

两个囚禁离子的激光致冷*

冯 芒 高克林 朱熙文

(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)

摘 要 介绍在离子阱中通过激光致冷来获得两个超冷离子的机理和相关实验工作,探讨了这方面工作的意义和复杂性,尤其是与量子计算的关系,并比较了与单离子激光致冷的不同之处.

关键词 激光致冷,偶极-偶极相互作用,离子阱

LASER COOLING OF TWO TRAPPED IONS

FENG Mang GAO Ke-Lin ZHU Xi-Wen

(Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

Abstract The mechanism and experiments involved in the laser cooling of two ultracold ions in an ion trap are described, and the significance and complexity of this subject, particularly its relation to quantum computation, are discussed. A comparison with the laser cooling of a single ultracold ion is also made.

Key words laser cooling, dipole-dipole interaction, ion trap

多个粒子的激光致冷是原子分子物理领域一个十分热门的课题,其目的之一是要观测量子统计效应和玻色-爱因斯坦凝聚.近年来,随着实验新技术的发展和应用,高密度原子团的致冷已经成功实现,玻色-爱因斯坦凝聚现象也已被观测到.在这些系统中,原子间的相互作用变得十分突出,并能导致系统在高密度情形下的额外加热.所以,一般认为多个中性原子的碰撞与激光致冷在理论上是一个极其复杂的问题.而对于离子而言,少数囚禁在离子阱中的离子,尤其是两个离子的激光致冷问题,不仅在理论上是可解的,而且在实验上也是可以实现的.因而这方面的研究有利于人们深入了解多体系统的复杂特性.两离子体系的激光致冷倍受人们关注的另外一个重要原因是与量子计算密切相关. Cirac 和 Zoller 提出的在离子阱中实现量子计算的方案^[1]就是设想将一串离子囚禁在线性离子阱中,限制它们沿对称轴作一维运动.当这些离子被激光致冷到振动基态时,它们除了在阱的势场驱动下作集体振荡外,还分别与不同的激光束作用,从而完成一系列受控非门的运算(见图1).随后的实验中成功地 Paul 阱演示了一个二量子比特的量子受控非门,表明这一方案是可行的,不过,要实现真正有意义的量子计算,须首先将多个离子同时冷却到量子基态,或

者将多个超冷两离子体系通过空腔或存储器相耦合^[2].可见,不论是哪种方案,两离子的激光致冷都是实现量子计算所必不可少的首要步骤.

离子间的纠缠能提高离子阱内的量子极限的信噪比^[3,4].因为在一切技术性噪声被消除之后,量子涨落导致的量子投影噪声依旧存在.研究表明,离子间的纠缠不仅能有效地压制量子涨落,而且纠缠的离子数越多,量子投影噪声就被压制得越低.可见,能制备出多个纠缠的超冷离子将有利于提高离子谱线的探测精度和离子频标的性能.不过,多个离子的激光致冷比单离子的情况要复杂得多.这是因为离子间存在着库仑相互作用,而且当离子相距较近时,偶极-偶极相互作用也开始起作用.因此,仅仅是两离子的激光致冷机理,就比单离子的情况要复杂得多,致冷难度也增大不少.首先,库仑相互作用的存在使得两个囚禁离子的运动不再是简单的谐振子运动;其次,偶极-偶极相互作用能导致离子自身能级的移动和劈裂,从而影响自发辐射率,甚至导致超辐射和亚辐射.

本文将阐述与两离子的激光致冷有关的理论和实验工作,探讨这方面工作的意义和复杂性.下面,

* 国家自然科学基金资助项目

1999-02-23 收到初稿,1999-03-29 修回

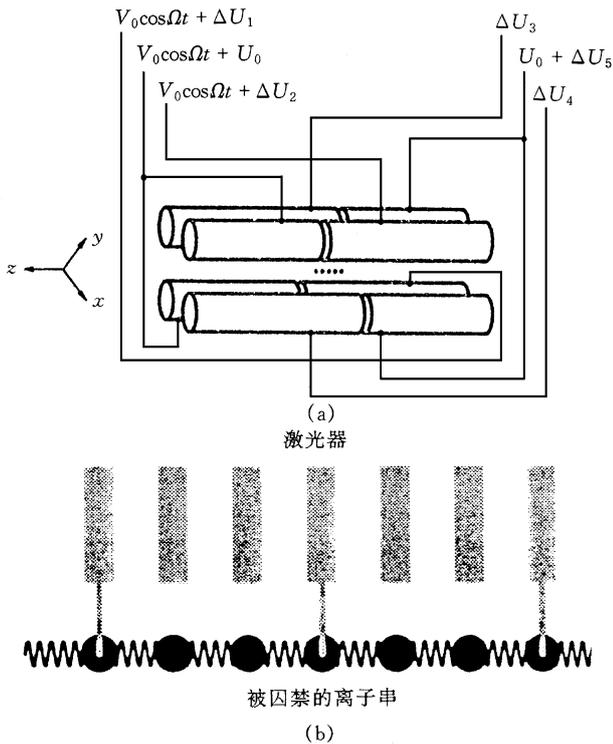


图 1 线性离子阱与量子计算方案示意图

- (a) 线性离子阱中囚禁住了一串离子(即四根电极之间的黑点);
- (b) 在线性离子阱中进行量子计算的方案,其中每个激光器控制一个离子

先简要回顾一下单个离子的激光致冷.

1 单个离子的激光致冷

尽管单个离子被激光致冷到其运动基态的工作在 80 年代末已在美国国家标准与技术研究所的实验室里实现^[5],但对于人类来说,仍然是一项极富挑战性、技术难度极大的工作^[6].

选定被囚禁的离子的两个能级,入射激光只同这两个能级作用.当激光束的入射方向与离子运动方向相对时,激光频率 ν 可以在小于离子二能级共振频率 ν_0 时使离子发生共振跃迁.离子吸收 $\hbar\nu$ 的能量,却由自发辐射放出 $\hbar\nu_0$ 的能量.由于自发辐射的各向同性,对离子的反冲极小,所以离子逐渐丧失能量而被冷却.这是利用了多普勒频移的机理,故称多普勒冷却.由于此时的离子辐射线宽 ν 大于其宏观运动频率 ν ,所以其极限温度由此线宽或光子反冲速度决定,约为 $\hbar\nu/2k_B$ (k_B 为玻尔兹曼常数),此时离子大约处在其运动量子态的第一激发态.若须进一步冷却离子,使其运动态从第一激发态降至基态而成为超冷离子,则要增大离子宏观运动频率,减小线宽,使 $\nu > \nu$,且离子运动幅度小于激光波长(称为

Lamb - Dicke 极限),那么囚禁离子在共振频率处及周围将出现可分辨的吸收边带.通过调节激光器,使离子吸收 $\hbar(\nu_0 - \nu)$ 的能量,再由自发辐射放出 $\hbar\nu_0$ 的能量,则离子逐渐损失能量,进一步被冷却,直至极限温度 $\hbar\nu/k_B$ 即量子基态.这一过程称作边带冷却^[7].

由于单离子运动态的量子基态的实现,人们可以制备出各种各样的非经典态^[8,9],如数态、相干态、压缩态、薛定谔猫态等等,也可以观察到消相干效应对量子态的负面影响程度.另外,二比特的量子受控非门的演示性实验也是用单个超冷 Be 离子完成的^[10].需要指出的是,在实验中,人们习惯于用二束激光的受激拉曼跃迁来完成对离子的边带冷却.不过这只是实验上为减小辐射线宽所用的技巧,其产生的效果与以上叙述的单束激光来致冷的情况完全一样.

2 两个离子的激光致冷

两个离子的激光致冷与上节描述的单离子的激光致冷的物理图像大同小异,基本原理也是完全一样的,也需要经历多普勒冷却和边带冷却两个阶段.不过由于两个离子之间存在库仑排斥,两离子体系的运动被分为质心运动和相对运动两种模式,所以问题要复杂一些.质心运动是指两个离子步调一致的集体振动;而相对运动则正好相反,两离子的运动位相相差 π ,呈现类似“呼吸”的振动.当离子的温度较高时,离子之间间距较大,两个离子可以近似看作两个独立的离子,其多普勒冷却机理与单个囚禁离子的情形没有区别.但是随着离子温度的降低,离子之间的间距逐渐减小,我们就必须考虑离子体系的质心运动和相对运动这两种模式的冷却了.这是与单离子冷却的显著不同之处.但在离子的温度还不是足够低时,每个离子的振动幅度还比较大,所以两种运动模式是纠缠在一起的.这种情况很难处理,在下面将要提到的非 Lamb - Dicke 极限的边带冷却方案里遇到的就是这种情况.当离子温度降到足够低时,每个离子的运动仅限于在平衡位置附近,运动幅度不超过激光的光波长(即前面提到的 Lamb - Dicke 极限),那么离子体系的质心运动和相对运动两种模式可认为是相互独立的,体系的总运动就是这两种运动模式的简单叠加.不过,由于离子间距的进一步减小,两离子之间的偶极 - 偶极相互作用逐渐变得可观.尤其是当离子间距同照射它们的激光

的波长相差无几时,两离子体系中能级出现简并,这些简并态是由一个离子处于基态,另一个离子处在激发态构成的.它们的出现将改变离子的能级寿命,也将影响冷却效率.尽管如此,由于离子的运动幅度满足 Lamb - Dicke 极限的要求,所以在某些方面的表现仍与单离子冷却机理相似^[11].只是由于离子间的库仑相互作用和偶极 - 偶极相互作用的存在,两离子体系的某些致冷过程与单离子情形有所不同^[12].比如说体系的相对运动模式的冷却便是在单离子致冷过程中不会出现的.它只与相对运动有关,不影响质心运动模式.而离子间的偶极 - 偶极相互作用还能导致某些相对运动模式的冷却过程中出现横向冷却,即如果激光沿 x 轴与离子作用,由于偶极 - 偶极相互作用不明显依赖于激光的传播方向,所以有可能导致 y 或 z 方向上的冷却.另外,偶极 - 偶极相互作用使得各冷却过程相互干涉,也会改变

离子体系的冷却效率.除此之外,由于偶极 - 偶极相互作用改变了离子体系原来的能级结构,会导致边带对的出现,所以此时的边带冷却变得十分复杂.这种现象在质心运动和相对运动模式的冷却中都会出现(见图 2).

前面提到过,离子的边带冷却需满足两个条件,即离子的辐射线宽小于其宏运动频率,以及 Lamb - Dicke 极限.这两个条件实质上都要求离子宏运动频率足够大.这也意味着阱的束缚力足够大,从而使得离子之间间距很小.但是离子阱中量子计算的要求却是要使某一束激光能同某一个离子单独作用且不影响旁边的离子,因此,离子间距必须足够大.为解决这一矛盾,人们采用通过选择适当的原子跃迁或适当地操纵离子内态的方法来减小辐射线宽,实现边带冷却的第一个条件.但即使这样,边带冷却的第二个条件仍无法达到.因此,在离子阱中进行量子计算的前提条件是能够寻找到不满足 Lamb - Dicke 极限的边带冷却^[13].以目前被认为是最有可能实现量子计算的线性离子阱为例,假设其中已多普勒冷却了两个离子,并已设法减小了辐射线宽.离子相距约 $10\mu\text{m}$,所以离子间的偶极 - 偶极相互作用可以不予考虑.如前面提到的,由于离子运动达不到 Lamb - Dicke 极限的要求,系统中的两种运动模式是纠缠在一起的,它们将同时被致冷或加热.正因为如此,其冷却时间比同等条件下的单离子冷却时间要长得多.另外,还有离子落入囚禁态(trapping state)的问题.离子一旦处于囚禁态上,就会稳定地呆在其上,而对激光的照射毫无反应,致冷过程由此中断或延缓.为避免此类情况的发生,人们需要适当增大离子的辐射线宽,使离子落入囚禁态的几率大幅度减小.还有,由于体系的两种运动模式纠缠在一起,谱线中的边带也因此增多.这样,人们不能通过调节激光频率来选择某一边带,而只能同时共振激发一组准简并态的跃迁.幸运的是,研究发现,随着离子辐射线宽的适当增大,边带便会大幅度减少,同时离子体系的冷却时间也显著缩短.由此可见,辐射线宽对两离子的冷却过程影响颇大.这种冷却效率对于辐射线宽的依赖性是非 Lamb - Dicke 极限下两离子体系边带冷却的一个重要特征.

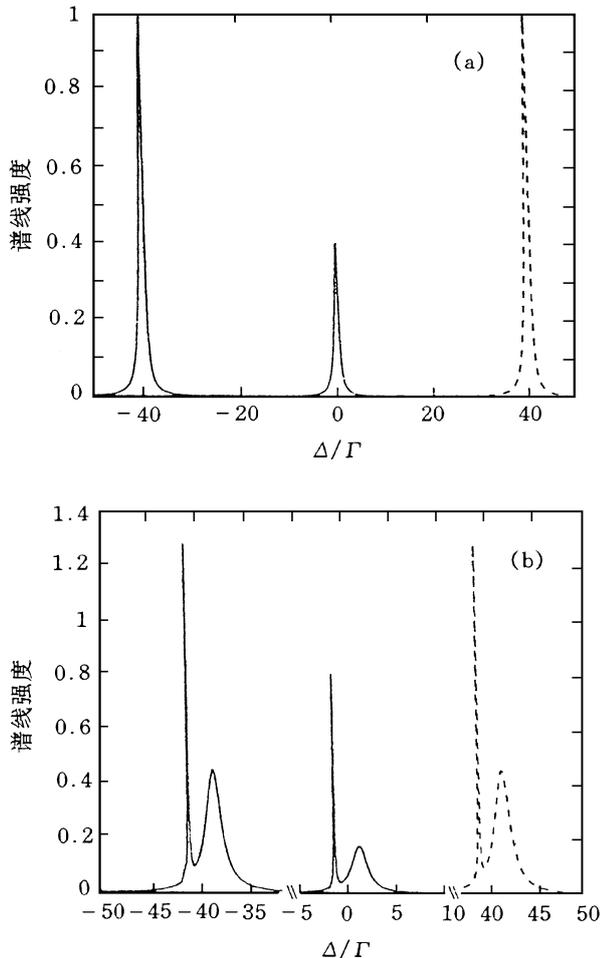


图 2 超冷两离子体系中质心运动模式的边带示意图^[12]
(a) 两离子相距较远,特征与单离子一样;(b) 两离子相距很近,偶极 - 偶极相互作用导致的边带对(其中横坐标 Δ/Γ 表示激光频率与离子共振频率之差)

3 相关的实验工作

目前两离子的冷却囚禁方面的实验工作已完成了几例.最先报道的是美国国家标准与技术研究所

的科学家们将两个囚禁在射频阱中的 Hg 离子多普勒冷却之后,进行类似于杨氏双缝干涉的研究^[14].照在这两个离子上的激光束被离子散射后发生干涉,形成明暗相间的条纹.该实验显示,如果我们能准确地知道光子的路径,干涉条纹将消失.这是在更微观的层次上再一次呈现了光的波动特性.接下来的工作是利用边带冷却将两个 Be 离子冷却至运动量子基态^[15].实验也是在射频阱中完成的.科学家们先用 3 束激光对离子体系作多普勒冷却,再用两束方向相互垂直的激光束来进行边带冷却.由于这两束激光垂直地照在离子上,由此导致的量子跃迁对离子的运动十分敏感.经过一系列的激光脉冲作用,两离子体系的质心运动态和相对运动态都被冷却至量子基态.此时,两离子间距约为 $3\mu\text{m}$.在此基础上可以制备出 Bell 纠缠态^[16].这些工作同时也显示,离子的质心运动模式比相对运动模式更易受消相干效应的影响.消相干效应是外部环境对离子体系的作用造成的,它能使离子体系的相干特征损失殆尽.在离子阱量子计算方案中,由于质心运动是信息的载体.消相干效应将极大地损害量子计算的有效进行.因此,按照这些实验的结论,当多个超冷离子被囚禁在离子阱中充当量子比特时,非质心运动模式也许是信息载体的更好的候选者.显然,这些超冷两离子的实验工作不仅是量子计算方面的基础性工作,而且与量子信息转换、量子保密术和光谱学等领域也密切相关.

除了美国国家标准与技术研究所的工作之外,IBM 公司的 De Voe 等人利用 $80\mu\text{m}$ 半径的微型射频阱也成功地将两个 Ba 离子激光致冷至量子基态^[17],两离子的间距约为 $1\mu\text{m}$,并能通过调节阱参数精确操纵.实验中采用的先进技术使科学家们能避免系统误差,精确测定离子自发辐射寿命和观测两离子的相互作用,并首次观察到两离子体系的超辐射和亚辐射.不过,这个实验并未区分开超辐射和亚辐射.要做到这点,需使离子间距更小才行.尽管如此,目前的实验结论与根据 Dicke 理论算出的结果仍是符合得相当好的.

4 小结

在物理学的发展史上,理论工作与实验工作总是相辅相成,交相争艳.两个超冷离子的囚禁与激光

致冷也不例外.当文献^[14]发表后,有数十篇理论文章对其进行广泛深入的探讨^[18].而文献^[17]则相反,是先有了理论上的计算^[19]之后,为了验证理论结果而进行的实验.不论是实验的成功还是理论的胜利,都使得离子冷却这个领域成为当前科学前沿的热点.

总之,从单离子的激光致冷到两离子集体运动基态的达到,是人类认识和实践的一次飞跃,也是人类向自然的一次成功挑战.它为人类今后囚禁多个超冷离子,实现真正意义上的量子计算积累了宝贵的经验,也极大地鼓舞了人们探索的勇气.同时,它的成功本身也使人们能在原子层次上完成对量子理论的检验和对微观世界的进一步认识.不过,这方面工作仍是任重道远,因为到目前为止,在线性离子阱的实验中尚无法将一串离子分别冷却至它们的运动量子基态.至于如何达到量子计算所要求的一束激光只与一个超冷离子作用的目标,更是难上加难的事.但世界上目前正有一批科学家们,其中也包括中国的科学家们,在废寝忘食地朝这个目标努力着.

参 考 文 献

- [1] Cirac J I, Zoller P. Phys. Rev. Lett., 1995, 74:4091—4094
- [2] Cirac J I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 78:3221—3224
- [3] Itano W M *et al.* Phys. Rev. A, 1993, 47:3554—3570
- [4] Wineland D J *et al.* Proc. R. Soc. Lond. A, 1998, 454:411—429
- [5] Diedrich F *et al.* Phys. Rev. Lett., 1989, 62:403—406
- [6] Wineland D J, Itano W M. Phys. Rev. A, 1979, 20:1521—1540
- [7] 高克林,朱熙文.物理,1997,26:654—658[GAO Ke-Lin, ZHU Xi-Wen. Physics, 1997, 26:654—658(in Chinese)]
- [8] Meekhof D M *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76:1796—1799
- [9] Monroe C *et al.* Science, 1996, 272:1131—1136.
- [10] Monroe C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1995, 75:4714—4717
- [11] Javanainen J. Opt. Soc. Am. B, 1988, 5:73—81
- [12] Vogt A W, Cirac J I, Zoller P. Phys. Rev. A, 1996, 53:950—968
- [13] Morigi G *et al.* Phys. Rev. A, 1999, 59:3797
- [14] Eichmann U *et al.* Phys. Rev. Lett., 1993, 70:2359—2362
- [15] King B E *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:1525—1528
- [16] Turchette Q A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81:3631—3634
- [17] De Voe R G, Brewer R G. Phys. Rev. Lett., 1996, 76:2049—2052
- [18] Itano W M *et al.* Phys. Rev. A, 1998, 57:4176—4187
- [19] Brewer R G. Phys. Rev. A, 1995, 52:2965—2970