

量子光力学

2012年7月出版的 *Physics Today* 杂志刊登了维也纳大学物理系的 Markus Aspelmeyer 教授、亚利桑那大学物理系与光科学学院的 Pierre Meystre 教授和加州理工学院应用物理系的 Keith Schwab 教授关于量子光力学的特写文章. 摘译如下:

给我一个支点,我可以用杠杆撬动整个地球.

——阿基米德

两千多年前的学者们已经理解简单的机械元件的力量,并阐述了这一自然实在的常识性的概念,如柏拉图在《理想国》中描述:“同一事物的同一部分不能同时有相反的动作或受相反的动作.”

今天的物理学研究者仍然在利用简单的机械元件认真地探索世界.但不同于其前辈,他们正准备将机械元件制备到量子区域,并挑战这一自然实在的古老观念.

两种关键的技术——纳米技术和半导体工艺——的发展开发了先进的材料和加工技术,这反过来又催生了超灵敏的微纳机械元件.这些元件可探测极其微小的力,可达到原子尺度的空间分辨率,例子见最近报道的 Casimir 力测量和单个电子自旋成像及机械探测.另一方面,量子光学和原子物理学对于与光和物质相互作用相关的力学规律已经取得了透彻的理解,包括量子力学如何限制了测量的最终灵敏度,以及量子测量施加于被测系统的反作用如何被用来控制机械系统的量子态.

量子光力学结合了两个方面:通过把光学腔或微波腔与机械共振器(机械振子)相结合,形成腔光力系统,人们获得了一种对机械运动进行量子控制或者对光或微波场进行机械控制的方法.因此,在这类系统中,量子规律可以在从纳米到厘米尺度、从毫微微克到千克范围的物体的运动中得到展示.作为一种观察和控制宏观物体量子态的腔光力系统,其观测精度接近量子极限,这种测量微弱力和场的方法具有广阔的前景.

简而言之,腔光力系统是一个包含了机械装置的光学或微波腔.其中机械装置的运动可以产生集体振动模式,其激发的量子称为声子.该系统可以被简单地作为一个光腔,而光腔一端的镜子好像是附加在弹簧上做振动.最早的光力系统是上世纪七八十年代发展的引力波探测器.它们本质上是重达数吨、光腔壁长达数公里的干涉仪(见图1).目前标准的引力波探测器可以在一秒内检测出 10^{-19} m 的位移(即位移灵敏度为 10^{-19} m/ $\sqrt{\text{Hz}}$).30多年来的引力波探测研究表明:引力波天文学是可能的;宏观物体在量子极限下的测量和操纵也是可能的.后者已越来越吸引了诸如固态物理、量子信息等不同领域的许多研究人员来寻找大型机械物体在实验上的量子行为.

在任何系统中,当热涨落的影响可忽略不计时,其量子

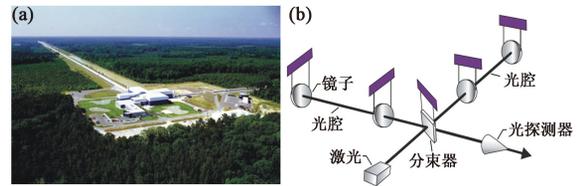


图1 美国路易斯安那州 Livingston 的激光干涉引力波观象台 (a)及其结构示意图(b)

效应最显著.因此,在理想情况下,机械元件在量子实验中初始处于所有热量子都被去除的量子基态.然而,实际上人们需要冷却机械元件,以致于其某个机械模式的平均热占据数 $N \approx k_B T / \hbar \omega_m < 1$ (k_B 是玻尔兹曼常数, \hbar 是约化普朗克常数, T 是温度, ω_m 是机械振动频率).机械元件的冷却是一个关键的实验挑战. Braginsky 在 20 世纪 60 年代就有相关的理论,其主要思想是利用与腔内光散射动量转移相关的辐射压力.他意识到,机械元件位置的改变与腔场响应之间的时间延迟会允许光场从机械系统中提取功或对机械系统做功.

以一端固定、一端为可移动的机械振子的 Fabry-Perot 腔为例,频率为 ω_L 的泵浦激光场将被机械振子调制而出现频率为 $\omega_L \pm \omega_m$ 的反斯托克斯和斯托克斯边带.仔细调节泵浦场的频率,使得与光腔失谐¹⁾,那么反斯托克斯过程会增强,从而促进从机械元件中提取能量.只要转换的光子离开光腔足够快,这个过程就可以冷却机械振子,理论上可冷却到量子基态,即 $N=0$.此时,可以在量子区域内进行光子或声子操纵.

这种边带冷却技术在实验上是 Braginsky 和 David Blair 在研究微波区域的引力波天线时为减少噪声而首次采用的.该方法实质上类似于激光冷却离子(原子)的方式.自 2004 年以来,几个实验室使用该方法在光学和微波领域冷却了微纳机械臂.今天,高品质的光力装置产生了足够强的耦合,使得质量为几皮克到几百纳克的机械臂(见图2)的运动可冷却到基态.在过去的一年里,至少有 3 种不同的微机械系统被冷却到振动基态.

美国 NIST 的 John Teufel 和 Ray Simmonds 领导的实验组采用的是一个圆形的、 $15\mu\text{m}$ 长、 100nm 厚、振动频率为 10MHz 的铝薄膜机械振子(图2(e)).薄膜与超导微波腔紧密结合.通过边带冷却,可使其热声子占据数由 $N=40$ (处于 20mK 的恒温器中)冷却到 $N \approx 0.3$.

加州理工学院的 Oskar Painter 与同事使用了 $15\mu\text{m}$ 长、 600nm 宽、 100nm 厚的硅棒(图2(b)).硅棒两端固定,中间悬浮,同时作为机械振子和光学腔.其令人感兴趣的机械模式是一个周期地扩大和缩小的呼吸模式,品质因数高达

1) 红失谐是指向长波长方向(低频方向)偏移.相反情况为蓝失谐.——译者注

10^5 . 采用初始为 20K 的低温 ($N \approx 100$), 他们使用边带冷却的方法使振子冷却到 $N \approx 0.8$, 并进而观察到了靠近基态的机械振子具有吸收声子比发射声子更显著的非对称性这一新的量子性质, 从实验上揭示了蓝失谐光比红失谐光散射更强.

加州大学圣芭芭拉分校的 Andrew Cleland 组采用的振子是一个 300nm 厚的氮化铝板材, 长 $40\mu\text{m}$ 、宽 $20\mu\text{m}$, 振动频率为 6GHz. 对于频率如此高的振子, 传统的 25mK 的稀释制冷机足以直接使其冷却到基态 ($N < 0.07$).

基态冷却之后的下一个挑战是控制量子机械谐振器的状态. Cleland 组在这个方向迈出了重要的第一步. 利用氮化铝的压电性质, 他们使机械振子与超导约瑟夫森结的量子比特耦合, 通过后者来探测单个声子的存在. 他们还第一次观察到了机械振子与量子比特间单量子交换的相干振荡现象. 最近, 加州理工学院、哈佛大学和法国格勒诺布尔市的实验室在耦合机械装置和其他各种量子元件方面取得了重要的进展.

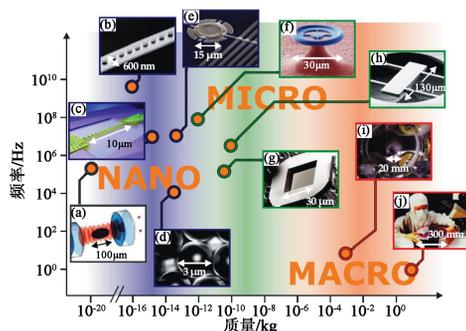


图 2 各种腔光力学装置

单量子或几个量子的控制只发生在强耦合区域, 此时机械振子与量子比特或者光场交换能量时的耗散很弱. 包括 Cleland 组在内的几个微机械装置现在已经达到了这一强耦合区域. 最后, 如此强的光力耦合将允许光与机械系统之间的高保真量子传输. 它甚至有可能产生光子与声子之间的纠缠. 相反, 声子场可以映射到一个光学模式, 从而可利用光学中的高效可靠的检测机制.

量子光力学的诱惑远远不只是简单地在“驯服”的量子系统名单中加入新的名单. 相反, 其前景是: 正如人们所知的那样, 将机械元件与腔场耦合, 我们可以使用这些相同的元件来耦合如磁性材料中的自旋或导电表面的电荷. 通过这种方式, 机械元件将充当一个普遍的传感器, 作为不兼容的系统之间的中介. 比如, 通过它, 飞行光子可以与固定的非光的量子比特连接起来. 最近, 瑞士巴塞尔大学的 Philipp Treutlein 组实现了冷原子与机械薄膜耦合的混合光力系统. 这种混合量子系统对于经典和量子信息处理和转换可能非常重要. 几个实验室正在努力使单个机械元件和光学或者微波频率的共振器发生耦合, 目的在于使超导微波电路和量子比特与量子光场结合起来.

光力学与原子物理学的结合尤其有趣. 激光冷却原子不仅激励和促进了量子光力学的快速发展, 它还导致一些新现象, 如类似于电磁诱导透明的光力诱导透明效应的发现. 该效应利用了机械振子激发路径之间的光学干涉, 可能会应用于基于腔光力阵列的光存储.

原子系统也可充当腔光力系统中的机械元件. 通过在光腔中捕获 10^5 个超冷铷原子, 加州大学伯克利分校的 Dan Stamper-Kurn 和同事使原子云与泵浦激光耦合, 从而观察到了光场量子涨落施加给原子的反作用.

机械振动量子态的产生和操控是量子计量和传感应用的重要挑战和目标. 迄今为止, 原子力显微镜和其他经典机械装置的力灵敏度已经超过 $10^{-18} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$. 尽管如此, 我们还没有达到最终极限. 目前的应用都遭受热噪声的影响, 最终还会遭受与海森伯不确定原理相关联的噪声.

幸运的是, 量子物理学提供了量子非破坏性测量方法, 该方法是由 Braginsky 和同事在 20 世纪 70 年代首次提出的. 它通常需要生成压缩态——也就是说, 把不需要但又不可避免的量子噪声限制在与感兴趣的变量相互补的变量中. 通过这种方法, 可以使其中的一个量以任意精度测量. 原则上, 把机械振子制备为几乎所有量子涨落都限制在位置或者动量分量的压缩态是可能的. 事实上, IBM 的 Daniel Rugar 和同事数年前就实现了低于热噪声极限的机械振子经典压缩态. 然而, 低于标准量子极限的机械压缩还没有实现. 一些基于 Braginsky 原始机制的、易于在光力系统中实现的方案正在积极考虑中.

虽然还处于探索阶段, 但微型机械振子将很可能提供一种检验前所未有的尺度和质量范围内的量子理论的新方式. 由于基本粒子遵循量子力学, 人们期望大量粒子的集合也应该遵循量子力学. 但这一结论似乎违反了我们的日常经验, 因为宏观世界通常遵循经典力学. 而量子光力学提供了一种很有前景的实现宏观物体的空间叠加和直接观测宏观物体如何退相干的方法. 人们正在为此而努力.

宏观机械的量子实验将面临许多艰巨的技术问题. 但我们确信未来的实验将导致对量子力学及其有效性限制更深刻的理解. 我们也确信, 未来的实验将表明, 退相干等量子力学框架内的理论和机制, 将能够描述从量子力学到经典力学的过渡. 在这个问题上, 我们将不需要引入新的物理原理. 人们从来没有如此接近能够在实验室真正解决这些深刻的问题和挑战柏拉图的自然实在的常识概念.

(北京计算科学研究中心 李勇 编译自 Markus Aspelmeyer, Pierre Meystre, Keith Schwab, *Physics Today*, 2012, (7):29, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)