocity of a Brownian particle [J]. *Science*, 2010, 328 (5986): 1673–1675.
- [6] Li T. Millikelvin cooling of an optically trapped microsphere in vacuum [M]. New York: Springer, 2013.
- [7] Jain V, Gieseler J, Moritz C, et al. Direct measurement of photon recoil from a levitated nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(24): 243601.
- [8] Romero-Isart O, Pflanzner A C, Blaser F, et al. Large quantum superpositions and interference of massive nanometer-sized objects [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(2): 020405.
- [9] Yin Z Q, Li T C, Zhang X, et al. Large quantum superpositions of a levitated nanodiamond through spin-optomechanical coupling [J]. *Physical Review A*, 2013, 88(3): 033614.
- [10] Robicieux F. Comment on “matter-wave interferometry of a levitated thermal nano-oscillator induced and probed by a spin” [J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(18): 180403.
- [11] Hoang T M, Ahn J, Bang J, et al. Electron spin control of optically levitated nanodiamonds in vacuum [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12250.
- [12] Rahman A T M A, Barker P F. Laser refrigeration, alignment and rotation of levitated Yb^{3+} : YLF nanocrystals [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 634–638.
- [13] Kaltenbaek R, Kiesel N, Romero-Isart O, et al. Macroscopic quantum resonators (MAQRO) [J]. *Experimental Astronomy*, 2012, 34(2): 123–164.
- [14] Millen J, Deesuwan T, Barker P, et al. Nanoscale temperature measurements using non-equilibrium Brownian dynamics of a levitated nanosphere [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(6): 425–429.
- [15] Hoang T M, Pan R, Ahn J, et al. Experimental test of the differential fluctuation theorem and a generalized Jarzynski equality for arbitrary initial states [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(8): 080602.
- [16] Bang J, Pan R, Hoang T M, et al. Experimental realization of Feynman’s ratchet [J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20: 103032.
- [17] Ranjit G, Cunningham M, Casey K, et al. Zeptonewton force sensing with nanospheres in an optical lattice [J]. *Physical Review A*, 2016, 93(5): 053801.
- [18] Xu Z, Li T. Detecting Casimir torque with an optically levitated nanorod [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(3): 033843.
- [19] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10-ng spheres with nano-g, acceleration sensitivity [J]. *Physical Review A*, 2017, 96(6): 063841.
- [20] Shen Y, Wang J Z, Luo J Y, et al. Theory and simulation of accelerometer based on laser trap [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 543–548.
- [21] Fu Z H, She X, Li N, et al. Launch and capture of a single particle in a pulse-laser-assisted dual-beam fiber-optic trap [J]. *Optics Communications*, 2018 (417): 103–109.
- [22] Ge X J, Shen Y, Su H M, et al. Practical sensing chip based on optical trap [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0206001.
- [23] Li Z G, Shen Y, Hu H Z, et al. Simulation and measurement of stiffness for dual beam laser trap using residual gravity method [J]. *International Journal of Nanotechnology*, 2015, 12: 849–859.
- [24] Hoang T M, Ma Y, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(12): 123604.
- [25] Ahn J, Xu Z, Bang J, et al. Optically levitated nanodumbbell torsion balance and GHz nanomechanical rotor [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(3): 033603.
- [26] Yan X C, Qi Z Y. High-precision gravimeter based on a nanomechanical resonator hybrid with an electron spin, arXiv: 1807.05671 [quant-ph].