

量子世界中的粒子操控——评 2012 年诺贝尔物理学奖

张天才^①, 高克林^②

① 山西大学光电研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006;

② 中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071

E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

刚刚公布的 2012 年诺贝尔物理学奖颁发给了法国巴黎高等师范学院的 Serge Haroche 教授和美国国家标准局的 David J. Wineland 教授, 以表彰他们获得突破性的实验方法, 使人们测量和操控单个量子系统成为可能. 过去数十年来, 这二位实验物理学家的主要围绕单个粒子的操控和测量, 包括原子、离子和光子, 在最基本的层面上研究场与物质的相互作用, 这是量子光学的重要内容.

研究事物之间的相互作用是物理学一个永恒的主题, 但是不同领域采取的方法却各有不同. 还原论者坚持认为只有弄清楚个体之间的相互关系, 才能获得整体的性质. 量子力学自建立以来, 为理解微观世界所发生的许多现象给出了合理的解释. 但是量子力学的许多描述和现象仍然是理想的. 翻开各种教科书, 随处可以见到粒子数(占有数)表象、无限深势阱、二能级系统与单模场作用模型、各种各样的量子态等, 这些具有漂亮解析形式的标准案例, 很长时间以来是作为一些远离实际的抽象理论或者数学结果, 躺在教科书中, 供物理系学生理解和练习量子力学. 而大部分学生对那些算符和量子态还是一头雾水. Serge Haroche 和 David J. Wineland 的工作以及自 20 世纪 80 年代以来量子光学取得的一系列重要实验进展, 慢慢地把这些躺在教科书中的抽象案例变成了物理现实, 帮助我们确认了那些在微观世界发生的想象, 是完全可以用量子力学描写的物理实在, 同时带来了一些意外的潜在应用.

量子现象非常脆弱, 因为连真空涨落都会使其衰减到经典世界, 而真空是无处不在的. 世界上哪里有一个孤立的二能级系统和 Fock 态存在, 供我们演示他们之间的相互作用呢?

有两个根本的困难: 第一, 必须把单个粒子从外部世界中孤立出来. 一片树叶之所以不显示量子性就是因为那些组成树叶的原子是一体的宏观物体. 一旦粒子融入外在世界, 其量子性质便会消失. 一个针尖上的原子与其说是一个原子, 不如说是那个原子与针尖上的其他原子相互作用的宏观系统. 实际上, 在量子力学建立起来的很长时间里, 没有人看见过单个孤立的原子, 因此连 Schrödinger 这

样的物理学家甚至对“原子”的真实存在也心存疑惑. 实验物理学家必须发明一些精巧的办法, 把单个粒子从环境中分离出来. 第二, 如何保证在对分离出来的单个粒子进行操控和测量时, 不要把它弄死了. 就是说需要保证孤立出来的粒子保持它的本来面目而不破坏它. 当把一片树叶抓在手上仔细观察, 再放回原处, 对这片树叶毫无影响, 但是能把一个光子抓在手上观察它, 再放回原处吗? 这件事情以前简直连想都不敢想. 因为传统上, 观察一个光子, 不管是这个光子打到一个探测器, 还是进入人的视网膜, 都是必须死掉的. 就是说单个光子的测量一定是破坏性的测量, 就像是要确认一只鞭炮的好坏, 必须点燃它一样. 因此必须发明一种量子的非破坏性测量手段^[1].

自 20 世纪 80 年代, Serge Haroche 和 David J. Wineland 就开始单粒子操控方面的实验研究, 他们以单个光子、原子和离子为对象, 完成了一系列量子操控和测量方面的工作, 解决了上述看起来无法解决的困难. 他们分别在不同的系统上展示了克服上述问题的巧妙的实验技术和方法, 展示了微观世界复杂离奇的现象, 让我们感受到了一个越来越真实的量子物理的许多基本方面.

Haroche 研究组的主要工作围绕一个超导微波腔^[2,3]. 这个微波腔具有极高的品质因子, 可以把一个微波光子囚禁在腔内长达 100 ms, 该光子会在腔壁上来回反射, 飞行 4 万公里还保持存活. 为了消除环境辐射的影响, 这个腔被冷却到 1 K 左右. 实验把制备好的铷原子送入该腔内, 跟微波光子发生作用. 他们完成了许多漂亮的工作, 如原子辐射的腔增强效应^[4]、量子退相干^[5]、量子纠缠和介观薛定谔猫态的退相干现象^[6]、Fock 态光场以及量子反馈等^[7], 演示了若干量子信息过程, 如光子存储以及将光子和原子作为“量子比特”的量子逻辑门操作等. 这里我们只举一个让人惊讶的例子: 他们第一次看见了一个光子但是没有弄死它(Seeing a photon without destroying it!)^[8]. 简单说来(实际过程稍微复杂一些), 他们的办法是先把一个里德堡原子制备到某个特殊的状态, 这个原子被注入微波腔内, 微波腔中如果有光子, 会使穿越腔的原子的状态发生

一个微小的相移(phase shift), 这个相移的多少取决于有没有光子. 原子穿越腔的过程中没有发生任何光子的交换(吸收或者发射). 最后, 他们通过测量飞越微波腔的许多原子是否有相移, 实现了“看见”腔内有一个光子但是没有破坏它. 这种测量叫量子非破坏测量. 微波腔与原子的作用也被美国加州理工学院的 Kimble 和德国马普量子光学实验室的 Remppe 等人扩展到光频区, 并且与冷原子技术结合, 使腔量子电动力学系统成为量子光学中研究物质与场(包括真空腔)相互作用的重要平台. 这方面的研究激发了后来其他相干系统, 如电路 QED、光-微机械动力学、表面等离子激元等方面的研究.

Wineland 研究组的主要工作围绕囚禁离子开展. 囚禁离子是利用具有特定构型的静电、静磁和射频场将带电离子约束在超高真空中, 使被研究的原子体系处于几乎孤立的、不受外界“干扰”的环境, 特别是单离子的囚禁, 可以免于碰撞效应的影响, 获得很长的囚禁时间以便“观察”, 是研究原子特性的理想手段. 利用目前发展的激光技术, 人们可以精确操纵原子内部的能级, 使电子非常准确地不同原子能级间跃迁. 如采用 Doppler 冷却、可区分边带冷却等原理实现囚禁离子的逐步冷却, 使其振动幅度逐步减小. 单个离子的囚禁和超冷离子的实现, 最终获得了处于“静止状态”的孤立体系, 通过与激光的作用, 可开展各种非经典态和量子逻辑门的实验研究. 他们完成了一系列漂亮的工作, 继离子的激光冷却以后, 1989 年实现了单个离子冷却到其质心运动基态^[9], 处在量子化状态的超冷离子呈现出明显的非经典性质, 由此可以验证量子力学的基本理论, 揭示微观世界中的新现象. 1995 年利用冷却到零点能的单个 Be^+ 离子成功演示了量子逻辑门^[10]; 1998 年实现了两个超冷离子的单重和三重 Bell 纠缠态, 后来拓展到四离子纠缠, 展现了囚禁离子用于量子计算的可扩展性^[11]. 他们还利用少离子体系和激光脉冲的作用, 产生了薛定谔猫态^[12]; 用重构和 tomographic 技术, 在位置-动量空间测量了负值的 Wigner 函数, 并实现了物质粒子间的量子隐形传态. 这些工作为研究非经典态的特点和演化提供了很好的实验例证. 可以设想, 随着微加工技术、激光技术的飞速发展并同 NMR 和固体的结合, 加上新近发展起来的量子纠错以及其他的量子载体的提出, 有望很好地推进量子

计算和量子信息的发展.

由于激光冷却、冷原子物理(1997 年和 2001 年诺贝尔物理学奖)和光的量子行为的研究以及锁模飞秒激光技术(2005 年诺贝尔物理学奖)的发展, 原子分子光谱的测量精度将会进一步提高. 特别是光频的精密测量导致了原子光频标的迅速发展. 2005 年 Wineland 把量子逻辑门的技术用于离子光频标, 采用协同冷却, 实现了 Al 离子的冷却, 同时利用量子逻辑读出, 得到了世界上最精确(不确定度为 8.6×10^{-18})的时钟^[13]. 2008 年通过对 Hg 离子和 Al 离子光钟频率的精确测量和比对实验, 实现了对精细结构常数 α 时间变化率的确定^[14]; 2010 年通过对两个 Al 离子光钟频率的精确测量和比对, 实现了对相对论时间延缓效应的检验^[15]. 基于光频的精密测量, 可以为基础科学研究和高技术应用(天文学观测、等离子体诊断、激光通讯和量子信息)等领域的发展提供所需的高精度原子分子数据, 也是检验物理学基本规律、测量基本物理常数的精密实验手段. 同时会用于国际时间基准、全球定位系统、航天卫星导航和网络信息安全等, 使得人们对自然界的认识和理解有可能产生新的飞跃.

两位科学家使用的系统看似不同, 但是方法很类似. Haroche 利用中性原子来测量和控制腔中的光子, 而 Wineland 利用光来捕捉、控制和测量带电的原子. 两位科学家通过对光与原子、离子、腔的作用的长期实验研究, 开辟了操控和测量单量子系统的方法, 让我们清晰地看到微观世界发生的状态叠加、纠缠、互补性和退相干等一系列量子物理的基本现象, 把量子力学奠基者们设想的一些“思维实验”真正搬进了实验室. 与此同时, 他们开拓性的方法, 为精密测量、量子操控和量子信息等迈出了关键的一步.

最近几年, 国内也有若干大学和研究机构开展了单量子系统操控方面的实验研究, 包括单离子频标^[16,17]、中性单原子操控以及光频区单原子与微光学腔强耦合腔量子电动力学^[18,19]等方面的实验研究, 并取得了重要进展. 国家自然科学基金委员会重大研究计划“单量子态的探测及相互作用”以及科学技术部国家重点基础研究发展计划和“量子调控”基础研究发展计划也在支持这方面的理论和实验研究.

- 1 Guerlin C, Bernu J, Deléglise S, et al. Progressive field-state collapse and quantum non-demolition photon counting. *Nature*, 2007, 448: 889–893
- 2 Haroche S, Raimond J M. Cavity quantum electrodynamics. *Sci Am*, 1993, 268: 54–62
- 3 Haroche S, Kleppner D. Cavity quantum electrodynamics. *Phys Today*, 1989, 42: 24–30
- 4 Goy P, Raimond J M, Gross M, et al. Observation of cavity-enhanced single-atom spontaneous emission. *Phys Rev Lett*, 1983, 50: 1903–1906
- 5 Deléglise S, Dotsenko I, Sayrin C, et al. Reconstruction of non-classical cavity field states with snapshots of their decoherence. *Nature*, 2008, 455: 510–514
- 6 Gleyzes S, Kuhr S, Guerlin C, et al. Quantum jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity. *Nature*, 2007, 446:

297–300

- 7 Sayrin C, Dotsenko I, Zhou X, et al. Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states. *Nature*, 2011, 477: 73–77
- 8 Nogues G, Rauschenbeutel A, Osnaghi S, et al. Seeing a single photon without destroying it. *Nature*, 1999, 400: 239–242
- 9 Diedrich F, Bergqvist J C, Itano W M, et al. Laser cooling to the zero-point energy of motion. *Phys Rev Lett*, 1989, 62: 403–406
- 10 Monroe C, Meekhof D M, King B E, et al. Demonstration of a fundamental quantum logic gate. *Phys Rev Lett*, 1995, 75: 4714–4717
- 11 Blatt R, Wineland D. Entangled states of trapped atomic ions. *Nature*, 2008, 453: 1008–1015
- 12 Monroe C, Meekhof D M, King B E, et al. A “Schrödinger cat” superposition state of an atom. *Science*, 1996, 272: 1131–1136
- 13 Schmidt P O, Rosenband T, Langer C, et al. Spectroscopy using quantum logic. *Science*, 2005, 309: 749–752
- 14 Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, et al. Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks: Metrology at the 17th decimal place. *Science*, 2008, 319: 1808–1812
- 15 Chou C W, Hume D B, Rosenband T, et al. Optical clocks and relativity. *Science*, 2010, 329: 1630–1633
- 16 Huang Y, Cao J, Liu P, et al. Hertz-level measurement of the $^{40}\text{Ca}^+ 4s\ ^2\text{S}_{1/2}$ - $3d\ ^2\text{D}_{5/2}$ clock transition frequency with respect to the SI second through the Global Positioning System. *Phys Rev A*, 2012, 85: 030503(R)
- 17 Huang Y, Liu O, Cao J, et al. Evaluation of the systematic shifts of a single- $^{40}\text{Ca}^+$ -ion frequency standard. *Phys Rev A*, 2011, 84: 053841
- 18 Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Elimination of the degenerate trajectory of a single atom strongly coupled to a tilted cavity TEM_{10} mode. *Phys Rev A*, 2011, 83: 031804(R)
- 19 Zhang P F, Guo Y Q, Li Z H, et al. Temperature determination of the cold atoms based on single atom countings. *J Opt Soc Am B*, 2011, 28: 667–670