

高准确度的钙离子光频标

管桦 黄焱 李承斌 高克林

$^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standards with high accuracy

Guan Hua Huang Yao Li Cheng-Bin Gao Ke-Lin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 164202 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180876

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180876>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于高精度光腔锁频激光的分子吸收光谱测量](#)

Measurement of molecular absorption spectrum with a laser locked on a high-finesse cavity

物理学报.2018, 67(10): 104206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172532>

[2.0 \$\mu\text{m}\$ 附近模拟呼吸气体中 \$^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2\$ 同位素丰度的高精度实时在线测量](#)

Highly precise and real-time measurements of $^{13}\text{CO}_2/^{12}\text{CO}_2$ isotopic ratio in breath using a 2 μm diode laser

物理学报.2018, 67(6): 064206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20171861>

[基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量](#)

Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报.2017, 66(20): 204204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204204>

[利用传输腔技术实现镱原子光钟光晶格场的频率稳定](#)

Transfer cavity scheme for stabilization of lattice laser in ytterbium lattice clock

物理学报.2017, 66(16): 164205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164205>

[基于单个量子级联激光器的大气多组分测量方法](#)

Detection of atmospheric multi-component based on a single quantum cascade laser

物理学报.2017, 66(9): 094203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.094203>

专题: 精密测量物理

高准确度的钙离子光频标*

管桦¹⁾²⁾ 黄垚¹⁾²⁾ 李承斌¹⁾²⁾ 高克林^{1)2)3)†}

1)(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)

2)(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, 武汉 430071)

3)(中国科学院冷原子物理中心(武汉), 武汉 430071)

(2018年5月3日收到; 2018年6月5日收到修改稿)

近年来, 冷原子技术和激光技术促进了高精度光频标的发展, 有望在建立时间基准、推动基础研究和满足国家需求等方面发挥重要的作用. 本文介绍了中国科学院武汉物理与数学研究所近年来在高准确度钙离子($^{40}\text{Ca}^+$)光频标研究方面的进展: 采用新的 ULE 腔系统, 实现了 729 nm 钟跃迁激光器 1—100 s 的频率稳定度均优于 2×10^{-15} , 通过对外场和环境效应的控制及克服, 特别是囚禁离子运动效应的抑制, 获得单个钙离子光频标的不确定度优于 5.5×10^{-17} ; 通过两台光频标的比对, 测得 20000 s 的稳定度也进入 10^{-17} 量级; 基于高精度钙离子光频标平台, 进行了相关精密测量的工作, 包括: 基于全球定位系统的超高精度远程光频绝对值测量方案, 第二次测量了钙离子的光频跃迁绝对值, 该测量结果再次被国际时间频率咨询委员会采纳, 更新了钙离子的频率推荐值; 精确测量了钙离子的钟跃迁魔幻波长, 由此提出新型的全光囚禁离子光频标的方法; 精密测量了钙离子的亚稳态寿命等参数. 以上工作推动了基于冷原子的精密测量工作.

关键词: 光频标, 精密测量, 钙离子, 魔幻波长

PACS: 42.62.Fi, 37.10.Ty, 43.58.Hp

DOI: 10.7498/aps.67.20180876

1 引言

频率和时间的研究对精密和准确的不断追求, 是推动物理科学发展的动力. 原子分子跃迁频率的精密测量不但可以为基础科学研究(如物理、化学、生物)和先进技术应用(如等离子体诊断、天文学观测、信息通信)等领域的发展提供所需的高精度原子分子数据, 而且也可以为检验物理学基本理论和定律(如量子力学、相对论、宇宙学等)、测量物理常数(如精细结构常数 α) 提供精密的实验手段.

人们对频率精度的追求没有止境. 冷原子物理和激光稳频及飞秒光梳技术的发展推动了冷原子光频标的飞速进展. 相对于微波频率(10^{10} Hz)而言, 光频率(10^{14} — 10^{15} Hz)要高出数个量级, 通

过增加谱线的品质因子(Q 值)可以实现频标稳定度的提高, 同时通过缩短测量时间提高测量的不确定度, 光频标的不确定度和稳定度有望达到 10^{-18} , 建成高精度光频标是国际上众多科学家的奋斗目标^[1].

光频标的发展基于优良的原子体系和精密的探测系统. 随着囚禁冷离子光频标和光晶格冷原子光频标的出现, 光频标取得了突破性进展.

在囚禁冷却离子量子体系中众多的光频测量的候选离子(Ba^+ , Sr^+ , Ca^+ , Hg^+ , Yb^+ , In^+ , Tl^+ , Ga^+ 和 Al^+ 等)中, Hg^+ ^[2], Sr^+ ^[3,4], Yb^+ ^[5], Al^+ ^[6] 和 Ca^+ ^[7] 作为光频标的窄光学跃迁的测量已取得了很好的进展. 其中, 德国技术物理研究院(PTB)的 Yb^+ 离子光频标的系统不确定度达到了 3×10^{-18} ^[8], 是目前离子光频标的最高水平.

* 国家自然科学基金(批准号: 91336211, 11474318, 11622434, 11774388)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB821301, 2005CB724502)和中国科学院先导专项(批准号 XDB21030100)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: klgao@wipm.ac.cn

而冷中性原子体系中大都选择了Sr^[9,10], Yb^[11]和Hg^[12]等. 目前美国国家技术标准局(NIST), PTB、英国国家物理实验室(NPL)、加拿大国家研究院(NRC)、法国巴黎天文台、美国天文联合实验室(JILA)、日本东京大学和日本通讯研究所(NICT)等都在开展激光冷却的Sr原子光频标的探索. JILA经过详细研究各种系统效应, 所研制的Sr原子光频标的系统不确定度为 2×10^{-18} ^[13], 三维光晶格中两团原子的频率差值测量精度达到 5×10^{-19} (1 h)^[14]; 日本东京大学采用低温光晶格光频标方案, 系统不确定度为 7.2×10^{-18} , 两套光频标的统计一致性达到 2×10^{-18} ^[15]; NIST的Yb原子光频标的稳定度达到 1.6×10^{-18} (7 h 平均)^[16].

我国也开展了光频标的研究, 如Sr, Yb, Ca, Hg, Hg⁺, Al⁺和Ca⁺等. 中国科学院武汉物理与数学研究所(以下简称武汉物数所, WIPM)实现了不确定度和稳定度(20000 s)均达到 10^{-17} 的Ca⁺光频标^[17]; 中国计量科学研究院实现了Sr光频标的闭环锁定和频率测量^[18]; 华东师范大学和WIPM都先后实现了Yb光频标的闭环锁定^[19,20]; 中国科学院国家授时中心实现了Sr光频标的闭环锁定^[21]; WIPM和华中科技大学的Al⁺光频标、中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称上海光机所)的Hg光频标和国防科技大学的Hg⁺光频标研究也在单元技术上取得了突破^[22-25]. 此外, 在主动光频标研究方面, 北京大学也取得了突破^[26].

Ca⁺只有一个价电子, 能级结构比较简单, 激光冷却和钟跃迁探测所需的激光均可采用半导体激光器直接得到. 因此, Ca⁺离子光频标和量子信息的研究工作在国际上得到了广泛的重视^[7,27,28]. 奥地利Innsbruck大学在线形阱中对Ca⁺离子的光频测量的不确定度到达 2.4×10^{-15} ^[7], 日本NICT在微型Paul阱中对Ca⁺离子的光频测量的不确定度达到 2.2×10^{-15} ^[28]. WIPM经过多年努力, 实现了单个钙离子的稳定囚禁和有效冷却^[29], 采用Pound-Drever-Hall(PDH)方法^[30]将729 nm钟跃迁激光器锁定到超稳腔上, 实现了钟跃迁激光器线宽压窄和长稳锁定^[31]. 在此基础上, 实现了钙离子光频标的锁定, 进行了系统误差的评估^[32], 并利用全球定位系统(GPS)进行了高精度远程光频绝

对值测量^[33].

近年来, 采用新的超低膨胀系数(ULE)腔系统, 实现了729 nm钟跃迁激光器1—100 s的频率稳定度优于 2×10^{-15} ^[34], 通过对钙离子的冷却和精密操控以及外场和环境效应的控制及克服, 将单个钙离子光频标的不确定度降低至 5.5×10^{-17} ^[17]; 开展两台光频标的比对, 测得20000 s稳定度达到 7×10^{-17} 量级^[17]; 基于高精度钙离子光频标平台, 进行了相关精密测量的工作, 包括: 基于GPS系统的超高精度远程光频绝对值测量方案, 再次测量了钙离子的光频跃迁绝对值^[17]; 精确测量了钙离子的钟跃迁魔幻波长^[35]和亚稳态寿命^[36-38]. 推动了基于冷却钙离子的精密测量研究.

2 ⁴⁰Ca⁺光频标结构简介

⁴⁰Ca⁺光频标主要由三个部分组成: 离子阱系统、光学系统以及飞秒光梳测量系统. 总体结构如图1所示. 以下介绍离子阱系统和光学系统, 飞秒光梳测量系统将在第3节绝对频率测量部分介绍.

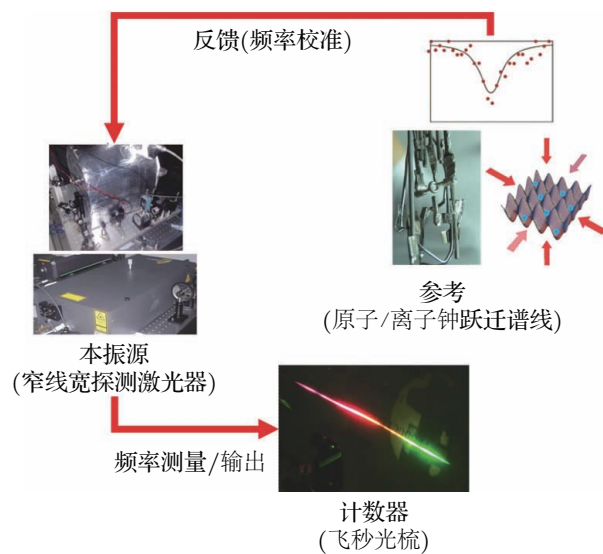


图1 钙离子光频标结构图

Fig. 1. Overall schematic diagram of the experimental setup.

与⁴⁰Ca⁺光频标相关的能级结构见图2. ⁴⁰Ca⁺的核自旋为0, 因此⁴⁰Ca⁺能级只有精细结构, 没有超精细结构. $4s^2S_{1/2}$ — $3d^2D_{5/2}$ 光频跃迁自然线宽约为0.14 Hz^[39,40], 谱线Q值高达 10^{15} , 因此非常适合作为光频标的参考谱线.

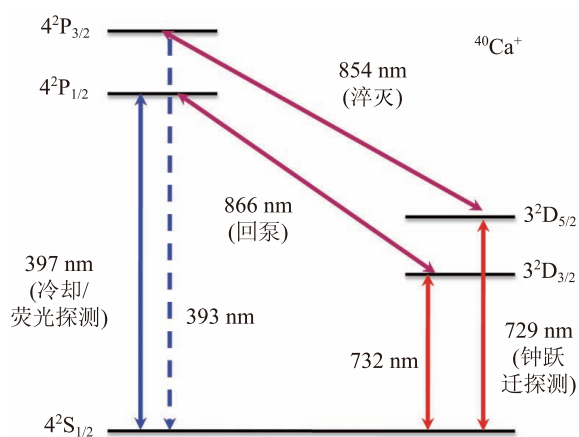


图2 与光频标相关的 $^{40}\text{Ca}^+$ 各能级及相关跃迁对应的激光波长

Fig. 2. Partial energy level diagram of $^{40}\text{Ca}^+$ showing the principal transitions used in cooling, repumping and probing of the reference 729 nm transitions.

2.1 离子阱系统

2.1.1 离子阱

在我们的实验中， $^{40}\text{Ca}^+$ 囚禁于离子阱中^[29]。如图3所示，离子阱由一个直径1.4 mm的环电极和两个帽电极(间距为2 mm)构成。离子的囚禁射频场囚禁，囚禁频率通常在10—30 MHz之间选择。离子在阱中会受到杂散电场的影响而产生附加微运动，对离子的长时间囚禁和光谱测量带来影响。我们通过在一对相互垂直的补偿电极上加直流电压实现对附加微运动的抑制。离子阱真空系统的本底真空优于 2×10^{-8} Pa。



图3 微型 Paul 阱

Fig. 3. The miniature Paul trap.

2.1.2 磁场精密控制

$^{40}\text{Ca}^+$ 光频跃迁在磁场中会分裂成10条谱线，磁场的稳定性很大程度上会影响光频标锁定的稳定性，尤其需要消除交流磁场的影响。实验中需要精密控制离子所在位置的磁场大小，尽量排除外界环境磁场的扰动。 $^{40}\text{Ca}^+$ 实验中，采用双层磁屏蔽

系统，磁屏蔽因子约为1000。为了实现 $^{40}\text{Ca}^+$ 所在位置的磁场精密调节，磁屏蔽内安装了三对相互垂直的 Helmholtz 线圈，通过精密调节线圈电流获得实验所需的磁场大小。

2.2 光学系统

2.2.1 光电离光学系统

实验中采用光电离方法实现钙离子的产生，钙离子的光电离采用双光子电离，先采用423 nm激光将 ^{40}Ca 原子从 1^1S_0 激发到 1^1P_1 态，然后再利用波长小于390 nm的光将 ^{40}Ca 原子电离。光电离光学系统如图4所示。423 nm激光通过846 nm激光倍频获得；390 nm光由紫外发光二极管(LED)实现。

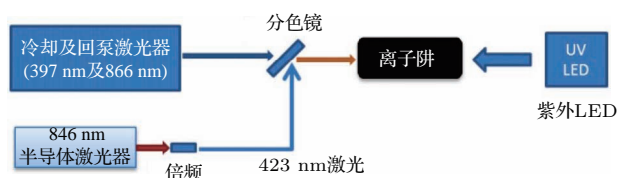


图4 离子的产生及冷却光路图

Fig. 4. Schematic diagram of ion loading and laser cooling.

2.2.2 激光冷却系统

实验中，采用 $^{40}\text{Ca}^+$ $4s\ 2^2S_{1/2} - 4p\ 2^2P_{1/2}$ 跃迁(波长为397 nm)作为激光冷却跃迁， $^{40}\text{Ca}^+$ 处于 $4p\ 2^2P_{1/2}$ 态时会跃迁到 $3d\ 2^2D_{3/2}$ 态(概率约1/16)，从而造成激光冷却停止。因此实验中采用另外一束866 nm激光将离子从 $3d\ 2^2D_{3/2}$ 回泵到 $4p\ 2^2P_{1/2}$ 态，从而实现冷却循环的闭合。

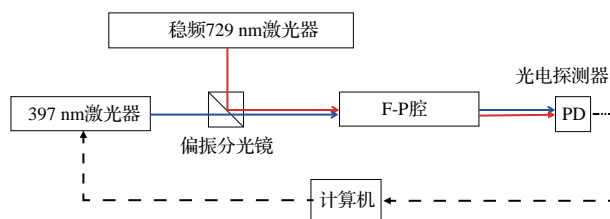


图5 传输腔稳频实验方案

Fig. 5. The 397 nm laser stabilization by a transfer cavity.

冷却光和回泵光均采用常用的半导体激光器产生。为了实现离子长时间有效的激光冷却，需要实现对实验中所用的激光器进行稳频。由于没有合适的原子谱线作参考，因此无法采用饱和吸收稳频的方案。早期实验中，我们利用钙的空心阴极灯产生的光电流信号实现397 nm和866 nm激光稳频^[41]，但该方法得到的激光长稳并不理想。因此为了进一步降低激光器的长漂，目前实验中采用传输

腔稳频技术, 利用稳定的 729 nm 激光作为参考, 实现了 397 nm 和 866 nm 激光的锁定(图 5), 长期稳定度优于 1 MHz/h^[42].

2.2.3 729 nm 激光系统

性能优良的钟跃迁探测激光是实现光频标光谱探测和频率锁定的重要前提. ⁴⁰Ca⁺ 钟跃迁为 4s²S_{1/2}—3d²D_{5/2}, 对应波长为 729 nm. 实验中采用 PDH 方法将钛宝石激光器 (MBR110, Coherent) 的频率锁定到超低膨胀材料的参考腔上, 实现了钙离子钟跃迁探测的激光器^[31].

3 高精度钙离子光频标的实现

3.1 超窄线宽钟跃迁激光器

近期, 我们采用 ULE 腔作为 729 nm 钟跃迁激光器稳频的参考腔. ULE 腔长为 10 cm, 细度高达 200000. ULE 腔放置于一台主动隔振平台 (TS-140, Table Stable) 上以隔离震动的影响; 为了消除温度的影响, 采用真空系统和双层温控系统;

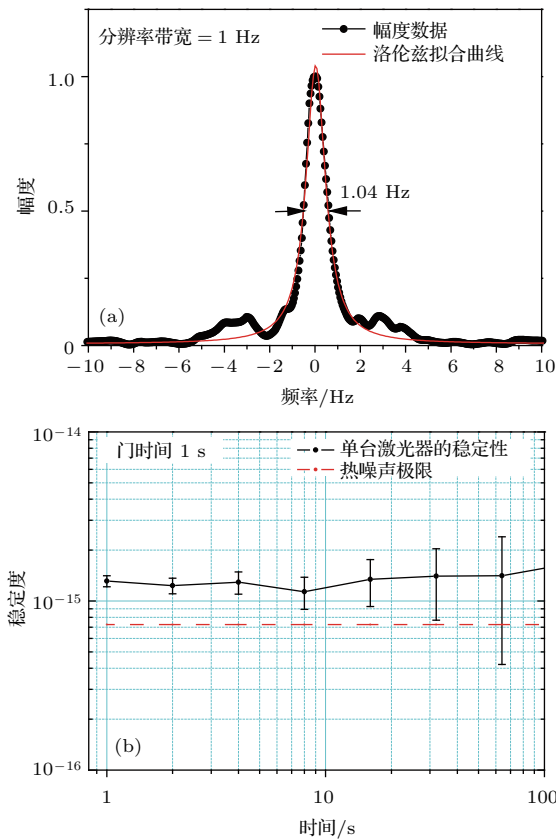


图 6 (a) 两台 729 nm 激光器的拍频; (b) 729 nm 激光器的频率稳定度
Fig. 6. (a) A 1 Hz linewidth beatnote of two 729 nm lasers; (b) the stability of the 729 nm laser.

为了隔离外界气流和噪声的影响, 实验中采用六块 10 mm 厚的铝板组成一个封闭空间, 将 ULE 腔包于其中. 实验中采用两台 729 nm 激光器的拍频以获得激光线宽, 约为 1 Hz (图 6 (a)). 假定两台激光器的线宽相近, 单台激光器线宽约为 0.8 Hz. 激光器的频率稳定度在 1—100 s 的时间内为 2×10^{-15} (图 6 (b))^[34].

由于钟跃迁激光器性能的提高, 加上对磁场系统的进一步控制(更换了屏蔽效果更佳的磁屏蔽), 离子钟跃迁 Zeeman 谱得到压窄, 通过 10 次扫描并平均, 得到线宽约为 4 Hz, 比之前的结果提高了近 30 倍, 见图 7.

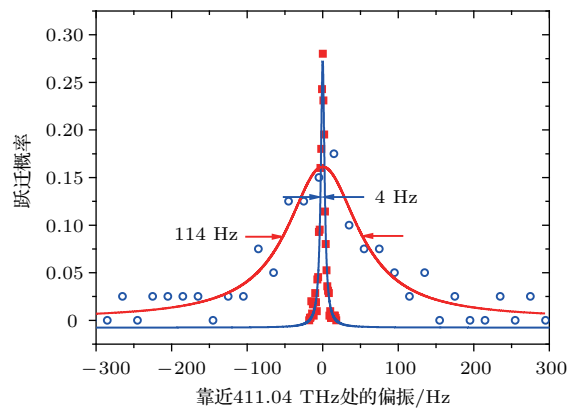


图 7 729 nm 钟跃迁谱线线宽
Fig. 7. A 729 nm clock transition of ⁴⁰Ca⁺ with 4 Hz linewidth.

3.2 实现两台钙离子光频标比对

建立第二套钙离子囚禁系统, 阱体全部采用无磁材料研制, 真空系统采用低磁不锈钢, 磁屏蔽系统也已安装到位. 经测试, 内部剩磁约在 100 nT 量级, 比第一套好约 2 个数量级. 由于两台光频标比对实验中, 需要固定一台光频标的射频囚禁场频率, 通过改变另外一台的射频囚禁场频率, 测量微运动效应. 因此, 新系统的射频囚禁场, 采用调节可调电容的电容值实现对射频囚禁频率的连续调节. 在此基础上用电子倍增型电荷耦合器件 (EMCCD) 观察离子成像以及射频光子关联技术, 对囚禁钙离子的动力学开展细致的研究, 实现囚禁系统的优化, 见图 8. 通过对两台光频标比对实验的锁定参数优化, 采用探测脉冲宽度 80 ms, 锁定在线宽约为 10 Hz 的钟跃迁谱线上, 并通过电光调制器 (EOM) 实现冷却激光的偏振调制. 钟的稳定度约 $1 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau}$, 万秒稳定度进入 10^{-17} 量级^[17], 见图 9.

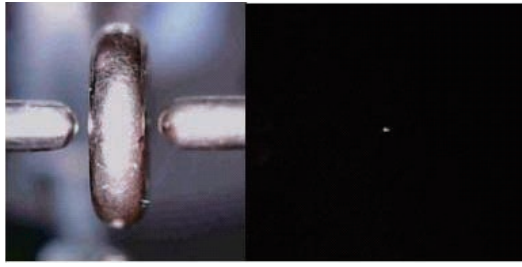


图8 采用 EMCCD 观察离子成像
Fig. 8. The picture captured by an EMCCD.

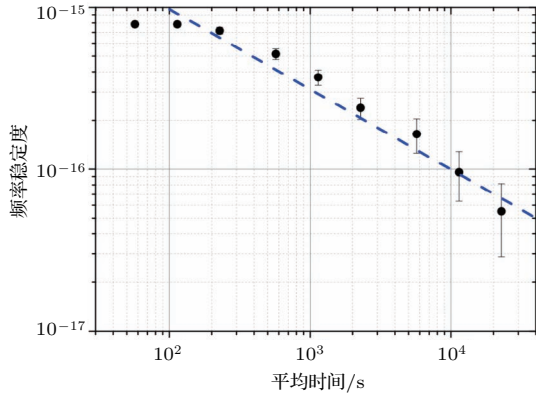


图9 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标的稳定度测量
Fig. 9. The stability of $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standard.

3.3 $^{40}\text{Ca}^+$ 光频标的系统误差评估

光频标的测量误差来源于系统误差和统计误差. 为此应逐项分析系统误差来源, 构建特定的实验进行测量和分析. 通过合理的设计实验方案、稳定系统长时间的测量来减小统计不确定度. 对于钙离子光频标, 需要考虑的系统频移主要来自于离子的运动效应、环境中的电磁干扰(包括钟跃迁探测时激光引入的噪声)、黑体辐射效应、引力红移等.

热运动会引入离子的二阶 Doppler 频移及 Stark 频移, 实验中根据 $^{40}\text{Ca}^+$ 激光冷却后的宏运动 (secular motion) 的边带载波比, 获得单离子的有效温度. 同时, 我们开展了细致的微运动补偿实验: 采用两个阱的比对, 一个阱采用“魔幻囚禁场”, 同时除了射频关联测量, 加上了成像测量; 细致调节补偿极电压实现微运动减小. 同时检测两个阱的光频差; 抑制微运动. 开展两套阱相同条件下的温度的测量, 由此确定了黑体辐射效应. 两套离子光频标的系统频移和不确定度见表 1. 其中一台钙离子光频标的频率不确定度为 5.5×10^{-17} , 在国际上是继 Hg^+ (NIST), Al^+ (NIST), Yb^+ (PTB/NPL)

表1 钙离子光频标的频率不确定度评估

Table 1. Systematic shifts and uncertainties for the evaluations of $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standard, all the numbers shown are in millihertz.

	光钟 1		光钟 2		光钟 2-光钟 1	
	频移	不确定度	频移	不确定度	频移	不确定度
黑体辐射: 温度	-354.5	7.8	-354.5	7.8	0.0	2.4
黑体辐射: Stark 常数	...	5.2	...	5.2
附加微运动	-17.0	17.0	0.0	4.6	17.0	17.6
宏运动造成 Stark 效应						
宏运动造成微运动引起的二阶 Doppler 效应	-6.7	3.4	0.0	0.3	6.7	3.4
宏运动造成的二阶 Doppler 效应	-7.8	3.9	-4.7	2.2	3.1	4.5
397 nm 激光造成的 ac Stark 效应	0.7	0.7	0.4	0.4	-0.3	0.8
866 nm 激光造成的 ac Stark 效应	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0	0.1
854 nm 激光造成的 ac Stark 效应	-0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0	0.1
729 nm 激光造成的 ac Stark 效应	3.0	3.0	0.3	0.3	-2.7	3.0
电四极	0.0	1.6	0.0	1.5	0.0	2.2
一阶 Zeeman	0.0	0.6	0.0	0.6	0.0	0.8
二阶 Zeeman	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
声光调制器引起的啁啾效应	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
线型牵引效应	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
碰撞效应	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
一阶 Doppler 效应	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1
伺服误差	15.9	8.1	16.0	8.0	0.1	8.4
引力效应					0.0	0.4
总计	-367	22	-343	14	24	21

和 Sr⁺ (NRC/NPL) 离子后不确定度达到了 10⁻¹⁷ 水平的第 5 种离子, 超越了目前 Cs 喷泉钟的不确定度.

4 基于囚禁冷却 ⁴⁰Ca⁺ 离子的精密光谱测量

4.1 ⁴⁰Ca⁺ 离子钟跃迁绝对频率的测量

目前的国际秒定义仍然参考于 Cs 喷泉钟, 我们实验室没有该喷泉钟, 为此基于 GPS 系统的超高精度远程光频绝对值测量方案实现钙离子

4s ²S_{1/2}—3d ²D_{5/2} 跃迁频率的绝对值测量. GPS 系统远程高精度溯源的测量方案见图 10: 本地的光频直接测量装置 (飞秒光梳系统) 参考至本地氢原子钟 (H-Maser), 对它进行溯源校准分为两步进行, 首先是将 H-Maser 通过 GPS 系统远程溯源到中国计量科学研究院的 UTC(NIM), 相应的频率校准系数通过二者间的时间差的变化率来得到; 接下来将 UTC(NIM) 溯源到国际单位制 (SI) 秒定义, 而相应的频率校准系数通过查询国际计量局 (BIPM) 定期发布的时间公报 (Circular T) 数据并推算得到. 搭建并完善了光频测量系统, 进行了 42 d 测量,

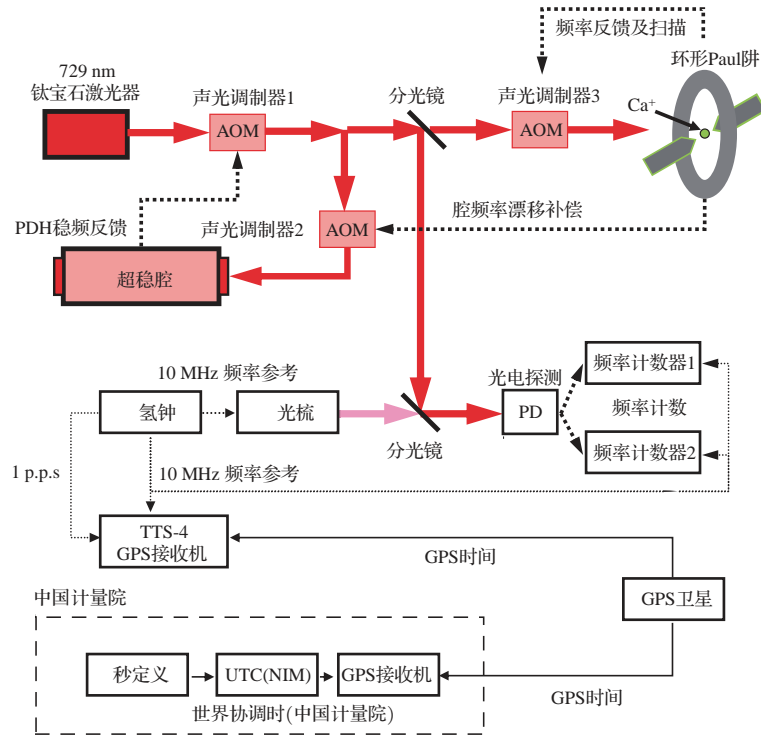


图 10 ⁴⁰Ca⁺ 离子钟跃迁绝对频率测量方案

Fig. 10. The measurement scheme of absolute frequency of ⁴⁰Ca⁺ optical frequency standard.

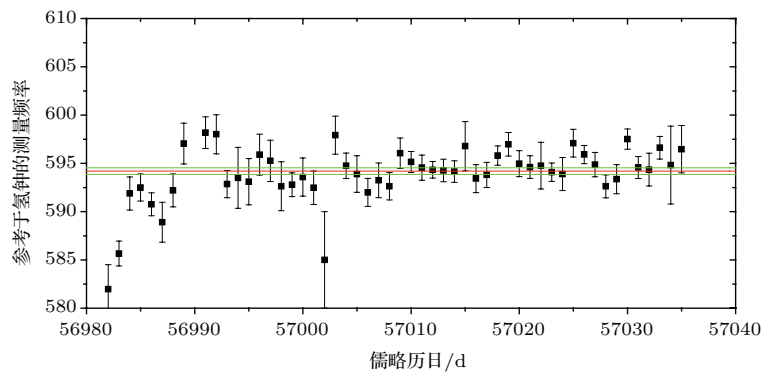


图 11 ⁴⁰Ca⁺ 离子钟跃迁绝对频率 42 次测量结果

Fig. 11. Frequency measurement of the 4s ²S_{1/2}—3d ²D_{5/2} transition of ⁴⁰Ca⁺ optical frequency standard (running 42 times).

表2 钙离子光频标光频跃迁绝对频率测量结果

Table 2. Uncertainty budget for the absolute frequency measurements between November 2014 and January 2015.

贡献项	十一月		十二月		一月		总计	
	频移/Hz	不确定度/Hz	频移/Hz	不确定度/Hz	频移/Hz	不确定度/Hz	频移/Hz	不确定度/Hz
系统误差 (表 1)	0.37	0.02	0.37	0.02	0.37	0.02		
引力效应	1.25	0.05	1.25	0.05	1.25	0.05		
统计	0	1.3	0	0.3	0	0.4		
通过 UTC(NIM) 实现氢钟的校准	187.7	0.5	191.5	0.5	192.1	0.5		
UTC(NIM) 相对于 TAI 的精度	-0.7	0.8	-0.7	0.8	-0.4	0.9		
TAI 相对于秒定义的精度	0.29	0.11	0.22	0.11	0.24	0.16		
总计	188.9	1.6	192.6	1.0	193.5	1.2		
参考氢钟测得的频率 (图 12)	411042129776590.2		411042129776594.5		411042129776595.2			
测得的绝对光频-411042129776000	401.3	1.6	401.9	1.0	401.7	1.2	401.7	1.1

其中参考氢钟获得的测量结果见图 11, 参考到 SI 秒之后的光频测量值见表 2. 测得光频跃迁为: 411042129776401.7(1.1) Hz. 频率测量结果被 BIPM 的国际时间频率咨询委员会会议 (CCTF20-2015) 采纳, 更新了 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子钟跃迁频率的推荐值 [43].

4.2 魔幻波长测量

魔幻波长是指在特定波长的激光作用下, 原子/离子/分子上下两个能级具有相同的偶极极化率, 激光所引入的 ac Stark 频移为零时对应的波长. 魔幻波长在量子态操控以及精密光谱方面具有广泛的应用, 基于魔幻波长发展起来的光晶格原子频标是原子光频标的一个重要发展方向.

在 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标锁定的情况下, 引入另外一束激光, 测量该激光造成的 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子钟跃迁的

ac Stark 效应, 当 ac Stark 效应为零时, 引入激光的波长即为 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频标钟跃迁对应的魔幻波长, 利用该魔幻波长激光实现离子的全光囚禁, 可以消除射频囚禁中由于离子的附加微运动造成的频移. 采用以上实验方案, 我们测量了 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子钟跃迁对应的魔幻波长 (图 12), 并分析了系统误差 (表 3). 测量结果为 $3d\ ^2D_{5/2}$ 态 $|m| = 1/2$ 的魔幻波长 $\lambda_{|m|=1/2} = 395.7992(7)$ nm, $3d\ ^2D_{5/2}$ 态 $|m| = 3/2$ 的魔幻波长 $\lambda_{|m|=3/2} = 395.7990(7)$ nm, 与理论计算值相符合 [44]. 基于此魔幻波长, 得到 $4s\ ^2S_{1/2} - 4p\ ^2P_{1/2}$ 和 $4s\ ^2S_{1/2} - 4p\ ^2P_{3/2}$ 跃迁的振子强度比为 2.009(4), 不确定度为 2.0×10^{-3} , 为原子精细结构的研究提供了实验依据. 同时提出实现全光 (魔幻波长) 的囚禁多离子的体系以提高囚禁离子光频标的稳定度 [35].

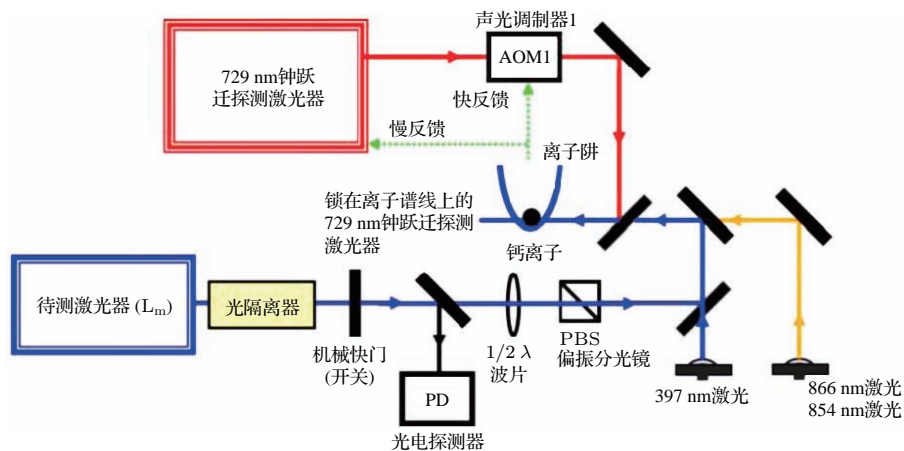


图 12 钙离子光频标光频跃迁魔幻波长测量方案

Fig. 12. Schematic diagram of the magic wavelength measurement setup.

表3 魔幻波长测量的不确定度分析

Table 3. The uncertainty budget of the magic wavelength measurement.

系统误差项	偏移/pm	不确定度/pm
激光光谱纯度	0	0.60
激光线偏纯度	0	0.01
二阶 Doppler 及 Stark 频移	0.01	0.01
波长计测量误差	0	0.06
统计	...	0.20
总计	0.01	0.7

4.3 $3d\ ^2D_{3/2}$ 和 $3d\ ^2D_{5/2}$ 态寿命测量

到目前为止 $3d\ ^2D_{3/2}$ 态寿命很少有实验测量, 新近测量的单个钙离子的寿命为 $1.176(11)\text{ s}$ 与理论计算结果 $1.196(10)\text{ s}$ [40] 不符, 我们用量子跃迁测量囚禁冷却于 Paul 阱中的单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子, 采用有效的态制备和读出时序, 并开展系统误差 (866 nm 激光的光强、同本底残余气体的碰撞、离子加热和统计误差等) 的分析, 通过采用对离子状态时时修正的方法, 精确测得其寿命为 $1.195(8)\text{ s}$, 该结果与理论计算结果 [40] 一致.

我们采用高效量子态探测方法以及高精度高同步脉冲时序, 有效测量囚禁在 Paul 阱中的单个 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的跃迁谱线, 获得了钙离子 $3d\ ^2D_{5/2}$ 态寿命, 结果为 $1.174(10)\text{ s}$ [37]. 在此基础上, 通过增加测量的样本数减小统计误差, 同时系统地分析了诸如 866 nm 激光功率、同残余本底气体碰撞以及离子加热和统计误差等, 并对激光成分不纯等问题进行改进, 进一步减小了测量的系统误差, 测得了 $3d\ ^2D_{5/2}$ 态的寿命为 $1.1650(27)\text{ s}$ [38], 该结果与新近在线形离子阱的结果 $1.168(7)\text{ s}$ [39] 和 $1.168(9)\text{ s}$ [40] 一致. 结合分支比的测量, 得到 $4s\ ^2S_{1/2} - 3d\ ^2D_{5/2}$ 跃迁的四极跃迁矩阵元为 $7.936(26)ea_0^2$ [38].

5 总结与展望

近年来, 我们采用新的 ULE 腔系统, 通过细致的温度、振动以及光学控制, 实现了 729 nm 钟跃迁激光器 1—100 s 的频率稳定度均优于 2×10^{-15} ; 开展了两台光频标的比对实验, 通过对外场和环境效应的控制及克服, 特别是囚禁离子微运动

的抑制, 将单个钙离子光频标的不确定度降低至 5.5×10^{-17} ; 20000 s 稳定度达到 7×10^{-17} ; 基于高精度钙离子光频标平台, 进行了相关精密测量的工作, 包括: 基于 GPS 系统的超高精度远程光频绝对值测量方案, 再次测量了钙离子的光频跃迁绝对值; 精确测量了钙离子的钟跃迁魔幻波长和亚稳态寿命.

光频标的研究是对精密极限的挑战. 我们一是发展更高精度的钙离子光频标: 目前限制钙光频标精确度的主要根源, 在于囚禁离子运动效应、黑体辐射效应和伺服系统误差等. 需要考虑更有效的冷却方法、黑体辐射效应、量子投影噪声、广义相对论效应和重力效应等. 同时研究突破限制的激光线宽的机理, 进一步减小激光线宽, 在此基础上, 研制出不确定为 10^{-18} 的钙离子光频标.

单离子光频标和光晶格原子光频标均发展很快, 能否结合各自的优点, 开展新型光频标的研究; 探索如何达到和超越标准量子极限.

同时, 应开展高精度频标的应用研究: 通过光频网的传输比对, 实现光频的比值测量, 给出更高精度的光频测量值, 使我国在国际单位制秒的重新定义上做出我们的贡献; 利用高精度频标和时频传递网技术, 实现基于时间频率的基本物理定律检验和基本物理常数测量, 开展重力梯度和引力效应的细致探索; 光频标驾驭微波频标研制出性能最好的守时系统; 为建立更高性能的时频系统奠定基础; 实现空间光频标, 为未来的全球定位系统奠定基础.

作者感谢研究组的学生刘培亮、边武、邵虎、宋红芳、王淼、曾孟彦、张宝林、张华青等的努力工作, 朱熙文、黄贵龙、李交美、黄学人、郭彬、范浩权、刘曲、曹健、欧保全、屈万成、舒华林、朱艳舞和张志飞的早期工作以及张炜、赵研英和魏志义的光频测量的早期合作; 感谢史庭云、唐丽艳、唐永波、马龙生、李天初、梁坤、J. Mitroy、B. Sahoo、李瑛和陈李生的合作; 感谢叶军、K. Matsubara、P. Gill、J. Bergquist、王义道、叶朝辉、罗俊、王育竹、李家明、詹明生、方占军、严宗朝和李朝红等的讨论和建议.

参考文献

[1] Bergquist J C, Jefferts S R, Wineland D J 2001 *Phys. Today* 54 37

- [2] Rosenband T, Hume D B, Schmidt P O, Chou C W, Brusch A, Lorini L, Oskay W H, Drullinger R E, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, Swann W C, Newbury N R, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C 2008 *Science* **319** 1808
- [3] Margolis H, Barwood G P, Huang G, Klein H A, Lea S N, Szymaniec K, Gill P 2004 *Science* **306** 1355
- [4] Madej A A, Dubé P, Zhou Z, Bernard J E, Gertsz M 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 203002
- [5] Huntemann N, Okhapkin M, Lipphardt B, Weyers S, Tamm C, Peik E 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 090801
- [6] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, Wineland D J, Rosenband T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [7] Chwalla M, Benhelm J, Kim K, Kirchmair G, Monz T, Riebe M, Schindler P, Villar A S, Hansel W, Roos C F, Blatt R, Abgrall M, Santarelli G, Rovera G D, Laurent Ph. 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 023002
- [8] Huntemann N, Sanner C, Lipphardt B, Tamm C, Peik E 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 063001
- [9] Takamoto M, Hong F, Higashi R, Katori H 2005 *Nature* **435** 321
- [10] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, Blatt S, Boyd M M, de Miranda M H G, Martin M J, Thomsen J W, Foreman S M, Ye J, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, le Coq Y, Barber Z W, Poli N, Lemke N D, Beck K M, Oates C W, Hinkley N 2008 *Science* **319** 1805
- [11] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, Schioppo M, Lemke N D, Beloy K, Pizzocaro M, Oates C W, Ludlow A D 2013 *Science* **341** 1215
- [12] McFerran J, Yi L, Mejri S, Manno S, Zhang W, Guéna J, le Coq Y, Bize S 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 183004
- [13] Nicholson T L, Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, Bloom B J, McNally R L, Zhang W, Barrett M D, Safronova M S, Strouse G F, Tew W L, Ye J 2015 *Nat. Commun.* **6** 6896
- [14] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, Goban A, Darkwah Oppong N, McNally R L, Sonderhouse L, Robinson J M, Zhang W, Bloom B J, Ye J 2017 *Science* **358** 90
- [15] Ushijima I, Takamoto M, Das M, Ohkubo T, Katori H 2015 *Nat. Photon.* **9** 185
- [16] Schioppo M, Brown R C, McGrew W F, Hinkley N, Fasano R J, Beloy K, Yoon T H, Milani G, Nicolodi D, Sherman J A, Phillips N B, Oates C W, Ludlow A D 2016 *Nat. Photon.* **11** 48
- [17] Huang Y, Guan H, Liu P, Bian W, Ma L, Liang K, Li T, Gao K 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 013001
- [18] Lin Y, Wang Q, Li Y, Meng F, Lin B, Zang E, Sun Z, Fang F, Li T, Fang Z 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 090601
- [19] Zhang X, Zhou M, Chen N, Gao Q, Han C, Yao Y, Xu P, Li S, Xu Y, Jiang Y, Bi Z, Ma L, Xu X 2015 *Laser Phys. Lett.* **12** 025501
- [20] Liu H, Zhang X, Jiang K, Wang J, Zhu Q, Xiong Z, He L, Lyu B 2017 *Chin. Phys. Lett.* **34** 020601
- [21] Wang Y, Yin M, Ren J, Xu Q, Lu B, Han J, Guo Y, Chang H 2018 *Chin. Phys. B* **27** 023701
- [22] Che H, Deng K, Xu Z, Yuan W, Zhang J, Lu Z 2017 *Phys. Rev. A* **96** 013417
- [23] Shang J, Cui K, Cao J, Wang S, Chao S, Shu H, Huang X 2016 *Chin. Phys. Lett.* **33** 103701
- [24] Zou H, Wu Y, Chen G, Shen Y, Liu Q 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 054207
- [25] Fu X, Fang S, Zhao R, Zhang Y, Huang J, Sun J, Xu Z, Wang Y 2018 *Chin. Opt. Lett.* (Accepted)
- [26] Shi T, Pan D, Chang P, Shang H, Chen J 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 043102
- [27] Champenois C, Houssin M, Lisowski C, Knoop M, Hagel G, Vedel M, Vedel F 2004 *Phys. Lett. A* **331** 298
- [28] Matsubara K, Hachisu H, Li Y, Nagano S, Locke C, Nogami A, Kajita M, Hayasaka K, Ido T, Hosokawa M 2012 *Opt. Express* **20** 22034
- [29] Shu H, Guan H, Huang X, Li J, Gao K 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 1641
- [30] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, Hough J, Ford G M, Munley A J, Ward H 1983 *Appl. Phys. B* **31** 97
- [31] Guan H, Liu Q, Huang Y, Guo B, Qu W, Cao J, Huang G, Huang X, Gao K 2011 *Opt. Commun.* **284** 217
- [32] Huang Y, Liu Q, Cao J, Ou B, Liu P, Guan H, Huang X, Gao K 2011 *Phys. Rev. A* **84** 053841
- [33] Huang Y, Cao J, Liu P, Liang K, Ou B, Guan H, Huang X, Li T, Gao K 2012 *Phys. Rev. A* **85** 030503
- [34] Bian W, Huang Y, Guan H, Liu P, Ma L, Gao K 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 063121
- [35] Liu P, Huang Y, Bian W, Shao H, Guan H, Tang Y, Li C, Mitroy J, Gao K 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 223001
- [36] Shao H, Huang Y, Guan H, Qian Y, Gao K 2016 *Phys. Rev. A* **94** 042507
- [37] Guan H, Shao H, Qian Y, Huang Y, Liu P, Bian W, Li C, Sahoo B K, Gao K 2015 *Phys. Rev. A* **91** 022511
- [38] Shao H, Huang Y, Guan H, Li C, Shi T, Gao K 2017 *Phys. Rev. A* **95** 053415
- [39] Barton P A, Donald C J S, Lucas D M, Stevens D A, Steane A M, Stacey D N 2000 *Phys. Rev. A* **62** 032503
- [40] Kreuter A, Becher C, Lancaster G P T, Mundt A B, Russo C, Häffner H, Roos C, Hänsel W, Schmidt-Kaler F, Blatt R 2005 *Phys. Rev. A* **71** 032504
- [41] Guan H, Guo B, Huang G, Shu H, Huang X, Gao K 2007 *Opt. Commun.* **274** 182
- [42] Qu W C, Huang Y, Guan H, Huang X R, Gao K L 2011 *Chin. J. Lasers* **38** 0803008 (in Chinese) [屈万成, 黄焱, 管桦, 黄学人, 高克林 2011 中国激光 **38** 0803008]
- [43] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Report of the 20th Meeting (September 17–18, 2015) to the International Committee for Weights and Measures <https://www.bipm.org/utis/common/pdf/CC/CCTF/CCTF20.pdf>
- [44] Tang Y, Qiao H, Shi T, Mitroy J 2013 *Phys. Rev. A* **87** 042517

SPECIAL TOPIC — Physics in precise measurements

$^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standards with high accuracy*

Guan Hua¹⁾²⁾ Huang Yao¹⁾²⁾ Li Cheng-Bin¹⁾²⁾ Gao Ke-Lin^{1)2)3)†}

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

3) (Center for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

(Received 3 May 2018; revised manuscript received 5 June 2018)

Abstract

With the development of the technologies in the lasers and the manipulation of cold atoms, the high precision optical frequency standards have been extensively studied and built in recent years. These high precision frequency standards may play an important role in establishing the new time reference, promoting the researches in the fundamental fields, fulfilling the national strategic needs, etc. In this paper, the research progress of high accuracy $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standard in Wuhan Institute of Physics and Mathematics (WIPM) of Chinese Academy of Sciences is presented. A new ULE super cavity is adopted for stabilizing the frequency of 729 nm clock laser, and the stability of the laser is improved now to 2×10^{-15} in a duration of 1–100 s. By controlling the external fields and other environmental influences, especially suppressing the micromotion effects of the trapped ion, the uncertainty of the optical frequency standard based on a single $^{40}\text{Ca}^+$ is reduced to 5.5×10^{-17} . The stability of 5×10^{-17} in a duration of 20000 s is achieved via the comparison between two $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standards. Several precision measurement experiments are performed, based on the high precision $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standard. The absolute value of the clock transition frequency of the $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standard is measured second time, using an optical comb referenced to a hydrogen maser which is calibrated via GPS referenced to UTC (NIM)) using the precise point positioning data-processing technique. The frequency offset of UTC (NIM) relative to the SI second can be evaluated through BIPM circular-T reports, and the newly measured value of $4s\ ^2S_{1/2}-3d\ ^2D_{5/2}$ transition is adopted by CCTF-20, thus updating the recommended value of $^{40}\text{Ca}^+$ optical clock transition. Besides the absolute frequency measurement, the magic wavelengths of $^{40}\text{Ca}^+$ optical clock transition are measured precisely, and this work is a milestone for establishing all-optical trapped-ion clocks. The lifetime of the $3d\ ^2D_{3/2}$ and $3d\ ^2D_{5/2}$ state in $^{40}\text{Ca}^+$ are precisely measured, too. The work mentioned above contributes to the researches of the precision measurements based on cold atomic systems.

Keywords: optical frequency standards, precision measurements, $^{40}\text{Ca}^+$ ion, magic wavelengths

PACS: 42.62.Fi, 37.10.Ty, 43.58.Hp

DOI: 10.7498/aps.67.20180876

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 91336211, 11474318, 11622434, 11774388), the National Basic Research Program of China (Grants Nos. 2005CB724502, 2012CB821301), and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB21030100).

† Corresponding author. E-mail: klgao@wipm.ac.cn