

离子光频标的原理和发展*

黄 垚¹ 陆泽晃² 管 桦^{1,†} 高克林^{1,††}

(1 中国科学院武汉物理与数学研究所 中国科学院原子频标重点实验室 波谱与原子分子物理国家重点实验室 武汉 430071)

(2 华中科技大学物理学院 基本物理量测量教育部重点实验室 武汉 430074)

2016-05-30收到

† email: guanhua@wipm.ac.cn

†† email: klgao@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160702

Principle and progress of the ion optical frequency standards

HUANG Yao¹ LU Ze-Huang² GUAN Hua^{1,†} GAO Ke-Lin^{1,††}

(1 Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

(2 MOE Key Laboratory of Fundamental Quantities Measurement School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

摘 要 人类对时间的计量历史可以追溯到几千年前,随着科学技术的发展与进步,人类对事件的计量精度也越来越精确。当前,世界上最精确的计时工具为光频标,可以达到百百年不差一秒的水平。文章回顾了离子光频标的发展过程和当前的研究进展,简要介绍了钙离子光频标和量子逻辑铝离子光频标的原理及进展。

关键词 离子囚禁, 光频标, 量子逻辑光谱

Abstract With respect to human history, time keeping is probably up to thousands of years; with the development of science and technology, the accuracy of time keeping becomes more and more accurate. At present, the world's most accurate timing keeping device is the optical frequency standard, which can neither gain nor lose one second in about ten billion years. In this paper, we will review the development and current research progress of the ion optical frequency standards, after which we will briefly introduce the principle and the progress of the calcium ion optical frequency standard and the quantum logic aluminum ion optical frequency standard.

Keywords ion trapping, optical frequency standard, quantum logic spectroscopy

1 引言

时间的计量一直是人们所关心的基本问题,它与人们的日常生产生活息息相关。人类的计时可以追溯到五千多年前,最初人们利用日月星辰的运行规律等天象来计时,往往以天为单位,在

人们的生活和生产中发挥重要作用。随着人类文明的进步,计时变得越来越重要,人们也陆续研制出各种基于不同原理的钟作为计时工具。目前,科学家们在实验室研制出的世界上精度最高的钟为新一代的光频标,精度已经提高到百百年不差一秒的水平。我们详细介绍一下囚禁离子光频标的原理及发展现状,最后介绍光频标在生产生活中的应用前景。

* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB821301)、国家自然科学基金(批准号: 91336211, 11034009, 11474318, 11304363)资助项目

2 囚禁离子光频标的原理

原子钟被广泛应用于国民经济的各个领域,如时间基准、定位导航、信息高速公路(通讯、网络)和城市交通管理等,在国防和国民经济中起着至关重要的作用。随着原子钟准确度和稳定度的提高,以此为基础的卫星导航、精确定位武器以及高码率通信同步系统等的性能都将得到提高,因此,人们需要精度更高的原子钟。Dehmelt于上世纪70年代提出了利用单个离子实现超高精度光频标的设想^[1]。光频标即为输出频率处于可见光频率甚至更高频率的原子钟。

光频标同微波钟一样,都是由物理系统、本振源和计数器三个基本部分组成。而物理系统又由不受相互碰撞及外界环境干扰的原子、离子或分子体系组成。目前的光频标主要参考两种物理体系:一是光晶格中囚禁的中性原子,二是离子阱中囚禁的单离子。本振源为窄线宽探测激光器。计数器实现了光波与微波的连接和传递,由飞秒光梳系统和微波钟基准组成。

离子光频标的原理如图1所示。简单而言,首先通过图1中的物理系统囚禁离子,并进行激光冷却降低离子的运动速度,然后研制一台超稳定的窄线宽探测激光器作为本振源,以实现原子钟跃迁光谱的探测,最后利用飞秒光学频率梳技

术实现由可见光频率到微波频率的转换,最终实现可直接使用的超高稳定度的频率输出。

下面简单介绍一下离子光频标的各项相关技术。

2.1 离子囚禁技术

早在1936年,美国科学家Penning在电子放电的实验研究中,通过施加了一个磁场来增长电子运动的路径^[2],该设计在之后的物理实验中得到了广泛的应用。1953年,德国的Paul发明了无磁场的四极质量过滤器^[3],从而引发了质谱领域的革命。几年后,基于射频电场的离子阱被发明并被命名为Paul阱。1959年,Dehmelt创建了世界上第一个采用磁场加电场囚禁带电粒子的离子阱,并将其命名为彭宁(Penning)阱^[4]。离子阱装置利用在阱体区域内具有特定构型的静电、静磁或射频场,将带电离子约束在阱内,并处于超高真空环境中,可使被研究的原子体系处于几乎孤立的不受“干扰”的环境;该装置还有很长的囚禁时间以便“观察”,是研究原子特性的理想手段。离子阱的发明使得长时间囚禁单个带电粒子成为可能。Dehmelt等人实现了对电子的长时间囚禁^[5-7]。20世纪60年代,Dehmelt小组在Paul阱中首次观察到了原子的超精细结构^[8],展现了采用囚禁离子实现原子钟的可能性。20世纪70年代,高分辨光谱实验研究要求消除一阶和二阶多普勒(Doppler)频移,这就要求只有少数离子被囚禁在阱内,并且离子运动速度尽量低。由于在精密测量方面的突出成就,离子阱奠基人Paul和Dehmelt教授获得1989年诺贝尔物理学奖,Wine-land教授获得2012年诺贝尔物理学奖。

2.2 激光冷却技术

随着激光技术的发展,激光冷却原子技术得以发明并被应用到长时间囚禁的单个离子和原子体系上,可以进一步控制原子的运动效应。离子阱中囚禁的单个离子由于处于超高真空环境,与背景气体碰撞的几率非常小,几乎处于“孤立”

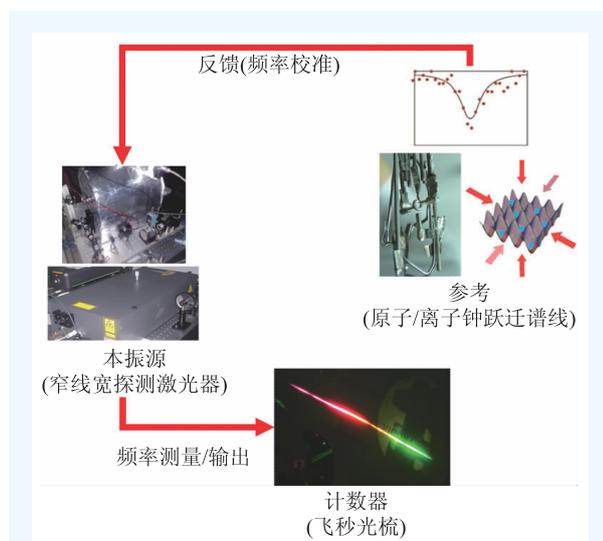


图1 光频标原理结构图

的状态,可以显著抑制钟跃迁谱线的碰撞展宽^[9]。1978年,德国 Toschek 小组^[10]和美国 Wineland 小组^[11]几乎同时报道了激光冷却离子的实验结果。在此基础上,1980年 Toschek 小组首先实现了对单个离子的囚禁及冷却^[12]。激光冷却是对单个离子进行冷却的有力手段,特别是用此可以克服二阶 Doppler 效应造成的谱线移动和增宽。多普勒激光冷却的基本原理是:光子带有的动量可以用于减小原子和离子的动量。对一个两能级系统的离子,当冷却用的单色激光频率略低于离子跃迁共振频率时,若离子迎着激光方向运动,多普勒效应使得离子与激光共振发生跃迁,离子从基态跃迁到激发态。而处于激发态的离子会自发辐射回到基态,自发辐射的光子的出射方向是各向同性的,沿着离子运行的方向,平均而言动量减小,因此总的结果是离子被减速。目前实验上常用的囚禁离子的激光冷却方法除了多普勒冷却外,还可采用边带冷却、电子诱导透明冷却等。

2.3 窄线宽超稳激光器技术

如何提高离子光频标钟跃迁探测光的稳定度和线宽是离子光频标的关键技术之一。目前普遍使用 Pound—Drever—Hall 方法^[13],把囚禁离子光谱跃迁的探测光稳频在超低膨胀(ULE)高细度腔上,使其满足钟跃迁探测的要求。激光稳频需要一台精细度很高、稳定性很好的参考腔,这种参考腔通常是用超低膨胀系数材料制成,腔镜通过光胶合(optical contact)粘在腔体上,形成法布里—珀罗干涉仪。超稳腔放置于超高真空环境,并进行温度控制和振动隔离。目前几乎所有光频标研究小组的钟跃迁激光器都达到了 Hz 水平甚至更高,最好的激光器的线宽已经达到了几十 mHz 水平^[14]。

2.4 飞秒光学频率梳技术

随着 20 世纪 90 年代钛宝石激光器的 Kerr 棱镜锁模技术^[15]以及超短脉冲钛宝石飞秒激光技术

的发展^[16],飞秒光梳得以诞生。1999年,德国马普量子光学研究所(Max Planck Institute of Quantum Optics)利用自锁模的飞秒激光器研制出了飞秒激光光学频率梳(飞秒光梳)^[17]。同年,美国 JILA(Joint Institute for Laboratory Astrophysics)研制出了自溯源的飞秒光梳装置^[18]。飞秒光梳的诞生使得从可见光频率直接向微波频率的传递得以实现,从而取代原来用于测量光频标的钟跃迁频率的光频链^[19],并且可以产生波长范围很宽的激光,从而实现多种光学频率的测量。它的发明对光频标的发展起到了非常重要的推动作用,使光频标真正意义上由原理性实验走向了实用化^[20]。JILA 的 Hall 和马普量子光学研究所的 Hänsch 因为在精密激光光谱和飞秒光梳领域的突出贡献,获得了 2005 年的诺贝尔物理学奖。

3 囚禁离子光频标的发展现状

随着离子阱技术的发展,单离子光频标已经在许多实验室得以实现。离子光频标的候选体系有:铯离子^[21, 22]、镱离子^[23, 24]、汞离子^[25]、铝离子^[26]、铷离子^[27]和钙离子^[28, 29]等。目前最好的镱离子光频标及铝离子光频标的精度已经进入了 10^{-18} 量级,即几十亿年不差一秒甚至更高的水平^[26, 30]。其中,镱离子光频标的不确定度达 3.2×10^{-18} ,即约一百亿年不差一秒。上述基于单离子光频标的精度已经达到或超过了目前铯喷泉钟的水平。随着新一代光频标的发展,科学家们可能在不远的未来重新讨论秒的定义。而目前,国际时间频率咨询委员会(CCTF)已经将一些原子、离子或分子的光谱频率作为“秒”定义的次级标准^[31]。

我国选择铷离子、钡离子、汞离子、铝离子和钙离子开展了离子光频标的研究。例如,中国科学院武汉物理与数学研究所(WIPM)实现了钙离子光频标的锁定和频率测量^[32],华中科技大学和 WIPM 的铝离子光频标、国防科技大学的汞离子光频标研究也取得了技术上的突破^[33, 34]。下面先简单介绍一下钙离子光频标的研究进展,然后介绍量子逻辑铝离子光频标的原理。

3.1 钙离子光频标

钙离子除了具有其他碱土族离子所共有的能级结构简单的优点之外,它的其他特色是激光冷却和光频跃迁探测所需的激光都可以利用固体激光器,特别是半导体激光器实现。因此,钙离子光频标一直都是“秒”的次级定义的有力竞争者^[35]。

国际上开展钙离子光频标研究工作的小组有奥地利 Innsbruck 大学^[28]、日本国家信息与通讯研究所(NICT)^[29]、以及法国 Provence 大学^[36]。基于⁴³Ca 同位素的光频标研究也在进行中,其优势是

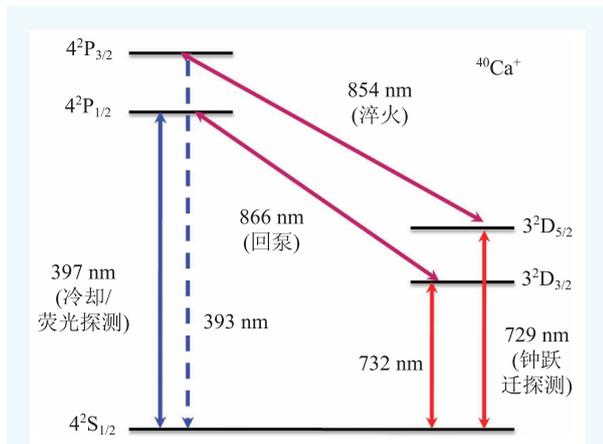


图2 与光频标相关的⁴⁰Ca⁺离子各能级及相关跃迁对应的激光波长

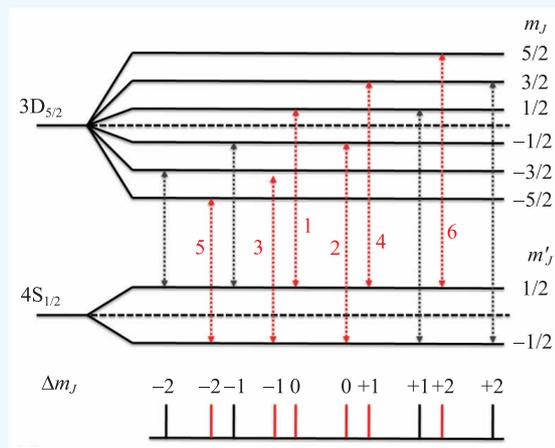


图3 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁对应各个子能级间的跃迁示意图: $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁在静磁场下分裂为10个子能级,选取图中用红色数字标出的6个能级按顺序依次进行测量并平均,就能较为有效地获得⁴⁰Ca⁺离子 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁的中心频率

跃迁中心有一条不受一阶塞曼(Zeeman)频移影响的谱线^[37]。此外钙离子在量子信息等研究方面也具有广泛的应用^[38, 39]。

⁴⁰Ca 原子与其他碱土金属原子类似,最外层有2个价电子,被电离成⁴⁰Ca⁺离子的过程中丢失一个电子,最外层仅剩一个价电子,结构上与氢原子类似。图2显示的是与光频标相关的能量最低的几个能级,其中 $4^2S_{1/2}$ 态为离子的基态, 3^2D 态为能量最低的离子激发态,同时也是亚稳态,寿命约为1s^[40],对应的 $4^2S_{1/2}$ — 3^2D 跃迁的自然线宽约为0.14 Hz。 $4^2S_{1/2}$ — 3^2D 跃迁拥有的长寿命(窄自然线宽)使得这些跃迁成为理想的光频标参考跃迁,在实验中选择 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁作为光频标的参考跃迁。

在一定的静磁场条件下,由于一阶塞曼效应,跃迁谱线会发生频移;另外,离子所在位置由于电极不规则和杂散电场的存在或接触电势的影响,会存在电场梯度,与 $4^2S_{1/2}$ 和 $3^2D_{5/2}$ 态作用会引起电四极频移。一般情况下,一阶塞曼频移和电四极频移这两项是引起 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁频移的主要因素。⁴⁰Ca⁺离子的核自旋为0,因此该同位素离子不具有超精细结构, $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁在静磁场下分裂为10条谱线(图3)。选取图3中用数字标出的6条谱线进行频率测量后进行平均,就能有效消除上述两项频移。

实验中采用微型 Paul 阱实现对带电粒子的囚禁^[41—45]。该阱由一个环电极、两个帽电极和两个补偿电极组成,开放式的结构使其便于进行激光冷却及钟跃迁探测等激光与离子的相互作用;微型结构也便于实现少离子或者单离子的囚禁。补偿电极分布在环平面且相互垂直,加上直流电压后用来克服实验中杂散电场的影响。离子阱置于真空环境中来降低离子与背景气体的碰撞几率。⁴⁰Ca⁺离子具有一阶塞曼效应,每条钟跃迁谱线的频率都与磁场强度近似成正比关系。磁场的变化和抖动会影响光频标的锁定,尤其是磁场的快速抖动,会造成谱线的增宽,从而影响到光频标的频率稳定度。因此需要对离子所在位置的磁场进行有效地控制,以排除外界环境磁场的变化对它

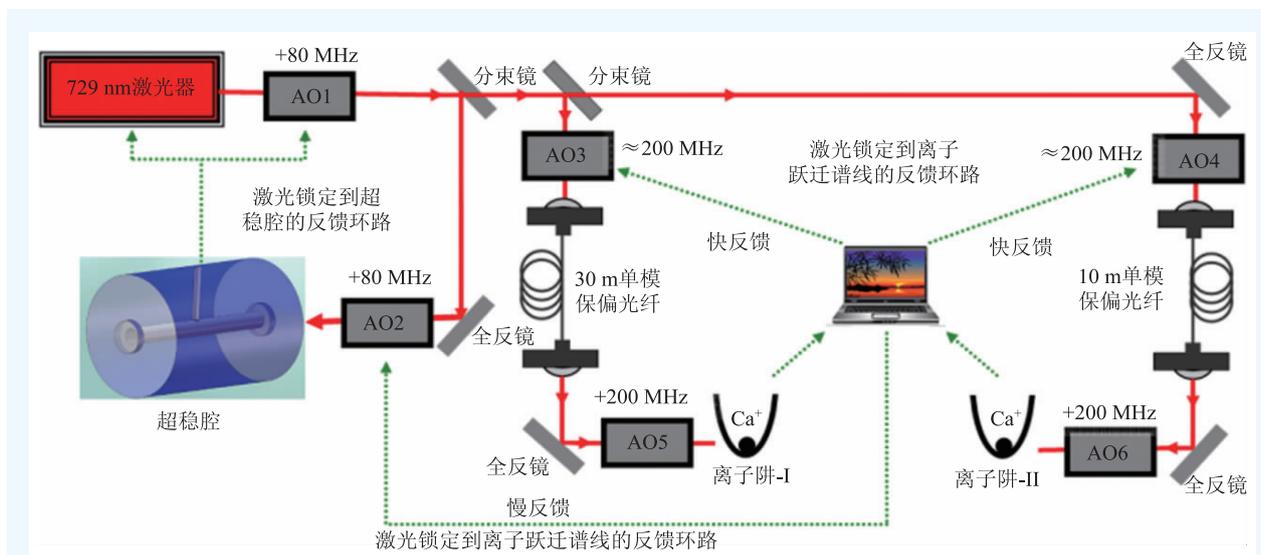


图4 两台钙离子光频标的频率比对方案(图中AO1—AO6为声光调制器,用于改变激光的频率)

的干扰,其中一种有效的方法就是采用磁屏蔽。通过采用坡莫合金作为磁屏蔽材料,在离子阱真空腔体外加上双层磁屏蔽系统,可以屏蔽外界磁场。为了实现对离子所感受到的磁场强度的控制,通常在磁屏蔽内的真空系统外安装了三对相互垂直的线圈,通过调节三台精密直流源的输出电流实现对离子所在位置磁场的高精度控制。

在光频标的研制中,除了上述需要考虑的一阶塞曼效应外,为了提高光频标的精度,还需要考虑的系统频移主要有:二阶多普勒频移、电四极频移、斯塔克频移、黑体辐射频移、交流斯塔克频移、二阶塞曼频移、引力红移等。经过十多年的努力,WIPM研制的钙离子光频标的精度已经达到了5亿年的偏差不超过1秒的水平^[32]。

除了提高光频标的精度之外,还需要对光频标的精度进行验证并进行稳定度的测量与评估。通过比对测量两台光频标的频差是直接且有效的手段。两台钙离子光频标的比对方案如图4所示。图中显示了两台钙离子光频标频率比对测量的主要实验装置图,包括4个部分,分别为两套独立运行的离子囚禁系统、钟跃迁激光探测系统以及计算机程序控制系统。只有实现了两套独立运行的离子囚禁系统,才能使用729 nm激光对囚禁离子进行探测,分别获得两台钙离子光频标的谱线,实现两台光频标的同时锁定,最终获得频

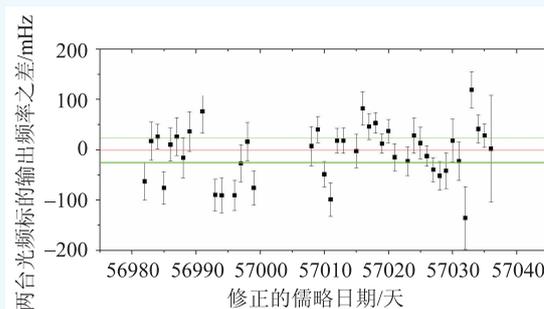


图5 考虑了系统误差之后的两台光频标的输出频率之差随时间的变化(红线表示测量的统计平均值,绿线表示 3σ 统计不确定度)^[32]

率比对测量结果。

2014—2015年,WIPM进行了两台钙离子光频标的频率比对,两台光频标的输出频率差如图5所示。两台光频标输出频率差别为 -13 mHz。考虑到统计不确定度为 8 mHz,两台光频标的系统不确定度为 21 mHz,总的 3σ 不确定度为 23 mHz;实验测得的频率差小于总的测量不确定度^[32]。

3.2 量子逻辑铝离子光频标

囚禁离子光频标的参考离子中,除了铯离子和铝离子外,其余候选离子的核外都只有一个价电子,能级结构相对简单,同时由于所用的激光器容易获得,因此实现起来较为容易。与其他候选离子相比,铯离子和铝离子对环境变化(包括磁

场、电场、黑体辐射及激光等)的影响更加不敏感,并且钟跃迁波长在紫外波段时频率更高。因此理论上基于铟离子和铝离子的单离子光频标系统不确定度可以做到更小。

但是由于冷却光都处于深紫外波段,目前世界上还没有研制出如此短波长的激光器,对激光技术是一个很大的挑战。为了解决对候选离子的冷却问题,美国国家标准与技术研究所(NIST)的Wineland等人提出了利用协同冷却(sym pathetic cooling)的方案,通过其他离子(如铍离子或镁离子)间接冷却候选离子^[46],从而成功实现了铝离子的协同冷却。在此基础上通过量子逻辑光谱技术研制成的铝离子光频标系统不确定度达到了 10^{-18} 量级^[26],是目前世界上精度最高的光频标之一。下面介绍一下量子逻辑光谱技术。

量子逻辑光谱技术是一个近十几年才发展起来的技术,目的是为了探测很多利用传统激光光谱方法很难探测到的谱线。量子逻辑光谱技术目前主要在离子阱中实现。其最早在铝离子光频标上实现,近几年逐渐被扩展到对分子离子、高离化态离子的探测。

若利用传统的类似于钙离子的方法来直接探测铝离子钟跃迁谱线,需要波长167 nm的激光器来对应铝离子的强跃迁线 $^1S_0 \rightarrow ^1P_1$,可是目前却无法产生这样的激光波长。为了解决这个问题,Wineland等人就提出了一个巧妙的思路^[46]:假设

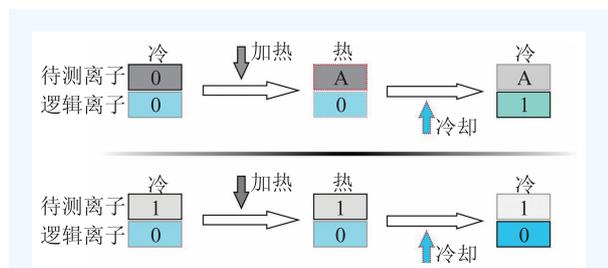


图6 量子逻辑示意图(实线框表示离子处于“冷”的状态也即振动基态,虚线框表示离子处于“热”的状态,A表示待测离子的一个辅助电子态,铝的A态为 3P_1 态。图中加热是作用于待测离子的,注意:待测离子在电子态0时能被加热,而在电子态1时加热的光不起作用。图中冷却是作用于逻辑离子的,逻辑离子只有处于“热”的状态时才能被冷却,且冷却后其电子态会发生翻转。最终待测离子的电子态0和1分别映射到逻辑离子的电子态1和0上)

离子阱里同时囚禁有另外一个可以探测状态的离子,那么能不能想办法把铝离子的状态信息传递给被囚禁的另一个离子呢?答案是肯定的。现在我们先绕过具体的实现步骤,来看看到底什么叫传递状态信息。

既然涉及的是量子系统,那么我们就不妨用薛定谔的猫来打个比方。问题现在变成了我们想知道箱子里的猫到底是死的还是活的,可是又不愿打开箱子(因为毒气毕竟对人也有害),那怎么办呢?一个很简单的想法就是,我们给猫接上一个心电监护仪,这样通过这个监护仪就可以在不开箱子的情况下知道猫是否活着了。如果猫还活着,那么心电监护仪将有心电的信号输出,否则心电监护仪就没有任何信号输出了。

所谓的量子逻辑光谱技术其原理和上面的例子一样,待测的铝离子就是例子中的猫,而另一个离子(又叫逻辑离子)则是心电监护仪。如果待测离子处在电子状态0,那么通过一些作用,逻辑离子会变成电子状态1;反之逻辑离子则保持在电子状态0。这样一来我们就绕过了直接观察铝离子电子状态的过程,而从逻辑离子的状态间接地判断铝离子的状态。

现在问题是具体如何实现这个过程呢?或者说这“一些作用”都是什么作用呢?这些作用要使两个离子相互联系起来并且准确地传递信息,就像猫的心跳能够联系起猫的状态和心电监护仪的状态一样。通常在离子阱中,可以选择离子的振动作为传递信息的中介。因为两个离子有很强的电磁相互作用,所以一旦一个离子的运动变剧烈了,另一个离子的运动由于电磁力作用也会变得剧烈;反之亦然。离子运动的剧烈程度可以反映在离子的振动能量上。离子的振动能量不是连续的,而是量子化的,而且存在一个最低的能量状态被称作振动基态。在强束缚条件下我们可以通过边带冷却或者拉曼边带冷却的方法将离子冷却到振动基态。如果离子处于振动基态就不能被进一步冷却了。有了上面这两个现象,我们通过两束分别针对两个离子作用的激光对就可以实现将它们关联起来的目的,下面来看看具体如何实现。

首先我们把离子冷却到振动基态，先假设待测离子处在电子状态0，这时针对待测离子电子状态0的激光会加热待测离子，逻辑离子这时也跟着变热了。此时针对逻辑离子进行一次冷却，我们发现因为激光的作用逻辑离子的电子状态从0变成了1。反过来，如果待测离子处在电子状态1，此时针对待测离子电子状态0的激光并不会加热离子。所以针对逻辑离子进行冷却也不起作用了(因为离子都处在振动基态，不能继续被冷却了)，那么逻辑离子就依然维持在电子状态0上。如此一来，我们通过激光的作用就实现了系统状态信息的传递，而量子逻辑光谱探测的过程也就完成了。

可见，为了进行量子逻辑过程，首先要进行的重要一步是将离子冷却到振动基态，以 $^{25}\text{Mg}^+$ 为例，可以使用拉曼边带冷却的方法将其冷却至振动基态。图7是其相关能级图，图中 $|\downarrow\rangle$ 和 $|\uparrow\rangle$ 是其基态超精细能级的两个态，这里作为量子比特态。拉曼边带冷却的基本原理为，对于初态在 $|\downarrow\rangle$ 的镁离子，使用一阶或二阶红边带拉曼脉冲作用，离子将发生拉曼跃迁，其振动量子数 n 将会减小1或2个，同时离子跃迁到 $|\uparrow\rangle$ 态上。这里拉曼跃迁使用两束9.2 GHz的失谐激光实现。其中一束是传播方向垂直于磁场且偏振方向平行于磁场的线偏振光(即 π 光)；另一束激光为沿磁场方向传播的圆偏振光(即 σ 光)。然后进行回泵，离子被回泵到 $|\downarrow\rangle$ 态，且回泵过程中离子的振动量子数 n 几乎保持不变，再重复进行下一轮拉曼红边带冷却，最终当 n 降到足够低时，离子有很大的可能处在 $n=0$ 的振动态上，此时拉曼红边带将不再能够对离子作用。冷却之后的离子可以用探测拉曼谱红蓝边带强度比的方法推断其振动量子数。图8为冷却之后镁离子的拉曼谱，根据红蓝边带强度比计算出其对应离子的平均振动量子数为0.05(2)。

4 结束语

如上文中所述，经过短短几十年的发展，目

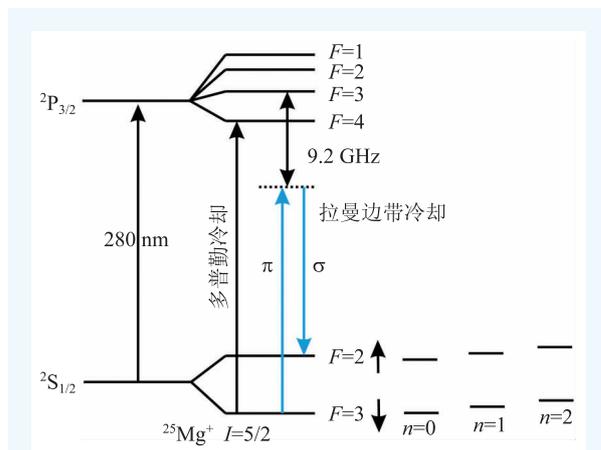


图7 $^{25}\text{Mg}^+$ 离子的相关能级图(其中基态超精细分裂的两个能级作为量子比特态，而每个量子比特态又存在不同的振动态($n=0, 1, 2, \dots$)，拉曼边带冷却使用了红失谐为9.2 GHz的一对光作为拉曼光)

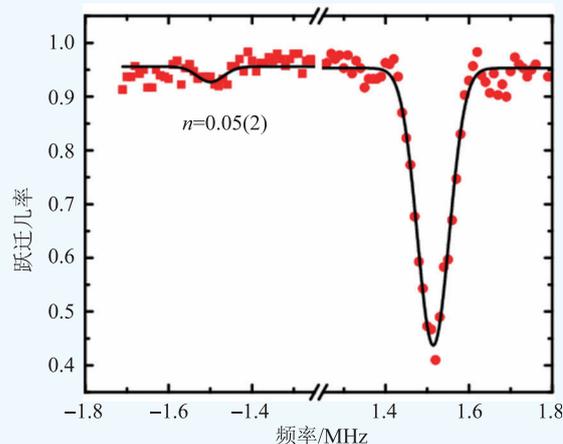


图8 经过拉曼边带冷却后的拉曼谱，对应离子的平均振动量子数为0.05(2)^[47]

前囚禁离子光频标的精度已经超过了世界上最好的微波钟，凭借对时间频率的超高精度测量，囚禁离子光频标的应用将不仅仅局限于时间标准及计量领域，在推动基础物理理论、前沿应用等方面也会有重要的应用。随着相关技术的不断发展，囚禁离子光频标的研制也一步步走向成熟。目前最好的囚禁离子光频标已经达到了 10^{-18} 量级的精度。可以预见，在不远的将来，随着囚禁离子光频标的发展和技術上的进一步成熟，囚禁离子光频标有望将取代铯喷泉钟来重新定义国际单位制“秒”，从而在上述各方面发挥更大的贡献。

参考文献

- [1] Dehmelt H, *Bull. Am. Phys. Soc.*, 1973, 18: 1521
- [2] Bergstrom I *et al.* *Nuc. Instrum. & Metho. Phys. Resear. A*, 2002, 487: 618
- [3] Paul W, Steinwedel H. *Zeitschrift f. Naturforschung A*, 1953, 8: 448
- [4] Van Dyck Jr R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1993, 70: 2888
- [5] Dehmelt H, Walls F. *Phys. Rev. Lett.*, 1968, 21: 127
- [6] Wineland D, Ekstrom P, Dehmelt H. *Phys. Rev. Lett.*, 1973, 31: 1279
- [7] Van Dyck Jr R, Schwinberg P, Dehmelt H. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 59: 26
- [8] Schuessler H *et al.* *Phys. Rev.*, 1969, 187: 5
- [9] Ghosh P. *Ion Trap*. Oxford: Clarendon Press, 1995. 7
- [10] Neuhaser W *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 41: 233
- [11] Wineland D *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1978, 40: 1639
- [12] Neuhaser W *et al.* *Phys. Rev. A*, 1980, 22: 1137
- [13] Drever R, Hall J, Kowalski F *et al.* *Applied Physics B*, 1983, 31: 97
- [14] Kessler T *et al.* *Nature Photonics*, 2012, 6: 687
- [15] Spence D, Kean P, Sibbett W. *Opt. Lett.*, 1991, 16: 42
- [16] Asaki M, Huang C, Garvey D *et al.* *Opt. Lett.*, 1993, 18: 977
- [17] Reichert J, Niering M, Holzwarth R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1999, 84: 3232
- [18] Diddams S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 84: 5102
- [19] Hall J. *IEEE J. of Quant. Electron.*, 2000, 6: 1136
- [20] Ye J, Cundiff S. *Femtosecond Optical Frequency Comb*. Springer, 2005
- [21] Barwood G *et al.* *Phys. Rev. A*, 2014, 89: 050501
- [22] Dubé P *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112: 173002
- [23] Godun R *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 113: 210801
- [24] Huntemann N *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 090801
- [25] Rosenband T *et al.* *Science*, 2008, 319: 1808
- [26] Chou C *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 070802
- [27] von Zanthier J, Becker T *et al.* *Optics Letters*, 2000, 25(23): 1729
- [28] Chwalla M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2009, 102: 023002
- [29] Matsubara K *et al.* *Opt. Express*, 2012, 20: 22034
- [30] Huntemann N *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 063001
- [31] Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Report of the 19th Meeting (September 13—14, 2012)
- [32] Huang Y *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2016, 116: 013001
- [33] Zhang J *et al.* *Rev. Sci. Instrum.*, 2014, 84: 123109
- [34] Zhou H *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2015, 32: 054207
- [35] Recommendation 2(c2-2009)-(CIPM). <http://www.bipm.org/utills/en/pdf/CIPMOutcomes/CI-2009-Recommendation-2.pdf>
- [36] Champenois C *et al.* *Phys. Lett. A*, 2004, 331: 298
- [37] Jurcevic P *et al.* *Nature*, 2014, 511: 202
- [38] Ramm M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 023004
- [39] Sherman J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 180501
- [40] Sahoo B *et al.* *Phys. Rev. A*, 2006, 74: 062504
- [41] Shu H *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2005, 22: 1641
- [42] Guo B *et al.* *Front. Phys. China*, 2009, 4: 144
- [43] Liu Q *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2011, 28: 013201
- [44] Guan H *et al.* *Opt. Commun.*, 2011, 284: 217
- [45] Huang Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 2011, 84: 053841
- [46] Schmidt P *et al.* *Science*, 2005, 309: 749
- [47] Deng K *et al.* *Sci. Sin-Phys. Mech. Astron.*, 2016, to be printed

读者和编者

《物理》有奖征集
封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649470；82649029

《物理》编辑部