

2012年诺贝尔物理学奖:大卫·维因兰德*

严马可[†] 金奇奂

(清华大学交叉信息研究院 量子信息中心 北京 100084)

2012-11-06收到

[†] Email: ummark89@yahoo.com.cn

DOI: 10.7693/wl20130401

The 2012 Nobel Prize in physics and David Wineland

Mark Um[†] Kihwan Kim

(Institute for Interdisciplinary Information Sciences, Center for Quantum Information, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要 文章介绍了大卫·维因兰德由于找到了能够测量和操控单个量子系统的突破性实验方法,特别是由于他在离子阱方面的贡献,而与塞尔日·阿罗什共同获得了2012年的诺贝尔物理学奖。大卫·维因兰德带动了离子阱技术的发展,在量子计算方面为量子物理开辟了一片新天地。他还通过实验研究使原子钟达到了前所未有的精度。文章简述了大卫·维因兰德研究离子阱的历史,介绍了他在以离子阱技术为基础的量子计算方面和离子原子钟的发展方面所取得的科研成果。

关键词 诺贝尔奖, 维因兰德, 离子阱, 量子信息, 原子钟

Abstract The 2012 Nobel prize in physics was awarded to David Wineland, together with Serge Haroche. David Wineland received the prize for ground-breaking experimental methods that enabled the measurement and manipulation of individual quantum systems, especially systems with trapped ions. He improved a trapped ion system and opened a new quantum world leading to quantum computation. He also realized optical atomic ion clocks with unprecedented precision through his experimental research. This article briefly reviews the history of trapped ion systems, the development of trapped-ion based quantum computation, and the development of the atomic ion clock, which are closely related to Wineland's achievements.

Keywords Nobel prize, David Wineland, trapped ion, quantum information, atomic clock

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CBA00300; 2011CBA00301; 2011CBA00302)、国家自然科学基金(批准号: 61073174; 61033001; 61061130540)资助项目

1 引言

在离子阱领域，很多人期待大卫·维因兰德(David Wineland, National Institute of Standards and Technology)获得诺贝尔物理学奖。当笔者向维因兰德的至交好友门罗教授(Prof. Chris Monroe, University of Maryland)问及维因兰德能否被授予诺贝尔物理学奖时，他回答说：“我们一直在等待(We are always waiting for it)”。远早于人们实现了用激光冷却中性原子，维因兰德已经成功地用激光冷却带有电荷的原子，即离子。除了原子带有电荷以外，离子冷却在原理上与中性原子的冷却几乎无差别，因此当1997年朱棣文教授(Prof. Steven Chu)、菲利普斯博士(Dr. William Phillips)和科恩塔诺季教授(Prof. Cohen Tannoudji)凭借在这方面的成就获得诺贝尔物理学奖时，很多人都认为将维因兰德排除在外是不公平的。其实，维因兰德是一位对名誉或奖赏不太在乎的科学家。尽管在他二三十年的学术生涯中取得了众多突破性的科研成就，但笔者从没见过他在发表那些令人称奇的研究成果时很兴奋，他只是淡然地描述实验结果。最终，他因为在研究测量和操控单个量子系统的突破性实验方法方面的卓越贡献而与阿罗什教授(Prof. Serge Haroche)共同获得了诺贝尔物理学奖。

诺贝尔物理学奖委员会在“Advanced Information”^[1]中更详细地说明了阿罗什与维因兰德的获奖理由。维因兰德通过捕获与观测单个原子，进一

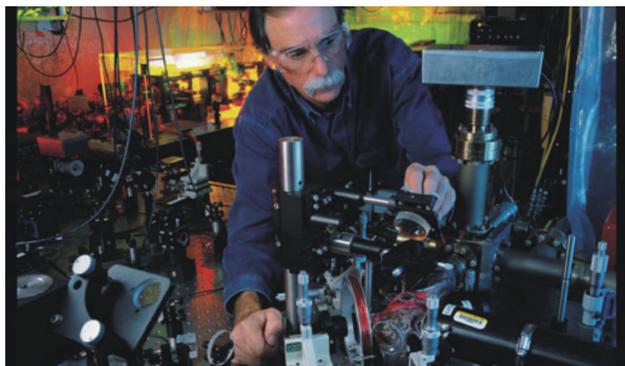


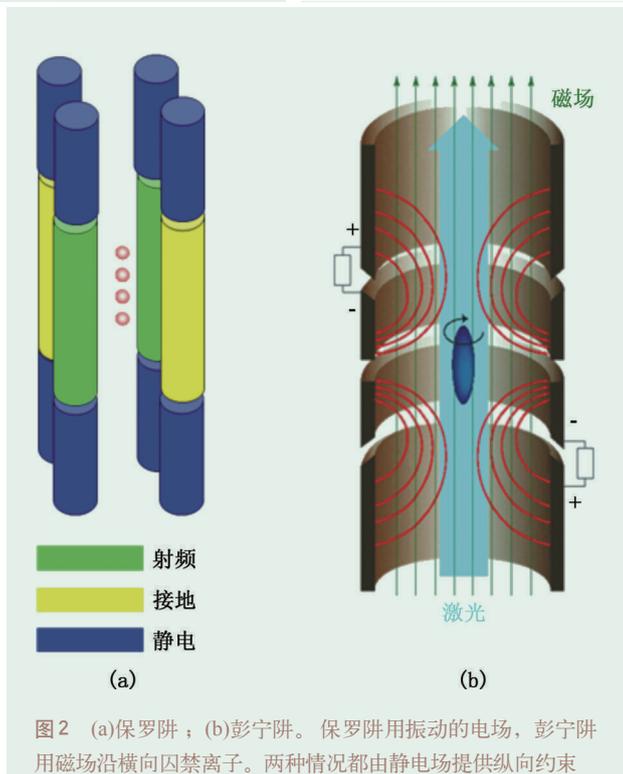
图1 在实验室工作的维因兰德博士

步发展了由保罗教授(Prof. Wolfgang Paul, 1989年诺贝尔物理学奖得主)和德默尔特教授(Prof. Hans Dehmelt, 1989年诺贝尔物理学奖得主)开始的离子囚禁技术。他还制备了多种量子态，奠定了实现量子计算机的基石，并制出了目前世界上最精密的原子钟。从某种意义上讲，这个奖项并不是针对他某个特定的实验成果，更多地是对他一生积累的整个科研成就的肯定(见图1)。

本文将以维因兰德的研究成果为核心，回顾离子阱的研究历史、离子量子计算机的发展以及离子原子钟的进步，并对这些方面的未来的研究课题进行展望。

2 离子阱的研究历史

仅用静电场无法做到的离子阱，现今大体有两种方法可以实现。其一是由保罗教授发展起来的利用振动电场的保罗阱(Paul Trap, 见图2(a))，另一



个是由德默尔特教授开发的利用磁场的彭宁阱(Penning Trap, 见图2(b))。利用振动电场或磁场囚禁带有电荷的粒子这个想法虽然看起来简单,但保罗教授和德默尔特教授正是因此而获得了1989年的诺贝尔物理学奖。德默尔特教授在德国哥廷根大学攻读博士学位期间与保罗教授有过短暂的合作。当时保罗是哥廷根大学的讲师,据德默尔特回忆,当时保罗任教的实验科目相当有趣^[2]。

之后,德默尔特教授去了美国,在西雅图的华盛顿大学度过了大部分余生。维因兰德博士在华盛顿大学(Univ. of Washington)攻读博士后期间与德默尔特教授一起发展了离子阱装置。此后维因兰德博士搬到了美国国家标准与技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST),在那里成功地实现了用激光对粒子的冷却,这在整个原子分子物理领域尚属首次^[3]。维因兰德博士曾经对笔者说过,实现原子冷却是他科研生涯当中最艰难的时期。他还说,多普勒冷却技术成功之后,研究所就开始支持他做任何想做的项目。他的贡献正是体现在捕获和观察单个原子的实验领域^[4]。

单个离子(a single ion)囚禁的成功,拉开了使

用这项技术的崭新的分光学的序幕。之后,维因兰德领导的实验组观测到了使测定单原子内部态(internal states)变为可能的量子跳跃(quantum jump)现象^[5]。紧接着,在内部态之外,他们还用线宽很窄的激光将原子的外部态也冷却到了势能最低的态^[6]。离子阱装置从开发之初就被用来精密测量原子质量以及获取g因子的准确数值。此时发展的分光学实验,尤其是量子跳跃现象,与频率梳(frequency comb)技术(2005年诺贝尔物理学奖)一起成为实现最精密的光学原子钟(optical atomic clock)的基础。将原子的外部态冷却到势能最低态之后,又产生了之前从未想到过的量子计算机方面的应用。维因兰德教授也说过,自从量子计算机的构想建立起来之后,离子阱的实验变得非常有趣。

3 量子计算机与维因兰德

对量子计算机的本质性关心始于绍尔教授(Prof. Peter Shor, MIT)有效地解决了普遍认为不可能做到的大数的因式分解之后^[7]。然而在此之前也陆续出现过设想,认为量子计算机在量子货币(quantum money)和量子模拟(quantum simulation)方面可以提供比经典力学高出一个级别的效率。最近的研究也表明,即使是为了维持计算机的计算复杂度理论(computational complexity theory)体系不致崩溃,量子计算机在计算性能上必须要超越一般计算机^[8]。量子计算机在特定问题上比传统计算机更加卓越已经得到了公认,然而其界限在哪里,仍没有人给出明确的答案。也可以说,此次维因兰德博士是因为他开始具体实现量子计算机的开发而被授予了诺贝尔物理学奖。

到现在为止,离子阱实验装置(trapped ion system)在各个方面距离量子计算机的具体实现最为接近。单看可以生成简单纠缠态的量子比特(qubit)数,离子阱是14个,光子是8个,超导系统是3个^[9]。并且据笔者所知,有关囚禁1万个以上量子比特的计算机的庞大计划也正在进行当中^[10]。近来学者们普遍认为,如果量子计算机可以实现其他计算方法不能实现的功能,即可称之为实际的量子计算机。根

据这种观点, 制造出控制大约 40—50 个量子比特的系统装置是一个重要门槛。正如图 3 所示, 这一目标的实现似乎已经为期不远了。

维因兰德博士及其同行已于 1995 年开始了这项工作。1995 年, 佐勒教授(Prof. Peter Zoller)与西拉克教授(Prof. Ingusio Cirac)提出了用离子阱制作 CNOT 门的想法^[1]。同一年, 维因兰德博士的实验组就用实验验证了他们的设想^[2]。西拉克教授与佐勒教授的 CNOT 门的描述如下。CNOT 门由 2 个原子比特构成, 对应的真值表如图 4(a)所示。普遍共识是, 只要有一个 CNOT 门和单量子比特(single qubit)门, 就可以实现所有量子演算。不仅是 CNOT 门, Z 门在这种意义下也是一种通用的(universal)门(单原子比特门与 CNOT 门可以实现 Z 门, 反之亦然)。

将离子的两个内部态当作一个原子比特($|0_e\rangle$, $|1_e\rangle$), 在外部态谐振子上把基态 $|0_m\rangle$ 和第一激发态 $|1_m\rangle$ 当作另外一个量子比特, 可以画出图 4(c)所示的能级图。这里的核心部分是外部态 $|0_m\rangle$ 为基态, 下面不再有其他态存在。为了制备 Z 门, 需要一个仅与内部态 $|1_e\rangle$ 连接的辅助电子态(auxiliary electronic state, 以下简称 AUX)。适当调节激光的频率, 使得 $|1_e, 1_m\rangle$ 态与 $|AUX, 0_m\rangle$ 态之间发生迁移。在此状态下, 如图 4(c)所示, 只有 $|1_e, 1_m\rangle$ 态与 $|AUX, 0_m\rangle$ 态之间产生拉比振荡(Rabi oscillation), 其余 3 个态才不会受到这路激光的任何影响。适当调整激光作用的时间, 使粒子重新回到 $|1_e, 1_m\rangle$ 态, 这样就只有 $|1_e, 1_m\rangle$ 态拥有 -1 相位, 其余 3 个态保持不变。以上就是西拉克与佐勒教授设想的核心。最后再补充一点, 将外部振动态用作量子比特以增加比特数, 目前还面临很多的制约, 因此要使用其他离子的内部态。单纯使用外部态量子比特替换一个原子的内部态量子比特的操作即可实现这一点。由于在离子阱装置中所有离子的外部态都是共享的, 从原理上可以用此方法实现任何原子之间的 CNOT 门, 与离子量子比特个数无关。

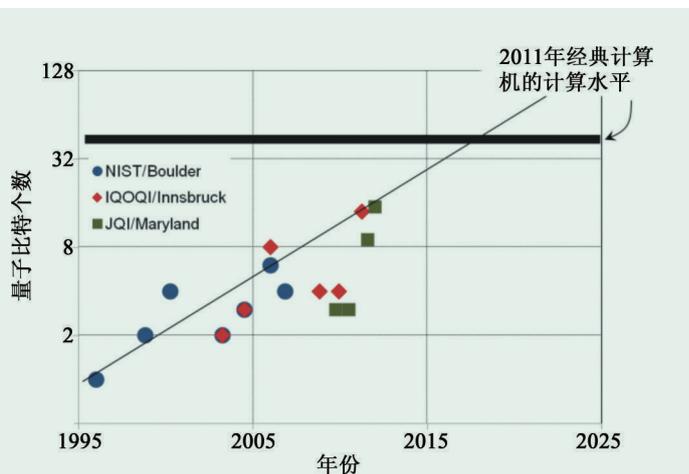


图 3 纠缠态离子量子比特个数随时间的增加

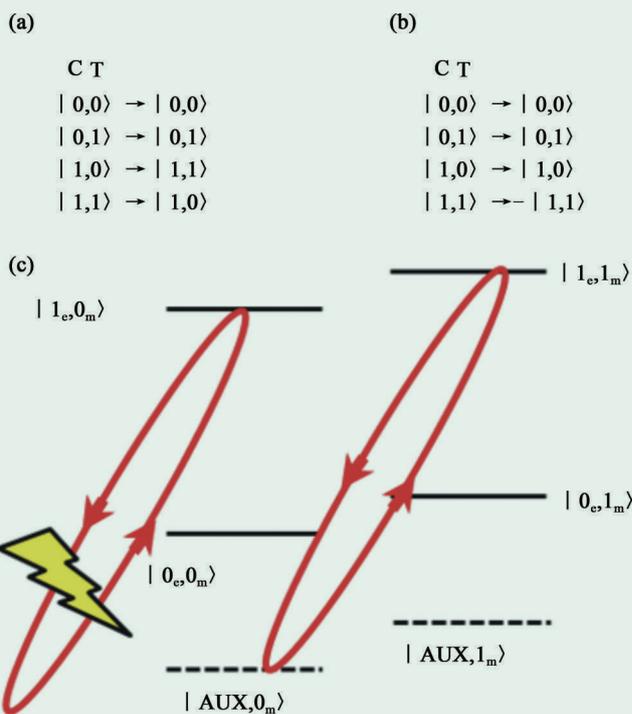


图 4 每个门对应的真值表 (a)CNOT 门; (b)Z 门; (c)用离子阱实现的 Z 门

利用两个离子制备的 CNOT 门已于 2003 年由因斯布鲁克大学的布拉特教授(Prof. Rainer Blatt, Innsbruck)的实验组实现^[13]。

然而由于实验上的若干限制, 西拉克与佐勒教授所提议的门近来几乎不再使用。之后, 由摩尔莫教授(Prof. Klaus Molmer, University of Aarhus)与索伦森教授(Prof. Anders S. Sorensen, The Niels)

Bohr Institute)提出的其他概念的量子门在离子阱实验组中被广泛使用。这个门被称作MS门,它缓和了实验技术上的很多制约,例如,不需要把外部态降低到基态,不需要激光光束精确射到离子就可以运作等。维因兰德博士实验组也利用MS门分别于2000年和2005年制作出了对应4个原子比特(见图5(a))和6个原子比特的门^[14]。因斯布鲁克大学实验组实现的14个原子比特纠缠态^[9]以及误差最小的CNOT门^[15]都利用了这个门的原理。

MS门虽然有它的长处,但随着原子比特个数增加其性能骤减。仅用这个门将量子计算机的量子比特数增加到几十个存在根本上的局限。最大的问题在于,这种门只使用一个正常态,量子比特数增加会造成振动模式构造复杂化,增大门的误差。为了解决这个量子计算机开发过程中遇到的问题,维因兰德博士实验组于2002年提出了量子电荷耦合器件(quantum CCD)方案(见图5(b))^[16]。精确操控小规模离子,并按照存储领域和控制领域的不同来增加量子比特数,这确实是一个很出色的计划,但实际实验过程中存在着很多预想不到的难关。维因兰德博士实验组为了实现这个设想,花费了10年以上的时间,投入了巨大的精力和努力,但直到最近才开始发表出了些许成果(见图6)^[17]。量子计算机的最终实现仍有很长的路要走。除了本文提到的内容之外,维因兰德博士实验组还为离子量子计算机的实现开辟了重要道路。在维因兰德博士的主页(<http://www.nist.gov/pml/div688/grp10/index.cfm>)上可以获得更多的信息。

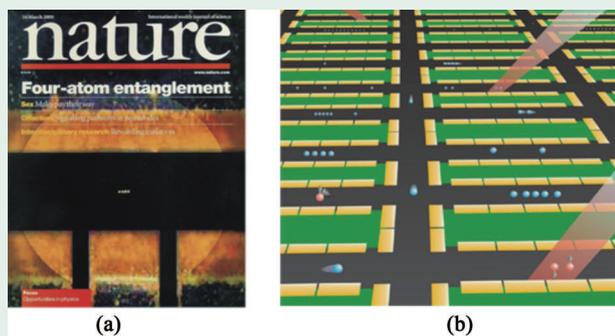


图5 (a)实现4个量子比特纠缠态的*Nature*杂志封面; (b)展示实现量子计算机方法的*Nature*杂志论文

4 量子钟与维因兰德

在成为量子计算机的强力候选者之前,离子阱装置已经是世界上最精密的原子钟的平台,而这也同样是通过维因兰德博士的研究实现的。虽然现在由铯(Cs)原子的9 GHz微波跃迁(microwave transition)提供世界标准时间,然而利用光学跃迁(optical transition)的原子钟(atomic clock)和离子钟(atomic ion clock)的测量精度超越标准原子钟已经有相当一段时间了(见图7)。下一代的标准将利用光学迁移的离子还是原子仍有待观察,但维因兰德博士实验组的铝离子($^{27}\text{Al}^+$)钟成功地进行着世界上最精密的测量。最近发表的铝离子钟的精度小于 10^{-17} ^[18],使用精度小于 10^{-17} 的时钟,从宇宙生成至今产生的误差只有5s左右。因此,检查这个时钟的精确程度的唯一方法就是再做一个同样的时钟与之进行比较^[18]。

正是有了如此高的测量精度,最近观测到了有关速度与地面高度的相对论效应。大家知道,按照特殊相对性效应移动的物体的时间走得较慢,一般相对性效应物体的时间速度随加速度和重力强度的不同而变化。以10m/s的速度移动的物体的时间以 1×10^{-15} 的比率缓慢走动,在地球上,每升高30 cm的高度引起的重力变化带来 0.5×10^{-16} 的时间

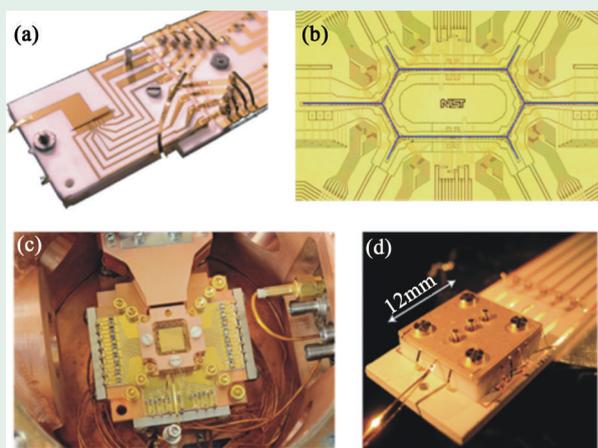


图6 维因兰德博士实验组为开发量子计算机研发出的离子阱装置 (a)使用最久的离子阱; (b)为囚禁500个以上离子的离子阱; (c)低温离子阱; (d)用来连接光子的离子阱

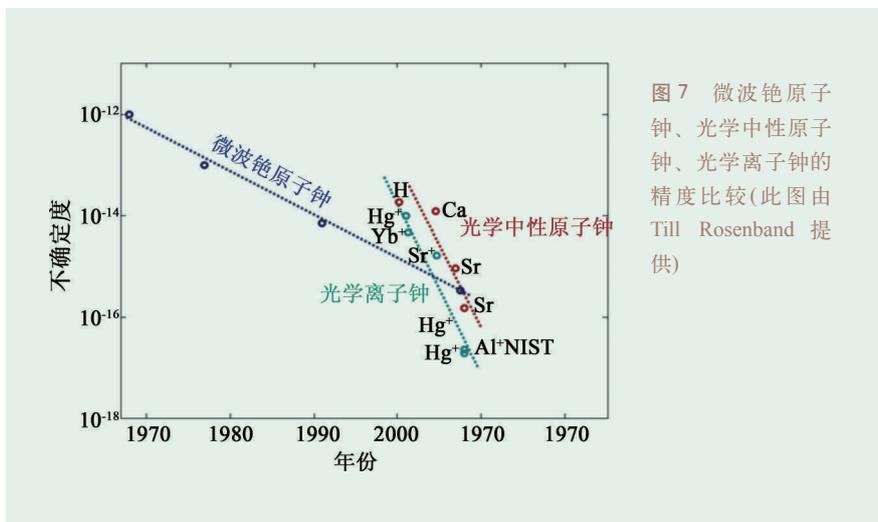


图7 微波铯原子钟、光学中性原子钟、光学离子钟的精度比较(此图由Till Rosenband 提供)

变化^[19]。维因兰德博士通过提高时钟精度，在地球的一个桌子上就观测到了原本认为只能在天体当中看到的相对论效应。

铝离子钟非常特殊。在现在的时钟精度水平下，之前可以忽略的误差以及实验上的问题会带来很大影响。利用光学跃迁的时钟在 10^{-16} 的精度级别上最大的不确定性来自黑体辐射。由于至今已经被发现的原子当中受此影响最小的是铝离子，以后也很难再有其他的光学原子钟在性能上超越铝离子钟。另外，相比于其他离子，铝离子还具有不会产生四极移位(quadrupole shift)的优点。

在实现铝离子钟的过程中，最大的问题在于，

虽然存在对应时钟过渡(clock transition)的激光(267.43nm)，但用来测量能看到量子跃迁的态所对应的激光波长太小(167nm)，没有合适的激光。维因兰德博士通过量子逻辑解决了这个问题。其基本想法是把铝离子时钟过渡的信息转移到铍离子($^9\text{Be}^+$)进行观察，从而得到铝离子时钟过渡的结果(见图8(a), (b))。如图8(c)所示，利用两个不同的离子在同一个阱里面共享的振动固有态，就

可以将其中一个原子的信息转移到另外一个原子上进行观测^[20]。

使用这一量子逻辑技术的分光学除铝离子之外，还适用于其他原子、分子，应用范围非常广泛。在阱的一侧，囚禁要进行光谱分析的原子或分子，在另外一侧，囚禁可以观测的离子；通过激光的频率梳(frequency comb)，使我们想了解的原子或分子能吸收对应的光子，并将其信息传递给另外一个观测离子。与我们关心的原子或分子无关，我们始终用同一个离子进行观测，这样就可以用一个系统实现几乎所有原子分子的光谱分析。

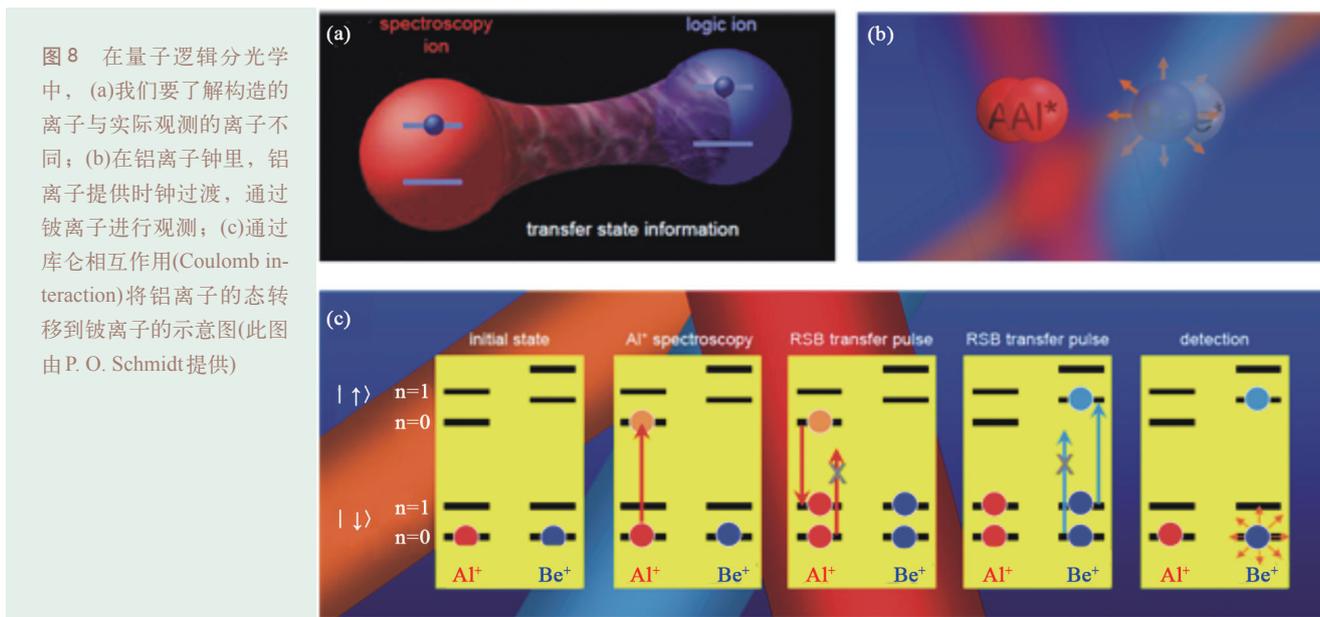
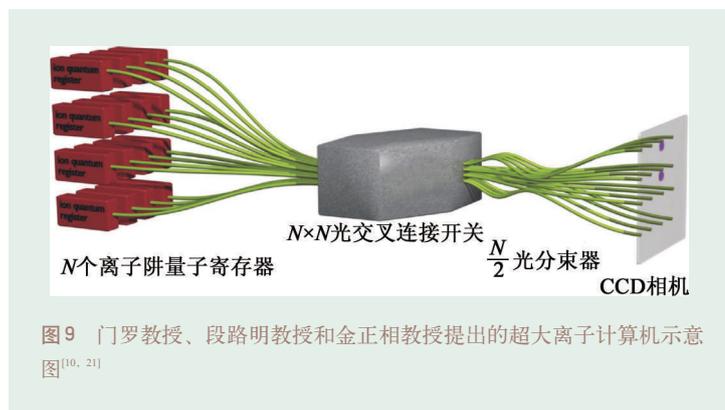


图8 在量子逻辑分光学中，(a)我们要了解构造的离子与实际观测的离子不同；(b)在铝离子钟里，铝离子提供时钟过渡，通过铍离子进行观测；(c)通过库仑相互作用(Coulomb interaction)将铝离子的态转移到铍离子的示意图(此图由P. O. Schmidt提供)



5 未来的展望

如上所述,我们认为维因兰德博士获得诺贝尔物理学奖的意义在于,他为量子力学实现更加广泛的发展奠定了基础。尽管已经取得了不少进展,但无论从哪个意义上讲,都仍然没有开发出超越现存计算机的量子计算机。由于技术上的阻碍,维因兰

参考文献

- [1] Advanced Information at the website of http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2012/advanced.html.
- [2] Autobiography of Hans G. Dehmelt in http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/dehmelt.html.
- [3] Wineland D J, Drullinger R E, Walls F L. *Phys.Rev.Lett.*, 1978, 40: 1639
- [4] Neuhauser W, Hohenstatt M, Toschek P E *et al.* *Phys.Rev.A*, 1980, 22: 1137; Wineland D J, Itano W M. *Phys.Lett., A*, 1981, 82: 75
- [5] Nagourney W, Sandberg J, Dehmelt H. *Phys.Rev.Lett.*, 1986, 56: 2797; Bergquist J C, Hulet R G, Itano W M *et al.* *Phys.Rev.Lett.*, 1986, 57: 1699
- [6] Diedrich F, Bergqvist J C, Itano W M *et al.* *Phys.Rev.Lett.*, 1989, 62: 403; Monroe C, Meekhof D M, King B E *et al.* *Phys.Rev. Lett.*, 1995, 75: 4011
- [7] Shor P W. Algorithms for quantum computation; Discrete Logarithms and factoring. Proc.35nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science. 1994.124
- [8] Aaronson S, Arkhipov A. The Computational Complexity of Linear Optics. Proceedings of ACM STOC. 2011, 333
- [9] Monz T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106: 130506; Yao X C *et al.* *Nature Photonics*, 2012, 6: 225; Neeley M *et al.* *Nature*, 2010, 467: 570; Reed M D *et al.* *Nature*, 2012, 482: 382

德博士的Quantum CCD方法的进展比预期缓慢得多。门罗教授(Prof. Chris Monroe, University of Maryland)、段路明教授(Prof. Luming Duan, University of Michigan)和金正相教授(Prof. Jungsang Kim, Duke University)最近提出了一种用光子增加离子量子比特数的新方法(见图9)^[10, 21],并在实验上取得了相当大的进展,用这种方法增加量子比特数从原理上看也是可能的。然而这个研究方向也存在着很多技术上的问题。门罗教授与段路明教授进一步提出了用一个阱控制数百个量子比特的方案,但这个方案至今仍处在在原理阶段,没有实验验证其可能性。从否定的角度上看,量子计算机的发展异常艰难;另一方面,我们却认为,量子计算机仍有很大的空间等待我们做出贡献。

在真正不远的未来,谁用什么方法开发出实用的量子计算机,将取决于大家富有创意与热情的挑战和努力。

- [10] Monroe C, Raussendorf R, Ruthven A *et al.* ArXiv 1208.1661 (2012)
- [11] Cirac J I, Zoller P. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, 74: 4091
- [12] Monroe C, Meekhof D M, King B E *et al.* *Phys.Rev. Lett.*, 1995, 75: 4714
- [13] Schmidt-Kaler F, Haffner H, Riebe M *et al.* *Nature*, 2003, 422: 408
- [14] Sackett C A *et al.* *Nature*, 2000, 404: 256; Leibfried D *et al.* *Nature*, 2005, 438: 639
- [15] Benhelm J, Kirchmair G, Roos C F *et al.* *Nature Physics*, 2008, 4: 463
- [16] Kielpinski D, Monroe C R, Wineland D J. *Nature*, 2002, 417: 709
- [17] Jost J D *et al.* *Nature*, 2009, 459: 683; Home J P *et al.* *Science*, 2009, 325: 1227; Hanneke D *et al.* *Nature Phys.*, 2010, 6: 13; Amini J M *et al.* *New J. Phys.*, 2010, 12: 033031; Brown K R *et al.* *Nature*, 2011, 471: 197; Ospelkaus C *et al.* *Nature*, 2011, 476: 181
- [18] Chou C W *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 070802
- [19] Chou C W, Hume D B, Rosenband T *et al.* *Science*, 2010, 329: 1630
- [20] Schmidt P O *et al.* *Science*, 2005, 309: 749
- [21] Duan L M, Monroe C. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 82: 1209