

文章编号:1005-4642(2021)01-0001-08



## 真空光镊技术与应用

田 原, 郑 瑜, 郭光灿, 孙方稳

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘 要:**真空光镊是一种能够在真空环境中稳定悬浮微纳颗粒的技术,在近十年中得到广泛关注并被研究改进,已成为能够进行精密测量、微观热力学研究以及宏观量子性探索等工作的重要物理平台.本文回顾了光镊的发展历史,介绍了真空光镊的原理、关键技术,列举了真空光镊的应用方向,最后展望了真空光镊未来的应用前景.

**关键词:**光阱;真空光镊;力学传感;宏观量子态

**中图分类号:**O436

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2021.01.001

### 1 光镊简介

光镊是一种利用聚焦光束捕获微粒的装置,由于光镊具有在操纵目标微粒时不直接接触样品,对样品损伤小等优点,使之成为生物、化学研究领域操控微粒的重要工具.2018年诺贝尔物理学奖颁发给了光镊的发明者:美国科学家阿瑟·阿什金(Arthur Ashkin),以表彰其在光镊的发明及其在生物系统的应用所作的贡献.

光镊约束微粒的能力来源于对光动量传递的控制.与光具有动量相关的记录最早可以追溯到17世纪的开普勒对彗星彗尾指向总是背离太阳的观察(图1<sup>[1]</sup>).然而其理论解释直到19世纪后,通过麦克斯韦方程组从经典电磁波的角度证明光会对反射其的物体施加光压力.虽然光具有动量,但在通常情况下由光动量传递所引起的作用太微弱,难以被直接观察到.直到1901年,列别捷夫利用扭秤装置,第一次在实验上验证了光压的存在并测量了光压力的大小<sup>[2]</sup>.1960年激光的发明拓展了光子的力学相互作用的应用前景.激光的高能量、高定向的特性使得利用光压移动微观粒子成为可能.1970年,通过对激光光束操控微观颗粒运动的研究,Ashkin发现光不仅可以

对颗粒施加平行于光传播方向的散射力,还可以施加平行于光强变化梯度方向的梯度力<sup>[3]</sup>.1986年,Ashkin利用1束紧聚焦的光束实现了对颗粒三维方向上的束缚,这种技术被人们称为光镊<sup>[4-5]</sup>.由于光镊对微纳颗粒具有出色的操纵能力,其很快得到了生物学领域研究者的关注.1987年,Ashkin进行了对多种生物样品的光镊捕获实验,包括细菌、病毒等,证明了光镊的对生物样品的无损性<sup>[6]</sup>.1994年后,Bustamante等人利用光镊测量微力的能力,表征DNA、肌动蛋白等生物大分子的机械特性以研究DNA折叠、细胞运动等的生物学现象的机理<sup>[6]</sup>.此后,光镊技术被逐步应用于单分子生物学、胶体科学等领域,并发展出愈发精细的微观操控的能力和极高的空间、时间测量精度.



图1 彗尾永远指向太阳的反方向<sup>[1]</sup>

**收稿日期:**2020-10-26

**基金项目:**挑战计划资助(No. TZ2018003-3-301)

**作者简介:**田原(1996—),男,山东枣庄人,中国科学技术大学物理学院2018级硕士研究生,研究方向为真空光镊的力学测量.

**通讯作者:**孙方稳(1979—),男,安徽合肥人,中国科学技术大学物理学院教授,博士,从事量子光学与量子信息、微纳光子学方面的研究. E-mail: fwsun@ustc.edu.cn



相比光镊技术发展早期在生物学等领域大放异彩的液体光镊,真空光镊在近 10 年来才随着实验技术的突破而逐渐发展起来,并因其独特的优势成为了引人瞩目的新兴研究领域。真空光镊的优势首先在于其能较好地隔离外界环境,捕获颗粒与环境的相互作用仅来自于与真空中残存的空气分子的随机碰撞。其次在于,利用前散射光干涉法等位置测量技术,光捕获颗粒的运动状态可以被高精度实时探测。2010 年李统藏教授首次利用真空光镊测量了布朗粒子的瞬时速度,打破了爱因斯坦认为布朗运动无法测量的预言<sup>[7]</sup>,展示了真空光镊对颗粒位置的实时高精度探测能力。而利用真空光镊的高精度位置测量能力,可以实现对力、加速度、质量等其他物理量的精密测量。比如,对极弱力测量的灵敏度理论上可以达到  $10^{-21} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ ,在实验中实现了  $\text{zN}$  级微力的探测。更有小组认为真空光镊的精密测量能力可以用于对暗物质的探测。在基础物理研究方向,真空光镊被应用于微观热力学研究。在量子研究领域,真空光镊被认为是一种研究宏观量子现象的理想平台,为了实现可观测的量子现象,人们提出了不同的真空光镊冷却方案。直到最近,已有实验小组成功实现真空光镊粒子的基态冷却,为真空光镊研究宏观相干态,引力引起量子塌缩等工作提供了可能。

## 2 真空光镊的基本原理

### 2.1 光捕获的基本原理

光捕获的基本原理来自于当捕获光场与目标颗粒相互作用时,颗粒改变了光场分布。由于光具有动量,光场分布改变时,光动量的方向、大小发生改变。又由于动量守恒,这部分改变的光动量向目标颗粒传递,以光力的形式改变了颗粒的运动状态。在特定的光场分布中,比如紧聚焦光场,存在颗粒在光场中所受光力指向稳定捕获点的情况,能够实现对目标颗粒的捕获,从而实现光镊的构建(图 2)。

在具体分析光场对颗粒的力学作用时,可以将作用在颗粒上的光力分为 2 部分:梯度力和散射力。梯度力大小正比于光场梯度  $F_{\text{grad}} \propto \nabla I$ 。通过聚焦 1 束光束,可以获得方向指向光束聚焦中心的梯度力场(图 3)。散射力大小正比于光强  $F_{\text{scat}} \propto I$ ,方向沿光束传播方向,在聚焦光场中,其

作用效果是将粒子沿激光方向推出。因此要实现粒子捕获,就需要使光束传播方向上梯度力的大小足以抵消散射力。

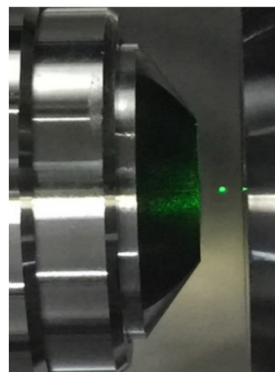


图 2 光镊捕获颗粒实物图<sup>[8]</sup>

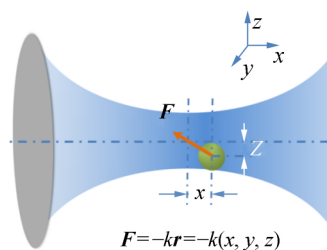


图 3 光镊梯度力示意图

在实际的光力计算中,面对不同尺寸的颗粒,为了计算上的方便可以根据颗粒尺寸与捕获光波长的相对大小关系建立不同的光场散射模型。当粒子尺寸远小于激光波长时,可以使用瑞利散射模型计算光场力。当颗粒大小远大于激光波长时,计算模型可以使用几何光学模型,而当颗粒尺寸与波长相近时,需要使用较为复杂的米氏散射模型计算光镊作用力。

### 2.2 真空光镊谐振子模型

在颗粒振幅较小时,真空光镊捕获光束对颗粒的作用力可近似为正比于颗粒位移大小的线性回复力。除了真空光镊对颗粒的作用力,粒子还会受到空气阻力以及真空环境下残存的空气分子与真空光镊颗粒随机碰撞引起的随机力(重力太小可忽略不计),真空光镊颗粒的动力学方程为

$$\ddot{x} + \Gamma \dot{x} + \Omega^2 x = \sqrt{k_B T \Gamma / M} \zeta(t),$$

其中,  $\Gamma$  为颗粒阻尼系数,  $\Omega$  为颗粒本征角频率,大小与捕获光束光强成正比;  $T$  为环境温度,  $M$  为颗粒质量。等式右边为颗粒所受随机力与颗粒

质量的比值,其中  $\zeta(t)$  为正态随机白噪声,  $\langle \zeta(t) \rangle = 0$ ,  $\langle \zeta(t)\zeta(t') \rangle = \delta(t-t')$ . 在真空环境下,光镊作用力在颗粒运动状态控制中起主导作用,颗粒在真空光镊线性回复力的作用下往复振荡. 在高真空环境下,当颗粒所受阻尼力和随机力忽略不计时,粒子将围绕平衡点做相互正交的 3 个自由度的简谐振动,某一振动维度上的功率谱为

$$S(\omega) = \frac{2k_B T}{M\Omega^2} \frac{\Omega^2 \Gamma}{(\Omega^2 - \omega^2)^2 + \Gamma^2 \omega^2},$$

其功率谱形状如图 4 所示.

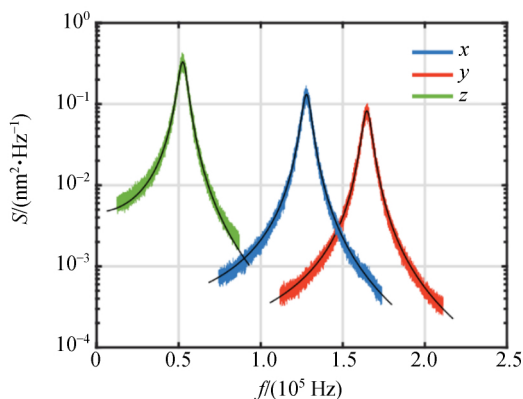


图 4 粒子的三轴位置功率谱<sup>[8]</sup>

### 3 光镊研究方法概述

#### 3.1 真空光镊结构

真空光镊装置如图 5 所示,图中 AOM 为声光调制器,用于调制光强. Dove 棱镜用于将光束旋转 90°,从而探测真空光镊颗粒 y 轴信号. 波长为 1 064 nm 的激光通过透镜扩束后进入真空腔中的物镜聚焦产生光势阱,再通过非球面镜变成平行光束,利用反射镜将前散射光沿不同方向分束进行颗粒 x 和 y 轴位置分量的测量, z 轴位置则通过后散射光分量与前散射光分量的差值信号得到. 将采集获得的位置信号传输到反馈系统中,反馈系统将位置信号处理后得到反馈信号传至声光调制器从而调节激光光强.

真空光镊系统根据功能不同可以分为以下几个部分:捕获光学系统、位置探测系统、粒子投送系统、真空系统和反馈冷却系统. 捕获光学系统主要包括捕获光的扩束和聚焦,用于形成捕获微粒用的光势阱. 位置探测系统主要包括前散射光收集和光电探测器组,用于探测粒子位置. 粒子投送系统用于粒子运送到激光聚焦中心附近. 真

空系统用于生成真空环境. 反馈冷却系统用于在高真空中提供反馈阻尼,提高光镊在高真空环境下工作的稳定性. 下面将根据具体实验流程,介绍粒子投送方法与信号校准过程.

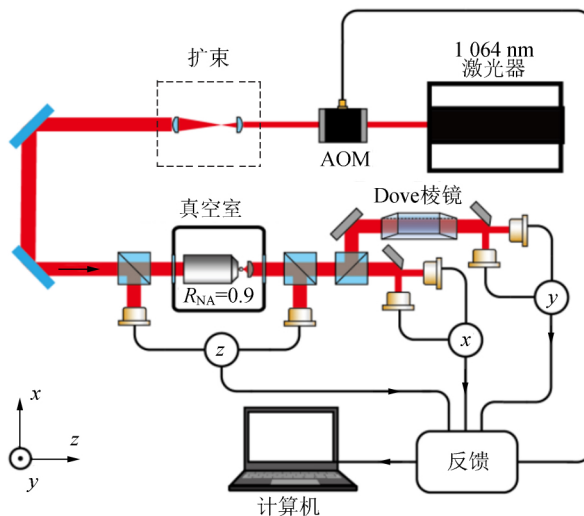


图 5 真空光镊装置示意图

#### 3.2 粒子投送

粒子投送(起支)是指将微粒送到光阱可捕获范围内的过程. 由于颗粒与承托其的基板间的范德瓦尔斯力的大小和颗粒直径的平方成反比,直径为 1  $\mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  小球所需克服的范德瓦尔斯力比自身重力还要高 7 个数量级. 比光力高 5 个数量级. 为克服范德瓦尔斯力,主要有 3 种颗粒投送方法:压电陶瓷振荡、分散溶剂雾化和脉冲激光爆轰. 压电陶瓷振荡法为利用电脉冲驱动下压电陶瓷快速收缩伸长振荡基板,产生上百 gf 的惯性力从而将粒子甩出,射入光镊中. 分散溶剂雾化法是利用超声波、压缩空气或者微孔雾化的方式将溶解有目标颗粒的溶剂雾化成微米尺寸的液滴,液滴中的颗粒在溶剂挥发后飘入光镊捕获范围. 脉冲激光爆轰法则是利用脉冲激光聚焦在目标颗粒基板上,利用激光瞬间气化颗粒下基板,气浪将颗粒推入光镊中.

不同投送方式的选择,取决于颗粒的大小、投送环境气压等条件. 比如,对于直径 1  $\mu\text{m}$  以下的颗粒通常使用雾化法,而对直径 1  $\mu\text{m}$  以上的颗粒通常使用压电陶瓷振荡法.

#### 3.3 位置信号测量

捕获颗粒的位置信号测量是真空光镊的关键技术,实现方式有很多种. 基本原理是利用对捕

获颗粒散射光的测量. 图 6(a)展示了利用透镜或光纤收集侧向散射光的位置探测方式. 此外也有用光学腔收集的方式, 未在图中展示. 图 6(b)为前散射光干涉测量的示意图, 粒子的散射光和原捕获光相互干涉, 被透镜收集后用反射镜从光束横截面中心竖直劈开, 分为水平方向上的 2 束光, 分别被平衡探测器的 2 个探头探测, 平衡探测器将 2 束光的信号做差, 差值为  $V$ , 在一定粒子偏移范围内, 粒子在图中水平方向的偏移与  $V$  成正比, 即

$$x = cV,$$

其中,  $c$  为校准系数. 通过配置不同的分光方式可以实现对颗粒的三维位置探测. 相比其他位置探测方式, 前散射光探测法利用光的干涉放大了捕获颗粒的位置信号, 在需要探测纳米级位移的真空光镊体系中是最为常用的位置探测方式.

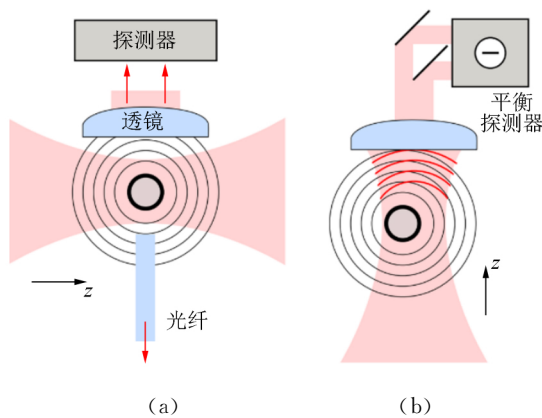


图 6 干涉测量法示意图<sup>[9]</sup>

### 3.4 信号校准

真空光镊校准指通过实验方法得到原始探测信号与颗粒实际位移之间的转换系数. 由于该转换系数设计的实验系统参量繁杂, 难以直接计算得到, 因此一般通过实验测量. 真空光镊校准对于真空光镊精密测量具有重要意义, 校准系数的测量精度将影响所测物理量的精度. 下面将介绍 3 种校准系数测量方案.

#### 3.4.1 随机力方案

根据能量均分定理, 束缚微粒每个平动自由度的平均势能为  $\frac{1}{2}k_B T$ , 即:

$$\frac{1}{2}M\Omega\langle x^2 \rangle = \frac{1}{2}k_B T,$$

其中,  $M$  为粒子质量,  $\Omega$  为粒子振荡本征角频率,

$T$  为粒子的动力学温度,  $k_B$  为玻尔兹曼常量. 在没有施加冷却时, 其等于粒子周围环境的温度. 将位置信号和电压信号的关系代入即可得到校准系数.

该方法的优点为操作简单, 缺点为得到的校准系数精度不高, 粒子质量误差是限制该方法测量精度的最主要因素.

#### 3.4.2 电场力方案

真空光镊中捕获的颗粒通常都携带有少量电荷. 在施加交变电场的情况下, 带电颗粒的动力学过程类似于受迫振动, 颗粒运动会产生频率等于外加电场的频率的运动分量, 在运动信号的功率谱上表现为在驱动力频率处存在峰值, 如图 7 所示(气压值为 0.1 Pa. 粗虚线为颗粒位置功率谱的拟合曲线, 竖直虚线为交流力的频率). 该峰值高度与电场强度和谐振子性质有关, 在已知电场强度等其他物理量的情况下, 通过对探测的电压信号的功率谱在驱动力频率附近的值进行积分处理即可得到校准系数. 该方法的好处在于适用气压范围广, 缺点在于仍然需要颗粒的质量信息, 校准精度受质量误差拖累.

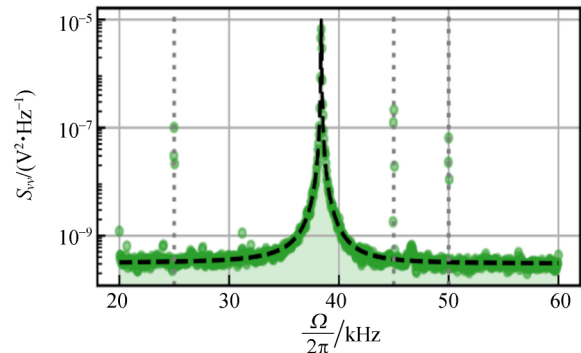


图 7 交流力作用下施加反馈冷却下真空光镊颗粒功率谱<sup>[10]</sup>

#### 3.4.3 非线性方案

通常在真空光镊中使用的捕获光束是高斯分布的, 故其生成的光势阱形状也接近高斯线性. 当捕获颗粒运动幅值较小时, 其所感受到的势阱形状接近抛物线形, 受线性回复力. 而当颗粒运动幅值较大时, 势阱形状偏离抛物线形, 回复力中出现正比于位移高次项的非线性力项, 这其中起主要作用的是三次方项.

非线性回复力对真空光镊捕获颗粒运动状态的主要影响结果表现为: 颗粒在不同振幅时的本

征频率不同,本征频率随振幅的增加而降低. 频率降幅正比于振幅平方. 通过测量不同电压信号振幅下捕获颗粒振动频率的变化,获得信号振幅与振动频率的对应关系,结合对势阱非线性的已知信息,得到实际振幅与测量信号振幅间的对应关系,从而获得校准系数.

中国科学技术大学孙方稳团队通过真空光镊颗粒的运动操控,测量不同振幅下真空光镊颗粒的非线性频移,实现了颗粒校准系数与质量的高精度测量,其质量精度与校准精度分别为 2.2% 和 1.0%,其中真空光镊颗粒校准精度是目前最高的校准精度<sup>[11]</sup>.

### 3.5 冷却

在真空光镊中,粒子的质心运动等效温度定

义为  $T_{cm} = m\Omega_0^2 \langle x^2 \rangle / k_B$ ,描述了粒子运动的剧烈程度. 在高真空下,颗粒受光子散粒噪声等的影响,其运动变得剧烈起来,捕获稳定性下降. 为了实现在高真空中的稳定捕获,质心运动温度的冷却技术在真空光镊研究中十分重要. 同时,真空光镊在宏观量子态研究方向的应用需要优秀的冷却技术支持,才能在将粒子运动冷却到基态时观测到量子现象.

冷却的基本原理为:通过某种方式,对颗粒施加与其运动方向相反的力,从而降低颗粒运动的机械能. 该外加的力被称为冷却力.

根据施加冷却力的类型或冷却原理,冷却方案可分为光动量反馈冷却、参量反馈冷却、腔冷却、静电力反馈冷却,各方案的对比如表 1 所示.

表 1 不同冷却方案对比

冷却方案	方法	$T/\mu\text{K}$	优点	缺点
光动量反馈冷却 <sup>[7]</sup>	通过额外光束的光动量传递施加冷却	1 500	思路简单	需要额外引入光束
参数反馈冷却 <sup>[12]</sup>	周期性调制捕获激光	450	装置简单,使用广泛	冷却极限温度受限
腔冷却 <sup>[9]</sup>	腔促进颗粒反斯托克斯散射	12	不需要信号反馈	装置复杂
静电力反馈冷却 <sup>[13]</sup>	外加电场力提供冷却力	100	冷却力更强	需要额外引入电场力

### 3.6 参量反馈冷却与运动操控

在上述冷却方案中,参量反馈冷却方案因为装置简单,成为最广泛使用的冷却方式.

构筑光势阱的光梯度力是保守力,在没有外力干扰时,保守力势阱中运动粒子的机械能守恒,然而守恒的前提条件是保守力不随时间变化. 由于梯度力与光强成正比,通过控制捕获光光强可以使光镊的弹性系数随着时间发生改变,机械能守恒将不再成立. 参量反馈冷却的原理是通过周期性改变光场强度来实现粒子的冷却. 如图 8 所示,参量反馈控制在粒子远离平衡位置时增强光强,在粒子靠近平衡位置时减弱光场. 从能量的角度来看,粒子振荡达到峰值处时,粒子的能量由于弹性系数的变化而减少,从而实现了粒子的冷却.

此外,除了单纯的冷却控制,如果在粒子远离平衡位置时施加强光强,靠近平衡位置时施加强光强,可以实现粒子的加热. 通过实时测量粒子的动力学温度,在参量反馈冷却与加热的共同作用下,可以实时根据颗粒的质心运动温度调控颗粒的冷却与加热,实现粒子运动幅值和能量的控

制,当目标温度设定为某一定值时,颗粒的运动类似于完美的简谐运动,如图 9 所示.

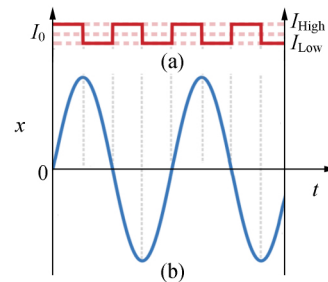


图 8 参数反馈冷却方案<sup>[8]</sup> (红色代表光场强度,蓝色代表粒子位置)

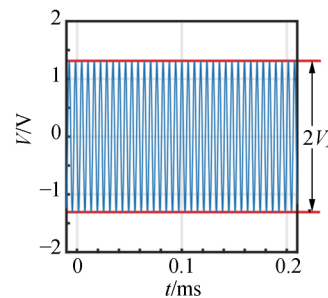


图 9 粒子操控实现近乎完美的简谐运动<sup>[8]</sup> (V 代表光电探测器探测到的信号)

## 4 真空光镊的应用

真空光镊在精密测量、宏观量子态和微观热力学研究等领域都有着广泛的应用,本节将主要从这 3 个应用方向进行阐述。

### 4.1 精密测量

由于高真空下真空光镊捕获颗粒的运动具有较长的相干时间,相比于其他纳米振荡器没有机械接触引起的损耗,真空光镊可以实现亚纳米尺寸下有关力、质量、加速度等物理量的精密测量。

#### 4.1.1 力测量

真空光镊测量交流力的原理为颗粒在外加力作用下发生的振动近似为受迫振动,在功率谱上表现为在外加力频率处存在峰值,峰值大小与力大小的平方成正比。真空光镊的力测量灵敏度为:  $F_{\min} = \sqrt{4k_B T M \Gamma b}$ ,其中  $\Gamma$  为颗粒阻尼系数,  $b$  为测量带宽。理论上可达到最高精度为  $10^{-21}$  N/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。在实验中,Ranjit<sup>[14]</sup>和 Hempston<sup>[15]</sup>分别实现了 1.6 aN/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 和 0.095 aN/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的测量精度。在真空光镊直流力测量方向上,Hebestreit 小组<sup>[16]</sup>通过测量颗粒在重力作用下自由下落过程中能量随时间的变化,分析得到粒子的重力大小,测量精度达到 aN 量级。

相比于悬臂系统等其他纳米振荡器的力学测量,光镊的优点在于可以测量卡西米尔力等短程相互作用。在实验上,Winstone<sup>[17]</sup>观测到当真空光镊带电颗粒与硅板距离只有  $\mu\text{m}$  量级时,由于静电相互作用粒子的势阱发生变化,其势阱变化和理论计算,如图 10 所示。

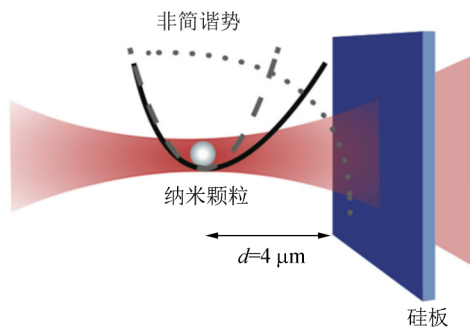


图 10 光镊测量短距离相互作用<sup>[18]</sup>

#### 4.1.2 加速度测量

根据牛顿第二定律,将颗粒所受的力除以颗粒质量可得到颗粒的加速度。真空光镊加速度测

量理论灵敏度为  $a_{\min} = \sqrt{4k_B T \Gamma b / M}$ 。加速度精密测量在惯性导航具有重要意义。超高的加速度灵敏度有望使真空光镊成为新型的精密加速度计。在实验上,Montero<sup>[19]</sup>实现了  $0.4 \times 10^{-7}$  g/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 的灵敏度,目前该灵敏度为真空光镊加速度测量最高灵敏度。

#### 4.1.3 质量测量

由于纳米颗粒的质量达到 fg 量级,传统的方法难以测量如此小的质量。除了在信号校准一节中提到的非线性力的质量测量方案,Ricci 团队利用交流电场力,实现了对真空光镊颗粒质量的精密测量。首先利用光电效应,真空光镊颗粒的电荷可以被控制和测量,在真空光镊力和交流电场的共同作用下,颗粒的功率谱在驱动力频率和本征频率处均有峰值,且峰值之比与质量成正比,再将测量得到的颗粒阻尼系数、电荷量和拟合得到的电场强度代入即可得到峰值比与质量之间的比例系数,从而得出粒子的质量。利用该方案可实现 2.5% 的测量精度<sup>[20]</sup>。除此之外,Blakemore 等人利用静态电场力和重力平衡测量 pg 级悬浮颗粒的质量<sup>[18]</sup>。

#### 4.1.4 其他测量

除了真空光镊力、加速度等动力学物理量的精密测量研究外,利用真空光镊进行温度、电荷等物理量测量的研究也有报道。Millen<sup>[21]</sup>通过分析粒子功率谱得到粒子的质心运动温度,而 Hebestreit<sup>[22]</sup>通过观察关闭冷却后粒子升温速率得到粒子本身的热力学温度。Moore<sup>[23]</sup>通过紫外线照射激发粒子产生光电效应,改变粒子带电量以探测分数电荷的存在。

## 4.2 宏观量子态

真空光镊将颗粒冷却至宏观量子基态,对研究物体在什么尺度下具有量子特性的研究具有重要意义。首先,真空光镊可以捕获亚纳米尺寸的颗粒,在该尺寸下的量子效应一直是量子领域的研究热点。其次真空光镊中的颗粒在高真空中与环境干扰隔绝,研究体系有足够长的相干时间用于量子效应的测量。因此自从真空光镊被提出以来,宏观量子态的研究一直是真空光镊领域研究的热点。在技术上,观测到宏观量子态需要将粒子冷却到量子基态附近。2019 年维也纳小组利用腔冷却首次实现了真空光镊体系的基态冷却,

其光悬浮谐振子的平均声子数低至 0.43<sup>[24]</sup>. 量子基态冷却装置如图 11 所示,  $\omega_{\text{cav}}$  为腔的共振频率, 数值上等于捕获光频率与粒子  $x$  轴本征频率  $\Omega_x$  之和.  $\omega_{\text{het}}$  为对散射光进行外差测量而引入的频率,  $\Gamma$  为光学腔的衰减速率. 捕获光照射到被捕获颗粒, 发生反斯托克斯散射, 将捕获颗粒的能量带出, 而真空腔通过控制共振频率促进该散射现象的发生, 从而实现了捕获颗粒的冷却.

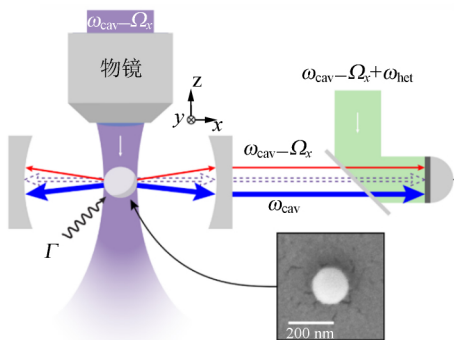


图 11 量子基态冷却装置示意图<sup>[24]</sup>

### 4.3 微观热力学

微观热力学主要研究微观粒子的随机热运动. 真空光镊是微观热力学的良好实验平台. 由于真空光镊颗粒的位置与速度可以被实时测量, 粒子的随机热运动可以被实时监控. 真空光镊中颗粒可以被长时间稳定捕获, 为热力学统计提供充足的数据. 相比于以往宏观热力学系统对多粒子统计的研究方式, 真空光镊颗粒研究利用单粒子在时间尺度上的统计, 能量、功、熵等物理量的波动大小与平均值在相近甚至大于其平均值, 因此有望在微观领域发现新奇的热力学现象. 2010 年李统藏教授利用光镊测量了布朗运动的瞬时速度, 从实验上证明了布朗运动的理论, 为今后真空光镊在微观热力学领域的研究奠定了基础. Rondin 等人利用真空光镊在实验上验证了 Kramers turnover 理论在特定阻尼范围的正确性(图 12)<sup>[25]</sup>. 此外, 通过周期性改变外力或捕获激光功率, 可以使真空光捕获颗粒处于非平衡状态. 真空光镊与外界环境的隔绝状态使非平衡状态到平衡状态的弛豫过程更缓慢也更容易观察, 因此真空光镊也成为非平衡热力学物理研究的良好实验平台. 2018 年, 李统藏小组利用真空光镊颗粒对微分波动定理进行了首次实验验证, 并且对其他非平衡理论例如 Jarzynski 恒等式也进行了实

验验证<sup>[26]</sup>.

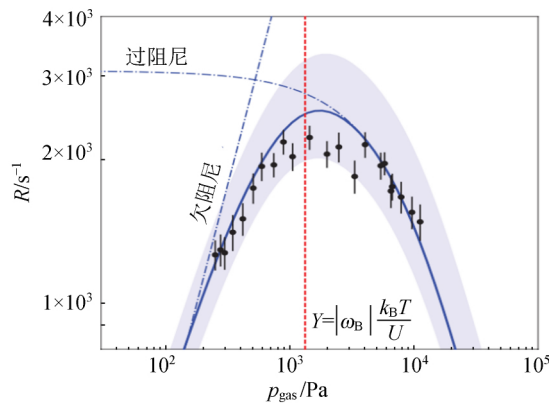


图 12 Kramers turnover 在真空光镊上的实验验证<sup>[25]</sup> (证实亚稳态的转换速率在特定阻尼系数下达到最大值)

## 5 总结与展望

真空光镊的研究近 10 年如火如荼, 方兴未艾. 随着实验技术的日趋成熟, 对真空光镊极限性能的追求成为新的技术挑战: 粒子的冷却极限能否进一步降低, 能否构建不依赖粒子冷却的高真空光镊、粒子校准精度能否进一步提高, 光镊的实验结构能否随着应用场景的需求产生新的变化, 等等. 在应用层面, 能否利用真空光镊探测到暗物质、暗能量的存在, 能否利用光镊作为运载工具和其他多能级量子系统(如金刚石氮-空位色心)结合, 这些问题都有待研究. 除此之外, 微观热力学和非平衡物理也仍有许多问题值得研究.

本文通过对真空光镊的发展历史、研究方法和应用方向的梳理, 以及对真空光镊未来的展望, 增进读者对真空光镊领域研究的了解. 作为一种极其灵敏的测量工具, 真空光镊与其他领域的结合将有望发现过往因精度有限而无法发现的物理现象, 而真空光镊宏观量子态的实现则有望为物理学基础理论——量子力学提供实验验证. 真空光镊与其他领域结合的趋势愈发明显.

### 参考文献:

[1] Jones P H, Maragò O M, Volpe G. Optical tweezers: principles and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015:1.  
 [2] Lebedev P. Untersuchungen über die druckkräfte des. liches [J]. Annalen der Physik, 1901, 311: 433-458.

- [3] Ashkin A. History of optical trap and manipulation of small-neutral particles, atoms, and molecules [J]. *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum*, 2000, 6:841-856.
- [4] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure [J]. *Physical Review Letters*, 1970, 24(4):156-159.
- [5] 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.
- [6] Ashkin A, Dziedzic J M, Yamane T. Optical trapping and manipulation of single cells using infrared laser beams [J]. *Nature*, 1987, 330(6150):769-771.
- [7] 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.
- [8] 郑瑜. 真空光镊及其反馈控制[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2019.
- [9] Delić U, Reisenbauer M, Grass D, et al. Cavity cooling of a levitated nanosphere by coherent scattering [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(12):123602.
- [10] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann R, et al. Calibration and energy measurement of optically levitated nanoparticle sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3):033111.
- [11] Ranjit G, Atherton D P, Stutz J H, et al. Attnewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high vacuum [J]. *Physical Review Applied*, 2015, 9(5):051805.
- [12] Gieseler J, Deutsch B, Quidant R, et al. Subkelvin parametric feedback cooling of a laser-trapped nanoparticle [J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(10):103603.
- [13] Tebbenjohanns F, Frimmer M, Militaru A, et al. Cold damping of an optically levitated nanoparticle to microkelvin temperatures [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(22):223601.
- [14] Zheng Y, Zhou L M, Dong Y, et al. Robust optical-levitation-based metrology of nanoparticle's position and mass [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(22):223603.
- [15] Hempston D, Vovrosh J, Toroš M, et al. Force sensing with an optically levitated charged nanoparticle [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(13):133111.
- [16] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann R, et al. Sensing of static forces with free-falling nanoparticles [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(6):063602.
- [17] Winstone G, Bennett R, Rademacher M, et al. Direct measurement of the electrostatic image force of a levitated charged nanoparticle close to a surface [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(5):053831.
- [18] Blakemore C P, Rider A D, Roy S, et al. Precision mass and density measurement of individual optically-levitated microspheres [J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(2):024037.
- [19] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10-nanogram spheres with nano-g acceleration sensitivity [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 9(6):063841.
- [20] Ricci F, Cuairan M T, Conangla G P, et al. Accurate mass measurement of a levitated nanomechanical resonator for precision force-sensing [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(10):6711-6715.
- [21] Millen J, Deesuwan T, Barker P, et al. Nanoscale temperature measurements using nonequilibrium brownian dynamics of a levitated nanosphere [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9(6):425-429.
- [22] Hebestreit E, Reimann R, Frimmer M, et al. Measuring the internal temperature of a levitated nanoparticle in high vacuum [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(4):043803.
- [23] Moore D C, Rider A D, Gratta G. Search for millicharged particles using optically levitated microspheres [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(25):251801.
- [24] Delić U, Reisenbauer M, Dare K. Cooling of a levitated nanoparticle to the motional quantum ground state [J]. *Science*, 2020, 367(6480):892-895.
- [25] Rondin L, Gieseler J, Ricci F, et al. Direct measurement of Kramers turnover with a levitated nanoparticle [J]. *Nature nanotechnology*, 2017, 12(12):1130-1133.
- [26] 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.

(下转 21 页)



## Simulating Mössbauer experiment using mossbSim

WANG Si-guang, LUO Ling-yin, JIA Chun-yan  
(State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology,  
School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The mossbSim simulation software was developed based on the Geant4 package. It could simulate Mössbauer spectra with different vibration speed range, different distance between  $\gamma$ -source and sample, different distance between the sample and the detector, and the different thickness of detector. Studying the spectra simulated with different experimental parameters, the simulation code and the data analysis code, students could understand more detail of the Mössbauer experiment, and get a preliminary knowledge of the application of the Geant4 simulation software package and the ROOT data analysis software.

**Key words:** Mössbauer spectrum; Monte Carlo simulation; Geant4 software package

[责任编辑:任德香]

(上接 8 页)

## Technique and application of vacuum optical tweezers

TIAN Yuan, ZHENG Yu, GUO Guang-can, SUN Fang-wen  
(CAS Key Laboratory of Quantum Information,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** Vacuum optical tweezer is a technique for stably suspending micro and nano particles in vacuum environment. In the past ten years, vacuum optical trap has developed rapidly, showing its potentiality in constructing macroscopic quantum state and ultra-sensitive force detection. In this article, the history of optical tweezers was reviewed, the principle and key technique of vacuum optical tweezers and its applications were introduced. Finally, an outlook on vacuum optical tweezers was presented.

**Key words:** optical trap; vacuum optical tweezers; force sensing; macroscopic quantum state

[责任编辑:郭伟]