

测则要满足众多条件:类星体要足够亮,吸收体的红移要大于 3,使 Lyman 系列能红移至地面的可见区.且柱密度要足够高,丰度要尽可能低.最后还要足够幸运,使这个比氢线弱四个量级的 D 线不被其他氢云所污染或遮挡.

1994 年,两个组相互独立地选取了同一个类星体和同一个吸收云,并相继取得成功,得到的 D/H 值为  $(1.9-2.5) \times 10^{-4}$ <sup>[9,10]</sup>,他们分别估计一个外来氢云恰好落在 D 线位置内的几率为 3% 和 15%,因此,这一结果在没有得到其他吸收云的证实之前只能作为 D 丰度的上限值.它与文献[2]根据太阳系观测推得的  $y_{23p}$  的上限  $1.0 \times 10^{-4}$  显著矛盾,但却与  $Y_p$  偏小的趋向相洽,因而引起极大关注.如果这一观测结果被对其他高红移吸收云的观测所证实,那么原来对  $y_{23p}$  的推断有问题.人们必须面对银河系的化学演化问题:如何解释 D 丰度如此大幅度降低而  $^3\text{He}$  丰度却没有显著增长.要消耗掉  $^3\text{He}$ ,必须增加经过大质量恒星过程的气体的比例,而这必然会加重元素的产额,宇宙重元素的总和构成了对通过恒星过程的气体数量的严格限制.所以说,要显著降低  $g_3$  是十分困难的.正是在这个意义上 Steigman<sup>[11]</sup>认为,观测到的吸收线不是来自 D 而是来自飞行中的氢.

看来,对于 SBBN 理论来说,对河外 H II 区中  $^4\text{He}$  丰度和高红移吸收云中 D 丰度的进一步测量是至关重要的,与此同时,关于 D 和  $^3\text{He}$  丰度的化学演化以及  $^7\text{Li}$  丰度的进一步研究也是应当重视的.

## 参 考 文 献

- [ 1 ] The LEP Collab., *Phys. Lett. B*, **276**(1992), 247.
- [ 2 ] T. P. Walker, G. Steigman, D. N. Schramm et al., *Astrophys. J.*, **376**(1991), 51.
- [ 3 ] M. S. Smith, L. H. Kawano, R. A. Malaney, *Astrophys. J. (Suppl. Ser.)*, **85**(1993), 219.
- [ 4 ] D. S. P. Dearborn, D. N. Schramm, G. Steigman, *Astrophys. J.*, **302**(1986), 35.
- [ 5 ] C. P. Deliyanies, Ph. D. Thesis, Yale Univ., (1990).
- [ 6 ] D. R. Garnett, R. J. Dufour, M. Peimbert et al., *Astrophys. J.*, **449L**(1995), 77.
- [ 7 ] K. A. Olive, G. Steigman, *Astrophys. J. (Suppl. Ser.)*, **97**(1995), 49.
- [ 8 ] P. Kernan, Ph. D. Thesis, Ohio State Univ., (1993).
- [ 9 ] A. Songila, L. L. Cowie, C. J. Hogan et al., *Nature*, **368**(1994), 599.
- [ 10 ] R. F. Carswell, M. Rauch, R. J. Weymann et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **268**(1994), 11.
- [ 11 ] G. Steigman, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, **269L**(1994), 53.

## 离子囚禁技术与量子计量基准的新进展\*

罗 学 立      朱 熙 文

(中国科学院武汉物理研究所, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071)

**摘 要**      利用静电场、静磁场和射频场可以将离子长时间地囚禁在不受外界干扰的离子阱中, 在离子阱中开展的关于离子运动频率和内部能级的超高精确测量, 对于计量学有非常重要的应用前景, 特别是在原子质量基准和时间频率标准方面已取得突破性进展.

**关键词**      离子囚禁, 质量基准, 频率基准, 计量

离子和离子过程在原子分子物理、化学、天      体物理和生命科学等领域中起着非常关键的作用

\* 国家自然科学基金和中国科学院重点基金项目基金资助项目.  
1995 年 9 月 4 日收到初稿, 1995 年 11 月 6 日收到修改稿.

用. 但由于离子带电, 易于反应与复合, 给实验研究带来了困难. 离子囚禁技术利用静电场、静磁场或射频场, 可以在较长时间内将离子约束在一般为超高真空的很小的空间几何构型(离子阱)中. 德国玻恩大学 Paul 教授首创了射频离子阱(Paul 阱)<sup>[1]</sup>, 美国华盛顿大学的 Dehmelt 教授, 成功地发展了离子囚禁技术, 开展了原子基本常数和光谱学的精密测量<sup>[2]</sup>, 共同获得 1989 年诺贝尔物理学奖.

80 年代以来, 由于激光冷却等相关技术手段的发展, 囚禁离子的物理研究和应用研究又有了长足的进步, 人们进行了很多非常精密的实验, 提出了一些新的迷人的设想. 美国华盛顿大学的 Dehmelt 小组、麻省理工学院 Pritchard 小组以及哈佛大学 Gabrielse 小组, 在 Penning 阱中囚禁了某些特殊离子, 如电子和正电子、质子和反质子、氢和氦、氘和氚等, 精密测量了它们的质量比. 此类实验与检验 CPT 守恒(电荷共轭、宇称守恒和时间反演)及中微子质量有关, 并有希望发展成为一种新的质量基准<sup>[3-5]</sup>. 美国加州理工学院喷气推进实验室 Prestage 小组研制了具有最高长期稳定度的线性离子阱频标, 其改进型由于体积小重量轻, 可望搭载人造卫星用于检验引力理论和构成 GPS(全球定位系统)<sup>[6]</sup>. 其他主要经济发达国家, 也广泛进行了类似项目及其他相关项目的研究, 如新的激光冷却技术、有序相结构(库仑簇)和相变过程、单个冷却离子的量子跳跃和光子统计特性等.

离子阱中关于物质基本属性和运动状态的超高精密测量, 不仅促进了物理学本身的发展, 而且在计量学中也有非常重要的应用前景. 广义地讲, 计量包括所有的测量, 它在生产实践、科学研究和人们的日常生活中起着非常重要的作用. 每一项工程的设计和建设, 自始至终都离不开测量; 现代科学技术的每一项新发现都是测量的结果, 每一个新的理论都需要通过实验测量加以验证; 同样, 现代社会中人们的衣、食、住、行等各方面也都与计量密切相关. 测量实际上就是一个未知的量与一个定义为基准的

量进行比较的过程, 因此计量基准精确程度的提高(例如从沙漏、日晷到钟表), 也就意味着人类认识水平和生产力水平的提高. 1960 年国际计量大会以保存在法国塞佛尔的一套原器为主基准, 建立了国际单位制(SI), 以后的历届大会对此单位制提出过若干改进意见. SI 单位制的基本单位有长度单位米(m)、时间单位秒(s)、质量单位千克(kg)、物质的量单位摩尔(mol)、电流单位安培(A)、热力学温度单位开尔文(K)和发光强度单位坎德拉(cd)<sup>[7]</sup>. 本文将主要论述囚禁离子的基本原理和方法及其在时间频率基准和原子质量标准两方面应用的最新进展.

## 1 Penning 阱和原子质量基准

世界由物质组成, 描述物质多少的物理量是质量. 质量基准是目前 SI 单位制中唯一仍利用人工制造的物体定义的, 其主基准(千克原器)是保存在法国塞佛尔的一个铂铱合金圆柱体. 它除精确度不高( $\sim 10^{-9}$ )外, 还存在长时漂移、可能遗失和损坏以及难与其他低密度物体进行比较等缺点. 事实上, 为了避免比对过程中可能存在的人为损伤, 近一个世纪以来, 该主基准只使用过三次.

另一个描述物质多少的量是摩尔量, 它与构成物质的原子量或分子量有直接联系. 1971 年第 14 届国际计量大会规定摩尔是一系统的量, 该系统中所包含的基本单元数与 0.012kg 碳-12 原子的数目相等, 基本单元可以是原子、分子、离子、电子及其他粒子, 或者是这些粒子的特定组合. 换言之, 1mol 碳-12 原子重 0.012kg, 其所包含的碳-12 原子的数目与所有 1mol 由其他基本单元构成的物质的基本单元数目相等, 这一数目称为阿伏伽德罗常数( $N_A$ ). 质量与摩尔量既有区别又有联系, 前者描述物质的量的方面, 后者描述构成物质的基本单元数的方面. 目前在 Penning 阱中进行的原子质量比对的精确度已达 $10^{-10}$ 数量级以上, 结合其他技术手段, 将有可能发展成为一种新的稳定普适的原子质量基准, 取代现今唯一的一个人

工原器基准,并将质量和摩尔量更加紧密地结合起来.

Penning 阱的几何构型如图 1 所示. 环极和上下帽极都是绕轴向( $z$  轴)旋转对称的双曲面,当两个帽极相对环极为高电位  $U_0$  时,正离子在轴向将受到一个指向阱心的、与位移成正比的囚禁力的作用,而径向囚禁则通过平行于  $z$  轴的静磁场来实现. 在静电场和静磁场的共同作用下,离子的运动可以化解成三种正则模式:沿轴向的谐振动( $\omega_z$ )以及在垂直于  $z$  轴平面内主要由磁场引起的回旋运动( $\omega_c$ , 经电场修正后成  $\omega'_c$ )和主要由洛伦兹力引起的磁控运动( $\omega_m$ ),三者频率满足

$$\omega_c = \frac{eB}{m} = \sqrt{\omega_c'^2 + \omega_z^2 + \omega_m^2}. \quad (1)$$

显然,如果测得两种不同离子在同一磁场中“自由空间”的回旋运动频率  $\omega_c$ , 则就可得到它们之间的质量比, Penning 阱中高精确质量比对正是利用这一原理来进行工作的.

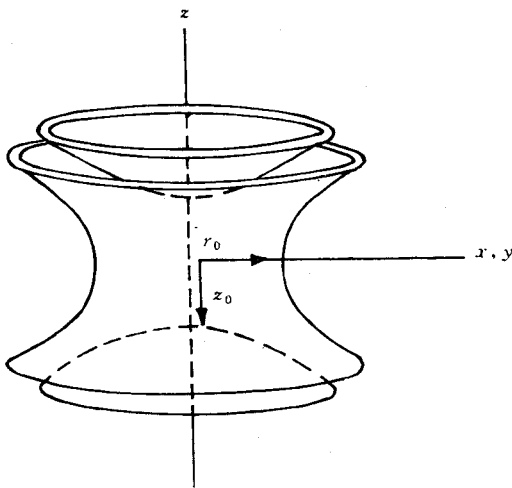


图 1 Penning 阱的几何构型

Pritchard 小组的 Penning 阱的主要电极都是用高导电的无氧铜加工而成,电极表面镀有一层石墨薄膜以减少吸附的电介质碎片产生的杂散场. 在环极与两帽极之间还装有两个分成两半的辅环极,用来消除高阶电场分量和检测离子运动. 阱体装在超高真空室内,然后又一齐置于温度保持在 4.2K 的 8.5T 超导磁场中. 离子在阱外产生以后再注入阱中,由计算机控

制的整个离子产生系统可以在 3min 之内使离子阱从空阱到多离子再到只剩一个离子的状态. 每种离子都分别一个一个地测量多次,以减少离子间的库仑作用影响和统计误差. 轴向运动频率可以通过在帽极上的感应电流测量,整个检测电路包括超导共振电路( $Q$  值高达 25000)和射频 SQUID(超导量子干涉仪).

径向回旋运动和磁控运动不易直接冷却和测量. Wineland 和 Dehmelt 建议通过加在相对的两辅环极上频率为两运动模频率之差或之和的非均匀射频场来达到轴向与径向运动的耦合<sup>[8]</sup>,利用这一方法测量了氚与氦-3 之间的质量差,精度超过  $10^{-9}$ ,该实验与检验中微子质量有关<sup>[3]</sup>. Pritchard 小组 Cornell 等人则提出了  $\pi$  脉冲方法<sup>[9]</sup>,使回旋运动和轴向运动发生相互交换,此时轴向检测电路将测得回旋运动的位相,频率则是所得位相的时间导数. 磁控运动也可以用类似的方法测量,最后得到的质量测量精确度达  $10^{-10}$  数量级,已超过宏观物体的质量比对精度. 当测量质量相差大的离子时(质量比  $\neq 1$ ,称为非双重态),由于离子平均位置不同而引起的误差必须加以考虑. 如果在测量时保持所加直流电压不变,就可以使离子在阱中所处的平均位置基本相同,故由于杂散场引起的误差差不多可以相互抵消. 但此时若离子质量相差较大,则其运动频率就很难都与检测电路共振. 为了解决这一矛盾, Pritchard 小组采用 Ramsey 分离振荡场原理来测量离子的经典运动,即首先施加相隔一定时间间隔的两个相同的脉冲,使离子的回旋运动产生干涉而出现 Ramsey 花样,然后改变电压大小,再通过  $\pi$  脉冲方法进行测量<sup>[4]</sup>.

非双重态原子的质量比对是迈向原子质量标准的一步,因为这将允许我们将任何离子直接与碳-12 进行比对. 特别是通过  $CD_3^+$  或  $CD_4^+$  与  $C^+$  的比对,我们可以得到非常精确的氢和氘的质量,它们就像质量最小的砝码一样,通过添加适当的数目,就可以将所有的质量比对都化为双重态之间的比对. 为了真正实现原子质量基准,还必须实现从微观基准

(碳-12)到宏观基准(千克原器)的过渡.理论上可以通过将 $N_A$ 定义为一个精度足够高的常数;而实践上可行的方案之一是使用超高纯净的硅-28晶体,通过其晶格常数的直接测量以及与千克原器的密度比对, $N_A$ 的测量精度已达 $1.1 \times 10^{-6}$ .主要的误差来源是硅同位素丰度不够,改进以后精度可望达到 $10^{-8}$ 数量级,与硅-28原子质量的高精确测量相结合(Pritchard小组已达 $7 \times 10^{-11}$ ),将最终实现原子质量基准.

## 2 射频阱和时间频率标准

一切物质均随时间的进程不断运动和变化.为了描述这种运动和变化,时间计量是不可缺少的.时间是流逝的过程,时间基准不可能用原器的形式保存起来.因为周期运动的频率和周期互为倒数,所以时间基准和频率基准是一致的.对时间基准的基本要求是它的周期均匀性或稳定性,其主要性能指标是它的频率准确度和稳定度.准确度表示频标的实际输出信号频率与其标准频率之间的符合程度,稳定度则是一定的取样时间内平均输出频率的波动程度.

原子物理的进步使人们认识到,不受外界干扰的自由原子分子内部的基本属性是非常稳定的,其集中体现就是它们的能级结构和在各能级之间跃迁时发射或吸收电磁波频率的高度确定性.利用原子的这种固有属性的时间频率标准称为量子频标<sup>[10]</sup>.1967年第13届国际计量大会将铯-133原子零场基态 $6^2S_{1/2}$ 超精细能级跃迁 $|F=4, m_F=0\rangle \rightarrow |F=3, m_F=0\rangle$ 的9192631770个周期的持续时间定义为1s,称为原子秒.目前氢激光射器频标(H-maser,也称氢钟)的稳定度已达 $10^{-15}/h$ ,铯束频标(铯钟)的准确度则已跨入 $10^{-14}$ 数量级.哈佛大学的Ramsey教授正是由于在氢激光射器和量子电子学方面的贡献,与Dehmelt及Paul一齐获得1989年诺贝尔物理学奖.

量子频标不但在测量基本物理常数(如电

子 $g$ 因子)、检验物理理论(如引力理论、量子电动力学)等方面作出了重要的贡献,同时还广泛应用于通信、导航、天文观测、大地测量、电网调节乃至高速交通管理等国防和经济部门.另一方面,由于时间基准是所有7个基本单位中精确度最高的,因此人们尽可能将其他物理量转化为频率或时间来进行测量.例如,1983年第17届国际计量大会规定米是光在真空中于 $(1/299792458)$ s时间间隔内所经路径的长度,这一定义的物理基础是爱因斯坦的光速不变原理,它通过光速的超高精确测量把米的定义与时间的定义结合起来.另外还有通过约瑟夫森效应将电压测量转化为频率测量等等.

由于一些高新技术和科学研究对时间频率计量提出了比现有频标更高的要求,如导航和飞船的深空跟踪,要求稳定度优于 $1 \times 10^{-15}/(10^4-10^5)$ s,频率基准希望准确度优于 $10^{-13}$ ,寻找引力波则要求稳定度接近 $1 \times 10^{-15}/$ 年,从而推动了新型高性能频标的研制.离子囚禁技术可以将离子长期囚禁在超高真空的离子阱中,使离子免受外界干扰和氢激光射器中壁移之类的麻烦,同时当离子在阱中运动的空度尺度小于辐射波长时(这在微波段很容易满足),就可以有效地抑制一级多普勒效应,因此离子囚禁技术可望获得极窄的稳定谱线,从而制成有很高准确度的频率基准或者有很高稳定度的能长期连续工作的标准频率源.

为了避免塞曼效应的影响,在基于离子阱的频标技术中,通常采用没有磁场的射频阱.射频四极阱(Paul阱)的几何结构与Penning阱完全相同,但不用磁场而是用加在环极和帽极之间的一个交变电场 $V_0 \cos \Omega t$ 来实现离子的囚禁,在此电场的半周期之内,离子在轴向运动是稳定的而在径向是不稳定的,后续半周期情况恰好相反.只要离子的质量足够大,就有可能来不及响应该射频场的变化而总是感受一个指向阱心的弱力作用,从而达到离子囚禁的目的.1986年和1987年,美国惠普公司的Cutler等人研制了两台用Hg-199为工作物质、Hg-202谱灯抽运的Paul阱频标,在美国海军天文台连

续运行,其长稳性能优于商品铯频标. Hg-199 和 Hg-202 的能级结构如图 2 所示. 用 Hg-202 谱灯发出的 194.2nm 的谱线对 Hg-199 离子  $F = 1$  的基态进行抽运, 结果在数秒之间将  $F = 1$  的基态抽空, 使离子集中在  $F = 0$  的基态能级上. 当送入满足基态超精细共振  $40507347996.9(0.3)\text{Hz}$  的微波信号时, 离子跃迁到  $F = 1$  能级并重新吸收光跃迁到  $^2P_{1/2}$ , 检测的荧光信号通过反馈回路最终锁定微波信号源的输出频率, 使之成为微波频率标准.

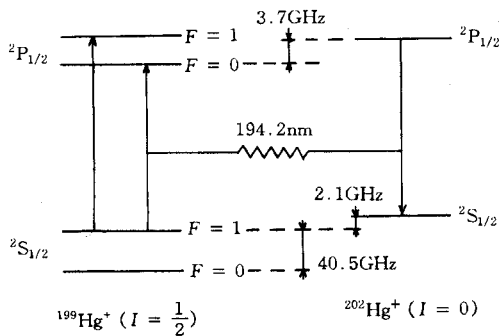


图 2  $^{199}\text{Hg}^+$  和  $^{202}\text{Hg}^+$  的能级结构

Paul 阱频标的缺点是离子密度较低, 信噪比差. 这是因为只有阱心一点场强为零, 当离子数目增加而形成离子云时, 离子间将互相排斥, 严重影响阱中的电势分布, 同时还会出现射频加热效应, 产生较大的二级多普勒频移. 为了克服这一缺点, 80 年代末加州理工学院喷气推进实验室 (JPL) Prestage 小组提出了线性离

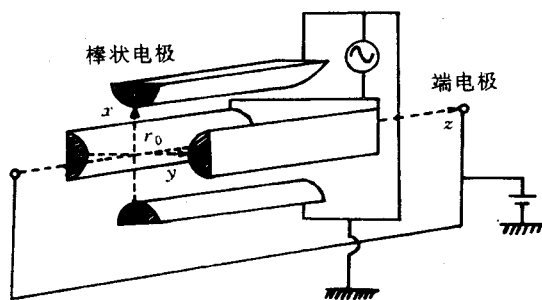


图 3 线性离子阱的结构

子阱频标. 线性离子阱的结构如图 3 所示. 在四根棒状电极的两两相对之间加上射频场以达到径向囚禁, 轴向囚禁则通过加在两端极上的

静电势实现. 因为其轴线的很长一段都可认为场强为零, 因此可以达到增加离子密度、提高信噪比的目的. JPL 已完成两台谱灯选态的 Hg-199 线性阱频标, 其中 Hg-199 离子通过氦缓冲气体冷却到室温, 以进一步减小谱线的二级多普勒效应. 实测稳定度为  $1 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$  ( $\tau$  为取样时间), 漂移为  $5 \times 10^{-16}/\text{日}$ , 长稳 ( $\tau > 10^4\text{s}$  后小于  $1 \times 10^{-15}$ ) 性能明显优于氢钟和其他现有频标. JPL 正在研制离子产生和选态区与微波共振区分离的分区式线性阱频标, 以进一步提高性能指标, 并减小体积和重量到单区式的 1/10 左右, 预计将制成重量为 10kg 左右、体积小于 100L、稳定度优于  $1 \times 10^{-15}/10^4-10^5\text{s}$  的高可靠性的星载频标, 以取代现有的氢频标而构成 GPS. 美国国家标准技术研究院的 Wineland 小组也正在研制激光冷却和选态的 Hg-199 线性阱频标, 由于进一步抑制了二级多普勒效应, 准确度预计将超过现有的铯束基准. 另外, 在新的工作物质 (如钷、钙、铯)、新的阱构型 (如环形阱) 和多频段 (从微波到红外和可见光区) 等基础性研究方面人们也开展了很多有益的探索.

### 参 考 文 献

- [1] W. Paul and M. Raether, *Z. Phys.*, **140**(1955), 62.
- [2] H. G. Dehmelt, *Adv. Atom. Molec. Phys.*, **3**(1967), 53.
- [3] R. S. Van Dyck, Jr., D. L. Farnham, P. B. Schwinbery, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993), 2888.
- [4] V. Natarajan, K. R. Boyce, F. DiFilippo et al., *Phys. Rev. Lett.*, **71**(1993), 1998.
- [5] G. Gabrielse, X. Fei, L. A. Orozco et al., *Phys. Rev. Lett.*, **65**(1990), 1317.
- [6] J. D. Prestage, G. J. Dick and L. Maleki, *J. Appl. Phys.*, **66**(1989), 1013.
- [7] 陈训浩、张盖楚, 法定计量单位的正确使用和常见错误, 金盾出版社, (1991).
- [8] D. J. Wineland and H. G. Dehmelt, *Int. J. Mass Spectro. Ion Proc.*, **19**(1975), 251.
- [9] E. A. Cornell, R. M. Weisskoff, K. R. Boyce et al., *Phys. Rev. A*, **41**(1990), 312.
- [10] 王义道、王庆吉、傅济时等, 量子频标原理, 科学出版社, (1986).