

专题: 量子光学原理与应用

基于光钟的精密测量研究进展*

卢晓同¹⁾²⁾³⁾ 曹进¹⁾²⁾³⁾ 常宏^{1)2)3)†}

1) (中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

2) (中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

3) (合肥国家实验室, 合肥 230088)

(2025 年 11 月 24 日收到; 2025 年 12 月 19 日收到修改稿)

光钟作为新一代时间频率标准, 通过将本地振荡器频率精准参考至光频原子跃迁频率, 具备更高的频率准确度和稳定度. 自 21 世纪初第一台全光学 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟成功问世以来, 光学原子钟在二十多年里实现了跨越式发展. 当前顶尖光钟已实现 10^{-19} 量级的系统不确定度和频率稳定度, 这一指标较传统微波原子钟提升了两个数量级以上, 为基础物理研究和精密测量领域开辟了全新研究维度. 本文系统综述了光钟的研究进展, 包括中性原子光钟与离子光钟的性能突破、新型光晶格囚禁技术的应用以及系统误差抑制方法的创新; 同时重点探讨了光钟在驾驭国际原子时、降低基本物理常数可能的变化速率上限、检验爱因斯坦等效性原理等精密测量领域的前沿应用, 为后续光钟技术的发展与应用拓展提供参考.

关键词: 光钟, 精密测量, 计时水准测量, 原子物理

DOI: 10.7498/aps.75.20251594

CSTR: 32037.14.aps.75.20251594

1 引言

原子钟利用原子跃迁频率这一“自然标准”作为参考频率, 将时间的基本单位“秒”的测量误差降低至 10^{-16} 量级^[1-4], 是精密测量、全球卫星导航、基础物理实验和高速电子通信等应用的基础. 1955 年, 世界上第一台基于铯原子束的原子钟问世^[5], 其钟跃迁频率约为 9.192 GHz(处于微波频段, 因此被称为微波原子钟), 频率不确定度为 1×10^{-9} . 1967 年, 原子钟的系统不确定度已进入 10^{-12} 量级^[6], 比当时使用的天文时的不确定度低 4 个数量级, 于是国际计量委员会通过决议将时间的基本单位——“秒”定义在 ^{133}Cs 原子钟的钟跃迁频率上, 并在 2018 年将其进一步修改为: 位于海平面上的 ^{133}Cs 原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁频率对

应的 9192631770 个周期^[7]. 随着激光冷却技术的发展, 基于超冷原子的 ^{133}Cs 喷泉钟将原子钟的系统不确定度大幅度降低, 已经实现了低至 9.3×10^{-17} 的系统不确定度^[8]. 实际上, ^{133}Cs 喷泉钟的系统不确定度在 2014 年便已达 1.1×10^{-16} ^[4], 然而直到 2025 年, 其系统不确定度才降低至 10^{-17} 量级^[8], 其发展瓶颈已经非常明显. 为了突破当前原子钟发展的瓶颈, 实现更低的系统不确定度, 研制基于光频跃迁的光钟是当前最佳的办法. 光频跃迁比微波跃迁的频率高 4 个数量级以上, 理论上可实现 10^{-20} 量级甚至更低的系统不确定度.

尽管光钟的研究思想早在 1973 年就被提出^[9], 然而在 21 世纪以前, 光钟的发展缓慢, 主要受限于多普勒频移、高稳定的本地振荡器和光频的绝对频率测量. 随着 20 世纪末, 激光冷却技术^[10]、窄线宽激光器技术^[11] 和飞秒光学频率梳技术的出现和

* 中国科学院重大科技基础设施运行与维护 (批准号: 2024000014) 和“量子通信与量子计算机”国家科技重大专项 (批准号: 2021ZD0300902) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

发展^[12], 光钟才得到迅速的发展. 到目前为止, 世界上已经有多台光钟的系统不确定度进入 10^{-19} 量级^[13-15], 利用光钟重定义时间的基本单位“秒”已经被提上日程^[7,16]. 凭借极高的时频测量能力, 光钟在精密测量领域扮演着重要角色, 特别是在检验广义相对论和测量基本物理常数 (如精细结构常数 α_{EM} 和电子荷质比 μ_{pm}) 是否随时间变化等方面取得了远超传统测量手段的成果.

2 光钟研究进展

光钟主要包括两种类型: 基于离子阱囚禁单个离子的单离子光钟和基于光晶格囚禁大量中性原子的光晶格钟. 图 1 总结了光钟系统不确定度的发展趋势. 相比于光晶格钟, 单离子光钟无需考虑离子间相互作用和晶格光电场对钟跃迁能级的扰动, 可以更容易地实现低的系统不确定度. 然而, 单离子光钟的钟跃迁探测信号信噪比差 (主要受限于量子投影噪声), 光晶格钟的频率稳定度通常优于单离子光钟. 当前光晶格钟已经实现了 $4.8 \times 10^{-17} (\tau/s)^{-0.5}$ 的频率稳定度^[17], 而单离子光钟的最佳稳定度为 $3.5 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$ ^[14]. 此外, 光晶格钟通过同步频率比对消除迪克噪声 (Dick noise) 之后, 已经能实现 $1.5 \times 10^{-18} (\tau/s)^{-0.5}$ 的频率差测量稳定度^[18], 而通常情况下单离子光钟无法通过同步频率比对大幅度提高频差测量稳定度.

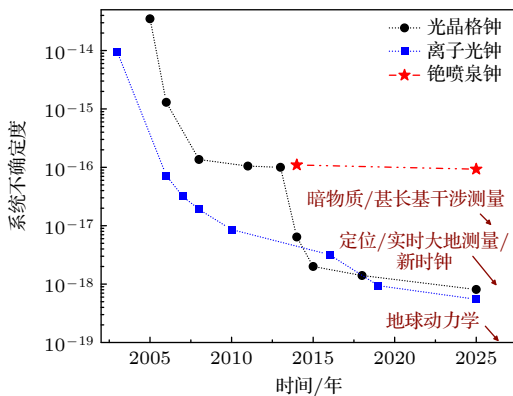


图 1 光钟系统不确定度发展趋势

Fig. 1. Development of systematic uncertainty of optical clocks.

2.1 单离子光钟

单离子光钟通常利用保罗阱将带电离子囚禁在电磁场为零的区域并通过深的阱深消除一阶多

普勒频移和光子反冲频移. 此外, 由于电子能级对外界电磁场的敏感程度通常反比于粒子所带电荷的平方^[19], 因此离子光钟更容易压制电磁场带来的系统频移, 实现低的系统不确定度. 2001 年, Diddams 等^[20]报道了世界上第一台基于 $^{199}\text{Hg}^+$ 的全光学单离子光钟并实现了 $7 \times 10^{-15} (\tau/s)^{-0.5}$ 的频率稳定度, 其首次利用光学频率梳测量光钟的绝对频率, 开启了光钟发展的新纪元. 2003 年, Tanaka 等^[21]将 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟的系统不确定度降低至 9.4×10^{-15} , 并将其钟跃迁绝对频率的相对测量误差降低至 9.5×10^{-15} . 2006 年, Oskay 等^[22]将 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟的系统不确定度降低至 7.2×10^{-17} , 超越了最好的微波原子钟. 2008 年, Rosenband 等^[23]将 $^{199}\text{Hg}^+$ 光钟和 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟的系统不确定度分别降低至 1.9×10^{-17} 和 2.3×10^{-17} , 并测量了两台光钟的频率比值, 测量不确定度为 4.3×10^{-17} . 2010 年, Chou 等^[24]将 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟的系统不确定度降低至 8.6×10^{-18} , 首次将光钟的不确定度降低至 10^{-18} 量级. 尽管 $^{199}\text{Hg}^+$ 和 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟具有钟跃迁频率高和对黑体辐射频移不敏感等优点, 但其钟跃迁频率均在深紫外波段, 特别是 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟需要通过量子逻辑谱探测钟跃迁信号, 研制难度很大. 因此, 一些更容易实现的其他元素离子光钟相继被实现, 包括 $^{171}\text{Yb}^+$ ^[25,26], $^{88}\text{Sr}^+$ ^[8,15,27,28], $^{40}\text{Ca}^+$ ^[29-31] 和 $^{117}\text{In}^+$ ^[32,33]. 2016 年, Huntemann 等^[34]将 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟的系统不确定度降低至 3.3×10^{-18} , 成为当时系统不确定度最小的离子光钟. 2019 年, Brewer 等^[35]将 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟的系统不确定度进一步减小至 9.4×10^{-19} , 首次将光钟的系统不确定度推进至 10^{-19} 量级; 2025 年, Marshall 等^[14]进一步将 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟的系统不确定降低至 5.5×10^{-19} , 并实现了 $3.5 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$ 的频率稳定度.

国内也有许多离子光钟方面的研究并取得了非常瞩目的成果. Huang 等^[29]致力于 $^{40}\text{Ca}^+$, $^{27}\text{Al}^+$ 和 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟的研究, 2022 年通过液氮冷却装置压制黑体辐射频移, 将 $^{40}\text{Ca}^+$ 光钟的系统不确定度降低至 3×10^{-18} ; Cui 等^[36]成功研制了基于 $^{40}\text{Ca}^+$ 协同冷却粒子的 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟, 系统不确定度为 7.9×10^{-18} ; Ma 等^[37]也成功研制基于 $^{25}\text{Mg}^+$ 协同冷却粒子的 $^{27}\text{Al}^+$ 光钟, 系统不确定度为 1.6×10^{-18} .

最近 Zhang 等^[38]研制的 $^{176}\text{Lu}^+$ 光钟具备极小的黑体辐射频移系数, 已实现了 7.3×10^{-18} 的系统不确定度; Holliman 等^[39]研制的 $^{226}\text{Ra}^+$ 光钟, 其系统不确定度为 9×10^{-16} , 钟跃迁频率对精细结构常

数变化很敏感. 此外, Zhang 等^[40] 在预印本平台上公布了其 $^{40}\text{Ca}^+$ 光钟最新的系统不确定度评估结果, 其系统不确定度低至 4.6×10^{-19} . 表 1 总结了当前国内外单离子光钟的系统不确定度和稳定度.

表 1 单离子光钟系统不确定度和稳定度
Table 1. Systematic uncertainty and stability of single-ion optical clocks.

单位	类别	不确定度	稳定度(τ/s) ^{0.5}
美国国家标准 技术研究所	$^{27}\text{Al}^+$	5.5×10^{-19} [14]	3.5×10^{-16} [14]
	$^{199}\text{Hg}^+$	1.9×10^{-17} [23]	2.8×10^{-15} [23]
	$^{171}\text{Yb}^+$	2.7×10^{-18} [26]	1.1×10^{-15} [26]
德国物理技术研究院	$^{115}\text{In}^+$	2.5×10^{-18} [33]	9.2×10^{-16} [33]
	$^{88}\text{Sr}^+$	1×10^{-17} [27]	3.3×10^{-15} [27]
加拿大国家研究委员会	$^{88}\text{Sr}^+$	1.1×10^{-17} [8]	3×10^{-15} [8]
英国国家物理实验室	$^{88}\text{Sr}^+$	4.9×10^{-17} [28]	2.2×10^{-14} [28]
	$^{171}\text{Yb}^+$	2.2×10^{-18} [25]	6.4×10^{-15} [25]
日本国家信息通信 技术研究所	$^{117}\text{In}^+$	5×10^{-16} [32]	1.7×10^{-13} [32]
	$^{40}\text{Ca}^+$	2.2×10^{-15} [31]	2.2×10^{-14} [31]
芬兰 VTT 技术研究中心	$^{88}\text{Sr}^+$	7.9×10^{-19} [15]	2×10^{-15} [15]
新加坡国立大学	$^{176}\text{Lu}^+$	7.3×10^{-18} [38]	3.9×10^{-15} [38]
加利福尼亚大学	$^{226}\text{Ra}^+$	9×10^{-16} [39]	1.1×10^{-13} [39]
中国科学院精密测量科 学与技术研究院	$^{40}\text{Ca}^+$	3×10^{-18} [29]	3×10^{-15} [29]
	$^{27}\text{Al}^+$	7.9×10^{-18} [36]	3.7×10^{-14} [36]
	$^{171}\text{Yb}^+$	—	2.2×10^{-15} [41]
华中科技大学	$^{27}\text{Al}^+$	1.6×10^{-18} [37]	1.5×10^{-15} [42]

2.2 光晶格钟

光晶格钟利用光晶格 (通常是一维光晶格) 囚禁大量中性原子, 以压制光子反冲频移和原子热运动导致的一阶多普勒频移, 兼具高稳定性和低系统不确定度的优点. 然而, 晶格光导致的钟跃迁频率变化是阻碍光晶格钟发展的主要问题. 1999 年, Katori 等^[43] 提出了通过将光频率消除光场对铯原子 $5s^2 \ ^1S_0 \rightarrow 5s5p \ ^3P_1$ 跃迁造成的交流斯塔克频移, 并在 2003 年, 进一步提议将铯原子 $5s^2 \ ^1S_0 \rightarrow 5s5p \ ^3P_0$ 作为光晶格钟的钟跃迁并理论计算出在 800 nm 附近, 晶格光导致的交流斯塔克频移为零^[44]. 在这些理论工作的基础上, 2005 年 Takamoto 等^[45] 报道了世界上第一台基于 ^{87}Sr 的光晶格钟, 其系统不确定度为 3.5×10^{-14} . 随后, Ludlow 等^[46] 和 Le Targat 等^[47] 也实现了 ^{87}Sr 光晶格钟. 到 2008 年, Ludlow 等^[48] 已将 ^{87}Sr 光晶格钟的系统不确定度减小至 1.4×10^{-16} , 性能超过当时最好的 ^{133}Cs

喷泉钟. 2011 年, Falke 等^[49] 成功研制了 ^{87}Sr 光晶格钟, 其系统不确定度为 1.1×10^{-16} , 稳定度为 $5 \times 10^{-15} (\tau/s)^{-0.5}$. 2012 年, Nicholson 等^[50] 使用 40 cm 长超低膨胀玻璃的光学参考腔, 将钟激光的热噪声极限降低至 1×10^{-16} , 并将 ^{87}Sr 光晶格钟的稳定度提升至 $4.4 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$. 2013 年, Hinkley 等^[51] 将 ^{171}Yb 光晶格钟的稳定度提升至 $3.2 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$. 2014 年, Bloom 等^[52] 研制了基于腔增益的 ^{87}Sr 光晶格钟, 通过增加晶格光的束腰俘获大量原子的同时确保了低的原子密度, 使得其稳定度达到 $3.4 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$ 的同时将系统不确定度降低至 6.4×10^{-18} ; 次年 Nicholson 等^[53] 进一步减小了晶格光交流斯塔克频移和黑体辐射频移这两个主要频移项, 将 ^{87}Sr 光晶格钟的系统不确定度降低至 6.4×10^{-18} , 同时还将稳定度提升至 $2.2 \times 10^{-16} (\tau/s)^{-0.5}$. 为了消除激光器噪声对光晶格钟稳定度的限制, 2016 年 Schioppo 等^[54] 通过无死区时间的交替探测两台 ^{171}Yb 光晶格钟, 将光晶格钟的稳定度推进至 $6 \times 10^{-17} (\tau/s)^{-0.5}$; 2018 年, McGrew 等^[55] 通过真空内置热屏蔽铜腔结合精密的温度测量方案将 ^{171}Yb 光晶格钟的系统不确定度降低至 1.4×10^{-18} . 2019 年, Oelker 等^[17] 完成了工作在 124 K 温度下的单晶硅光学参考腔的研制, 并将锁定在其上的钟激光的热噪声极限降低至 4×10^{-17} , 将单台 ^{87}Sr 光晶格钟的稳定度提升至 $4.8 \times 10^{-17} (\tau/s)^{-0.5}$. 此后, 光晶格钟的发展方向集中在减小晶格光交流斯塔克频移、黑体辐射频移和密度频移的评估不确定度上. 随着浅光晶格技术的应用和对原子结构理解的深入^[56-58], 2024 年 Kim 等^[59] 将 ^{87}Sr 光晶格钟的系统不确定度降低至 8.1×10^{-19} , 将光晶格钟的系统不确定度也推进至 10^{-19} 量级.

近些年, 国内在光晶格钟的研制方面取得了诸多成果. 表 2 总结了各单位光晶格钟的研究进展^[13,17,54,55,60-81]. 2015 年, Liu 等^[82] 报道了国内第一台光晶格钟的系统不确定度评估和绝对频率测量, 其研制的 ^{87}Sr 光晶格钟系统不确定度为 2.3×10^{-16} . 2018 年, Gao 等^[83] 报道了 ^{171}Yb 光晶格钟, 其系统不确定度为 1.8×10^{-16} . 2021 年, Lin 等^[84] 将 ^{87}Sr 光晶格钟系统不确定度降低至 2.9×10^{-17} , 并通过卫星链路溯源国际原子时 (international atomic time, TAI) 的方法测量了 ^{87}Sr 光晶格钟的绝对频率, 测量不确定度为 3.1×10^{-16} ; 次年, Lu 等^[76] 大幅度降低了黑体辐射频移的评估不确定度, 将系统不确定

度降低至 7.2×10^{-18} . 2024 年, Li 等 [80] 成功研制了 2 台 ^{87}Sr 光晶格钟, 系统不确定度为 4.4×10^{-18} , 稳定度为 $4.6 \times 10^{-16} (\tau/\text{s})^{-0.5}$. 2025 年, Lu 等 [81] 完成了其第 2 套 ^{87}Sr 光晶格钟的研制, 实现了 2×10^{-18} 的系统不确定度和 $3.6 \times 10^{-16} (\tau/\text{s})^{-0.5}$ 的稳定度. 2025 年 9 月, Jia 等 [85] 在预印本平台报道了其 ^{87}Sr 光晶格钟 (Sr1) 的最新进展, 系统不确定度达到了 9.1×10^{-19} , 稳定度为 $2.3 \times 10^{-16} (\tau/\text{s})^{-0.5}$.

表 2 光晶格钟系统不确定度和稳定度
Table 2. Systematic uncertainty and stability of optical lattice clocks.

单位	类别	不确定度	稳定度(τ/s) ^{-0.5}
美国联合天体联合物理实验室 美国国家标准技术研究所	^{87}Sr	8.1×10^{-19} [13]	4.8×10^{-17} [17]
	^{171}Yb	1.4×10^{-18} [55]	6×10^{-17} [54]
德国物理技术研究院	^{88}Sr	2×10^{-17} [60]	4.1×10^{-16} [60]
	^{87}Sr	2.1×10^{-18} [61]	5×10^{-17} [62]
日本物理化学研究所	^{199}Hg	7.5×10^{-17} [63]	2×10^{-15} [63]
	^{171}Yb	1.7×10^{-17} [63]	6×10^{-16} [64]
	^{87}Sr	5.5×10^{-18} [65]	5×10^{-16} [64]
法国国家计量与测试实验室-时间与空间参考系统	^{199}Hg	1.7×10^{-16} [66]	4×10^{-15} [66]
	^{87}Sr	4.1×10^{-17} [67]	1.7×10^{-15} [67]
英国国家物理实验室 日本国家信息通信技术研究所	^{87}Sr	1×10^{-17} [68]	1.5×10^{-15} [68]
	^{87}Sr	5.4×10^{-17} [69]	7×10^{-15} [69]
日本国家计量院	^{87}Sr	1.1×10^{-16} [70]	6.6×10^{-15} [70,71]
	^{171}Yb	9.8×10^{-17} [71]	1×10^{-14} [71]
意大利国家计量研究所	^{171}Yb	1.9×10^{-17} [72]	2×10^{-15} [72]
韩国标准科学研究院	^{171}Yb	1.7×10^{-17} [73]	3.2×10^{-15} [73]
尼古拉斯哥白尼大学	^{88}Sr	4.6×10^{-15} [74]	—
中国计量科学研究院	^{87}Sr	6.5×10^{-18} [75]	1.2×10^{-15} [76]
华东师范大学	^{171}Yb	1.3×10^{-16} [77]	1.5×10^{-15} [78]
中国科学院精密测量科学与技术创新研究院	^{171}Yb	—	4.6×10^{-16} [79]
中国科学技术大学	^{87}Sr	4.4×10^{-18} [80]	4.5×10^{-16} [80]
中国科学院国家授时中心	^{87}Sr	2×10^{-18} [81]	3.6×10^{-16} [81]

3 光钟在精密测量领域的应用

光钟在精密测量领域已经展现了巨大的潜力, 一方面, 利用光钟驾驭国际原子时便是光钟在时间测量方面的重要应用. 另一方面, 随着光钟的测量能力进入 10^{-21} 量级 [57,58], 利用光钟在宏观和微观尺度验证广义相对论、测量基本常数随时间可能的

微变和实现基于相对论的计时水准等应用也逐渐被实现.

3.1 驾驭国际原子时

为了建立全球统一的测量系统, 即国际单位制 SI, 1875 年各国签署了《米制公约》并为此设立了一个常设的框架机构——国际权度局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM), 其管理机构为国际计量委员会 (Comité International des Poids et Mesures, CIPM), 并且有关计量的重大决策需要通过每四年一届的国际计量大会 (Conférence Générale des Poids et Mesures, CGPM) 最终确定. 在当前 7 个国际基本单位中, 时间的基本单位“秒”通过主频标 (^{133}Cs 喷泉钟) 确定, 其不确定度 (约为 1×10^{-16}) 远低于其他基本单位. TAI 由主频标和次级频标 (^{87}Rb , ^{87}Sr , ^{88}Sr , ^{171}Yb , ^{199}Hg , $^{171}\text{Yb}^+(\text{E}2)$, $^{171}\text{Yb}^+(\text{E}3)$, $^{88}\text{Sr}^+$, $^{199}\text{Hg}^+$, $^{40}\text{Ca}^+$) 联合校准. 因此, 2018 年召开的第 26 届 CGPM 通过定义一系列常数将长度的基本单位“米”(定义普朗克常数 h)、质量的基本单位“千克”(定义玻尔兹曼常数 k_B)、电流的基本单位“安培”(定义电子电荷量常数 e) 和物质的量的基本单位“摩尔”(定义阿伏伽德罗常数 N_A) 溯源至“秒”定义 [7]. 同时, 此次大会还为“秒”定义变更确定了 5 个具有里程碑意义的目标并计划在 2030 年第 29 届 CGPM 上完成“秒”定义的变更. 在新的基于光学“秒”定义框架下, TAI 将由光钟作为基准钟校准守时钟 (组) 产生, 而当前通过将光钟作为秒的次级表示参与到驾驭 TAI 的工作中是平稳地实现光学“秒”定义变更的关键步骤.

光钟驾驭 TAI 的原理如图 2 所示. 光钟闭环运行后, 其本地振荡器 (钟激光) 的频率通过负反馈系统锁定至量子参考体系 (离子阱俘获的离子或者光晶格囚禁的中性原子) 的钟跃迁共振频率上. 由于用于钟跃迁探测的钟激光频率需要被周期调制, 以获得频率误差信号, 且此时的共振频率还包括各种系统频移, 因此需要单独分出一束钟激光传输至光学频率梳用于与其他频标进行频率比对. 在获得驾驭 TAI 的频率信号之前, 还需修正光钟的系统频移. 一种比较方便的方法是在钟激光信号传递至光学频率梳之前通过声光移频器对这些系统频移进行扣除, 其中部分系统频移修正量是固定值 (如引力频移), 而部分系统频移可以做到实时扣

除(如二阶塞曼频移). 为了减小微波或射频频率上转换带来的测量误差, 光学频率梳的重复频率(f_r) 锁定至光学频率梳与钟激光的拍频频率(f_b) 上, 而载波相位包络频移(f_0) 则频率参考至守时氢钟上. 在确定钟激光与第 N_c 根梳齿拍频以及 f_b 和 f_0 的正负号后, 将频率计数器参考至守时氢钟并采集 f_r , f_b 和 f_0 的值, 就能获得钟激光的频率: $N_c \times f_r + 2f_0 + f_b$ (此处假设钟激光与倍频后的光学频率梳拍频, 对于钟激光能够与光学频率梳直接拍频的情况则表示为 $N_c \times f_r + f_0 + f_b$). 由于频率计数器和 f_0 均频率参考至守时氢钟, 测量所得的频率包含守时氢钟的偏差. 由于守时氢钟时刻与协调世界时(coordinated universal time, UTC) 在本地的实现 UTC(k) (如 UTC(NTSC) 和 UTC(NIM) 等进行着时差测量, 通过卫星链路获得 UTC(k) 与国际协调世界时的差并通过每月发布的时间频率公报就能校准本地守时氢钟的频差, 进而建立光钟绝对频率测量的路径.

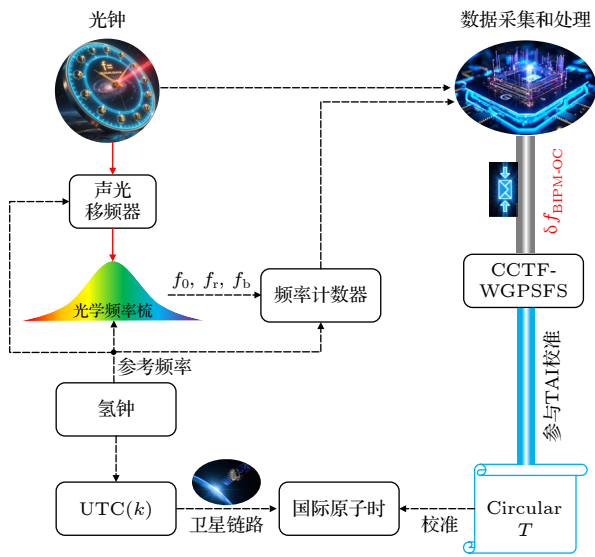


图 2 光钟驾驭国际原子时原理图

Fig. 2. Schematic diagram of TAI steered by an optical clock.

光钟驾驭 TAI 即光钟绝对频率的测量结果被时间频率咨询委员会组织的主要和二级频标工作组 (Consultative Committee for Time and Frequency-Working Group on Primary and Secondary Frequency Standards, CCTF-WGPSFS) 采纳并参与 TAI 的校准. 光钟工作组需要向 CCTF-WGPSFS 提供某一时间段内光钟频率 (守时氢钟提供频率参考且修正光钟自身系统频移后) 与该频

标 BIPM 推荐值之间的相对频差 ($\delta f_{\text{BIPM-OC}}$). 每次测量的时长需为 5 天的整数倍, 同时, 测量起止时间所对应的简化儒略日 (modified Julian day, MJD) 的个位数需为 4 或 9. 每一次测量均需提供光钟的系统不确定度评估 (及相关文献) 和绝对频率测量不确定度分析. 特别地, 当该光钟第 1 次提交数据时, 需要提供至少 5 次独立的测量结果且这 5 次测量的时间跨度不小于 3 个月, 此外, 其中至少有 3 次测量是在近 400 天内获得 [86].

尽管自 2013 年 6 月开始, BIPM 就将次级频标与频标一起发布在时间频率公报 (Circular T) 上并参与 TAI 的驾驭工作, 但在 2017 年以前, 都只有法国巴黎天文台的铷喷泉钟参与 TAI 的计算. 直到 2017 年 3 月公布的第 350 期时间频率公报上才首次出现了光钟参与 TAI (在 2014 年 10 月 24 日—2016 年 6 月 15 日期间, 巴黎天文台的 ^{87}Sr 光晶格钟 (SRB 与 SR2) 累计测量了 5 组数据, 这些数据均被用于驾驭 2017 年 2 月的 TAI 数据). 图 3 展示了截止到 2025 年 9 月为止, 光钟参与驾驭 TAI 的情况. 图 3(a) 展示了各单位光钟驾驭 TAI 的次数, 日本、韩国和意大利参与的次数最多且 ^{171}Yb 和 ^{87}Sr 光晶格钟参与次数远远多于其他类型的光钟. 图 3(b) 则总体展示了每一期时间频率公报中参与 TAI 驾驭的光钟数量, 整体来看, 可见绝大部分时间, 参与 TAI 驾驭工作的光钟数量都在 3 台以内. 考虑到当前全世界有报道的光钟数量已经超过了 40 台, 当前光钟驾驭 TAI 的比例还需进一步提高.

3.2 测量基本物理常数随时间的变化

标准物理模型统一了电磁力、强力和弱力, 而广义相对论则描述了引力的本质-时空弯曲的几何效应, 两个理论相互独立却又通过各种严格的实验检验, 取得了巨大的成功. 然而, 人们一直在追求统一 4 种基本作用力的大统一理论, 这些理论必须兼容广义相对论和标准物理模型. 如超弦理论 [87] 和 Kaluza-Klein 模型 [88] 等大统一理论候选者预测精细结构常数 ($\alpha_{\text{EM}} = e^2/(2\epsilon_0 hc)$, ϵ_0 和 c 分别为真空磁导率和真空光速), 质子与电子的质量比 ($\mu_{\text{pe}} = m_{\text{p}}/m_{\text{e}}$, m_{p} 为质子质量, m_{e} 为电子质量) 和质子旋磁因子 (g_{p}) 等基本物理常数相关的时空变化, 这可能与动力学暗能量模型、暗物质模型、统一尺度的变化和弦理论模型有关. 一旦实验发现基

本物理常数随时间变化和常数之间的变化关系, 就能为新物理的发现提供指引. 原子物理指出不同类型原子的钟跃迁频率对 α_{EM} , μ_{pe} 和 g_p 变化的敏感度不一致, 因此可以通过测量不同原子钟之间的频率比值, 来检验这些基本物理常数是否随时间变

化. 两台原子钟跃迁频率的比值与这些基本常数的关系可以被表示为^[89]

$$v_{AB} = v_A/v_B \propto \alpha_{EM}^{\kappa_\alpha} \mu_{pe}^{\kappa_\mu} g_p^{\kappa_g}, \quad (1)$$

其中, κ_i ($i = \alpha_{EM}, \mu_{pe}, g_p$) = $d\ln(v_{AB})/d\ln(i)$ 表示微分敏感系数 (通过多体计算获得^[90]). 通过相对论对跃迁频率的修正, 光钟的钟跃迁频率表现出对 α_{EM} 的依赖性, 而基于超精细劈裂的微波原子钟 (如 ^{133}Cs 和 ^{87}Rb 喷泉钟), 其钟跃迁频率还取决于 μ_{pe} 和 g_p . 因此, 通过测量不同原子钟跃迁频率的比值与时间的关系, 就能以极高的精度推断基本物理常数是否随时间变化. 特别地, 通过测量不同光钟之间的频率比值, 可以单独观测 α_{EM} 随时间的变化.

表 3 总结了原子钟频率比值测量随时间的线性漂移速率及其对应的微分敏感系数 κ_i ($i = \alpha_{EM}, \mu_{pe}, g_p$)^[23,26,62,91-93]. 2023 年, 通过分时自比对法交替测量同一台光钟不同钟跃迁的频率, Filzinger 等^[26] 将 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟 E3 和 E2 钟跃迁频率比值的速率确定为 $-1.2(1.8) \times 10^{-18} \text{ a}^{-1}$ (测量时间为 2020 年 9 月 5 日—2022 年 11 月 11 日), 因此 $(1/\alpha_{EM}) \times (d\alpha_{EM}/dt) = 1.8(2.5) \times 10^{-19} \text{ a}^{-1}$, 是目前为止对 α_{EM} 变化速率最严格的限制. 通过测量光钟与 ^{133}Cs 喷泉钟频率比值随时间的变化, 并扣除 α_{EM} 和 g_p 等变化速率 (通过其他系统测量获得), 可以推断 μ_{pe} 的线性漂移速率. 2021 年, Lange 等^[92] 通过测量 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟的 E3 跃迁与 ^{133}Cs 喷泉钟频率比值与时间的关系 (2010 年 10 月 10 日—2019 年 12 月 13 日), 推断出 $(1/\mu_{pe})(d\mu_{pe}/dt) = 8(36) \times 10^{-18} \text{ a}^{-1}$. 受限于微波原子钟的精度, 通过光钟与微波钟频率比值的方法需要大量的平均时间才能进入 10^{-17} 量级. 另一方面, 尽管光钟与光钟的频率比值测量不确定度可以轻松进入 10^{-17} 量级, 但其只对 α_{EM} 的敏感. 寻找对基本物理常数更加敏感的光学原子钟

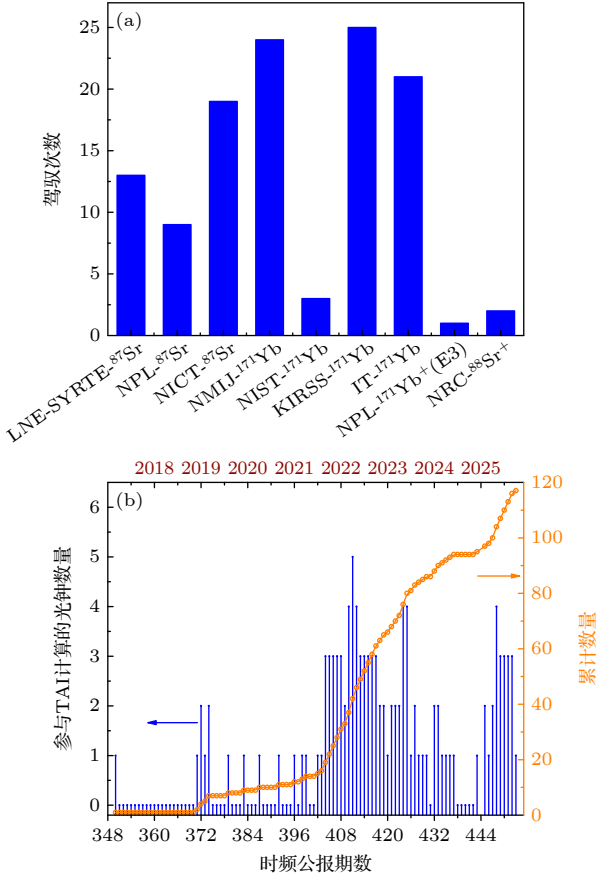


图 3 光钟驾驭 TAI 研究进展 (a) 各单位光钟驾驭 TAI 的次数; (b) 各期时频公报里参与 TAI 驾驭的光钟数量, 空心圆点对应右侧纵坐标, 表示累计参与驾驭 TAI 的光钟数量
Fig. 3. Development of steering the TAI using optical clocks: (a) Number of each institution in steering the TAI using optical clocks; (b) number of optical clocks involved in TAI steering in each issue of the Circular T, the hollow circles correspond to the vertical coordinate on the right, indicating the cumulative number of optical clocks involved in steering the TAI.

表 3 光钟对基本耦合变化的约束

Table 3. Optical clock constraints of varying fundamental couplings.

原子钟类型	$\dot{v}_{AB}/v_{AB}/\text{a}^{-1}$	$\kappa_{\alpha_{EM}}$	$\kappa_{\mu_{pm}}$	κ_{g_p}
$^{199}\text{Hg}^+ / ^{27}\text{Al}^+$	$5.3(7.9) \times 10^{-17}$ [23]	-2.95	0	0
$^{171}\text{Yb}^+(\text{E3}) / ^{171}\text{Yb}^+(\text{E2})$	$-1.2(1.8) \times 10^{-18}$ [26]	6.95	0	0
$^{133}\text{Cs} / ^{171}\text{Yb}^+(\text{E2})$	$0.5(1.9) \times 10^{-16}$ [91]	1.83	1	-1.266
$^{133}\text{Cs} / ^{171}\text{Yb}^+(\text{E3})$	$3.1(3.4) \times 10^{-17}$ [92]	8.83	1	-1.266
$^{133}\text{Cs} / ^{199}\text{Hg}^+$	$-3.7(3.9) \times 10^{-16}$ [93]	5.77	1	-1.266
$^{133}\text{Cs} / ^{87}\text{Sr}$	$4.2(3.3) \times 10^{-17}$ [62]	2.77	1	-1.266

是进一步限制 α_{EM} 和 μ_{pe} 等基本常数变化范围的捷径, 如 ^{229}Tm 核光钟与光钟的频率比值对 α_{EM} 变化的微分敏感因子达到了 5900 (2300)^[94]; Cs_2 某些振动跃迁与其他光钟的频率比值对 μ_{pe} 变化的微分敏感因子达到了 10^2 量级^[95].

3.3 检验广义相对论

爱因斯坦的广义相对论是我们当前理解物理世界 (特别是天体物理) 的重要基石. 爱因斯坦等效原理 (Einstein equivalence principle, EEP) 是广义相对论的一个基本假设, 其指出在重力场中自由移动的参考系里进行的局部测量不能揭示超出参考系范围的重力的存在. EEP 的正确性是将引力理解为一种几何现象的根本保障. 然而, 希格斯玻色子的实验证实为标量场的存在提供了强有力的证据, 而大多数的暗能量模型都是基于长程标量场^[96-98], 标量场的引入往往导致对 EEP 的违背. 此外, 量子引力、弦理论和大统一理论等非标物理模型也预言了 EEP 的微小破坏^[99-102]. 因此, 广义相对论可能只是一个有待发现的更基本理论的低能近似, 对违背 EEP 的实验探索极有可能发现新物理或新的基本相互作用. EEP 的核心测试包括弱等效原理 (weak equivalence principle, WEP)、局域位置不变性 (local position invariance, LPI) 和局域洛伦兹不变性 (local Lorentz invariance, LLI) 三个方面, 其中 LLI 和 LPI 可以通过原子钟之间的频率比验证.

3.3.1 利用光钟检验 LPI

LPI 的核心表述是在任何时空点的一个局域惯性系中, 所有非引力的物理定律都与在无引力的闵可夫斯基时空 (即狭义相对论的平直时空) 中形式相同. 其推论的重要结论就是引力频移: 当光 (或任何电磁波) 从引力场较强的地方传播到引力场较弱的地方时, 其频率会降低, 波长会变长. 即越靠近引力源的钟具有更强的引力势能, 其时钟的频率越低. 引力频移可以被近似表达为 $\Delta\nu_{\text{red}}/\nu_0 \sim (1+\xi)\Delta W/c^2$ ^[65], ν_0 表示原子钟无外场扰动的钟跃迁频率, $\Delta W = W_2 - W_1$ 表示两台原子钟的势能差 (对于位置非常接近的两台钟而言, $\Delta W \sim g\delta h$, 其中 g 为重力加速度, δh 为两台钟的大地水准高度差), ξ 表示违背 LPI 的量 (如果 $\xi \neq 0$, 则意味着违背 LPI). 通过对比两台引力势存在差异的原子

钟的频差和广义相对论的计算结果, 就能获得 ξ 的值, 进而验证 LPI.

光钟具备 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级的系统不确定度, 是当前在地面验证 LPI 的最佳选择. 通过光钟频率比对测量引力频移的方式主要包括两种, 第 1 种方式如图 4(a) 所示, 两台独立光钟分别处于引力势为 W_1 和 W_2 的位置, 通过光纤或者空间光链路测量两台光钟的频差. 第 2 种方式如图 4(b) 所示, 在沿重力方向 (或有重力方向分量) 的光晶格里, 通过原位测量对比上下两团不相关原子团之间的频差. 第 1 种方式比较容易获得大的测量杠杆且离子光钟和光晶格钟都能使用, 但其需要两台高精度的光钟且具备高精度的光学时频传递链路. 2020 年, Takamoto 等^[65] 将两台可搬运的 ^{87}Sr 光晶格原子钟分别放置在东京晴空塔的底部和顶部, 垂直高度差约 452.7 m. 根据引力频移的测量结果, 他们得到 $\xi = (1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$, 是地面原子钟对 ξ 最严格的限制. 第 2 种方式的优点是可以共模抑

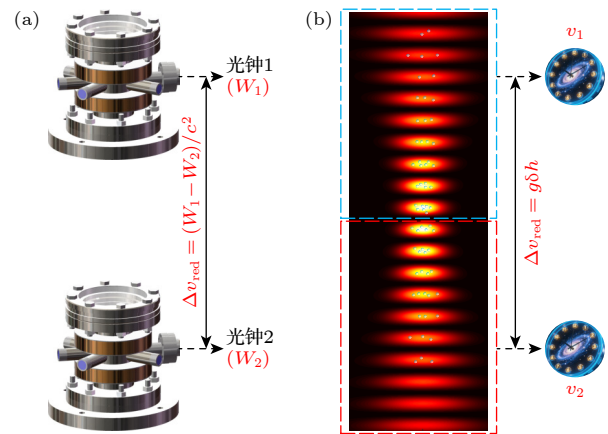


图 4 光钟验证 LPI 原理图 (a) 两台独立光钟验证广义相对论, W_1 和 W_2 分别代表光钟 1 和光钟 2 量子参考体系所处位置的引力势, $\Delta\nu_{\text{red}}$ 表示两台光钟引力频移差; (b) 基于一台光晶格钟的引力频移测量, 光晶格沿重力方向, 重力加速度为 g , 光晶格两个互不相关区域的原子可以被当作两台独立的光钟, 其高度差为 δh , 钟跃迁频率分别为 ν_1 和 ν_2

Fig. 4. Schematic diagram of testing the LPI: (a) Two independent optical clocks verify the LPI, W_1 and W_2 represent the gravitational potentials at the locations of the quantum reference systems of optical clock 1 and optical clock 2, respectively, $\Delta\nu_{\text{red}}$ denotes the gravitational frequency shift difference between the two optical clocks; (b) gravitational frequency shift measurement based on an optical lattice clock, the optical lattice is aligned along the direction of gravity, with a gravitational acceleration of g , atoms in two uncorrelated regions of the optical lattice can be treated as two independent optical clocks, with a height difference of δh and clock transition frequencies of ν_1 and ν_2 , respectively.

制大多数系统频移 (如黑体辐射频移, 二阶塞曼频移和晶格光交流斯塔克频移等), 并且通过原位测量可以共模抑制钟激光的噪声, 实现趋于量子投影噪声的测量精度; 缺点是只能用于光晶格钟、需具备原位成像的能力和精密校准重力与光晶格的轴线的夹角、两团原子的高度差通常在 10^{-6} – 10^{-3} m 量级 (测量杠杆小, 只能在微观尺度验证 LPI). 2022 年, Bothwell 等^[57] 通过该方式实现了 10^{-21} 量级的频差测量精度, 实验结果表明广义相对论的计算结果在亚毫米量级依然与实验测量符合.

3.3.2 利用光钟检验 LLI

LLI 是广义相对论以及更一般的弯曲时空物理定律所遵循的对称性. 其要求在时空的每一个点上, 都可以选择一个局部惯性系, 在这个无穷小的邻域内, 物理定律回归到狭义相对论的形式, 即满足洛伦兹对称性. 这意味着不论观察者以何种恒定速度或方向运动, 实验结果都应一致. 数学上, 洛伦兹对称性对应于时空坐标在洛伦兹变换下的不变性, 其形式为

$$x'^{\mu} = \Lambda_{\nu}^{\mu} x^{\nu}, \quad (2)$$

其中, Λ_{ν}^{μ} 是保持时空间隔 $s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ 不变的变换矩阵. 换言之, 在洛伦兹对称性成立的情况下, 物理定律对所有惯性系是协变的. 这一原则是相对论与量子场论的理论基础, 决定了电磁波以光速传播且光速在所有惯性系中恒定.

然而, 许多超出标准模型的理论, 尤其是量子引力、弦论或时空离散模型预言在极高能量 (普朗克尺度, $E_p \sim 10^{19}$ GeV) 下时空的连续性可能被破坏, 从而导致洛伦兹对称性并非绝对精确. 若这种破缺存在, 其会在低能实验中表现为微小的各向异性或速度依赖效应. 为了系统地刻画可能存在的洛伦兹对称性破坏, 人们通常采用标准模型扩展 (standard model extension, SME) 理论框架^[103]. 在该框架下, 可以选取一个参考系, 使洛伦兹对称性破坏等效地体现在电子的拉格朗日量中. 修正后的电子量子电动力学拉格朗日量可表示为^[104]

$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} \bar{\psi} (\gamma_{\mu} + c'_{\mu\nu} \gamma^{\nu}) \overleftrightarrow{D}_{\nu} \psi - m_e \bar{\psi} \psi \quad (3)$$

其中, ψ 是电子的狄拉克旋量, γ^{μ} 是狄拉克矩阵, D_{ν} 为协变导数. 张量 $c'_{\mu\nu} = c^{\mu\nu} + k_{\nu\mu}/2$ 描述了电子 ($c^{\mu\nu}$) 与光子 ($k_{\nu\mu}$) 两部分的洛伦兹对称性破坏参数. 这种电子洛伦兹对称性破坏最重要的后果, 是

使电子的能量与其动量方向相关. 对于束缚在原子中动量为 p 的电子, 由上述拉格朗日量可得到一个依赖于动量方向的微小能量修正, 对应的有效哈密顿量为^[104]

$$\delta H = -\frac{C_0^{(2)}}{6m_e} (p^2 - 3p_z^2), \quad (4)$$

其中, p_z 是电子动量在量子化轴方向的分量, $C_0^{(2)}$ 是由 $c^{\mu\nu}$ 线性组合而成的参数. 若 $C_0^{(2)} = 0$, 洛伦兹对称性完好; 反之则存在对称性破缺, 原子中电子能级会随其空间取向而产生微小能量偏移. 由于地球的自转与公转会周期性改变实验室参考系相对于太阳系天球坐标系的取向, 这些能量偏移会表现为以恒星日或年为周期的能级差调制信号.

2013 年, Hohensee 等^[105] 通过监测镝 (Dy) 原子两个近简并能级之间的射频跃迁频率随地球自转和公转的变化, 首次在实验室尺度上联合测试了电子体系的洛伦兹对称性和爱因斯坦等效原理, 获得了 10^{-17} 量级的约束结果. 随后, Pruttivarasin 等^[104] 基于囚禁的 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子实现了“电子版的迈克耳孙-莫雷实验”, 检测电子能量的取向依赖性, 将对称性破缺的约束提高至 10^{-18} 水平. 这些工作奠定了以原子和离子系统开展高精度时空对称性检验的实验基础.

相比之下, 光钟利用电子的光频跃迁作为参考频率, 具有极高的频率差测量能力, 能有效区分电子、光子及原子核在洛伦兹对称性破缺中的可能贡献. 2019 年, Sanner 等^[106] 对两台量子化轴方向不同的 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟的频率差异进行了长达半年的持续观测, 将电子-光子系统的洛伦兹破缺系数 $c^{\mu\nu}$ 的上限推至 10^{-21} 量级, 较以往实验提高约两个数量级. 这一结果不仅验证了洛伦兹对称性在电子系统中依然成立, 也展示了光钟在基础物理研究中的独特优势.

3.4 计时水准测量

大地测量学是研究地球形态、引力场及其变化的科学, 其为导航定位、地球物理研究和计量基准建立提供了基础框架. 在地球系统中, 重力势是描述地球引力场最本质的物理量之一, 其不仅决定了水体流动与海平面形态, 也直接影响到时间的流逝速度和精密计量的准确性. 测定地球表面不同地点之间的重力势差, 对于统一国家或全球高程基准、

研究地壳运动与地球内部质量分布和实现高精度时间频率比对等具有重要意义。

在传统的大地测量方法中,测定重力势差主要依赖两种技术路径.第一种是几何水准测量,该方法通过高精度水准仪逐段测定相邻测点间的高差,再结合沿测线的重力加速度观测结果,积分获得两点之间的重力势差.几何水准法在短距离内具有极高的精度,通常可达毫米级,因此在城市测绘、工程施工等领域广泛应用.然而,几何水准法本质上是一种差分测量技术,必须依赖连续可达的测线进行逐步传递,系统误差会随着距离的增大而累积且费时.当测线延伸至数百公里甚至跨越大陆时,这种误差可能达到数厘米乃至分米量级,难以保证全国乃至全球范围内的势差一致性.第二种是基于全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)与重力场模型的GNSS/大地水准面方法(GNSS/geoid).该方法利用全球卫星导航系统提供的椭球高,并结合由卫星重力观测和地面重力测量共同建立的高分辨率(准)大地水准面模型,计算得到测点的正高和相应的重力势值^[107].与几何水准法不同,GNSS/geoid方法能够在全球范围内提供绝对势值,不受地形阻隔或观测路径限制,因此在大范围高程统一与国际基准转换中具有明显优势.然而,该方法的精度高度依赖于重力场模型的质量和GNSS高程的精确性.在山区或重力数据稀疏的地区,模型误差往往可达数厘米至数分米.

随着光钟精度达到 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级,一个全新的思路逐渐成为可能——通过高精度时频比对直接测量重力势差,即“计时水准测量(chronometric levelling)”^[108,109].这一技术基于广义相对论指出的引力频移,为建立以时间为测尺的全球高程基准提供了全新的途径,也为地球物理学与计量学的融合开辟了新的方向.计时水准测量的原理如图5所示,其基本思想是通过比较不同地点光钟的频差来直接获得重力势差.根据爱因斯坦的引力红移效应,在引力场中时间的流逝速度取决于重力势的高低,重力势越高的地方,时间流逝越快,原子钟振荡的频率也相应略高.两个不同位置的时钟频率之差满足相对论关系式:

$$\delta\nu/\nu = \Delta W/c^2, \quad (5)$$

其中, $\delta\nu = \nu_1 - \nu_2$ 为两台光钟之间的频率差, $\Delta W = W_1 - W_2$ 表示两台光钟所在地之间的重力势差.

可见,两台光钟所在位置间的重力势差 $\Delta W = g_1 h_1 - g_2 h_2$ 可通过精确测量它们之间的频率差获得(g_1 和 g_2 分别表示两台光钟所处位置的重力加速度).随着光钟频率稳定性和准确度达到 10^{-19} 量级,这种方法已经能够分辨毫米量级的高程变化(1×10^{-18} 的频率不确定度对应约0.92 cm的高度测量误差),实现前所未有的重力势测量精度.与传统的大地测量方法相比,计时水准测量具有独特的优势.首先,其是一种直接的物理测量方法,不依赖于几何测线或重力场模型的间接推算,能够实现真正的“绝对势测量”,通过频率比对即可在任意两点之间建立重力势差关系,而不需要连续的可达路径.其次,计时水准测量的测量结果直接可追溯到国际单位制中的“秒”定义,使其在计量学意义上具有天然的可溯源性,这一点是传统大地测量体系所不具备的.再次,随着光钟系统不确定度进入 10^{-19} 量级,计时水准测量可以实现毫米量级的高差分辨能力且精度不受测量距离的限制.最后,计时水准法具备测量两地高差动态变化的能力,而传统水准测量非常耗时,无法测得短期的高差变化.

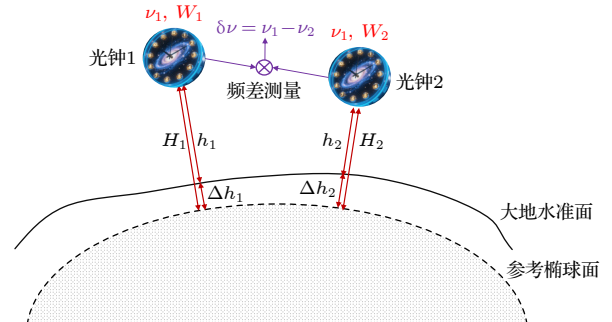


图5 计时水准测量原理图,两台位于不同测量站的光钟,其所在位置的重力势分别为 W_1 和 W_2 ,钟跃迁频率分别为 ν_1 和 ν_2 ,通过水准测量得到的高程 h_i 为正高,通过GNSS测得的椭球高为 H_i ,两者差值 $\Delta h_i = h_i - H_i$ 表示大地水准面的高程起伏

Fig. 5. Schematic diagram of chronometric levelling, two optical clocks located at different measurement stations, with gravitational potentials at their respective positions being W_1 and W_2 , and clock transition frequencies of ν_1 and ν_2 , the elevation H_i obtained through spirit leveling is the orthometric height, while the ellipsoidal height measured by the GNSS is h_i , the difference between them, $\Delta h_i = h_i - H_i$, represents the undulation of the geoid.

自Bjerhammar^[110]于1985年提出计时水准测量(或相对论测地学)的想法以来,基于原子钟的大地测量方法受到了时间频率领域和地球物理领域的高度关注,计时水准测量的理论方法不断被

发展, 该方法的可靠性被大量的实验测量论证. 2016年, Lisdat等^[111]通过1415 km的光纤链路对他们的⁸⁷Sr光晶格钟进行了远程频率比对. 结果表明光纤链路的精度优于 2×10^{-19} (经过 10^5 s时间平均), 光钟频率比对稳定度达到 2×10^{-17} (经过3000 s时间平均), 两台光钟的频率一致性优于 5×10^{-17} . 由于光钟远程频率比对的一致性直接关系到引力频移修正量的正确性, 因此该实验结果为计时水准测量奠定了实验基础. 2018年, Grotti等^[112]的可搬运⁸⁷Sr光晶格钟分别在摩丹地下实验室(Laboratoire Souterrain de Modane, LSM)和INRIM与位于INRIM的¹⁷¹Yb光晶格钟进行频率比对. LSM和INRIM之间可通过150 km的光纤链路进行远程频率比对. 可搬运⁸⁷Sr光晶格钟在INRIM与¹⁷¹Yb光晶格钟进行频率比对并标定后, 被搬运至LSM与¹⁷¹Yb光晶格钟通过光纤链路进行频率比对, 在此过程中, 可搬运光晶格钟充当光学频率标准传递的作用. 最终结果表明INRIM与LSM光钟的重力势能差异为 $10034(174) \text{ m}^2/\text{s}^2$, 与基于GNSS/geoid模型计算的结果 $10032.1(16) \text{ m}^2/\text{s}^2$ 相符合. 2024年, Grotti等^[113]的可搬运⁸⁷Sr光晶格钟被搬运至马克斯普朗克量子光学研究所(Max-Planck-Institut für Quantenoptik, MPQ), 并通过长达940 km的光纤链路与PTB的实验⁸⁷Sr光晶格钟进行频率比对. 结合可搬运与实验室⁸⁷Sr光晶格钟在PTB本地频率比对的结果, 最终测得MPQ和PTB对应的重力势差为 $3918.1(26) \text{ m}^2/\text{s}^2$, 这一结果与基于GNSS/geoid模型计算得到的 $3915.88(30) \text{ m}^2/\text{s}^2$ 相符合.

计时水准测量作为一种基于相对论红移原理的重力势测定方法, 正逐步发展成为可操作的高精度地球测量技术. 计时水准测量打破了传统几何水准测量和GNSS/geoid方法的局限, 能够直接以频率比对实现绝对重力势差的测量, 从而在空间覆盖、可溯源性和测量精度上实现根本性提升. 随着光钟(包括可搬运光钟)性能的提升和将来大规模全球光钟比对网络的建立, 计时水准测量有望推动高程基准体系向全球统一过渡, 也可能在地球物理观测、重力场变化监测和时空基准构建中发挥核心作用.

4 总结与展望

光钟技术在过去二十余年中经历了跨越式的

发展, 单离子光钟的系统不确定度和稳定度分别进入了 10^{-19} 和 10^{-18} 量级, 光晶格钟的系统不确定度和稳定度均已突破 10^{-19} 量级, 频差测量精度更是达到了 10^{-21} 量级^[57,58]. 光钟在时间频率基准、基础物理研究和精密测量应用等方面展现出前所未有的能力. 未来光钟的发展首先将在性能极限上继续突破. 稳定度方面, 基于传统超低膨胀玻璃的光学参考腔目前已经难以通过增大腔长来进一步降低热噪声^[114,115]. 基于低温单晶硅腔和AlGaAs/GaAs晶体膜(crystalline coating)的光学参考腔正不断刷新热噪声的下限^[17,116-118], 将来有望实现 10^{-18} 量级秒级稳定度的超稳激光. 此外, 通过量子纠缠等方式突破标准量子极限^[119,120], 是未来光钟超越迪克极限后进一步提升稳定度的重要途径.

系统不确定度方面, 离子光钟当前主要受限于离子热运动导致二阶多普勒频移^[14,26,29], 部分离子光钟(如⁴⁰Ca⁺, ¹⁷¹Yb⁺和⁸⁸Sr⁺)还对黑体辐射频移较为敏感. 未来可通过进一步降低离子热运动和发展质量较大且对黑体辐射频移不敏感的元素(如Pb²⁺)等手段进一步降低系统不确定度^[121]. 此外, 发展基于离子阱囚禁的核光钟(如²²⁹Th³⁺^[122])和高离化态光钟(如Ar¹³⁺^[123]和Ni¹²⁺^[124])不仅是大幅度降低离子光钟系统不确定度的重要手段, 也是推动基础物理研究的关键^[125-127]. 光晶格钟方面, 限制其系统不确定度的主要频移项包括黑体辐射频移和晶格光交流斯塔克频移^[13]. 最近, 通过低温热屏装置, 黑体辐射频移不确定度已经被降低至 10^{-20} 量级^[128]. 然而, 即便尽可能提升测量杠杆和降低阱深, 晶格光的交流斯塔克频移的不确定度也难以低于 1×10^{-19} ^[59]. 未来光晶格钟进一步压制晶格光导致的系统频移的重要手段之一是发展蓝失谐光晶格技术^[129,130], 这种情况下, 原子被囚禁在光强最弱处, 可大幅度降低晶格光交流斯塔克频移.

在利用光钟重定义时间的基本单位“秒”方面, 国际计量体系面临着基准选择、彼此比对一致性、长期可重复性以及跨机构溯源链构建等挑战. 不同原子体系的光钟虽已达到重新定义所需的精度, 但其长期稳定运行、装置间系统性不确定度比对以及参与TAI的覆盖度仍需进一步提高. 推进光学“秒”定义的关键还包括: 构建全球尺度的高精度光钟链路网络, 实现多个候选钟体系之间的 10^{-18} 甚至 10^{-19} 量级的频率比对; 统一世界各国大地水准测量的结果; 通过计时水准测量等方法将引力频移

的不确定度降低至 1×10^{-18} 甚至更低.

在基础物理检验方面, 光钟对基本常数随时间演化及相对论效应的探测能力高度依赖光钟性能、测量时间和多种钟体系之间高精度频率比的联合测量框架. 持续运行的光钟网络可通过不断压缩频率比的不确定度, 将对基本常数变化率的约束推进至 10^{-20} a^{-1} 甚至更低. 而对不同物理机制敏感的光钟体系 (冷原子光钟、超冷分子光钟、核光钟等) 之间的多维比对, 将使对新物理相互作用或耦合结构的搜索更具可辨性. 在相对论等效性原理检验方面, 随着光钟不确定度向 10^{-19} 量级逼近, 地面光钟比对有望将局域位置不变性的违背量 ξ 的不确定度降低至 10^{-7} 量级, 并将洛伦兹对称性破缺的约束精度推进至 10^{-22} 量级. 随着可搬运光钟^[61,65]、空间光钟^[131] 和光钟比对链路的发展^[132,133], 基于计时水准的重力位测量将从厘米级迈向毫米级乃至亚毫米级, 成为统一全球的高程基准和未来地球观测体系的重要组成部分. 总而言之, 随着光钟性能、链路技术和多钟系协同能力的持续提升, 光钟将在基础物理、计量学和地球科学等领域不断拓展测量前沿, 并在未来科学与计量体系中发挥愈加关键的作用.

参考文献

- [1] Heavner T P, Donley E A, Levi F, Costanzo G, Parker T E, Shirley J H, Ashby N, Barlow S, Jefferts S R 2014 *Metrologia* **51** 174
- [2] Gerginov V, Hoth G W, Heavner T P, Parker T E, Gibble K, Sherman J A 2025 *Metrologia* **62** 035002
- [3] Wang X L, Ruan J, Liu D D, Guan Y, Shi J R, Yang F, Bai Y, Zhang H, Fan S C, Wu W J, Zhao S H, Zhang S G 2023 *Metrologia* **60** 065012
- [4] Zheng F S, Chen W L, Liu K, Dai S Y, Liu N F, Wang Y Z, Fang F 2025 *Metrologia* **62** 035005
- [5] Essen L, Parry J V L 1955 *Nature* **176** 280
- [6] Mungall A G, Bailey R, Daams H 1966 *Metrologia* **2** 98
- [7] Riehle F, Gill P, Arias F, Robertsson L 2018 *Metrologia* **55** 188
- [8] Marceau C, Beattie S, Kato K, Jian B, Gertsyolf M, Dubé P 2025 *Metrologia* **62** 045001
- [9] Dehmelt H G 1973 *Bull. Am. Phys. Soc.* **18** 1521
- [10] Chu S, Hollberg L, Bjorkholm J E, Cable A, Ashkin A 1985 *Phys. Rev. Lett.* **55** 48
- [11] Salomon C, Hils D, Hall J L J 1988 *Opt. Soc. Am. B* **5** 1576
- [12] Udem T, Reichert J, Holzwarth R, Haensch T 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568
- [13] Aeppli A, Kim K, Warfield W, Safronova M S, Ye J 2024 *Phys. Rev. Lett.* **133** 023401
- [14] Marshall M C, Castillo D A R, Arthur-Dworschack W J, Aeppli A, Kim K, Lee D, Warfield W, Hinrichs J, Nardelli N V, Fortier T M, Ye Jun, Leibrandt D R, Hume D B 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 033201
- [15] Lindvall T, Fordell T, Hanhijärvi K J, Doležal M, Rahm J, Weyers S, Wallin A E 2025 *Phys. Rev. Appl.* **24** 044082
- [16] Dimarcq N, Gertsyolf M, Mileti G, Bize S, Oates C W, Peik E, Calonico D, Ido T, Tavella P, Meynadier F, Petit G, Panfilo G, Bartholomew J, Defraigne P, Donley E A, Hedekvist P O, Sesia I, Wouters M, Dubé P, Fang F, Levi F, Lodewyck J, Margolis H S, Newell D, Slyusarev S, Weyers S, Uzan J P, Yasuda M, Yu D H, Rieck C, Schnatz H, Hanado Y, Fujieda M, Pottie P E, Hanssen J, Malimon A, Ashby N 2024 *Metrologia* **61** 012001
- [17] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J, Sonderhouse L, Bothwell T, Goban A, Kedar D, Samner C, Robinson J M, Marti G E, Matei D G, Legero T, Giunta M, Holzwarth R, Riehle F, Sterr U, Ye J 2019 *Nat. Photon.* **13** 714
- [18] Kim K, Aeppli A, Warfield W, Chu A J, Rey A M, Ye J 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 103601
- [19] Derevianko A, Dzuba V A, Flambaum V V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 180801
- [20] Diddams S A, Udem Th, Bergquist J C, Curtis E A, Drullinger R E, Hollberg L, Itano W M, Lee W D, Oates C W, Vogel K R, Wineland D J 2001 *Science* **293** 825
- [21] Tanaka U, Bize S, Tanner C E, Drullinger R E, Diddams S A, Hollberg L, Itano W M, Wineland D J, Bergquist J C 2003 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **36** 545
- [22] Oskay W H, Diddams S A, Donley E A, Fortier T M, Heavner T P, Hollberg L, Itano W M, Jefferts S R, Delaney M J, Kim K, Levi F, Parker T E, Bergquist J C 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 020801
- [23] 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
- [24] Chou C W, Hume D B, Koelemeij J C J, Wineland D J, Rosenband T 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 070802
- [25] Tofful A, Baynham C F A, Curtis E A, Parsons A O, Robertson B I, Schioppo M, Tunesi J, Margolis H S, Hendricks R J, Whale J, Thompson R C, Godun R M 2024 *Metrologia* **61** 045001
- [26] Filzinger M, Dörscher S, Lange R, Klose J, Steinel M, Benkler E, Peik E, Lisdat C, Huntemann N 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 253001
- [27] Steinel M, Shao H, Filzinger M, Lipphardt B, Brinkmann M, Didier A, Mehlstäubler T E, Lindvall T, Peik E, Huntemann N 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 083002
- [28] Barwood G P, Huang G, Klein H A, Johnson L A M, King S A, Margolis H S, Szymaniec K, Gill P 2014 *Phys. Rev. A* **89** 050501(R)
- [29] Huang Y, Zhang B L, Zeng M Y, Hao Y M, Ma Z X, Zhang H Q, Guan H, Chen Z, Wang M, Gao K L 2022 *Phys. Rev. Appl.* **17** 034041
- [30] Liu D X, Cao J, Yuan J B, Cui K F, Yuan Y, Zhang P, Chao S J, Shu H L, Huang X R 2023 *Chin. Phys. B* **32** 010601
- [31] 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
- [32] Ohtsubo N, Li Y, Nemitz N, Hachisu H, Matsubara K, Ido T, Hayasaka K 2020 *Opt. Lett.* **45** 5950
- [33] Haussner H N, Keller J, Nordmann T, Bhatt N M, Kiethe J, Liu H, Richter I M, Boehm M, Rahm J, Weyers S, Benkler E, Lipphardt B, Dörscher S, Stahl K, Klose J, Lisdat C,

- Filzinger M, Huntemann N, Peik E, Mehlstäubler T E 2025 *Phys. Rev. Lett.* **134** 023201
- [34] Huntemann N, Sanner C, Lipphardt B, Tamm C, Peik E 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 063001
- [35] Brewer S M, Chen J S, Hankin A M, Clements E R, Chou C W, Wineland D J, Hume D B, Leibbrandt D R 2019 *Phys. Rev. Lett.* **123** 033201
- [36] Cui K F, Chao S J, Sun C L, Wang S M, Zhang P, Wei Y F, Yuan J B, Cao J, Shu H L, Huang X R 2022 *Eur. Phys. J. D* **76** 140
- [37] Ma Z Y, Deng K, Wang Z Y, Wei W Z, Hao P, Zhang H X, Pang L R, Wang B, Wu F F, Liu H L, Yuan W H, Chang J L, Zhang J X, Wu Q Y, Zhang J, Lu Z H 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** 044017
- [38] Zhang Z, Zhao Q, Qin Q C, Jayjong N, Lee M D K, Arnold K J, Barrett M D 2025 *Metrologia* **62** 035008
- [39] Holliman C A, Fan M, Contractor A, Brewer S M, Jayich A M 2022 *Phys. Rev. Lett.* **128** 033202
- [40] Zhang B L, Ma Z X, Huang Y, Han H L, Hu R M, Wang Y, Zhang H Q, Tang L Y, Shi T Y, Guan H, Gao K L 2025 [arXiv: 2506.17423 \[physics.atom-ph\]](https://arxiv.org/abs/2506.17423)
- [41] Wang X J, Cao J, Shu H L, Yuan Y, Li Z H, Fang P C, Chen Q F, Huang X R 2025 *Appl. Phys. B* **131** 225
- [42] Ma Z Y, Pang L R, Wang B, Gong R, Wei S Q, Liu Y H, Gao Y M, Wang Y Z, Wang Z Y, Liu H L, Yuan W H, Deng K, Zhang J, Lu Z H 2025 *Metrologia* **62** 045002
- [43] Katori H, Ido T, Kuwata-Gonokami M 1999 *J. Phys. Soc. Jpn.* **68** 2479
- [44] Katori H, Takamoto M 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 173005
- [45] Takamoto M, Hong F L, Higashi R, Higashi R, Katori H 2005 *Nature* **435** 321
- [46] Ludlow A D, Boyd M M, Zelevinsky T, Zelevinsky T, Foreman S M, Blatt S, Notcutt M, Ido T, Ye J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 033003
- [47] Le Targat R, Baillard X, Fouché M, Bruschi A, Tcherbakoff O, Rovera G D, Lemonde P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 130801
- [48] 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, Coq Y L, Barber Z W, Poli N, Lemke N D, Beck K M, Oates C W 2008 *Science* **319** 1805
- [49] Falke St, Schnatz H, Vellere Winfred JSR, Middelman Th, Vogt St, Weyers S, Lipphardt B, Grosche G, Riehle F, Sterr U, Lisdat C 2011 *Metrologia* **48** 399
- [50] Nicholson T L, Martin M J, Williams J R, Bloom B J, Bishof M, Swallows M D, Campbell S L, Ye J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 230801
- [51] Hinkley N, Sherman J A, Phillips N B, Schioppo M, Lemke N D, Belyk K, Pizzocaro M, Oates C W, Ludlow A D 2013 *Science* **314** 1215
- [52] Bloom B J, Nicholson T L, Williams J R, Campbell S L, Bishof M, Zhang X, Zhang W, Bromley S L, Ye J 2014 *Nature* **506** 71
- [53] 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
- [54] Schioppo M, Brown R C, McGrew W F, Hinkley N, Fasano R J, Belyk K, Yoon T H, Milani G, Nicolodi D, Sherman J A, Phillips N B, Oates C W, Ludlow A D 2017 *Nat. Photon.* **11** 48
- [55] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J, Schäffer S A, Belyk K, Nicolodi D, Brown R C, Hinkley N, Milani G, Schioppo M, Yoon T H, Ludlow A D 2018 *Nature* **564** 87
- [56] Lemonde P, Wolf P 2005 *Phys. Rev. A* **72** 033409
- [57] Bothwell T, Kennedy C J, Aeppli A, Kedar D, Robinson J M, Oelker E, Staron A, Ye J 2022 *Nature* **602** 420
- [58] Aeppli A, Chu A J, Bothwell T, Kennedy C J, Kedar D, He P, Rey A M, Ye J 2022 *Sci. Adv.* **8** eade9242
- [59] Kim K, Aeppli A, Bothwell T, Ye J 2023 *Phys. Rev. Lett.* **130** 113203
- [60] Origlia S, Pramod M S, Schiller S, Singh Y, Bongs K, Schwarz R, Al-Masoudi A, Dörscher S, Herbers S, Häfner S, Sterr U, Lisdat C 2018 *Phys. Rev. A* **98** 053443
- [61] Nosske I, Vishwakarma C, Lücke T, Rahm J, Poudel N, Weyers S, Benkler E, Dörscher S, Lisdat C 2025 *Quantum Sci. Technol.* **10** 045076
- [62] Schwarz R, Dörscher S, Al-Masoudi A, Benkler E, Legero T, Sterr U, Weyers S, Rahm J, Lipphardt B, Lisdat C 2020 *Phys. Rev. Res.* **2** 033242
- [63] Ohmae N, Bregolin F, Nemitz N, Katori H 2020 *Opt. Express* **28** 15112
- [64] Nemitz N, Ohkubo T, Takamoto M, Ushijima I, Das M, Ohmae N, Katori H 2016 *Nat. Photon.* **10** 258
- [65] Takamoto M, Ushijima I, Ohmae N, Yahagi T, Kokado K, Shinkai H, Katori H 2020 *Nat. Photon.* **14** 411
- [66] Tyumeneyev R, Favier M, Bilicki S, Bookjans E, Le Targat R, Lodewyck J, Nicolodi D, Le Coq Y, Abgrall M, Guéna J, De Sarlo L, Bize S 2016 *New J. Phys.* **18** 113002
- [67] Lodewyck J, Bilicki S, Bookjans E, Robyr J, Shi C, Vallet G, Targat R L, Nicolodi D, Coq Y L, Guéna J, Abgrall M, Rosenbusch P, Bize S 2016 *Metrologia* **53** 1123
- [68] Hobson R, Bowden W, ianello A, Silva A, Baynham C F A, Margolis Helen S, Baird P E G, Gill P, Hill Ian R 2020 *Metrologia* **57** 065026
- [69] Nemitz N, Gotoh T, Nakagawa F, Ito H, Hanado Y, Ido T, Hachisu H 2021 *Metrologia* **58** 025006
- [70] Hisai Y, Akamatsu D, Kobayashi T, Hosaka K, Inaba H, Hong F L, Yasuda M 2021 *Metrologia* **58** 015008
- [71] Kobayashi T, Nishiyama A, Hosaka K, Akamatsu D, Kawasaka A, Wada M, Inaba H, Tanabe T, Yasuda M 2025 *Metrologia* **62** 025006
- [72] Goti I, Condio S, Clivati C, Risaro M, Gozzelino M, Costanzo G A, Levi F, Calonico D, Pizzocaro M 2023 *Metrologia* **60** 035002
- [73] Kim H D, Heo M, Park C Y, Yu D H, Lee W K 2021 *Metrologia* **58** 055007
- [74] Morzyński P, Bilicki S, Bober M, Kovačić D, Ciuryło R, Zawada M, Nawrocki J, Dunst P, Kobayashi T, Hosaka K, Akamatsu D 2024 *Metrologia* **61** 045009
- [75] Liao T Y, Liu H, Meng F, Wang Q, Yang T, Tian H C, Lu B K, Zhu L, Li Y, Lin B K, Fang Z J, Lin Y G 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 034201
- [76] Lu B K, Sun Z, Yang T, Lin Y G, Wang Q, Li Y, Meng F, Lin B K, Li T C, Fang Z J 2022 *Chin. Phys. Lett.* **39** 080601
- [77] Luo L M, Qiao H, Ai D, Zhou M, Zhang S, Zhang S, Sun C Y, Qi Q C, Peng C Q, Jin T Y, Fang W, Yang Z Q, Li T C, Liang K, Xu X Y 2020 *Metrologia* **57** 065017
- [78] Wang C Y, Yao Y, Shi H S, Yu H F, Ma L S, Jiang Y Y 2024 *Chin. Phys. B* **33** 030601
- [79] Zhang A, Xiong Z X, Chen X T, Jiang Y Y, Wang J Q, Tian C C, Zhu Q, Wang B, Xiong D Z, He L X, Ma L S, Lyu B L 2022 *Metrologia* **59** 065009
- [80] Li J, Cui X Y, Jia Z P, Kong D Q, Yu H W, Zhu X Q, Liu X Y, Wang D Z, Zhang X, Huang X Y, Zhu M Y, Yang Y M, Hu Y, Liu X P, Zhai X M, Liu P, Jiang X, Xu P, Dai H

- N, Chen Y A, Pan J W 2024 *Metrologia* **61** 015006
- [81] Lu X T, Guo F, Liu Y Y, Cao J, Li J A, Xia J J, Xu Q F, Lu B Q, Wang Y B, Chang H 2025 *Metrologia* **62** 035007
- [82] Lin Y G, Wang Q, Li Y, Meng F, Lin B K, Zang E J, Sun Z, Fang F, Li T C, Fang Z J 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 090601
- [83] Gao Q, Zhou M, Han C Y, Li S Y, Zhang S, Yao Y, Li B, Qiao H, Ai D, Lou G, Zhang M Y, Jiang Y Y, Bi Z Y, Ma L S, Xu X Y 2018 *Sci. Rep.* **8** 8022
- [84] Lin Y G, Wang Q, Meng F, Cao S Y, Wang Y Z, Li Y, Sun Z, Lu B K, Yang T, Lin B K, Zhang A M, Fang F, Fang Z J 2021 *Metrologia* **58** 035010
- [85] Jia Z P, Li J, Kong D Q, Zhang X, Yu H W, Liu X Y, Zhang Y C, Wang Y B, Zhu X Q, Zhang J H, Zhu M Y, Feng P J, Cui X Y, Xu P, Jiang X, Liu X P, Liu P, Dai H N, Chen Y A, Pan J W 2025 arXiv: 2509.13991
- [86] *Guidelines for Reporting Primary (PFS) or Secondary (SFS) Frequency Standards Data for TAI Calibration* [2024-09] https://www.bipm.org/documents/20126/66710981/Guidelines-PSFS-reports_2024.pdf/60dcadd3-5990-59ce-a998-f87fdd31d396
- [87] Schwarz J H 1982 *Phys. Rep.* **89** 223
- [88] Bailint D, Love A 1987 *Rep. Prog. Phys.* **50** 1087
- [89] Martins C J A P 2017 *Rep. Prog. Phys.* **80** 126902
- [90] Flambaum V V, Dzuba V A 2009 *Can. J. Phys.* **87** 25
- [91] Tamm C, Huntemann N, Lipphardt B, Gerginov V, Nemitz N, Kazda M, Weyers S and Peik E 2014 *Phys. Rev. A* **89** 023820
- [92] Lange R, Huntemann N, Rahm J M, Sanner C, Shao H, Lipphardt B, Tamm Chr, Weyers S, Peik E 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 011102
- [93] Fortier T, Ashby N, Bergquist J C, Delaney M J, Diddams S A, Heavner T P, Hollberg L, Itano W M, Jefferts S R, Kim K, Levi F, Lorini L, Oskay W H, Parker T E, Shirley J, Stalnaker J E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 070801
- [94] Beeks K, Kazakov G, Schaden F, Morawetz I, Col L d, Riebner T, Bartokos M, Sikorsky T, Schumm T, Zhang C, Ooi T, Higgins J, Doyle J, Ye J, Safronova M 2025 *Nat. Commun.* **16** 9147
- [95] DeMille D, Sainis S, Sage J, Bergeman T, Kotochigova S, Tiesinga E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 043202
- [96] Khoury J, Weltman A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 171104
- [97] Khoury J, Weltman A 2004 *Phys. Rev. D* **69** 044026
- [98] Carroll S M, Mantry S, Ramsey-Musolf M J, Stubbs Ch W 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 011301
- [99] Taylor T R, Veneziano G 1988 *Phys. Lett. B* **213** 450
- [100] Damour T, Polyakov A M 1994 *Nucl. Phys. B* **423** 532
- [101] Antoniadis I, Dimopoulos S, Dvali G 1998 *Nucl. Phys. B* **516** 70
- [102] Maartens R, Koyama K 2010 *Living Rev. Relativ.* **13** 5
- [103] Colladay D, Kostelecký V A 1998 *Phys. Rev. D* **58** 116002
- [104] Pruttivarasin T, Ramm M, Porsev S G, Tupitsyn I I, Safronova M S, Hohensee M A, Häffner H 2015 *Nature* **517** 592
- [105] Hohensee M A, Leefer N, Budker D, Harabati C, Dzuba V A, Flambaum V V 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 050401
- [106] Sanner C, Huntemann N, Lange R, Tamm C, Peik E, Safronova M S, Porsev S G 2019 *Nature* **567** 204
- [107] Denker H, Timmen L, Voigt C, Weyers S, Peik E, Margolis H S, Delva P, Wolf P Gérard P 2018 *J. Geod.* **92** 487
- [108] Takamoto M, Tanaka Y, Katori H 2022 *Appl. Phys. Lett.* **120** 140502
- [109] Tanaka Y, Katori H 2021 *J. Geod.* **95** 93
- [110] Bjerhammar A 1985 *Bull. Géodésiq.* **59** 207
- [111] Lisdat C, Grosche G, Quintin N, et al. 2016 *Nat. Commun.* **7** 12443
- [112] Grotti J, Koller S, Vogt S, Häfner S, Sterr U, Lisdat C, Denker H, Voigt C, Timmen L, Rolland A, Baynes F N, Margolis H S, Zampaolo M, Thoumany P, Pizzocaro M, Rauf B, Bregolin F, Tampellini A, Barbieri P, Zucco M, Costanzo G A, Clivati C, Levi F, Calonico D 2018 *Nat. Phys.* **14** 437
- [113] Grotti J, Nosske I, Koller S B, et al. 2024 *Phys. Rev. Appl.* **21** L061001
- [114] Häfner S, Falke S, Grebing C, Vogt S, Legero T, Merimaa M, Lisdat C, Sterr U 2015 *Opt. Lett.* **40** 2112
- [115] Lee W K, Park C Y, Heo M S, Kim H, Yu D H, Truong G W, Cole G D 2019 *Joint Conference IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)* Orlando, FL, USA, April 14–18, 2019 pp1–2 <https://doi.org/10.1109/FCS.2019.8856128>
- [116] Lee D, Hu Z Z, Lewis B, Aeppli A, Kim K, Yao Z B, Legero T, Nicolodi D, Riehle F, Sterr U, Ye J 2025 arXiv: 2509.13503
- [117] Ma C Y, Yu J L, Legero T, Herbers S, Nicolodi D, Kempkes M, Riehle F, Kedar D, Robinson J M, Ye J, Sterr U 2024 *J. Phys. Conf. Ser.* **2889** 012055
- [118] Kedar D, Yu J L, Oelker E, Staron A, Milner W R, Robinson J M, Legero T, Riehle F, Sterr U, Ye J 2023 *Optica* **10** 464
- [119] Pedrozo-Peñañafiel E, Colombo S, Shu C, Adiyatullin A F, Li Z Y, Mendez E, Braverman B, Kawasaki A, Akamatsu D, Xiao Y H, Vuletić V 2020 *Nature* **588** 414
- [120] Yang Y A, Miklos M, Tso Y M, Kraus S, Hur J, Ye J 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 193202
- [121] Bely K 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 013201
- [122] Campbell C J, Radnaev A G, Kuzmich A, Dzuba V A, Flambaum V V, Derevianko A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 120802
- [123] King S A, Spieß L J, Micke P, et al. 2022 *Nature* **611** 43
- [124] Chen S L, Zhou Z Q, Li J G, Zhang T X, Li C B, Shi T Y, Huang Y, Gao K L, Guan H 2024 *Phys. Rev. Res.* **6** 013030
- [125] Zhang C K, Ooi T, Higgins J S, Doyle J F, Wense L, Beeks K, Leitner A, Kazakov G A, Li P, Thiroff P G, Schumm T, Ye J 2024 *Nature* **633** 63
- [126] Rellergert W G, DeMille D, Greco R R, Hehlen M P, Torgerson J R, Hudson E R 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 200802
- [127] Kozlov M G, Safronova M S, CrespoLópez-Urrutia J R, Schmidt P O 2018 *Rev. Mod. Phys.* **90** 045005
- [128] Hassan Y, Bely K, Siegel J L, Kobayashi T, Swiler E, Grogan T, Brown R C, Rojo T, Bothwell T, Hunt B D, Halaoui A, Ludlow A D 2025 *Phys. Rev. Lett.* **135** 063402
- [129] Takamoto M, Katori H, Marmo S I, Ovsiannikov V D, Pal'chikov V G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 063002
- [130] Kestler G, Sedlik R J, Trapp E C, Safronova M S, Barreiro J T 2025 arXiv: 2506.18958 [physics.atom-ph]
- [131] Zhao G D, Xia J, Liu Y, et al. 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 063701
- [132] Caldwell E D, Deschenes J D, Ellis J, Swann W C, Stuhl B K, Bergeron H, Newbury N R, Sinclair L C 2023 *Nature* **618** 721
- [133] Liu B, Guo X X, Chen J, Zhou Y L, Liu T, Dong R F, Zhang S G 2025 *Chin. Phys. Lett.* **42** 014202

SPECIAL TOPIC—Principles and applications of quantum optics

Research progress on precision measurement based on optical clocks*

LU Xiaotong¹⁾²⁾³⁾ CAO Jin¹⁾²⁾³⁾ CHANG Hong^{1)2)3)†}1) (*National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)2) (*School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)3) (*Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China*)

(Received 24 November 2025; revised manuscript received 19 December 2025)

Abstract

Optical clocks, as the next-generation time and frequency standards, achieve ultra-low systematic uncertainty and frequency instability by precisely referencing the local oscillator frequency to the optical atomic transition frequency. Since the successful development of the first all-optical $^{199}\text{Hg}^+$ optical clock in the early 21st century, optical atomic clocks have made remarkable progress over the past two decades. Currently, state-of-the-art optical clocks have achieved systematic uncertainties and frequency stabilities at the 10^{-19} level, surpassing traditional microwave atomic clocks by more than two orders of magnitude. This breakthrough has opened up new research areas in fundamental physics and precision measurement.

This paper begins by reviewing landmark developments in ion optical clocks and optical lattice clocks. Corresponding tables are provided to summarize the best performance metrics achieved by all known research groups, along with the specific optical clock types developed by each group. The main focus of the paper is a review of precision measurement applications based on optical clocks, covering four key areas. First, the method and typical setup for steering international atomic time (TAI) using optical clocks are introduced. The principles underlying optical frequency measurement data submission are summarized, followed by an overview of progress in TAI steering with optical clocks. Second, the principles for constraining variations in fundamental physical constants through optical clock comparisons are briefly outlined. Recent results regarding the fine-structure constant and the proton-to-electron mass ratio are presented to demonstrate the ability of optical clocks to probe such variations. Third, tests of Einstein's equivalence principle are discussed, including principles and recent advances in examining local position invariance and local Lorentz invariance using optical clocks. Local position invariance is tested by measuring gravitational frequency shifts between clocks at different geopotential heights or within distinct regions of a vertical optical lattice. Local Lorentz invariance is tested by comparing optical clocks with different quantization axes; recent advances have raised the upper limit on Lorentz-violation coefficients for electron-photon systems to the order of 10^{-21} . Finally, chronometric leveling based on optical clock comparisons is presented. A comparison with traditional geodetic methods is provided, highlighting the advantages of the chronometric approach. The paper also details recent experimental progress in chronometric leveling.

In the outlook section, the paper analyzes potential research directions for further enhancing the performance of optical clocks. It also explores the possible advancements in precision measurement applications, such as constraining the variation rates of fundamental physical constants, as the performance of optical clocks continues to improve.

Keywords: optical clocks, precision measurement, chronometric levelling, atomic physics

DOI: [10.7498/aps.75.20251594](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251594)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251594](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251594)

* Project supported by the Operation and Maintenance of Major Scientific and Technological Infrastructure of the Chinese Academy of Sciences, China (Grant No. 2024000014) and the Quantum Science and Technology-National Science and Technology Major Program, China (Grant No. 2021ZD0300902).

† Corresponding author. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn



基于光钟的精密测量研究进展

卢晓同 曹进 常宏

Research progress on precision measurement based on optical clocks

LU Xiaotong CAO Jin CHANG Hong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040303 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251594

CSTR: 32037.14.aps.75.20251594

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251594>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电子束离子阱光谱标定和Ar¹³⁺离子M1跃迁波长精密测量

Spectral calibration for electron beam ion trap and precision measurement of M1 transition wavelength in Ar¹³⁺

物理学报. 2022, 71(3): 033201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211663>

少电子离子束缚态电子g因子精密测量

Precise measurements of electron g factors in bound states of few-electron ions

物理学报. 2024, 73(20): 203103 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240683>

频域反射法光纤延时精密测量

Accurate measurement of optical fiber time delay based on frequency domain reflectometry

物理学报. 2021, 70(8): 084204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201075>

基于线性与非线性干涉仪的量子精密测量研究进展

Research progress in quantum precision measurements based on linear and nonlinear interferometers

物理学报. 2022, 71(13): 130701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220425>

锁相放大器的研究进展

Research progress of lock-in amplifiers

物理学报. 2023, 72(22): 224206 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230579>

基于铁磁扭摆振子的磁场测量及其应用

Ferromagnetic torsional oscillator based magnetic field measurement and its applications

物理学报. 2025, 74(3): 030701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241538>