

囚禁冷却离子光频标^{*}

高克林[†]

(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 激光技术和冷原子物理的发展促进了冷原子光频标的研究. 文章主要介绍了激光技术与光频标的关系, 并重点介绍囚禁离子光频标的工作原理和相关的研究进展.

关键词 激光技术, 冷却原子, 光频标

Optical frequency standards based on trapped ions

GAO Ke-Lin[†]

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

Abstract New optical frequency standards are being developed with laser technology and cold atoms. In this article the relationship between laser technology and optical frequency standards is briefly reviewed. Emphasis will be placed upon the general principle and recent progress in the establishment of optical frequency standards based on trapped ions.

Keywords laser technology, cold atoms, optical frequency standards

时间(或频率)系统是人类文明发展中的一个重要组成部分. 日常生活中每个人都会不可避免地和时间打交道, 很难想象如果没有计时的各种钟来告诉我们时间, 人们的生活将会怎样?

同时科学的发展离不开实验测量, 若没有精确和准确的测量, 我们的科学又将会怎样发展? 对时间系统测量的精确度的提高无疑依赖于相关科学原理和技术的发展. 激光的发明和技术的发展, 大力推进了物理学等许多科学与技术领域的发展. 近年来原子光频标的发展是典型的事例之一. 原子光频标与激光的关系如何? 激光的发展如何促进光频标的发展? 本文试图就此作一简要的阐述, 有关其详细内容可参阅本文的参考文献和在《物理》上发表的相关光频标的文章^[1-4].

1 频标与光频标

时间是基本的物理量之一. 时间标准是人类探测和研究物质的运动和变化的标尺. 在人类历史上, 人们自然地把时间同地球的自转联系起来. 后来, 我

们的祖先就把水钟作为最早的时间计量设备. 17 世纪前后, 由于航海活动的需要, 人们开始追求较高精度的时间计量器件. 1928 年, 国际天文学协会推荐由天文年鉴来确定时间, 称为“世界时”, 人类才有了明确的时间定义. 20 世纪 60 年代开始, 随着科学技术的发展, 人们认识到未受干扰的原子的能级跃迁可以提供近乎完美的、普适的时间标准. 经过多年的不懈努力, 1967 年, 科学家们第一次用原子时间来定义“秒”, 即铯原子 133 同位素基态的两个超精细能级之间跃迁所对应辐射周期的 9,192,631,770 倍的时间. 由此导致原子频标的实现.

原子频标标准(简称原子频标或原子钟)是利用量子力学原理制成的高稳定性和高准确度的频率、时间信号产生系统. 由于铯原子基态的两个超精细能级之间的跃迁频率在微波波段, 因此建立的频率标准称为“微波钟”. 目前世界时和频率基准(实验室

^{*} 国家自然科学基金(批准号:6049028)、国家重点基础研究发展计划(批准号:2005CB724500)资助项目

2010-08-09 收到

[†] Email: klgao@wipm.ac.cn

型原子钟)所采用的原子频标——冷铯原子喷泉钟的准确度达到了 3.3×10^{-16} [5]。

在人们目前所涉及的物理常数中,时间频率作为最精密、最准确的计量单位,决定着其他许多物理量和基本物理常数的定义和精度。原子频标不仅可用于精密检验物理学基本理论和定律、精确测量物理常数及可能的变化,而且已广泛应用于国民经济各个领域,如全球定位系统(GPS)以及信息高速公路和城市交通管理等方面。

随着科学的发展,时间的精密计量研究有了新的推动力:一方面新的技术被用于发展高精度的时间计量,另一方面精确的时间计量对基础科学的发展起着重要的推动作用。时频精度的每一次提高,都使人们对物质世界有更深层次的认识。

随着激光的发明和激光技术的发展,原子频标有了新的进展。早在激光诞生后不久,人们就想到采用光频标代替微波钟作为新的时间基准的可能性。所谓光频标,就是利用原子在光波波段的跃迁来定义的时间/频率标准。

为什么要发展光频标呢?我们知道,基于原子跃迁的时间/频率标准的稳定性和精度与下式有关:

$$\sigma(\tau) \sim \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \frac{1}{\sqrt{N} \sqrt{\tau}},$$

式中 $\Delta\nu$ 和 ν_0 分别是原子跃迁的线宽和中心频率, N 是与电磁场相互作用的原子个数, τ 是测量时间。

从原理上讲,频标的相对频率准确度和稳定性与原子的中心频率成反比,由于光频的频率在数百 THz 量级,比微波频率 GHz 高多个量级,如果其对应的光学波段参考谱线的线宽 $\Delta\nu$ 与工作微波波段的频标的线宽相同,那么光频标用于稳频谱线的 $Q(=\nu_0/\Delta\nu)$ 值则为微波频标的几万倍,即从理论上预言光频标的稳定性和准确度比微波频标高出 4—5 个量级。采用光频标可望得到不稳定性的极限为 $1 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ 和优于 10^{-18} 的准确性 [6], 这无疑会大大推动精密谱的研究。光频标的建立,将进一步改进国际单位制体系,得到更准确的全球定位系统和更广泛应用的卫星通讯系统,所以科学家们一直期盼着建成光频标。

2 激光技术与光频标

同所有的原子频标一样,光频标也有两个基本组成部分:振荡器和计数器。振荡器由超窄线宽激光源和不受相互碰撞及外界环境干扰的原子或分子系

统(如光晶格中的冷原子或离子阱中的单个冷离子)组成。当窄线宽激光与原子的钟跃迁能级共振时,用伺服系统将它的频率锁定在原子的钟跃迁频率上,使得该激光的频率既精确又稳定。此时,激光就是光频标中的振荡器。

而微波与光波的连接需要一把尺子。飞秒激光频率梳(简称飞秒光梳)的发展为光频标提供了一个非常精确的“齿轮”,它可以将光频的精度传递到微波波段,从而实现记录和显示。此时,飞秒光梳就是光频标中的计数器。

2.1 光频跃迁探测的激光

原子钟跃迁探测光的线宽和稳定性是冷原子光频标的关键技术之一。一般选择的光频跃迁的自然线宽在 Hz 量级,这样对探测激光的线宽和稳定性提出了要求,需要一个亚赫兹量级线宽的超稳激光源, Q 值要达到 10^{15} 的量级。

目前采用 Pound-Drever-Hall(以下简称 PDH)稳频方法得到线宽为亚赫兹量级的激光器(见图 1) [7],即通过伺服系统将激光频率锁定到高精度的光学谐振腔上,该光学谐振腔由超低膨胀系数(ULE)材料制成并被放置在温度极其稳定、环境噪声极小的环境中。

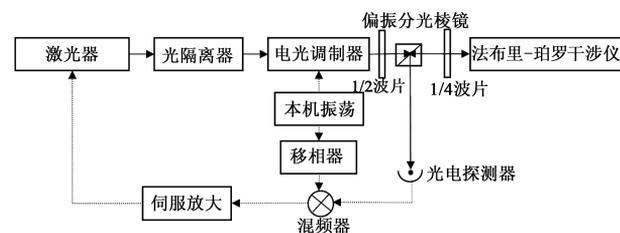


图 1 Pound-Drever-Hall 稳频方法原理图

稳频和线宽压窄方案如下:首先用电光调制器对激光输出进行相位调制。调制后的光信号入射到一高稳定度光学谐振腔并得到反射信号。利用该反射信号得到的误差信号将激光频率锁定在精细度在几十万左右谐振腔的超窄谐振峰上。激光器的频率调整可通过改变激光谐振腔长和外加声光调制器来完成。最后通过反馈控制电路,对反馈信号进行分频后再传给相应的频率调整机构。

激光稳频需要一个精细度极高,同时稳定性很好的参考腔,人们目前使用了超低膨胀系数的参考腔。这类腔主要由 ULE 材料制成,这种材料在 5—35℃ 时的热膨胀系数是 $(0 \pm 30) \times 10^{-9} / ^\circ\text{C}$, 并有一个膨胀系数为 0 的点,也就是通常所说的“拐点”。用光胶的办法把光学谐振腔的两个腔镜分别粘在腔体的两端,并且整个光学谐振腔被放置在一个真空

室内,进行温度控制和振动隔离。

1999年,美国国家标准与技术研究所(NIST)用PDH锁定技术锁定了激光器,并用几根长为3m的橡皮拉力带将整个真空室竖直吊起,首次将激光的线宽压缩到亚赫兹量级^[8]。

而美国科罗拉多大学和美国国家标准和技术研究所联合实验室(JILA)将光学谐振腔竖直支撑,使腔的光轴方向竖直,并且把支撑点选择在通过腔体重心的水平面上,此时总的腔长对竖直方向的振动不敏感。由此也可将激光的线宽压缩到亚赫兹量级^[9]。

2.2 飞秒光梳系统

计数器是实现光波与微波的连接和传递的手段之一。

为了实现微波频率与光学频率的连接,人们很早就提出了频率链的方案,其主要思想是通过非线性频率变换等手段,将待测的激光频率经过差频、和频以及拍频等手段与微波联系起来。由于在这种方案中复杂的技术和低的非线性效率,需要许多的激光器组成一个频率链,使用起来非常麻烦;并且每一个频率链只能测量一个激光频率,也即测一些孤立的频率,因而限制了它的广泛应用。在2000年前,仅有少数几个先进实验室建立了直接测量光学频率的光频链^[10]。

随着超短脉冲钛宝石激光系统的发展,促成了飞秒光梳的诞生^[11]。

前苏联科学院的契巴塔耶夫与德国马克斯普朗克量子光学研究所(MPQ)的亨施(Theodor W. Hänsch)教授提出利用脉冲激光进行激光频率的精密测量的思想,把在时间域内等间距的脉冲激光转换到频率域变成等间距的频率梳^[12,13]。

由激光原理可知,一个腔长为 L 的谐振腔在所输出的光谱范围内存在着许多等间隔的纵模,相邻纵模的频率间距为 $c/2L$,其中 c 是光速,这样第 n 级的光梳绝对频率可以表示为

$$f(n) = nf_{\text{rep}} + \delta,$$

这里 δ 是偏置频率。

由于激光脉冲的重复频率 f_{rep} 通常在100MHz左右,这样 f_{rep} 及 δ 都在微波频率的范围,可以分别锁定到微波原子频标上。如要测量任一未知光学频率 f_0 ,只要测出其与其邻近光梳频率 $f(n)$ 的差 Δf 即可,也就实现了激光频率与微波频率的固定和有效连接。

当人们所能产生的超短激光脉冲的宽度在皮秒(ps, $1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$)量级时,对应的光谱频率覆盖很窄,

这样通过对测出频率偏差与重复频率的锁定而实现微波与光学频率之间的稳定连接是极其困难的。

到了20世纪90年代后期,固体飞秒(fs, $1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$)激光技术的快速发展,导致了飞秒光梳突破。MPQ的亨施小组与JILA的霍尔(John L. Hall)小组合作努力,利用锁相技术锁定飞秒激光的重复频率,利用非线性光子晶体光纤将飞秒激光的带宽扩展到500—1200nm,利用自倍频的方法,锁定了偏置频率,得到覆盖范围很宽的等间隔梳状标准频率信号,用简单的装置实现了微波与光频的连接^[13,14]。

飞秒光梳在相当程度上解决了光波的频率计量问题,使人们看到了光频标的曙光,因而被认为是频率计量领域的革命性事件。为此,亨施和霍尔获得了2005年的诺贝尔物理学奖^[2,3,15]。

作为精密测量的新工具,频率梳的精度与可靠性如何呢?2003年我国华东师范大学的马龙生等人进行了三台飞秒频率梳(华东师范大学、NIST及法国的国际计量局)的国际比对,证明了高达 10^{-19} 的不确定度^[16]。

频率梳新近的进展是向其他波段的扩展。JILA的叶军小组(原霍尔小组)及MPQ的亨施小组将锁模掺钛蓝宝石激光输出的飞秒脉冲通过耦合镜注入另一重复频率完全匹配的环形腔中,通过在该腔焦点处的真空室中喷入惰性气体,从而激发高次谐波,成功地利用共振增强实现极紫外频率梳^[17,18]。

3 光频标的发展

光频标的发展依赖于激光技术的发展。

早期的光频标是稳频激光器,主要采用饱和吸收或双光子吸收等技术,所达到的稳定性和准确度一般在 10^{-11} 和 10^{-12} 量级,比不上好的微波频标^[19]。

光频标的突破性进展是囚禁冷却单个离子和冷原子光频标的出现^[20]。目前采用的原子光频标有两种原子体系:一是囚禁冷却的原子团,二是囚禁冷却的单离子。

在冷原子光频标中,开展了Ca, Yb, Sr, Mg和Hg原子频标的实验研究。其中Sr原子光频标的进展是引人瞩目的。

人们思考可以利用光晶格来囚禁冷原子,囚禁的原子不受相互碰撞及外界环境的干扰,同时由于原子在光晶格中移动的范围小于光波长,可以消除

一阶多普勒频移;如果使用“魔术”波长(即原子光频跃迁的基态和激发态的交流 Stark 频移相同)来构成光晶格,这样原子钟跃迁频率就可以保持不变^[21]. JILA 将波长为 698nm 的半导体激光器锁定到光学谐振腔上,其线宽被压缩至亚赫兹量级,用此激光器探测囚禁在光晶格中的冷 Sr 原子的跃迁,测得其跃迁线宽为 2Hz,光晶格 Sr 原子光频标的不确定度已达到 1×10^{-16} ^[22]. 同时,日本东京大学用基于铯钟的飞秒激光频率梳也测量了 Sr 原子的钟跃迁谱线频率. 比较的结果显示该谱线的测量频率偏差小于几个赫兹^[23]. 目前有更多国家的实验室正在建立 Sr 原子光频标或者其他原子的光频标,这为进一步广泛开展比对研究和评估光频标不确定度创造了条件.

另外一种体系是囚禁冷却的单离子,离子阱可利用射频场将单个带电离子约束在超高真空中,使被研究的原子体系处于几乎孤立的“不受干扰”的环境,并且有很长的囚禁时间以便“观察”,是研究原子特性的理想手段,特别有利于原子频标的研究^[24].

目前,光频标的候选离子有 Ca^+ , Sr^+ , Ba^+ , Yb^+ , Hg^+ , In^+ 和 Al^+ 等. 不难看出候选离子分为两类:一类是以 Ca^+ , Sr^+ , Ba^+ , Yb^+ , Hg^+ 为代表,其核外都只有一个价电子,均为类氢离子,能级结构比较简单. 而另一类是 In^+ 和 Al^+ , 为什么选它们呢? 对于 In^+ 和 Al^+ , 由于光频跃迁 $5^1\text{S}_0 - 5^3\text{P}_0$ 的基态和激发态的电子的总角动量都等于 0, 因此其交流 Stark 频移和相对论时间膨胀频移非常小,可望成为高性能的光频标. 同时提醒大家注意的是, $^{171}\text{Yb}^+$ 的 $6s^2\text{F}_{7/2}$ 的自然寿命约为 3700 天,因此,电八极钟跃迁 $6s^2\text{S}_{1/2} - 6s^2\text{F}_{7/2}$ 的谱线的 Q 值达 10^{24} , 此 Q 值在已知的所有光频标参考谱线中是最高的. 代表性的进展^[4]有英国国家物理实验室(NPL)的单个 Sr^+ 离子光频标的不稳定度为 3.4×10^{-15} ^[25], 美国 NIST 的单个 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子光频标的系统不确定度达到 1.9×10^{-17} ^[26], $^{27}\text{Al}^+$ 离子光频标的系统不确定度达到 8.2×10^{-18} ^[27]. 这是目前世界上最高指标的光频标.

单离子光频标是如何组成的呢? 单离子光频标的研究主要是研制稳频的激光,实现单离子的囚禁和冷却,控制原子的运动和外场效应,最终实现跃迁频率的测量和锁定.

如何制备孤立的离子体系,人们往往采用离子阱技术,标准的射频(Paul)阱由一绕 Z 轴的旋转双曲面电极和一个以 XY 平面为对称切面的双曲环形

电极组成. 阱的尺寸为 cm 量级,阱中的电势由加在环极相对帽极的交流电流和直流场产生;而单离子囚禁的阱尺寸一般在 mm 量级,为此发展了适合囚禁单个离子的各种简单的非标准的阱. 这些阱的特点是使冷却激光无阻碍地达到阱的中心,从而可对离子进行有效的冷却和共振荧光的测量.

通常囚禁离子的动能是囚禁势的 1/10 左右,大约为几个 eV. 所以为了有效地捕获离子和在光谱测量中减小 Doppler 效应引起的展宽,应采用冷却的方法降低它们的动能. 对于光频标实验而言,需要通过 Doppler 冷却将离子运动范围控制在 Lamb-Dicke 区域(离子的运动幅度小于探测激光的波长),从而消除离子钟跃迁的一阶 Doppler 频移,大大降低二级 Doppler 频移.

量子跳跃是检测是否为单离子的有效手段,并可用于测量离子的量子态^[28]. 离子的量子跳跃可准确地验证单离子的存在,同时可用于微波-光学双共振实验,并完成单离子的禁戒跃迁的测量等.

下面我们以囚禁冷却 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的工作为例,说明单个囚禁冷却离子光频标的工作原理,并以新近研究的 $^{27}\text{Al}^+$ 离子光频标描述光频标的可能发展趋势.

3.1 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标

$^{40}\text{Ca}^+$ 的候选光频标参考跃迁为 $4s^2\text{S}_{1/2} - 3d^2\text{D}_{5/2}$, 波长为 729nm.

此系统的激光冷却和光频跃迁所需的激光都可用半导体激光器或者钛宝石激光器得到,并能扩展到奇同位素离子 $^{43}\text{Ca}^+$ 的光频研究.

最新的进展有:奥地利 Blatt 小组在开展线形囚禁 $^{40}\text{Ca}^+$ 量子计算的同时,测量了 $^{40}\text{Ca}^+$ 光频跃迁,其不确定度达到 10^{-15} ^[29];日本的国家通讯技术研究所(NICT)也测量了 $^{40}\text{Ca}^+$ 光频跃迁,其不确定度达到 10^{-14} ^[30].

在我国,中国科学院武汉物理与数学研究所(WIPM)选择了囚禁冷却单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 作为光频标的候选原子,建立了非标准的微型 Paul 阱系统,冷却激光和光频激发系统以及微弱荧光测量系统,实现了单元技术的突破,包括稳频激光的实现,将光频跃迁激光初步稳定锁定到 ULE 腔,进行电场和磁场的精确控制. WIPM 开展了冷离子动力特性的研究,优化囚禁和冷却离子的条件,提高了测量离子荧光信号的信噪比,实现了单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的激光冷却和稳定囚禁;测量了离子的 $4s^2\text{S}_{1/2} - 3d^2\text{D}_{5/2}$ 态的光频跃迁频率,实现了钟跃迁的锁定. 我们建立了微型非标准的 Paul 阱(环的内径为 1.6mm,帽极间的间距为 2mm),真空达到 10^{-10}

Torr(见图 2, $1\text{Torr} = 1.333 \times 10^2 \text{Pa}$)^[31]; 建立了射频频率为 10MHz 的稳定囚禁场; 通过加上两个补偿电极, 实现了对离子附加微运动的精确控制.

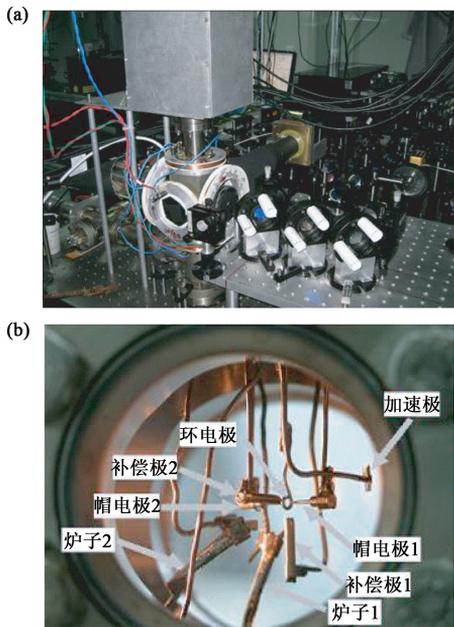


图 2 离子阱装置 (a) 实验装置; (b) 微型阱体

为了实现离子的 Doppler 冷却, 首先采用 PDH 方法将激光稳在细度为 400 的腔上, 然后利用光电流信号将激光的漂移压窄到 10MHz/小时以内^[32]. 为了更进一步压窄激光的长期漂移, 我们利用另一稳频激光(稳定的 729nm 激光)作参考, 利用传输腔的方法进行比较和锁定. 866nm 激光器未锁定时的漂

为 50MHz/20 分钟, 锁定后在 100kHz/小时以内(见图 3). 397nm 的激光器可以稳到 400kHz/小时.

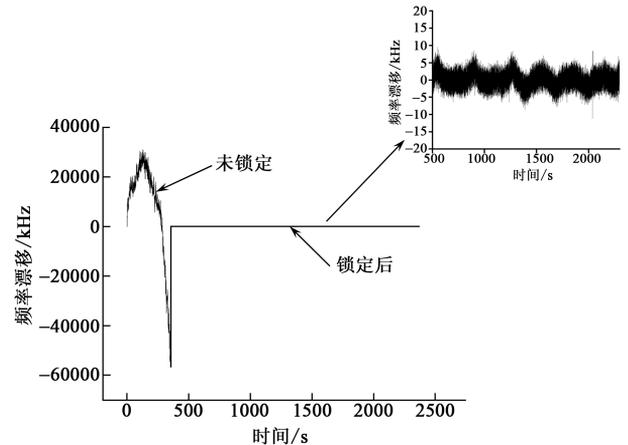


图 3 866nm 激光稳频前后频率变化的对比

对于 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标而言, $4^2\text{S}_{1/2} - 3^2\text{D}_{5/2}$ 钟跃迁的自然线宽为 0.16Hz, 因此需要钟跃迁抽运光的线宽为 Hz 量级.

稳频的方案采用 PDH 方法, 将 Coherent 的 MBR 110 钛宝石激光器输出的 729nm 激光频率锁定到细度 F 很高 ($F \sim 350000$) 的超稳腔上. 该激光器输出激光的线宽(最佳时)为 50kHz. 具体方案见图 4.

超稳腔采用 Zerodur 材料, 长度为 200mm, 外径为 100mm. 腔的细度约为 $34.97(0.12) \times 10^4$. 超稳腔放置在本底真空为 $6 \times 10^{-8} \text{Torr}$ 真空室内. 经过不断优化, 调试出激光与超稳腔耦合的 TEM_{00} 腔模, 基膜的耦合效率可达 50% 以上, 并将 729nm 激

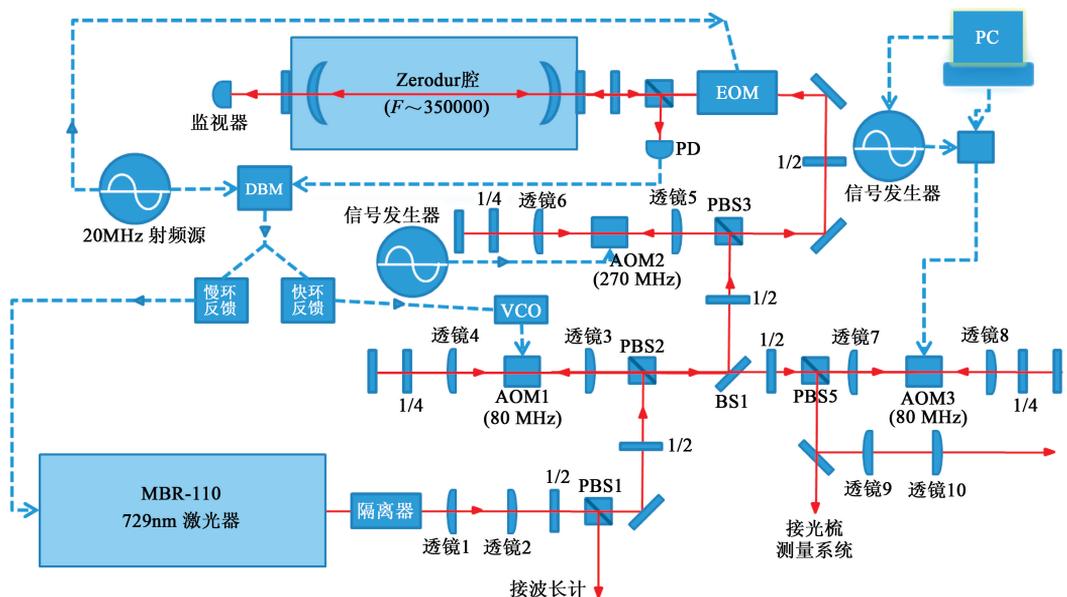


图 4 MBR 110 外腔稳频方案(图中 1/2 表示 1/2 波片, 1/4 表示 1/4 波片, PC 表示计算机, PD 表示光电探测器, AOM 表示声光调制器, EOM 表示电光调制器, BS 表示分光镜, PBS 表示偏振分光棱镜, VCO 表示压控晶振)

光稳定锁在该腔上。

在 729nm 的激光锁在超稳腔后,进行了震动隔离和两层温度控制. 真空室一天的温度变化在 10mK 以内. 这样使激光的漂移得到很好的抑制,最好时达到 0.1Hz/s.

同时,我们研制了 729nm 光频跃迁的半导体激光器,并用 PDH 的方法,将激光器锁定在细度大于 300000 的 ULE 腔上. 两个稳频激光的拍频结果表明,激光的线宽为 50Hz 左右(见图 5).

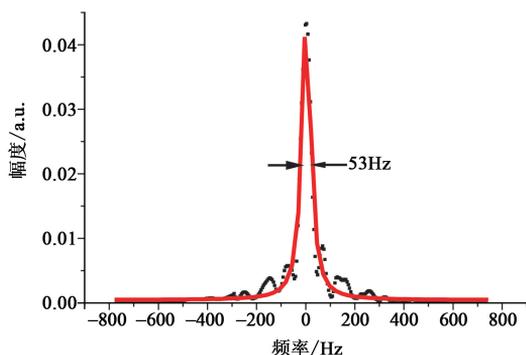


图 5 两个激光的拍频信号

在此基础上,我们开展了囚禁离子动力学的实验研究,特别是研究了离子微运动对囚禁离子荧光信号的影响. 然后通过建立的灵敏的射频—光子相关测量系统,进行了细致和更有效的补偿实验. 在一维探测方向,抑制了微运动的影响,得到较好单离子的荧光的光谱(见图 6)和量子跳跃信号(见图 7). 信噪比(S/N)达到了 50^[33]. 通过进一步的实验,得到稳定囚禁和冷却的单离子信号(囚禁时间增加到 8 天).

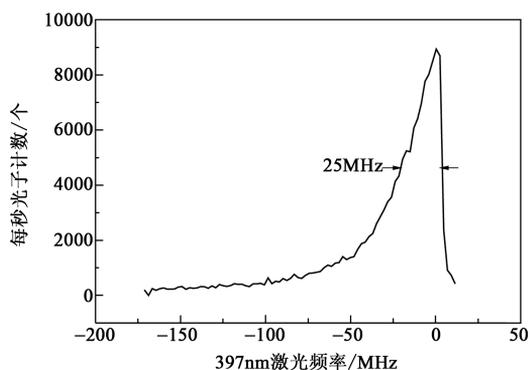


图 6 单离子的荧光信号

同时,我们利用三对对称结构的线圈在三维方向建立可控的磁场. 为此开展了细致的磁场与激光偏振以及离子 Zeeman 谱的关系的研究. 为减小光抽运对 Zeeman 谱的展宽,加快扫描速度,通过实现对激光冷却和光频测量激光的时序控制,从而得到 Ca 离子 S—D 跃迁的 Zeeman 谱(见图 8)^[34],单个 Zeeman 谱

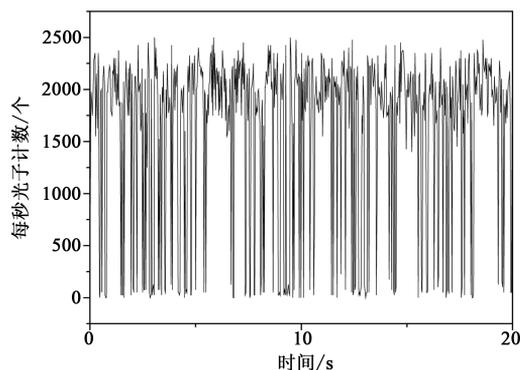


图 7 单离子的量子跳跃

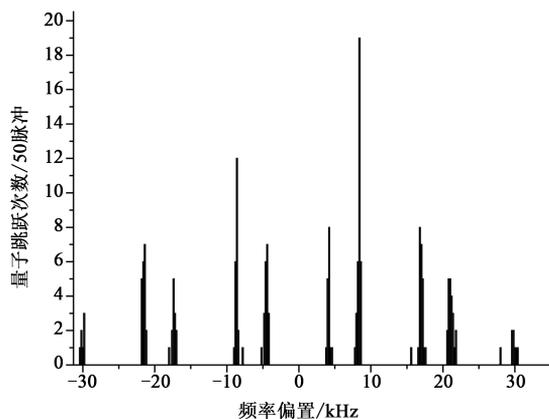


图 8 ⁴⁰Ca⁺ 离子光频跃迁的 Zeeman 谱(磁场为 750nT,729nm 激光的功率为 700nW)

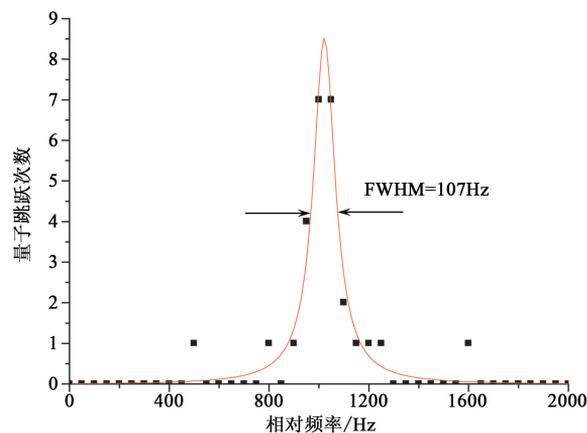


图 9 ⁴⁰Ca⁺ 离子光频跃迁的 $\Delta m_j=0$ 的 Zeeman 谱(图 FWHM 为谱线的半高全宽)

的线宽小于 150Hz(见图 9).

通过离子钟跃迁 Zeeman 谱频率与飞秒光梳对超稳腔基模频率的同步测量,可以得到⁴⁰Ca⁺离子 4S_{1/2}—3D_{5/2}的钟跃迁频率(见图 10). 利用⁴⁰Ca⁺离子 4S_{1/2}—3D_{5/2}的 Zeeman 谱线中 $\Delta m_j=0$ 的两个峰对 729nm 钟跃迁激光器进行了锁定实验(见图 11)^[35].

3.2 ²⁷Al⁺ 离子体系

²⁷Al⁺ 离子的核自旋为 $I=5/2$, 光频跃迁 ¹S₀—³P₀的波长为 267nm, 线宽为 8mH, Q 值高达

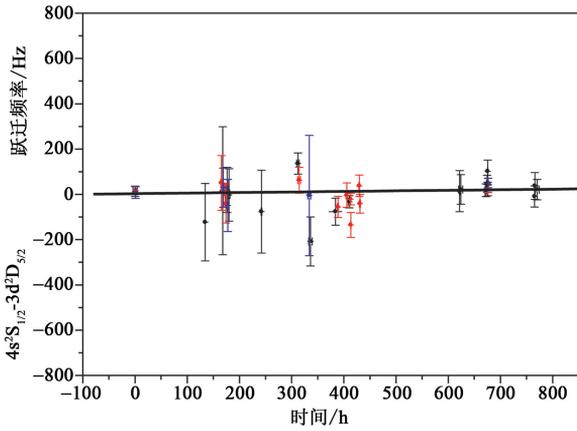


图 10 一个月时间内(2010 年 5—6 月)S-D 跃迁的绝对频率测量值(10 天的测量). 实线为所有测量频率的平均值(411, 042, 129, 776, 412 Hz, 统计误差为 14 Hz. 注: 还未考察其他系统误差)

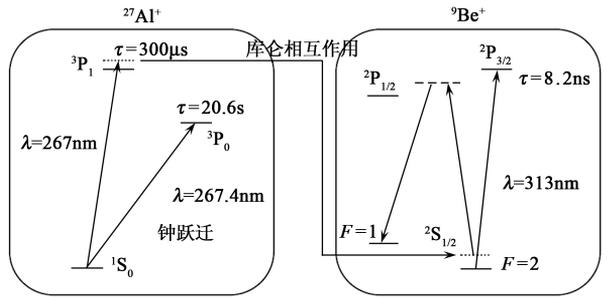


图 12 $^{27}\text{Al}^+$ 离子钟态和 $^9\text{Be}^+$ 离子态的传输图示

的态分布而得到光谱离子的跃迁, 由此得到 $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_1$ 钟跃迁的 Rabi 光谱. $^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ 钟跃迁频率的测量的不确定度为 7×10^{-15} [37].

建立了如此高精度的光频标, 面临的困难是频标的精确度越高, 比较的困难会越大. 为此 NIST 开展了两个光频标的连接并精确进行了频率比对, Hg^+ 和 Al^+ 光频标的频率不确定度分别达到: 1.9×10^{-17} 和 2.3×10^{-17} , 并由此测量了基本物理常数 α 随时间的变化为 $\dot{\alpha}/\alpha = (-1.6 \pm 2.3) \times 10^{-17}/\text{年}$ [38].

而最近他们采用新的线形阱同时囚禁 Mg^+ 和 Al^+ 离子, 此时的考虑是: 与 $^9\text{Be}^+$ 离子和 $^{27}\text{Al}^+$ 离子相比, $^{24}\text{Mg}^+$ 离子与 $^{27}\text{Al}^+$ 离子质量比更接近, 冷却效果更好; 同时 Mg^+ 离子的基态冷却只需两束激光. 经细致的物理和环境效应的研究以及比对实验(见图 13), 频率不确定度达到 8.6×10^{-18} , 稳定度为: $2.8 \times 10^{-15} \tau^{-1/2}$ (164967s) [27].

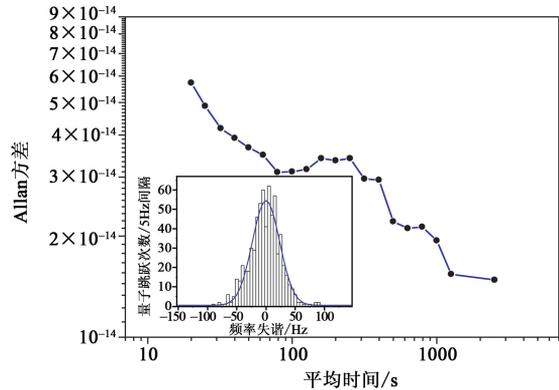


图 11 Ca 离子的锁定信号(Allan 方差)(整个数据组由 696 次频率测量组成(每个频率测量时间为 20s), 用高斯拟合, 标准偏差为 47(2)Hz)

2×10^{-17} . 可选择 ($^1\text{S}_0, m_F = 0$) - ($^3\text{P}_0, m_F = 0$) 的跃迁为光频钟跃迁; 线宽为 8mHz; $^{27}\text{Al}^+$ 离子对磁场和电场梯度不敏感, 在室温下黑体辐射频移小. 所以 $^{27}\text{Al}^+$ 离子是非常好的光频标候选原子体系. 但所需激光冷却光的波长为 167nm, 此波长较难实现.

如何实现此种光频标呢? NIST 的 Wineland 小组采用了新的量子逻辑光谱方法 [36].

在线形离子阱中, 同时囚禁 Be^+ 和 Al^+ 离子, 离子间的耦合是库仑相互作用, 通过交感冷却 (sympathetic laser cooling), 利用辅助的冷却 Be^+ 来冷却 Al^+ 离子.

用于光频测量的激光是线宽为 3Hz 的四倍频光纤激光(267.4nm). 态的制备和量子态的传输见图 12.

采用相干激发光谱离子的共振谱的方法, 其中 Be^+ 为逻辑离子, 通过红边带激发光谱离子, 然后把光谱离子的态传输到逻辑离子, 通过测量逻辑离子

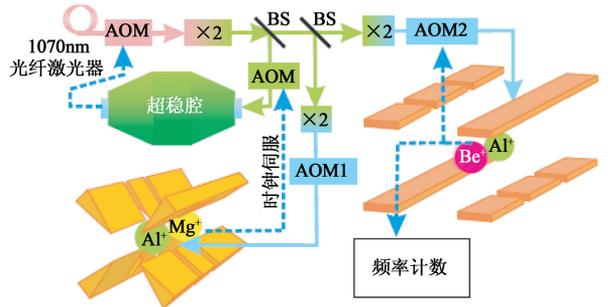


图 13 两个 Al^+ 离子光频的比对实验(图中 AOM 为声光调制器, BS 为分束片, $\times 2$ 为倍频器) [27]

4 总结和展望

目前, 世界上许多实验室已利用超窄线宽激光和光梳技术对冷原子光钟跃迁频率进行了精确测量. 在 2006 年召开的国际计量大会 (CIPM) 上, 第一次确定了三个离子和一个原子 (Hg^+ , Sr^+ , Yb^+ 和 Sr) 的光学跃迁频率作为国际单位制“秒”定义的二级标准. 它为利用光学频率标准定义“秒”迈出了

重要的一步。

实验表明,光频标的精度可达到 10^{-18} ,而要达到这一精度极限,还需要在实验和理论方面付出更多的努力,如,研究进一步减小激光线宽的机理,研究新的更细微的频率漂移机理和消除方法,发现更合适的原子跃迁能级和原子体系。此外,还要研究如何将全球各地的光频标连接起来,精确地进行频率比对,由此是否可能建立以光频作为“秒”的新定义^[39]? 目前囚禁冷原子(高信噪比)和单离子光频标都在发展中,是否可将研究囚禁冷单离子光频标的优点和研究冷原子光频标的优点结合起来,在相互借鉴的研究中产生新的突破^[40]? 原子光频标的极限可能突破吗? 在如此高的精度下,有什么新的更细微的物理效应^[41]?

50 年前发明的激光为人们提供了非常好的相干光源,为光频标的实现提供了实验保证。随着激光技术的推进,光频标的性能在不断改进(见图 14)。同时我们看到光频标的发展期待激光新技术的开拓。我们相信,随着激光和相关技术的突破,人们将把梦想变成现实,那就是用光波来定义时间。

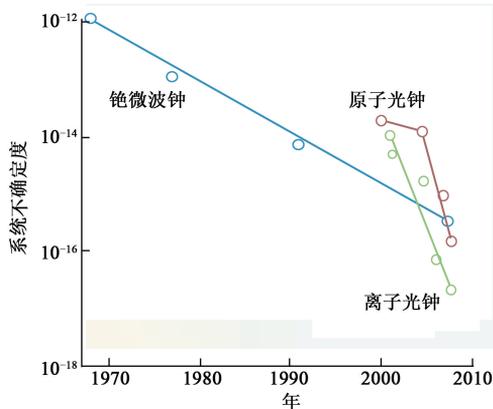


图 14 原子频标的发展简图(摘自文献[41])

致谢 感谢小组成员管桦、刘曲、黄焱、曹健、屈万成、欧保全、郭彬和黄学人的实验工作和帮助组稿。

参考文献

- [1] 马龙生. 物理, 2008, 37:716 [Ma L S. Wuli(Physics), 2008, 37:716(in Chinese)]
 [2] 魏志义. 物理, 2006, 35:213 [Wei Z Y. Wuli(Physics), 2006, 35:213(in Chinese)]

- [3] 陈徐宗. 物理, 2006, 35:207 [Chen X Z. Wuli(Physics), 2006, 35:207(in Chinese)]
 [4] 高克林. 物理, 2008, 37:720 [Gao K L. Wuli(Physics), 2008, 37:720(in Chinese)]
 [5] Jefferts S R *et al.* Proc. SPIE., 2007, 6673:667309
 [6] Dehmelt H G. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1982, 31:83; Wineland D J *et al.* Phys. Rev. A, 1987, 36:2220; Rafac R J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 85:2462
 [7] Drever R W *et al.* Appl. Phys. B, 1983, 31:97
 [8] Young B C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82:3799
 [9] Ludlow A D *et al.* Opt. Lett., 2007, 32:641
 [10] Schnatz H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76:18
 [11] T W H. Rev. Mod. Phys., 2006, 78:1297; Hall J L. Rev. Mod. Phys., 2006, 78:1279
 [12] Barger Y V *et al.* Appl. Phys. A, 1977, 12 :97
 [13] Reichert J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84:3232
 [14] Jone D J *et al.* Science, 2000, 288 :635
 [15] Advanced Information on the Nobel Prize in Physics 2005
 [16] Longsheng M *et al.* Science, 2004, 303 :1843
 [17] Jone R J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2005, 94:193201
 [18] Gohle Ch *et al.* Nature, 2005, 436:234
 [19] 王义遒等. 量子频标原理. 北京:科学出版社,1986
 [20] Gill P. Science, 2001, 294:1666
 [21] Takamoto M *et al.* Nature, 2005, 435:321
 [22] Boyd M *et al.* Science, 2006, 314 :1430
 [23] Blatt S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100:140801
 [24] Dehmelt H G. Advances in Atomic and Molecular Physics, 1967, 3:53; Dehmelt H. G. Adv. At. Mol. Phys., 1969, 5:109
 [25] Margolis H S *et al.* Science, 2004, 306 :1355
 [26] Ludlow A D *et al.* Science, 2008, 319 :1805
 [27] Chou C W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104:070802
 [28] G. Hehmelt H. IEEE Trans. Instrum. Meas., 1982, 31:83
 [29] Chwalla M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102:023002
 [30] Matsubara K *et al.* Appl. Phys. Express, 2008, 1 :067011
 [31] HuaLin S H U *et al.* Chin. Phys. Lett., 2007, 24 :1217
 [32] Guan H *et al.* Optical Comm., 2007, 274 :182
 [33] Guo B *et al.* Chin. Phys. Lett., 2010, 27:013202
 [34] Guo B *et al.* Front. Phys. China, 2009, 4 :144
 [35] Liu Q *et al.* 22nd International Conference on Atomic Physics (Book of Abstracts, p. 102), July 2010 (文章在准备中)
 [36] Schmidt P O *et al.* Science, 2005, 309:749
 [37] Rosenband T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98:220801
 [38] Rosenband T *et al.* Science, 2008, 319 :1808
 [39] 马龙生. 10000 个科学难题《物理学卷》. 北京:科学出版社, 2009, 129
 [40] 高克林. 10000 个科学难题《物理学卷》. 北京:科学出版社, 2009, 571
 [41] Kleppner D. Science, 2008, 319 :1768