

钙离子光频标研究进展*

管桦 黄垚 高克林[†]

(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 波谱与原子分子物理国家重点实验室 武汉 430071)

2023-06-25 收到

[†] email: klgao@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230702

The progress of $^{40}\text{Ca}^+$ optical frequency standards

GUAN Hua HUANG Yao GAO Ke-Lin[†]

(State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

摘要 钙离子光频标是原子光频标的成员之一。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(原武汉物理与数学研究所)从2000年开始选择钙离子为研究体系,先后解决了单离子稳定囚禁与有效冷却、超窄线宽激光稳频等一系列关键问题,特别是一步步抑制微运动和黑体辐射效应,实现了不确定度 3.0×10^{-18} 的液氮低温离子光频标和不确定度 4.8×10^{-18} 的室温离子光频标,稳定度达到 6.3×10^{-18} @52万秒。通过集成化设计,实现了不确定度 1.3×10^{-17} 、高鲁棒性的可搬运钙离子光钟,并基于该光钟实现了高程差测量应用。通过参考本地铯喷泉钟和本地时标,并远程溯源到国际秒定义,实现了不确定度达 3.2×10^{-16} 的钙离子光频跃迁绝对频率测量。钙离子光频跃迁被国际计量局推荐为新增的次级秒定义参考。

关键词 光频标, 囚禁离子, 可搬运光钟, 国际单位制秒, 绝对频率测量

Abstract The calcium ion optical frequency standard is one of a variety of different kinds of optical frequency standards. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology (formerly Wuhan Institute of Physics and Mathematics), Chinese Academy of Sciences has selected calcium ions as the optical frequency standard reference since 2000, and has successively step by step solved a series of problems, such as the trapping and laser cooling of single-ions, the frequency stabilization to achieve ultra-narrow linewidth lasers, and especially the suppression of the systematic uncertainty due to the micromotion and the blackbody radiation. The overall systematic uncertainty of the liquid nitrogen optical frequency standard and the room temperature optical frequency standard were evaluated as 3.0×10^{-18} and 4.8×10^{-18} respectively, and the stability was measured as 6.3×10^{-18} at 520000 s. A transportable and robust calcium optical clock has been built with the integrated design and the uncertainty of the transportable clock was evaluated as 1.3×10^{-17} , and a preliminary geopotential measurement was made with the transportable clock. The uncertainty for the absolute frequency measurement has been improved to 3.2×10^{-16} , referenced to both the local cesium fountain clock and the local UTC(k) referenced to the SI second. The calcium ion optical clock transition has been recommended by the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) as a new reference for the secondary representation of the SI second.

Keywords optical frequency standard, ion trapping, transportable optical clock, SI second, absolute frequency measurement

* 国家重点研发计划(批准号: 2017YFA0304400; 2018YFA0307500; 2017YFF0212003)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2005CB724500; 2012CB821300)资助项目, 国家自然科学基金重点项目(批准号: 11034009; 91336211; 11634013; 91736310), 中国科学院先导专项(批准号: XDB21030100)

1 引言

由于激光技术、冷原子物理和锁相飞秒激光频率梳技术的突破^[1],使得在高精度下测量与应用基于原子分子光学频率跃迁下的光谱成为可能,从而促成了原子光频标的诞生。

在众多光频标的候选原子体系中,人们主要选择了囚禁在射频离子阱中的单离子和囚禁在光晶格中的冷原子团两种体系。其中,对于囚禁离子光频标体系,目前新加坡研究小组的单个 Lu^+ 离子光频标的不确定度已经达到 6×10^{-19} ^[2],美国国家标准与技术研究院(NIST)的单个 Al^+ 离子光频标的不确定度达到 9.4×10^{-19} ^[3]。德国联邦物理技术研究院(PTB)的单个 Yb^+ 离子光频标的不确定度达到 2.7×10^{-18} ^[4]。对于中性原子光频标体系,美国天体物理联合实验室(JILA)^[5]和日本东京大学^[6]的Sr原子光晶格光频标的不确定度同时推进到 10^{-18} 量级,其中,JILA的Sr原子光晶格光频标的不确定度为 2×10^{-18} ^[5]。同时,NIST的Yb光频标的不确定度也达到了 1.4×10^{-18} ^[7]。稳定度方面,Sr和Yb两种原子光晶格光频标在数千秒的稳定度均达到 1×10^{-18} 水平^[5, 7]。

同时,高精度的时间频率标准是科技创新和国民经济建设的重要技术支撑。作为超高精度仪器设备,实现光频标的应用首要是做到“可搬运”。2018年5月,PTB实现了不确定度为

7.4×10^{-17} 的远程可搬运Sr原子光晶格钟^[8]。2021年,日本东京大学实现不确定度为 10^{-18} 量级的可搬运Sr原子光晶格钟^[9]。

随着高精度光频标^[2-7]、高精度光频传递网^[10]和可搬动光钟的实现^[8, 9],促进了频率溯源和精密测量物理研究的发展^[11]。

随着新一代光频标的发展,各种光频标的不确定度和稳定度已经优于现有国际单位制秒定义的参考¹³³Cs原子微波频标(10^{-16} 量级)。新近美国JILA和NIST合作测量了Sr、Yb、 Al^+ 三种光频标间频率比值,频率比值测量不确定度开始进入 10^{-18} 量级^[12]。

国际计量委员会(CIPM)于2006年将三种离子(Sr^+ 、 Hg^+ 、 Yb^+ 电四极)和一种原子(^{87}Sr)的光学跃迁频率作为“秒”定义的次级标准^[13],2012年和2017年又确定了两种离子(Al^+ 、 Yb^+ 电八极)和两种原子(Yb和Hg)的光学跃迁频率作为“秒”定义的次级标准^[14, 15]。而新近又确定了一种离子(Ca^+)和一种原子(^{88}Sr)作为“秒”定义的次级标准^[16]。目前,科学家们考虑在2030年左右参考光频标来修改国际单位制秒的定义^[15, 16]。

高精度光频标的光频跃迁频率与微小的物理和环境效应相关,由此可以开展物理常数的测量和物理规律的检验实验。2021年,PTB基于 Yb^+ 离子光频标电四极和电八极跃迁的观测,得到精细结构常数随时间的变化为 $\dot{\alpha}/\alpha = -1.0(1.1) \times 10^{-18} \text{ yr}^{-1}$ ^[17]。此外,PTB采用两台高精度的 Yb^+ 离子光频标(不确定度和稳定度为 10^{-18} 量级)的长时间频率比对,基于原子分子光物理的方法将洛伦兹不变性破缺的上限推进到 10^{-22} 量级^[4]。

高精度的光频标对引力的相对论效应非常灵敏,能比现有方法更精确地测量地球表面时空的引力效应,因此可将光频标用于广义相对论的检验,结合重力仪可开展重力和引力势的测量,成为相对论测地学的重要工具。日本东京大学利用两台高度差450 m,不确定度为 10^{-18} 量级的可搬运Sr原子光晶格钟的频率比对,将广义相对论理论的检验精度提高至 9.1×10^{-5} ,证明广义相对论预言的比例系数在第4—5位有效数字是可靠的。

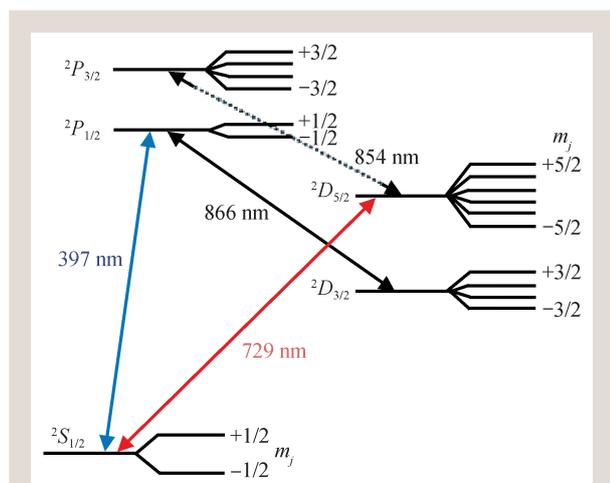


图1 $^{40}\text{Ca}^+$ 光频标用到的能级、跃迁及其对应频率

JILA 研制的 Sr 原子光晶格光频标和 NIST 研制的 Yb 原子光晶格光频标的不确定度分别达到了 2×10^{-18} 和 1.4×10^{-18} , 长期稳定度进入了 10^{-19} 量级^[5, 7], 可以保证大地水准面测定的不确定度接近 1 cm。2022 年, JILA 和美国威斯康辛大学麦迪逊分校各自通过测量同一团 Sr 原子中各部分原子的钟跃迁频率差, 实现了毫米量级的引力红移测量^[18, 19]。

光频标的发展也引起我国各方面的重视和支持。在国家科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院相关重大研究计划项目和基本设施的支持下, 我国及时开展了光频标的研究, 如中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(Ca^+ 离子, Al^+ 离子和 Yb 原子)、华中科技大学(Al^+ 离子)、中国计量科学研究院(NIM)(Sr 原子, Yb^+ 离子)、华东师范大学(Yb 原子)、中国科学院国家授时中心(Sr 原子)、中国科学技术大学(Sr 原子)、中国科学院上海光学精密机械研究所(Hg 原子)、国防科技大学(Hg^+ 离子)等。

我们选择囚禁钙离子体系开展高精度的光频标研究。 Ca^+ 离子的自然线宽为 0.14 Hz, 是实现高精度光频标的候选原子之一。 Ca^+ 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外, 同时还拥有魔幻囚禁频率, 可以极大地消除微运动对钟跃迁频率的影响。另一个突出优点是激光冷却和光频跃迁探测所需的激光都可以通过固体激光器得到(相关能级和所用激光波长如图 1 所示), 因此极可能早日实现应用。

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^[20-22]。在光频标方面, 国际上奥地利 Innsbruck 大学在线形离子阱中对 Ca^+ 离子的光频测量的不确定度达到 2.4×10^{-15} ^[20], 日本 NICT 在 Paul 阱中对 Ca^+ 离子的光频测量的不确定度达到了 4.4×10^{-14} ^[21], 2009 年 CIPM 根据上述两个单位的测量值推荐了 Ca^+ 离子的光频值^[23]。

同时, Ca^+ 离子与其他候选离子和原子相比, 除了前面提到的优势外, 也面临着诸多挑战: 其光频跃迁的品质因子相对不是很高(约 10^{15})、对磁场比较敏感(相对于 Yb^+ 离子、 Al^+ 离子、Yb 原子、

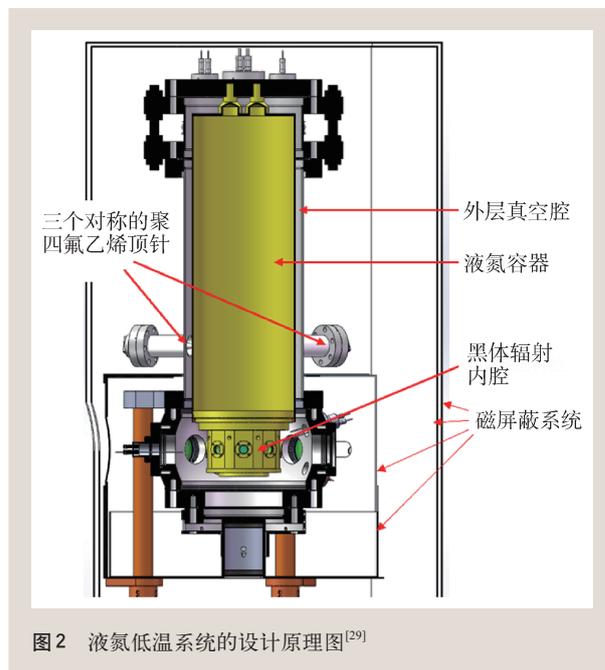


图2 液氮低温系统的设计原理图^[29]

Sr 原子等, 敏感度高三个数量级); 对黑体辐射也较为敏感(比 Al^+ 离子高 276 倍, 比 Yb^+ 离子高 12 倍, 比 In^+ 离子高 31 倍), 同 Sr^+ 离子、Sr 原子和 Yb 原子在同样量级^[1]。

由此可见, 开展 Ca^+ 离子光频标的研究是极有前途和挑战的课题。

2 钙离子光频标研究进展

2.1 建立了囚禁钙离子光频标: 不确定度和稳定度进入 10^{-18} 量级

我们团队自 2000 年以来开展单个钙离子光频标的研究, 首先细致研究抑制离子微运动效应的方案, 成功实现钙离子的有效冷却和长达两个月的稳定囚禁。同时解决超窄线宽激光、实验环境影响精确控制(含电、磁、振动、温度等)等一系列关键科学和技术问题, 于 2011 年实现了不确定度为 10^{-16} 量级的钙离子光频标^[24, 25]。通过改进钟跃迁激光性能, 采用理论上给出的魔幻囚禁场抑制微运动效应, 建立了第二台钙离子光频标并进行了两台光频标的比对, 于 2015 年实现了不确定度达 5.5×10^{-17} 、稳定度达 7×10^{-17} 的钙离子光频标^[26, 27]。

通过进一步在实验上精确测得魔幻射频场频率,获得的钟跃迁静态极化率之差的精度比理论计算结果高2个量级,将室温下静态极化率引入的不确定度降至 10^{-19} 量级;采用频率精度更高的魔幻囚禁场囚禁离子,使微运动引入的不确定度降至 10^{-19} 量级,2018年钙离子光频标的不确定度达到 2.2×10^{-17} ^[28]。这时,限制不确定度进入 10^{-18} 的主要因素为黑体辐射频移不确定度。黑体辐射频移与选择的光频标体系相关,同时与环境温度的4次方成正比,对温度非常敏感。实验上可以采用两种方案来降低黑体辐射频移不确定度:其一是直接降低离子所处环境温度;其二是减小离子所处环境的温度变化。

我们首先采用低温方案来抑制黑体辐射频移不确定度。设计并实现了液氮低温系统(原理图如图2所示),将离子阱系统的温度降低到77 K左右,实验表明低温系统的黑体辐射频移为3.1(1.2) mHz,不确定度为 2.7×10^{-18} 。加上囚禁离子的运动效应、磁场效应、光频标伺服系统误差的进一步抑制,2022年频率不确定度达到 3.0×10^{-18} ^[29],如表1所示,相当于运行105亿年不差一秒。

近期,我们为减小室温下离子所处环境的温度变化,搭建了一套全新的室温钙离子光频标,通过水冷系统对该物理系统进行主动温控,将运行过程中的离子环境温度不确定度减小至 ± 0.3 °C。同时采用有限元方法分析计算了离子阱各组件相对钙离子的有效温度立体角,并结合真空内的测温探头和红外相机监测评估了离子阱各组件的平均温度,最终将室温钙离子光频标的黑体辐射频移不确定度减小至 4.6×10^{-18} ^[30]。在此基础上,我们首次开展了两套 10^{-18} 量级不确定度

表1 液氮低温钙离子光频标的系统误差表^[29]

频移贡献项	频移/ 10^{-18}	不确定度/ 10^{-18}
黑体辐射频移(温度)	7.3	2.7
黑体辐射系数($\Delta\alpha_0$)	0	0.3
附加微运动	0	0.2
二阶多普勒(宏运动)频移	-3.1	0.9
剩余电四极频移	0	0.4
伺服误差	0	0.4
二阶塞曼频移	0	0.3
总计	4.2	3.0

钙离子光频标的频率比对实验,通过新搭建的室温钙离子光频标和实验室已有的低温钙离子光频标的频率比对来验证黑体辐射频移评估的可靠性,比对实验结果同理论计算结果相符;同时将钙离子光频标比对的不确定度提高至 10^{-18} 量级^[30]。

2021年实现的不确定度 10^{-18} 的钙离子光频标,是继铝离子(美国NIST)^[31]、铯原子(美国JILA/日本东京大学)^[5, 6]、镱离子(德国PTB)^[4]和镱原子(美国NIST)^[7]后第5种不确定度达 10^{-18} 量级的光频标,也是II族元素离子S—D跃迁光频标中的最好指标。

稳定度方面,我们持续不断地挑战单离子信噪比差难以实现高稳定度难题。通过更有效地激光冷却、初态制备^[31, 32]、采用Ramsey方法和改进伺服系统^[32]等优化措施,实现了光频标的准连续运行。2020年通过两台钙离子光频标长达31天的频率比对,稳定度达 $6.3 \times 10^{-18}/520000$ s^[33](图3),这表明我们研制的钙离子光频标可以分辨出约20亿亿分之一秒的微弱时间/频率变化。这是继德国PTB研制的镱离子光频标^[4]之后,国际第二种实现 10^{-18} 稳定度的离子光频标。

2.2 研制成功可搬运钙离子光钟,实现光频标的初步应用

将高精度的光频标搬出实验室,使其成为一台面向广泛科学应用的可搬运光钟,长期以来一直是科学家们的梦想。

光频标不是一台简单的仪器设备,而是包含成百上千个具体设备和部件,往往体积庞大、运行率低。我们通过几年的不懈努力,实现了光频标的集成化,让庞大的设备尽可能缩小体积、降低功耗,可以放在狭小的车厢内。我们还开发了一套半自动化光频标锁定软件,降低了光频标的伺服误差并提高其运行率,同时提高了光频标的可靠性、运行率和抗干扰能力,建立了可搬运的稳频光频激光器,研制成功一台系统不确定度达 10^{-17} 量级(相当于运行34亿年不差一秒)的可搬运光钟^[34](图4)。随后在武汉进行了本地搬运实

验, 通过可搬运光钟和实验室光频标的频标比对, 进行了高程差测量的演示实验(图 5), 频率差为 4.6×10^{-16} (对应约 4.3 m 高度差)。该车载钙离子光钟经过 1200 km 长途搬运, 从武汉成功搬运到北京, 是继 PTB 研制的铯原子光晶格钟后, 第二种进行千公里级长途搬运的光钟, 为光钟应用的拓展创造了前提条件^[34]。

2.3 钙离子光频跃迁的精密测量: 实现了 10^{-16} 量级钙离子钟跃迁绝对频率的测量

时间单位秒(s)是目前精度最高的物理量, 秒在国际单位制 7 个基本单位中最准确和最基础, 许多其他物理量的测量可转化为对频率的测量, 由此进一步检验物理规律、发现新的物理现象。光频跃迁绝对频率的精密测量将为我国参与新的国际量子计量标准的制定提供重要支持。光频标的快速发展, 使重新修改秒定义成为趋势, 根据国际计量局公布的秒定义修改实施路线图, 候选光频标需满足以下必要条件^[15]: (1)光频标的不确定度超越现有铯原子喷泉钟约两个量级, 即 10^{-18} 量级; (2)实现不同光频标间的频率比值测量, 测量不确定度优于 5×10^{-18} , 这要求光频标的稳定度也需要达到 10^{-18} 量级; (3)实现溯源到现有国际秒定义的高水平绝对频率测量, 测量不确定度优于 2×10^{-16} 。我们应迎接挑战, 努力发展不确定度和稳定度达到 10^{-18} 量级的高精度光频标, 进入国际光频标研究的先进行列; 开展 10^{-16} 量级高精度的光频测量, 使钙离子光频标成为次级秒定义标准, 提升我国在国际时间频率标准领域的影响力和话语权。

我们同中国计量科学研究院合作, 基于高精度光频标系统开展了钙离子钟跃迁光频绝对频率的精密测量: 在没有本地基准钟的条件下, 采用基于 GPS 远程溯源的高精度光频绝对值测量方案, 首次将基于 GPS 载波相位观测的精密单点定位

解算进行时间频率传递的方法应用到光频测量, 于 2012 年实现了钙离子光频标绝对频率测量^[35]。2015 年, 进行了两台钙离子光频标长达 42 天的比对; 同时, 基于 GPS 远程溯源方案再次测量了钙离子光频标绝对频率, 不确定度达 10^{-15} 量级^[26, 27]。2020 年, 利用可搬运钙离子光钟在北京实现本地基准钟的溯源测量, 国际上首次将钙离子光频标钟跃迁绝对频率测量不确定度推进至 5.6×10^{-16} ^[34]。最近, 通过进一步提升测量的总时间和运行率, 实现了长达 35 天, 运行率优于 90% 的绝对频率测量, 整个测量时间覆盖国际计量局公布的

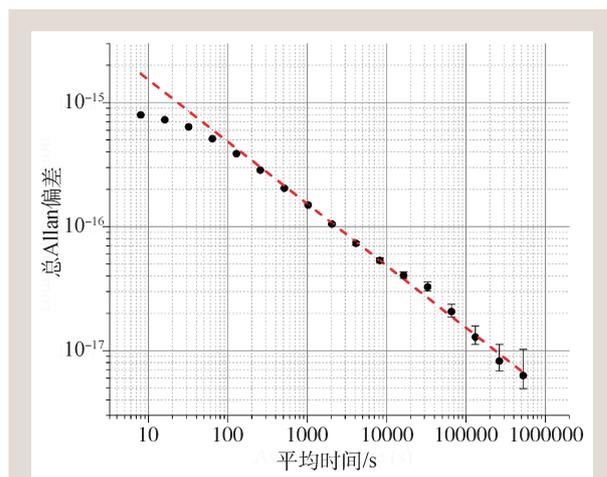


图 3 钙离子光频标稳定度测量结果^[33]

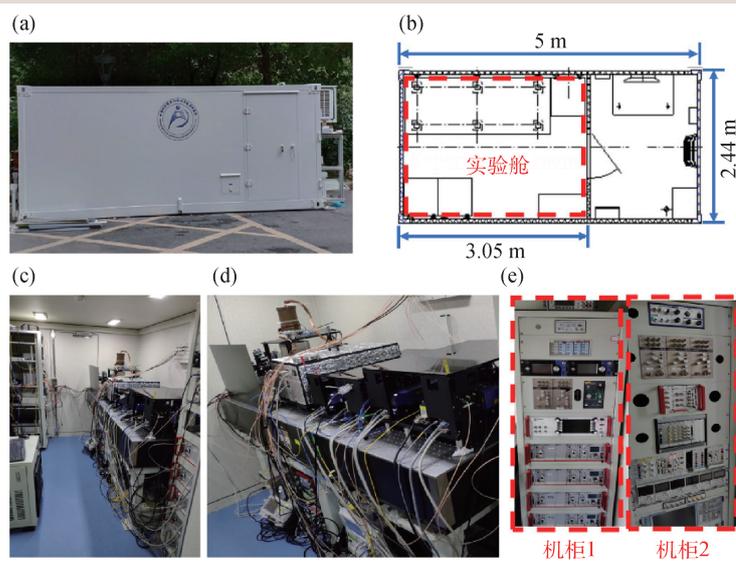


图 4 可搬运钙离子光钟^[34] (a)可搬运光钟车厢外观; (b)可搬运光钟车厢外形尺寸示意图; (c, d)可搬运光钟车厢内部照片(光路部分); (e)可搬运光钟车厢内部照片(电路部分)

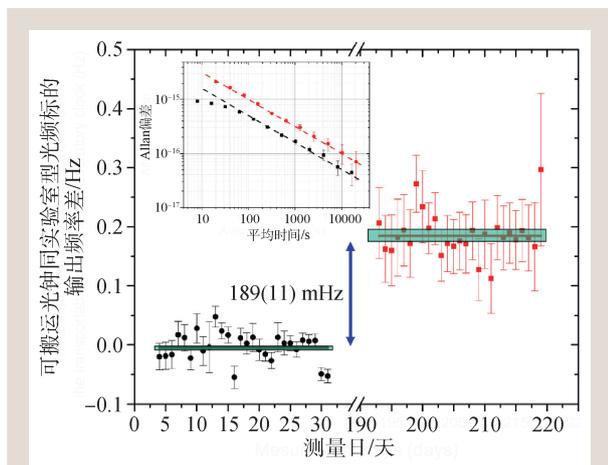


图5 基于可搬运钙离子光钟的高程差测量^[34]，其中黑色数据点为搬运前可搬运光钟同实验室型光频标的输出频率差(处于同一高度)，红色数据点为搬运后可搬运光钟同实验室型光频标的输出频率差(处于不同高度)，加权平均值相差189(11) mHz。左上小图是可搬运光钟同实验室型光频标的频率比对Allan偏差，红色数据点为实际测量结果，黑色数据点为根据测得的结果等效换算成单台光钟的稳定度，虚线是根据数据得到的拟合曲线

circular-T 时间段，大幅减小了由测量死时间引起的不确定度，将钙离子光频标的钟跃迁绝对频率测量不确定度进一步推进至 3.2×10^{-16} ^[36]。

我们在2012年、2015年和2020年的三次钙离子光频标绝对频率测量值四次被国际计量局时间频率咨询委员会(CCTF)采纳(CCTF19-2012^[14]；CCTF20-2015^[37]；CCTF21-2017^[15]；CCTF22-2021^[16])。由此钙离子光频跃迁推荐值也被不断更新：推荐值的不确定度从2009年的 1.4×10^{-14} (CCTF18-2009^[23])提高到2021年的 1.8×10^{-15} ^[16]。在2021年3月19日召开的第22届CCTF会议上，国际计量局时间频率咨询委员会将 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光频跃迁新增为次级秒定义参考^[16]，实现了我们对新的秒定义做贡献的梦想！

2.4 囚禁冷却钙离子精密光谱：测量了钟跃迁魔幻波长和亚稳态寿命等物理量

魔幻波长在量子态操控以及精密谱研究方面具有广泛的应用，基于魔幻波长的原子光晶格光频标已成为光频标的发展方向之一。我们提出了

采用魔幻波长的激光场囚禁离子实现光频标的方案，不仅消除离子的微运动，也可消除激光场的交流斯塔克频移；可进一步研制成多离子光频标，提高离子光频标的信噪比。通过精密测量特定波长的激光对钙离子光频跃迁的光频移，首次在离子体系中测量了魔幻波长，不确定度为 1.7×10^{-6} ，测量结果与理论计算结果相吻合；基于此魔幻波长，获得了不确定度为 2.0×10^{-3} 的跃迁振子强度比，为精度最高的方法之一，检验了原子结构理论。测量的魔幻波长为未来实现全光囚禁离子光频标打下了基础^[38]。

同时，基于钙离子光频标平台，采用高量子态探测方法以及高精度高同步脉冲时序，精确测量了钙离子亚稳态 $^3D_{5/2}$ 态寿命^[39]、 $^3D_{3/2}$ 态寿命^[40]、钟跃迁的四极跃迁矩阵元^[41]、 $^3D_{5/2}$ 态和 $^3D_{3/2}$ 态寿命比^[42]、 $^4P_{3/2}$ 态分支比^[43]等物理量。

3 思考与展望

人们对精密的追求是没有止境的，科学技术的发展是探索自然的动力，进而驱动科研工作者发展光频标的新技术：实现更优不确定度的光频标，建立更高保真的光频传递和比对系统。所以对我们是机遇，更是挑战。

在钙离子光频标的现有基础上，我们将在以下方面努力前行：

(1) 稳定度接近量子投影噪声极限的钙离子光频标：实现 1×10^{-16} 稳定度的钟跃迁探测激光、实验室环境下长期连续运行的 10^{-18} 量级光频标；

(2) 面向应用需求的钙离子光钟：实现 10^{-18} 量级不确定度的可搬运光钟；

(3) 更优不确定度的钙离子光频标：实现不确定度 10^{-19} 量级的钙离子光频标；

(4) 多离子光频标：研制多离子光频标，提高离子光频标的稳定度；

(5) 光频比对实验：通过进行不同光频标之间的频率比值测量，对秒定义的修改做出贡献，同时用于检验基本物理规律，并测量相关物理效应，如引力势引起的广义相对论效应等。

致谢 感谢张华青、张宝林、邵虎、曾孟彦的实验工作和帮助组稿；感谢陈群峰、林弋戈、方占军、王玉琢、房芳等的合作和帮助。感谢全国同仁的关心、支持和帮助。

谨以此文纪念朱熙文老师和李天初老师。

参考文献

[1] Ludlow A D *et al.* Rev. Mod. Phys., 2015, 87: 637
[2] Zhang Z Q *et al.* Sci. Adv., 2023, 9: eadg1971
[3] Brewer S M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 033201
[4] Sanner C *et al.* Nature, 2019, 567: 240
[5] Bothwell T *et al.* Metrologia, 2019, 56: 065004
[6] Ushijima I *et al.* Nat. Photon., 2015, 9: 185
[7] McGrew W F *et al.* Nature, 2018, 564: 87
[8] Grotti J *et al.* Nat. Phys., 2018, 14: 437
[9] Takamoto M *et al.* Nat. Photon., 2020, 14: 411
[10] Droste S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 110801
[11] Safronova M S *et al.* Rev. Mod. Phys., 2018, 90: 025008
[12] Beloy K *et al.* Nature, 2021, 591: 564
[13] CCTF report 2006, <https://www.bipm.org>
[14] CCTF report 2012, <https://www.bipm.org>
[15] CCTF report 2017, <https://www.bipm.org>
[16] CCTF report 2021, <https://www.bipm.org>
[17] Lange R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2021, 126: 011102

[18] Bothwell T *et al.* Nature, 2022, 602: 420
[19] Zheng X *et al.* Nature, 2022, 602: 425
[20] Chwalla M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 023002
[21] Matsubara K *et al.* Appl. Phys. Express, 2008, 1: 067011
[22] Joshi M K *et al.* Science, 2022, 376: 720
[23] CCTF report 2009, <https://www.bipm.org>
[24] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2011, 84: 053841
[25] Gao K. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 853
[26] Huang Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 013001
[27] Huang Y *et al.* Appl. Phys. B, 2017, 123: 166
[28] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2019, 99: 011401(R)
[29] Huang Y *et al.* Phys. Rev. Appl., 2022, 17: 034041
[30] Zeng M *et al.* Phys. Rev. Appl., 2023, 19: 064004
[31] Zeng M *et al.* Chin. Phys. Lett., 2018, 35: 074202
[32] Zhang B *et al.* J. Appl. Phys., 2020, 128: 143105
[33] Gao K. Natl. Sci. Rev., 2020, 7: 1799
[34] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2020, 102: 050802(R)
[35] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2012, 85: 030503(R)
[36] Zhang H *et al.* Metrologia, 2023, 60: 035004
[37] CCTF report 2015, <https://www.bipm.org>
[38] Liu P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2015, 114: 223001
[39] Guan H *et al.* Phys. Rev. A, 2015, 91: 022511
[40] Shao H *et al.* Phys. Rev. A, 2016, 94: 042507
[41] Shao H *et al.* Phys. Rev. A, 2017, 95: 053415
[42] Shao H *et al.* J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 2018, 51: 045002
[43] Song H *et al.* Phys. Rev. A, 2019, 100: 052505

新书推荐

物质是什么？这是人类永恒的课题，也是人类对自然探索的最高使命之一。丰富多彩的非晶物质占自然界常规物质的很大部分，“非晶物质本质是什么”是物质是什么这个问题的核心内容之一，也是凝聚态物理乃至科学的难题之一。《非晶物质——常规物质第四态》分三卷，它用科普的语言，以典型非晶物质如玻璃、非晶合金等为模型体系，系统论述非晶物质是和自然界中气态、液态和固态并列的第四种常规物质，是常规物质的第四态。书中系统阐述了非晶物质的本质、特征、性能以及广泛和重要应用，全面介绍了非晶物质科学中的新概念、新思想、新方法、新工艺、新材料、新问题、新模型以及理论、奥秘、发展历史、研究概况和新进展，其中穿插了研究历史和精彩故事。本书力图把非晶物质放入一个更大的物质科学框架和图像中、放入材料研究和应用历史中、放到现实生活中去介绍和讨论，

读者和编者



让读者可以从不同的角度和视野来全面了解非晶物质，及其对科技发展、人类生活和文明的影响。

目前国内关于非晶物质科学的书籍偏少，这和蓬勃发展的非晶物质科学和广泛的非晶材料应用形势不相适应。这本书可作为学习和研究物质科学、物理和材料的本科生、研究生、科研人员的参考读物，也可供从事非晶科学、非晶物理、非晶材料、玻璃材料研究和产业的科研工作者、工程技术人员、企业家、研究生参考。