

探测和操纵量子世界中的个体

——2012 年诺贝尔物理学奖科学贡献评述

孙昌璞 李 勇 张 芑

大家知道，微观物体通常表现出完全不同于经典物体运动的量子行为，其根本特征是具有波粒二象性：实物微观粒子会像光波、水波一样，具有传播、干涉和衍射的波动行为，这就是所谓的物质德布罗意波；光也会像实物粒子一样具有特定的动量和能量，与实物粒子碰撞遵守能量-动量守恒定律。然而，微观粒子通常和外部环境发生相互作用，外部的随机运动，甚至宏观观察者和测量仪器都会破坏物质波的位相，使得人们很难观察到位相导致的量子相干效应。另一方面，日常所见中的宏观物体虽然是由大量服从量子力学规律的微观粒子组成的，但由于其空间尺度远远大于这些微观粒子的德布罗意波长，不同个体的统计涨落会平均掉每个微观组元的物质波位相的一致性，使得日常宏观体系只能表现出经典行为。因此，量子物理预言的许多看似古怪的新奇现象无法被直接观测，科学家只能通过思想实验，在理论上研究原理上可以表现出来的新奇现象及其逻辑含义。

人们有两种途径观察量子相干效应：1. 从复杂体系中孤立出单个微观粒子，并能够对其波函数(包括振幅和位相)进行精密探测；2. 在极端条件下，把大量粒子协调一致，制备在单一量子态上。大量粒子的位相和谐匹配可以形成宏观量子态，超流、超导和玻色-爱因斯坦凝聚是这方面的典型例子。通过这两种方法剔除多态的混合和环境影响导致的位相随机性，据此纯化单光子、单电子、单原子和单分子乃至特定复合粒子，使得它们展现出丰富的量子效应。当单个微观粒子从它们周围的环境中分离出来，不与外部世界耦合，或大量粒子相干群聚于单一量子态放大其量子效应，神奇的量子特性就会异彩纷呈，展现在经典宏观世界之中。

2012 年诺贝尔物理学奖授予了法国科学家塞尔日·阿罗什(Serge Haroche)和美国科学家大卫·维因兰德(David Wineland)，首先是表彰他们在上述第一个方面的贡献。他们建立了测量和操纵单个量

子体系的、有基础性突破的实验方法，使得保持、观察和利用离子、原子和光子的各种量子力学性质成为可能。维因兰德及其合作者针对囚禁冷却离子发展的多普勒冷却和边带冷却(sideband cooling)技术，也促进了中性原子光冷却技术的发展，对最后实现冷原子的玻色-爱因斯坦凝聚(大量原子凝聚于基态形成宏观原子)作出了实质性的贡献。他们之所以同时获奖，可能是他们研究工作有共同特点：把离子、原子和光子分别约束在不同类型的小空间中——如约束在非均匀电磁场形成的势阱和由两个镜面形成的微腔驻波场中，且描述它们运动的理论核心可以简化为二能级体系和谐振子模式的相互作用(图1)。



图1 维因兰德和阿罗什工作的共性：

- (a) 维因兰德把Be离子囚禁在基频为2.5 MHz的离子阱中，利用激光对跃迁频率为GHz的离子进行量子操纵；
- (b) 阿罗什用单光子限制在品质因子高达 4×10^{10} 的微波腔体中，光子和跃迁频率为51 GHz的Rb原子发生量子相互作用

一、维因兰德的主要科学贡献

现年 68 岁的维因兰德出生于美国，现任职于美国国家标准局(NIST)和科罗拉多大学波尔得分校。他主要研究离子的量子相干控制，其具体贡献是发展囚禁离子的多普勒冷却与边带冷却的理论和实验技术，并利用囚禁离子实现了高精度的时间标准——光钟。

囚禁带电离子的研究在 20 世纪 70 年代就开始

了。早在 1989 年，保罗和德莫尔特由于发展了离子囚禁技术就获得了诺贝尔物理学奖。控制离子运动的重要步骤是多普勒 (Doppler) 冷却。1978 年，维因兰德等和诺伊豪泽尔 (Neuhauser) 等首次按照自己提出的理论方案在实验上成功地用激光冷却了镁离子。几乎同时，人们独立采用相同的原理实现了中性原子的多普勒冷却。

维因兰德和他在美国国家标准局的合作者将离子限制在电磁势阱中，并用频率稍低于离子跃迁频率的激光相对离子的运动方向射向待俘获的离子 (图 2)。离子处在静止状态时，它只吸收频率等于其跃迁频率的光子；当离子迎着激光照射的方向运动时，多普勒效应会使得离子感受到的激光频率会变大，当离子感受到的有效激光频率与离子的跃迁频率刚好匹配的时候，离子就会吸收光子。由于光子和离子的动量方向相反，离子吸收光子之后其运动速度会降低从而被冷却。冷却效应会一直持续下去，直到被激光的加热效应所抵消。然而源自原子每次随机地在各个方向辐射和吸收光子时产生的反冲效应而引起的加热效应，在有激光存在时总会出现。后来，人们发展了克服这种加热效应对多普勒冷却技术的限制，实现了离子和中性原子更低温度的冷却，最终实现了原子的玻色-爱因斯坦凝聚。

囚禁离子所用的离子阱处于超高真空环境中，且同时使用了静电场和振荡电场。有些阱中仅仅囚禁一个离子，有些阱则囚禁了线性排列的多个离子。囚禁离子存在空间振荡运动，在低温下，这种空间

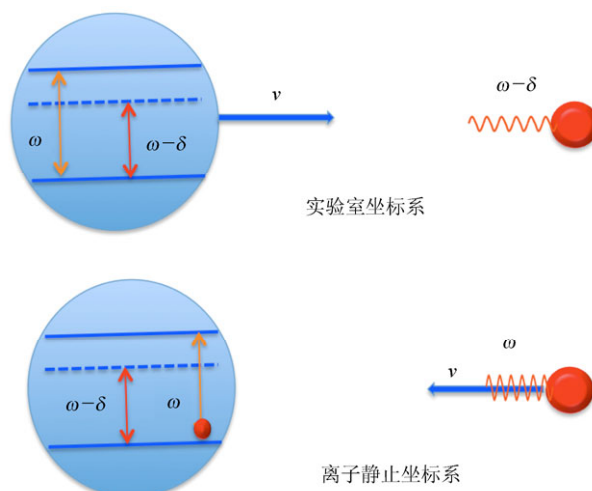


图 2 多普勒冷却原理：运动的离子吸收迎面飞来的、频率略低于其跃迁频率的光子，降低自己的动量。因为在运动坐标系中来看，由于多普勒效应，光子的表现频率升高到正好和离子发生共振

运动可以展示出量子化效应。因而，囚禁离子具有两种自由度对应于量子化的能级：描述空间运动自由度的振动模式 (外态) 和描述离子内部自由度的电子能级 (内态)。这些能级能够通过光吸收或者光辐射耦合，也可通过两光子过程的拉曼跃迁耦合。根据这些特点，控制离子量子态的重要环节是使用维因兰德等人提出的边带冷却方法把离子冷却到能量最低的基态。图 3 表明了离子能级结构： $|g=D\rangle$ 和 $|e\rangle$ 表示内部电子能级， $v=0, 1, 2, \dots$ 表示外部振动能级。边带冷却技术是通过激发离子、增加其内部能量以降低其振动能量。具体过程如下：使

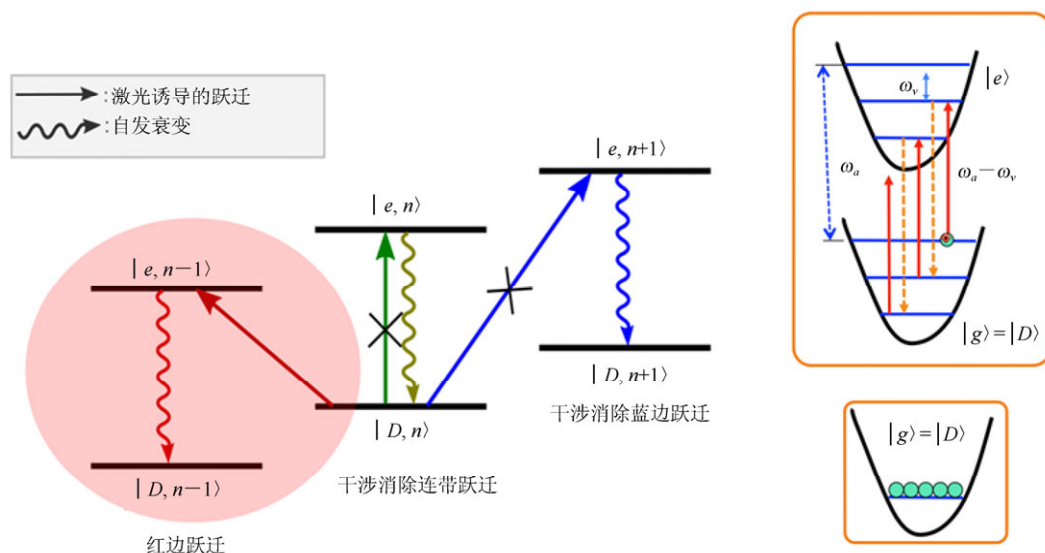


图 3 边带冷却：通过激发离子，增加其内部能量以降低其振动能量

用一个频率为 $\omega_a - \omega_v$ 的窄带宽激光(ω_a 为离子内部电子能级差, ω_v 是离子振动频率), 会将电子处基态 $|D\rangle$ 、振动处“ $v=n$ ”振动态的量子态激发到电子处激发态 $|e\rangle$ 、振动处“ $v=n-1$ ”振动态的量子态, 后者由于电子能级的快速衰变从而变到电子处基态 $|D\rangle$ 、振动处“ $v=n-1$ ”振动态的量子态。最终, 这一过程将会使得离子冷却到电子处基态 $|D\rangle$ 、振动处“ $v=0$ ”振动态的量子基态。

边带冷却的方法首先由维因兰德等提出, 用于囚禁离子的基态冷却。后来这一方法也被用于冷却中性原子的空间运动。最近, 这一方法也被用于微纳机械振子的冷却, 并在实验上实现了微纳机械振子的基态冷却。

在维因兰德和他在美国国家标准局的合作者的系列研究的推动下, 极端精准的时钟标准应运而生, 有望成为未来新型时间标准的基础。当前人们采用铯原子钟作为时间校准和测量标准, 这样的标准的铯原子钟工作在微波频率。维因兰德领导的研究组使用囚禁离子建立了比铯原子钟的时间精度高出一百倍的时钟。离子钟工作在可见光频率, 因此也称为光钟。目前的光钟标准达到 10^{-17} , 也就是说, 如果用于测量在宇宙大爆炸以来直至今今天长达 137 亿年的宇宙时间, 光钟的时间测量误差仅有 5 秒。他们的光离子钟利用了单离子的窄的(禁闭)能级跃迁结构, 因此对于扰动不敏感。这样的离子要有较大的能级跃迁, 以便用于其有效冷却和探测。维因兰德他们发展了一种基于两离子纠缠的叫做量子逻辑光谱学的新技术。这种光钟技术使用了不同类型的两个离子。其中的一个离子作为时钟, 另外一个用于在不破坏量子态的情况下读出时间。采用这样精确的时间测量技术, 一些优美的自然现象就能被观测到。比如他们利用这种光钟可以测量非常微弱的相对论效应, 如对于时速仅为几千米物体的时间延缓, 或者高度相差 30 厘米的两点之间重力势的差别。

二、阿罗什的主要科学贡献

法国法兰西学院(Collège de France)的物理学家阿罗什是一位出生于摩洛哥的法国犹太人, 他师从 1997 年诺贝尔物理学奖得主科恩-塔努基(Claude Cohen-Tannoudji), 主要研究领域是量子物理及其对量子信息的应用, 对微腔量子电动力学(cavity quantum electrodynamics)实验研究作出了

重要贡献。阿罗什的科学工作是多方面的, 很难用一个或少数的典型工作来代表。他最重要的工作包括: 观察到微腔中单原子自发辐射被明显增强, 利用微波腔实现了对单个原子的囚禁, 单个光子的量子非破坏测量, 直接证实了微腔中的场量子化, 直接观察到渐近量子退相干现象, 在原子系统中实现了光子存储, 产生原子-原子、原子-光子的纠缠态, 实现了将光子-原子系统的量子逻辑门操作。需要指出的是, 他所有这些工作, 都是在他 30 年坚持不懈搭建的一类精密的微腔量子电动力学系统上进行的(图 4)。

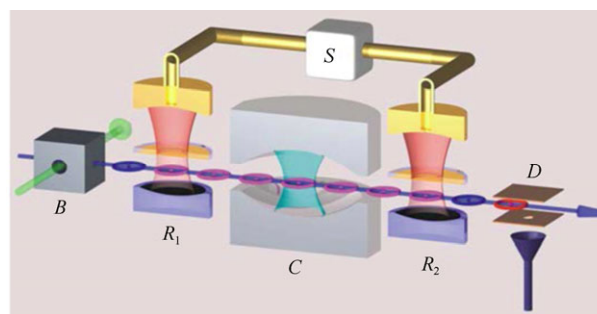


图 4 阿罗什小组构建的一类精密的微腔量子电动力学系统

微腔量子电动力学旨在研究单原子和单光子水平上的光和物质相互作用。这是小量子系统操控技术的一个重要组成部分。尽管人们在 20 世纪初期就已经认识了光子, 但是在自由空间中, 单个光子和单个原子的相互作用非常微弱, 难以探测。因此, 长期以来, 人们在实验上都只能研究原子和包含大量光子的强光之间的相互作用。20 世纪 80 年代, 物理学家们借助微加工技术, 得以在实验室中利用两面反射率极高的镜子构造一个体积很小的微腔。微腔中光场的能量密度非常高, 于是单光子和单原子的相互作用也就变得很强, 能够被有效地观察和控制。从此, 微腔成为人们研究少量光子和原子相互作用的有力工具。微腔量子电动力学也由此诞生。

微腔量子电动力学实验方面取得的第一个显著成果, 是观测到了微腔对原子自发辐射的影响。1946 年, 美国物理学家珀塞尔(E. Purcell, 1952 年诺贝尔物理学奖得主)曾经从理论上预言了这个效应。1985 年和 1987 年, 克莱普纳(Kleppner)小组和阿罗什小组先后从实验上观测到了微腔对腔中原子自发辐射的抑制。此后的二十余年中, 科学家们对微腔中原子和光子的量子行为和量子态操控进行了深入的探讨。在此方向上, 阿罗什及其小组作出了一

系列重要的贡献。

阿罗什小组实验中使用的装置如图 4 所示。这套装置由三部分构成。第一部分是图中 C 处的微腔，它由上下两面镜子构成。镜子的间距在 2.7 cm 左右，根据驻波条件，微腔中的光子处在微波频段。由于镜面本身存在弧度，光子被约束在图中天蓝色的区域中。镜子本身用超导材料制成，并被冷却到 0.8 K 左右的低温下。此时，镜面的反射系数和品质因子（Q 值）都非常高。这使得微腔中的光子寿命很长，很难漏出腔外。在阿罗什小组的实验中，微腔中的品质因子可以达到 4×10^{10} ，光子寿命可以达到 130 ms。

实验装置的第二部分是铷原子（图中一个个不同颜色的扁平小圆圈）。在阿罗什小组的实验中，铷原子的内部状态可以处在主量子数为 50 和 51 的两个高里德伯态（分别记为 $|e\rangle$ 和 $|g\rangle$ ）。这些铷原子从图中 B 处的原子源发出，它们依次穿过微腔。通过速度选择装置，人们可以精确控制原子空间运动的速度。由此也就控制了每个原子通过微腔的时间，即原子与微腔中光子相互作用的时间。

实验装置的第三部分是原子内部状态的制备和测量系统。它包括图中的 R_1 、 R_2 处的经典光腔和 D 处的量子态探测器。在实验中，原子在进入 C 处的微腔前，先要穿过 R_1 处的经典光腔。此时，该腔中的经典激光会和原子的内部状态耦合，从而把原子制备在 $|e\rangle$ 和 $|g\rangle$ 的任意叠加态上。原子离开微腔之后，会穿过 R_2 处的经典光腔后进入 D 处的探测器。利用这两个装置，人们对原子离开微腔后的内

部状态进行测量。

1990 年，阿罗什及其合作者指出，利用上述系统，可以实现对微腔中光子数的非破坏测量（图 5（a））。这是因为，当微腔中的光子的频率和原子两个内态 $|e\rangle$ 和 $|g\rangle$ 之间的跃迁频率存在一定差别（大失谐）时，光子不会引发原子在这两个状态之间的跃迁，但 $|e\rangle$ 和 $|g\rangle$ 之间的相对位相却会因为光子的存在而改变，而变化的大小则和微腔中的光子数成正比。由于原子和光子之间存在这类“非破坏有效耦合”，光子依旧会影响原子量子态的演化，相应原子演化之后的量子态将携带光子的信息。

1996 年和 1997 年，阿罗什小组利用这套装置实现了所谓“薛定谔猫”并演示了量子退相干的动力学过程。在这些实验中，微腔中的量子光场充当了“猫”的角色，并被预先制备在相干态上。而原子则在一开始被制备在一个叠加态 $(|e\rangle + |g\rangle)/\sqrt{2}$ 上面。在原子穿过微腔的过程中，原子不发生内态的跃迁，但这两个内态 $|e\rangle$ 和 $|g\rangle$ 却会使腔场经受不同的演化，变成“猫态” $|D\rangle$ 和 $|L\rangle$ 。于是，原子穿过腔场后，原子和腔场整体的量子态就是一个纠缠态 $(|e\rangle |D\rangle + |g\rangle |L\rangle)/\sqrt{2}$ 。实验最后用 R_2 处的经典光腔和 D 处的量子态探测器探测系统的拉姆西（Ramsey）干涉条纹。如果微腔最初被制备在真空态上，就会有 $|D\rangle = |L\rangle$ 。此时阿罗什小组得到一个理想的拉姆西干涉条纹。如果量子微腔预先制备在较大的相干态上（有大量光子），具有较大差别的“猫态” $|D\rangle$ 和 $|L\rangle$ 产生，拉姆西干涉条纹必为腔

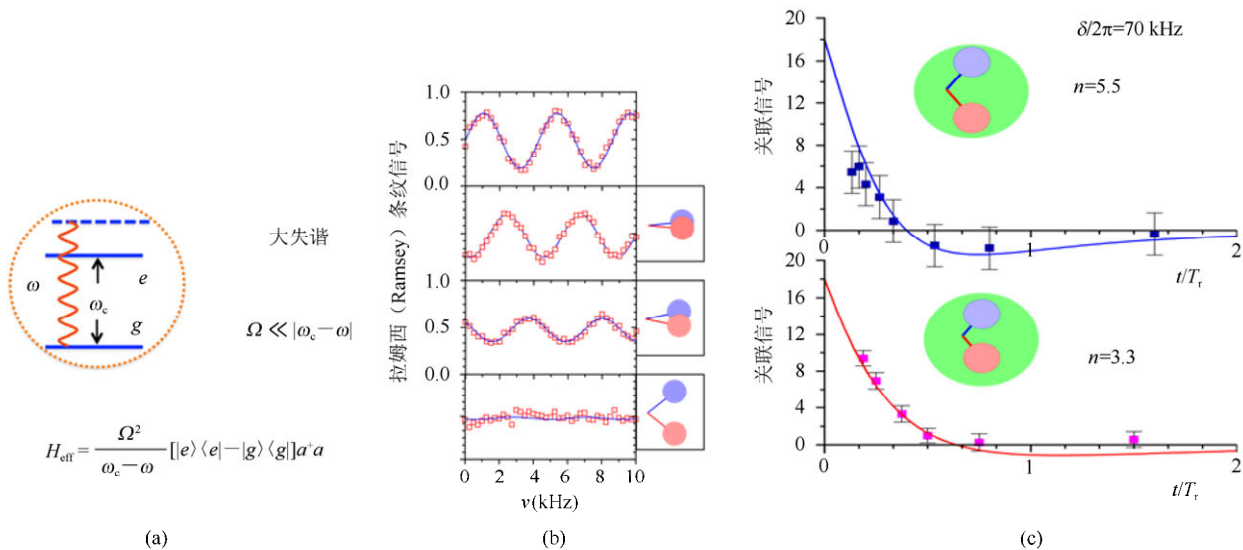


图 5 (a) 阿罗什小组利用微腔光场和原子能级的大失谐，产生非破坏有效耦合 H_{eff} ；(b) 它既可以导致对微腔中光子数的非破坏测量，也可以通过拉姆西干涉给出光场“猫态” $|D\rangle$ 和 $|L\rangle$ 描述的渐近退相干的观测；(c) 展示介观退相干的动力学

场的量子纠缠所破坏(图 5(b)和(c))。当微腔中累计的光子数越来越多,腔场变得越来越宏观,则作为重叠积分的退相干因子 $D|L$ 会变得越来越接近于零。当原子完全退相干,拉姆西干涉条纹完全消失。2008年,阿罗什小组在实验上实现了这个想法,并以此为基础演示了量子芝诺效应。

以上述工作为代表,最近的20年中阿罗什小组在微腔量子电动力学方面完成了一系列出色的理论和实验研究。这些工作在量子光学、量子力学基本问题和量子信息等方面都具有很重要的意义和很高的潜在价值。

三、共同关注量子物理的基本问题:

薛定谔猫态的产生

量子物理中的一个核心问题是量子世界与经典世界的边界。为了挑战量子力学的哥本哈根诠释,薛定谔描述了一个关于宏观物体——猫的思想实验:薛定谔的猫被放在一个与周围环境完全隔离的箱子内。这个箱子内有一瓶致命的氰化物,并由一些放射性原子的衰变控制。如果原子衰变,则氰化物被放出,猫被毒死;如果原子不衰变,则氰化物不会被放出,猫还会活下去。放射性衰变遵循量子力学定律,可以处于发射和未发射的叠加状态。因此,猫、氰化物以及放射性原子作为一个宏观的整体,可以处于“原子衰变、氰化物放出、猫被毒死”和“原子不衰变、氰化物不放出、猫活下去”的叠加态。我们注意到,从宏观性的角度说,“猫”和“猫、氰化物以及放射性原子构成的整体”没有本质的区别。因此,在很多讨论中,为了方便,常常用猫来指代将上述整个宏观系统,于是思想实验中结论就被描述成“猫可以处在死和活的叠加态”。如果观察猫的状态,猫会“随机塌缩”到出现死或者活两种结果中的一种,这种显然违背常识的佯谬使得哥本哈根诠释面临严峻挑战。薛定谔认为,如果关于量子力学测量的“哥本哈根解释”对宏观物体(猫)也是有效的,猫的死活就不再是一种独立于观察者主体的客观存在,而是依赖于观察者测量的结果。这种有悖常理的“薛定谔猫佯谬”本质是在提问:为什么在通常情况下,不存在宏观物体量子效应(即宏观态的相干叠加)?

20世纪八九十年代的系列研究工作,用量子退相干的观点,对薛定谔猫佯谬和宏观物体的退相干问题给出了初步的物理解答。概括地说,组成宏观

物体的微观粒子的无规运动,以及所处的环境的随机涨落,都会与宏观物体(薛定谔猫)的集体自由度纠缠起来。随着环境的自由度或组成宏观物体的粒子数增多,与之相互作用的薛定谔猫的集体自由度必出现量子退相干,使得薛定谔猫的量子相干叠加名存实亡。通过具有许多内部自由度的大分子干涉实验,有可能对这个基本问题的理解给出直接的实验检验。



图6 “薛定谔猫佯谬”——揭示量子世界与经典世界的边界根本问题的思想实验

维因兰德和阿罗什分别设计了关于薛定谔猫的精巧实验。维因兰德小组借助于边带冷却方法将囚禁离子基态冷却,通过适当的量子操控方法,将囚禁离子制备在薛定谔假设的多粒子叠加态上,并详细观测了这一行为实际上是如何导致量子状态的塌缩并失去其叠加特性的。而在上面提到的阿罗什小组的微腔实验中,对微腔态用里德伯原子的布居数拉姆西干涉进行探测,呈现了另一个表面上难以理解的、称为纠缠的量子效应。纠缠也是在薛定谔质疑哥本哈根诠释时提出来的,它描述了可以发生在两个或多个微观个体之间、彼此没有直接接触,却可以读取或影响对方的属性的非定域现象。微波场中的光量子态和里德伯原子的纠缠,并映射到猫的死活两态。进一步,阿罗什小组借助于第二个原子,又观测到了光场和第一个原子构成的整体,从量子叠加态到被完全定义的经典物理态的过渡(图5(b))。

四、量子物理的应用:用离子、原子和光子实现量子计算

经典计算机的迅速发展要求集成电路不断地走向更小的尺度,最近英特尔发布了22纳米处理器。然而,物理学家却认为,基本物理定律会从根本上限制“摩尔定律”的预言伴随着芯片尺度越来越小,

计算机速度高速增长，传统芯片工业迟早会遭遇量子力学和热力学定律给出的发展瓶颈。在超小的原子尺度上，量子力学描述的波粒二象性会使得逻辑状态完全依赖于传统电路中电子流动的传统计算机面临着挑战。

这一挑战恰恰是量子计算机发展的巨大优势。量子计算是基于量子力学基本原理，通过先进的量子操作和控制技术，完成信息的处理。在这里信息的载体是量子态：如果粒子的一种基本状态表示为 0，另一种基本状态表示为 1，一个粒子就可以同时表示为 0 和 1 某种叠加，记作一个量子比特。量子比特态的叠加性、相干性和非定域性等特点使得量子计算在原理上具有经典计算无法比拟的优势，可以极大地提升信息处理的效率，比如量子并行、量子纠缠等，将赋予量子计算更为强大的、经典信息过程无法完成的功能。量子计算的两比特逻辑门（受控非门 CNOT）的实现，实际上就是将两个量子比特纠缠起来的过程。维因兰德曾与人合作为《科学美国人》撰写一篇题为《用离子进行的量子计算》的文章，其中写道：“通常，有 N 个量子比特的计算机可以同时处理 2^N 个数值进行操作。若每个原子储存 1 个量子比特，300 个原子所能存储的数值就会比宇宙中的粒子总数还要多。”在这样的量子计算机面前，许多现有的电子密码安全体系将不堪一击。

然而，粒子一旦与外界环境耦合，所储存的量子信息的量子相干性就会迅速消失。因此，在通常情况下，量子信息不易长久保存。另外通过量子测量实现数据读取也会破坏量子比特的量子优势，这会使得量子计算机也存在先天不足。这里还存在很多技术问题，如果一个或两个量子比特的演示实验能够成功，可否扩展到更多量子比特的系统？量子比特需要绝对隔离外界环境，保持量子相关性，进行有效的量子计算，然而怎样使得它们和外界交流、读出它们的运算结果？面对这些问题，为了实现实用的量子计算，人们既要“测量和操控单个粒子”量子态，又不“破坏其量子性质”。维因兰德和阿罗什的工作使得人们向这一以前认为不可企及的目标迈出了重要的一步。

维因兰德小组借鉴了希拉克（J. Cirac）和佐勒（P. Zoller）的思想，用四根平行柱子间的交变电场制成一个“深井”，然后将一串离子囚禁其中。接着，维因兰德小组用激光将离子冷却到振动能量最低的

状态。离子间的静电排斥力使得离子的空间和内部运动状态关联起来。于是，维因兰德就实现了一个“量子门”。这里量子比特用离子的超精细内部能级来编码，离子的量子比特之间通过质心运动耦合。据此，1995 年他们基于囚禁离子首次做了两量子比特逻辑门操作的实验。此后，人们开展了大量囚禁离子量子计算的研究。今天人们实现了多达 14 个量子比特的囚禁离子系统，研究了一系列逻辑门操作和方案。这些研究工作大大推动量子计算机的研究。对比 20 世纪电子计算机发展，量子计算机的最终成功将会带来一场更大的新技术革命。

总之，在过去的 30 多年里，量子物理学发展经历了一个蓬勃发展的新阶段。不仅量子力学自身有一些深刻观念的提出和演进，而且从微观世界到宏观世界人们都观测到了各种新奇的量子效应。单粒子量子态的构筑和探测技术的发展，使得人们成功地实现了过去为揭示量子力学本质而提出的各种理想实验。特别是量子理论与信息和计算机科学交叉，产生了新兴的交叉领域——量子信息学。通过向实用化推进，量子信息学有可能引发新的技术革命，最终克服上面描述的芯片尺度极限对计算机科学发展的物理限制。阿罗什和维因兰德关于测量和操纵单个量子体系的研究工作正是置身于这样一个发展潮流。他们引领和推动了领域的发展，并因而获得了 2012 年诺贝尔物理学奖。

（孙昌璞，李勇，北京计算科学研究中心 100084；张芑，中国人民大学物理系 100872）

