

原子钟在精密测量领域的新应用*

贺凌霄[†]

(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉 430071)

2023-05-17收到

† email: helx@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230705

New applications of atomic clocks for precision measurement

HE Ling-Xiang[†]

(Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

摘要 近年来,伴随着原子钟研制精度的不断提高,尤其是基于中性原子的光晶格钟,其稳定度已经推进到 10^{-19} 量级,不确定度也已达小系数 10^{-18} 量级,原子光钟在精密测量领域的应用也被推上了一个新高度。除了被广泛谈及的用于测量精细结构常数的变化、测量引力波以及寻找暗物质,高精度的原子光钟被认为是一个可用于大地测量以及爱因斯坦广义相对论验证的强有力的工具。文章主要从原子光晶格钟测量引力红移的角度出发,介绍原子光晶格钟在测地学方面的应用。最后,引入高精度原子光晶格钟用于系统熵的测量,这可能成为未来精密测量的一个新领域。

关键词 原子光晶格钟, 引力红移, 相对论测地, 局域位置不变性, 熵

Abstract In recent years the performance of atomic clocks has been improved to an unprecedented level. In particular, for lattice clocks based on neutral atoms, the instability has reached an order of magnitude around 10^{-19} , and the uncertainty at the low 10^{-18} level, so their applications in precision measurement have been pushed to a new level. Apart from their use in measuring the variation of the fine structure constant, detecting gravitational waves, and hunting for dark matter, highly accurate optical clocks are also a powerful tool for geodesy and verification of general relativity. Here we give an introduction to the application of lattice clocks for geodesy from the viewpoint of gravitational redshift measurements. In the future, measurement of a system's entropy with highly accurate lattice clocks could be a new research area for precision measurement.

Keywords lattice clock, gravitational redshift, relativistic geodesy, local position invariance, entropy

* 国家自然科学基金区域创新发展联合基金(批准号: U20A2075)资助项目, 湖北省科技重大项目

1 引言

引力红移是爱因斯坦广义相对论预言的一种经典现象。当光波远离大质量物体传播时,就会产生引力红移,如图1所示。

引力红移描述了这样一个物理现象,从远处观察者的角度来看,强引力场中的原子钟走得更慢,观察到的光子波长向较长波(光谱中的红色部分)的方向偏移。引力红移是爱因斯坦等效原理的一个简单结果。观测引力红移是广义相对论的经典检验之一。而且引力红移在全球导航卫星系统(GNSS)中也是一个重要的效应。引力红移的测量是通过将两台原子钟彼此靠近时进行同步,随后将它们移动到不同的高程,引力红移会降低引力场中较低原子钟相对于较高原子钟的振荡频率。当我们把原子钟放在一起比较经过的振荡次数时,会测量到频率的偏移。

利用原子钟测量引力红移比较著名的是1971年开展的Hafele—Keating实验,研究人员把四台商用铯原子钟带上民航客机环游世界飞行,一次从东往西,一次从西往东,他们观察到运动原子钟所测量的时间与华盛顿实验室同类原子钟所测量的时间之间存在差异,朝东走的原子钟慢了 59 ± 10 ns,往西走的原子钟快了 273 ± 7 ns,证明了时间不是普适和绝对的,同时验证了狭义相对论和广义相对论效应^[1, 2]。继Hafele—Keating实验之后,Briatore和Leschiutta开展了第一个基于地面铯束原子钟的直接比对,通过进行引力红移的测量来推断高程差。实验显示两个高程差为3250 m的原子钟,预测时间不同步为30.6 ns/day,实测值为 36.5 ± 5.8 ns/day,相对精度在20%左右^[3]。

2 重力场的测量现状与引力红移的测量

重力场测量是地球物理学和大地测量学的核心。经典的测地学基于万有引力定律的牛顿理论框架体系,通过两个质点之间的引力,将测试质点设为单位质量,可以得出重力加速度。传统上,

短距离范围内最直接、最准确地获得重力势差的方法是几何水准法。在1 km范围内使用双线水准法结合适当的技术设备可获得0.2—1.0 mm的标准偏差^[4]。然而几何水准法的不确定度取决于许多因素,其中一些水准误差表现为随机性并且分别以单个装置数量或距离的平方根传播,而其他系统类型的误差可能以不太有利的方式随着距离传播。例如英国第二次和第三次几何水准法有很大的测量差异(南北方向跨度为1000多公里,两次测量产生0.2 m的测量偏差^[5]),法国新旧水准法的差异(北海到地中海南北方向跨度约900 km,两种测量方法产生0.25 m的测量偏差^[6]),以及横跨加拿大和美国之间测量结果超过100 m的不一致性^[7]。所以相隔几百公里的两个点之间的高程差测量通常需要借助GNSS测量法。但是重力数据有时分布疏密不均:平原地区通常能进行密集测量,而山区因传统重力测量无法到达,覆盖很少。而且基于GNSS的测量受限于空间跨度的测量精度和覆盖方面的缺陷,单独借助重力大地水准面模型来计算重力,还是会导致几厘米的高程差不确定度。例如2002年发射的重力恢复和气候实验(GRACE)系统,它每30天以400 km至40000 km的空间分辨率绘制全球重力场,是对地球平均重力场和时变重力场测量最精确的空间任务,用于推动水文(大陆和区域水平衡,监测含水层变化)、海洋学(研究洋流、海洋热流、海底压力、海平面上升)和固体地球科学领域的研究,在陆地和海洋区域精度约为2 cm^[8]。基于以上情况,仅靠GNSS卫星测量无法以足够的精度提供完整的地球势场分布。只有将高精度重力场测量与高分辨率地面数据(主要是1—2 km及以下分辨率的重力和测绘数据)相结合,才能有效完成对地球重力场分布的精确标定。

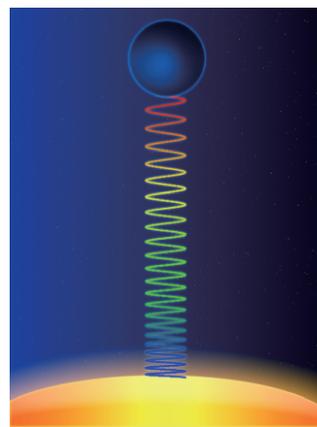


图1 光波在引力场的作用下向上移动时发生的引力红移

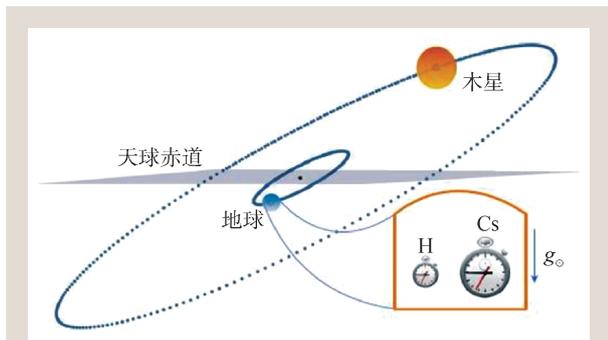


图2 太阳系引力场模型中处于地球同一位置的两台原子钟的比对^[13]

而1—2 km内的重力场数据很容易通过高精度的原子钟来获取,两者相结合将有助于区域重力场建模。尤其在山区将附近的原子钟和GNSS测量相结合的测量数据可以减小大地水准面确定的误差^[9]。

高精度实验结果表明,大地测量学不再仅仅受限于牛顿体系的框架,大地模型以及依托这些模型对数据的解释不可避免地需要超越牛顿的空间和时间架构。基于爱因斯坦提出的广义相对论,引力不再仅仅是一种力的概念,而是由质量分布引发的时空弯曲。新的大地测量学的理论基础需要以广义相对论为基础,利用原子钟测量引力红移,这就形成了相对论测地学^[10]。相对论测地要求两个高精度原子钟同时运转,它们的频率不确定度和稳定度以及两者并行操作时的频率差或频率比在一开始就能确定下来。将一台钟放在已知的高度上,另外一台钟放在未知高度上,依托它们在新位置运行时测量到的频率差或频率比,测量得到引力红移,由此推断引力势的变化。基本对应关系为

$$1 \text{ m (高程差)} \leftrightarrow \Delta f/f \sim 10^{-16} \leftrightarrow \Delta U \sim 10 \text{ m}^2/\text{s}^2. \quad (1)$$

这个对应关系的物理内涵为:如果将精度为 10^{-16} 的原子钟进行比对,可以将两个钟的高程差测量精度控制在1 m,或者将重力势差的测量精度控制在 $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

通过对原子钟频率的远程比对,可以借助相对论来修正地球表面各观测站之间的引力势和高程差。作为补充,以原子干涉仪进行重力测量和用激光干涉仪进行测距为地球重力场的测量提供

了新的灵敏度。原子光钟结合光纤远距离频率传递,也为引力红移的高精度测量奠定了基础。

引力红移的测量结果主要受限于参与比对的原子光钟的不确定度和不稳定性。随着性能不断改善,预期光钟将在大地测量中发挥越来越重要的作用,依托光钟网络有助于辅助建立高精度的国际高度参考系统(IHRS)。

3 原子钟用于广义相对论等效原理的验证

爱因斯坦等效原理(EEP)是爱因斯坦广义相对论的基石。基于广义相对论的宇宙模型需要引入暗能量来解释宇宙的膨胀,所以精确测量广义相对论的有效性,即使在经典框架下,对于理解基础物理也是很重要的一个环节。爱因斯坦等效原理概括为三大原理:弱等效原理(WEP)、局域洛伦兹不变性(LLI)以及局域位置不变性(LPI)。引力红移的测量被认为是LPI检测精度最高的方案。目前,局域位置不变性是爱因斯坦等效原理里检验精度最差的原理,对局域位置不变性的扰动程度可以用来表征引力势对某些特定基本物理常数的耦合程度。

测量引力红移最好的方案是原子钟方案。通过原子钟测量引力红移的方案目前主要分为两类。第一类检验是将两台相同的原子钟放在相隔一定高程的引力势上,通过比较这两个钟的频率差的相对变化和这两个不同地方的势差来确定局域位置不变性的扰动程度,可以用以下公式来描述:

$$\frac{\Delta f}{f} = (1 + \beta) \frac{\Delta U}{c^2}. \quad (2)$$

其中 β 表征LPI的扰动因子, ΔU 是两个原子钟所处位置的重力势差,当等效原理不受扰动时, $\beta = 0$ 。

第一类检验以1976年的Gravity Probe A (GP-A)实验为代表,通过相隔1万公里的两台氢钟的频率比值变化,确认了爱因斯坦预言的大约10%的准确度,扰动因子 β 的上限值测量约为 7×10^{-5} ^[11]。这个测量精度一直保持了接近40年,直到2018年被两台伽利略卫星上的被动氢钟的测

量结果所打破。2014年，由于两颗伽利略导航卫星 GSAT-0201 和 GSAT-0202 被错误放置在离心率为 0.16 的椭圆轨道上，利用这两颗卫星上的被动氢钟，经过三年的数据分析，欧洲空间局研究人员将 GP-A 实验精度提高了 5.6 倍，上限推进到 $(0.19 \pm 2.48) \times 10^{-5}$ ^[12]。

依托构建原子钟的原子内部能级结构的不同，将两台不同原子的钟放在同一位置，随着地球围绕太阳的旋转引起的引力势变化，第一类检验演化为第二类检验。第二类检测可以用以下公式来描述：

$$\frac{\Delta f}{f}|_{\text{clock1}} - \frac{\Delta f}{f}|_{\text{clock2}} = (\beta_{\text{clock1}} - \beta_{\text{clock2}}) \Delta U/c^2. \quad (3)$$

第二类检验由于不需要依托空间分隔的两台原子钟之间的频率传递，而且地球体积相对于地球—太阳轨道的变化是个很小的量，所以地面上同一位置放置的两台原子钟相当于在相同的引力势上。如图 2 所示，2018 年，通过比较美国国家标准与技术研究院(NIST)的四台氢钟和分别来自于美国、法国、德国、意大利、英国的一级频率标准的长达 14 年的频率稳定度，将扰动因子 β 的上限值测量精度推进到 $(2.2 \pm 2.5) \times 10^{-7}$ ^[13]。

2005 年，日本 Katori 小组将“魔数波长”光晶格装载引入中性原子光晶格钟用来消除交流斯塔克频移，成为原子光晶格钟里程碑式的工作^[14]。经过十多年的技术积累，作为典型代表的镱原子光钟和锶原子光钟均取得了令人瞩目的进展，两种原子的光钟稳定度已经进入 10^{-19} 的量级。2018 年，美国 NIST 的研究小组通过对两台 Yb 原子光钟进行比对，在 36 小时的平均时间内获得了 3.2×10^{-19} 的稳定度，不确定度达到 1.4×10^{-18} ，意味着首次将确定高程差的相对论测地学推进到毫米量级^[15]。2019 年，美国天体物理联合实验室(JILA)的研究小组

也将 Sr 原子光钟的频率稳定度经过 1800 s 的平均时间推进到 6.6×10^{-19} ^[16]，并且在 2022 年实现了毫米量级原子尺度上引力红移的测量^[17]。

2020 年，日本研究小组将两台 Sr 原子光钟放置在相隔 450 m 高程差的东京晴空塔上下两端，联合进行了 10^{-18} 量级可搬运锶光钟的联合比对测量，如图 3 所示，利用引力红移的测量将局域位置不变性的扰动上限推进到 $(1.4 \pm 9.1) \times 10^{-5}$ 的水平^[18]。这一结果将地面原子钟的验证精度提高了一个数量级，并可与空间原子钟实验结果相比拟。这也是首次通过光钟比对开展的第一类检验。

通过高精度光钟组网进行远程比对，可以凭借其对引力红移的测量来确定地球表面各观测站之间的引力势和高程差，并且结合传统的几何水准法以及 GNSS 测量法进行大地水准面直接测绘和重力一位势联合测量，反演是否存在地壳板块运动引起的地下密度异常^[19]。研究模型预测，埋藏在地壳 2 km 深处、半径 1.5 km、密度异常为 20% 的球体引起的大地水准面扰动，已经可以用

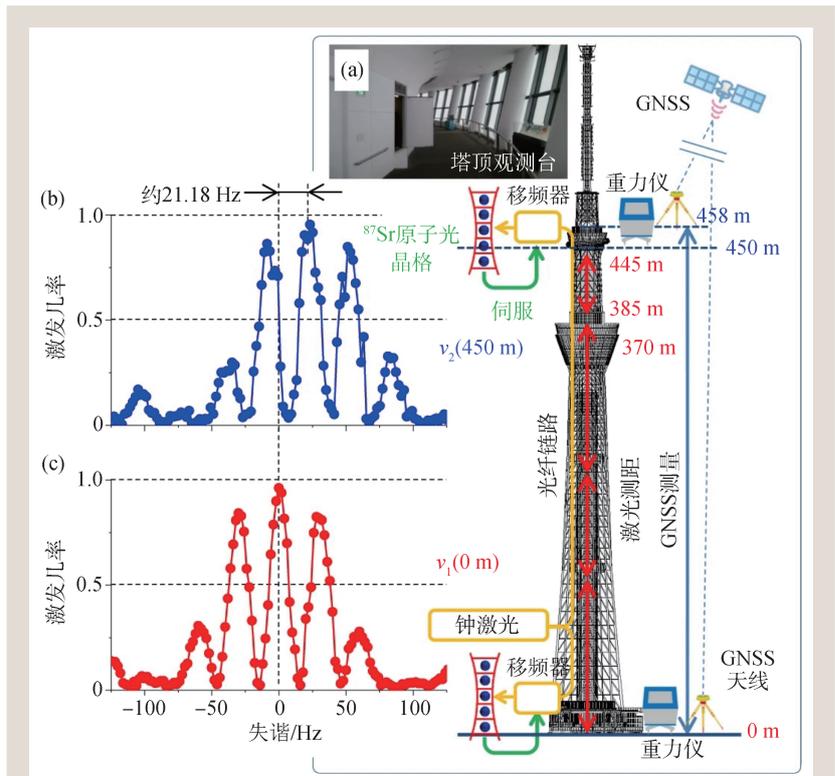


图 3 东京晴空塔上集成了光钟、激光测距、GNSS 测量三种手段，利用两台锶原子光钟进行重力势差的测量以及局域位置不变性的验证^[18] (a)塔顶的光钟装置；(b)塔顶光钟测量的 Ramsey 钟谱；(c)塔底光钟测量的 Ramsey 钟谱

比对精度达到 10^{-18} 的光钟探测到^[9]。

4 原子钟用于热力学熵的测量

熵的概念最早是由德国物理学家克劳修斯于1865年所提出的^[20]。最初是用来描述“能量退化”的物质状态参数之一，在热力学中有广泛的应用。克劳修斯将一个热力学系统中熵的改变定义为：在一个可逆过程中，输入热量相对于温度的变化率，即 $dS = \left(\frac{dQ}{T} \right)_{\text{可逆}}$ 。当一个过程被界定为“可逆”时，即指在每一个极短的步骤内改变过程，系统都保持非常接近平衡的状态，称为“准静态过程”。否则，该过程即是“不可逆的”。若过程是不可逆的，则 $dS > dQ/T$ ，即熵增原理，也就是热力学第二定律。引力热力学中的 Tolman—Ehrenfest 关系通过显示固有时和温度之间的二象性，指出了广义相对论时间与原子钟热力学之间的深层联系。所有的物理原子钟都是受热力学约束的开放非平衡系统，必然是不可逆的。所有的原子钟都是被推离热平衡的物理系统，从而增加了它们的自由能。这些约束条件必然会限制原子钟的性能，而好的原子钟需要更大的能量耗散。无论何种形式的原子钟，要服从热力学定律，本质上都是通过向更高熵态演化来量化时间的流逝。由于热力学第二定律的统计性质和相应的熵流，热起伏从根本上限制了原子钟的性能。这就揭示了熵增和原子钟计时之间存在着深刻的联系。通过精确的测量手段来降低熵，从而提高原子钟的自由能，提供了一种到达低熵的路径。对于周期性原子钟，是通过外部对系统做功来实现远离热

平衡；对于非周期热原子钟，通过热或化学势梯度来降低熵，也可以通过测量来远离热平衡。作为耗散系统，所有的原子钟都受到噪声的影响，从而限制了它们的性能。对于量子时钟，热噪声被量子噪声(自发辐射或隧穿)所取代，即使在绝对零度附近，噪声仍然由于自发辐射或量子隧穿等机制而存在。2017年，来自西班牙的研究小组通过一个简单的量子时钟模型，发现了量子时钟的精度和它们产生的熵之间存在线性关系，即在有限的范围内，量子时钟的准确度每增加一点，都会导致产生的熵也更大一些^[21]。2021年，奥地利和英国的研究人员联合设计了一个经典的可以调节准确度的时钟^[22]。如图4所示，这个时钟由一层50 nm厚的氮化硅薄膜组成，这层氮化硅薄膜悬浮在金属电极上，因此悬浮的薄膜和电极之间形成了一个微小的空腔。连接到空腔的电路能测量薄膜的振动，每次薄膜上下移动一次，再回到原来的位置时，就被计算为一次“滴答”。“滴答”之间的间隔规律性用来衡量时钟的精度。通过提高输入信号的能量(或“热量”)，研究人员就能增加振动的振幅，进而提高对薄膜的测量精度。他们的研究表明，随着原子钟精度的提高，系统产生的热量随之增加，通过挤压附近的粒子，周围环境的熵也有所增加^[23]。

因此，可以引入高精度的原子钟作为一种量子传感器，从超长寿命原子态与光子相互作用的角度来描述系统熵的变化，可以用来揭示时间的本质，深层次地理解时间与系统熵的关系。

5 未来发展展望

长远来看，把引力红移、高程差与原子结构联系起来，可以克服由几何水准法测量高度差存在的弱点和均匀性。作为解决不同大地测量技术之间存在的差异以及纠正远距离大地高程测量偏差，原子光钟通过频率比对能够展现较好的时间分辨率来反映重力场的变化，逐步成为一种备受期待的新技术手段，所以建立高精度的原子光钟用于辅助传统地球物理测量成为人们关注的焦点之一。

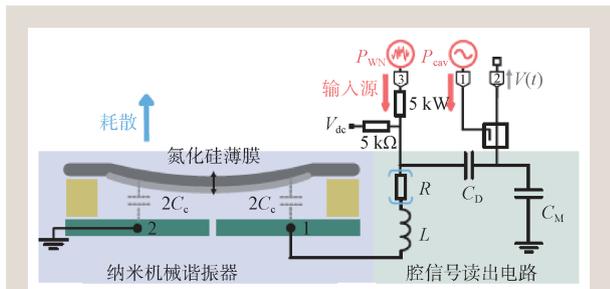


图4 纳米机电系统钟用于熵测量的工作原理^[22]

另一方面,原子光钟的研制精度是否可以无限提高,原子光钟精度的提高与系统熵变的定量关系,光钟研制的极限精度是否受到系统熵的限制,现在依然有待研究和探索。所以,借助原子光钟对系统熵变的测量,也是今后精密测量、热力学、量子信息学等需要重点关注的科学问题。

参考文献

- [1] Hafele J C, Keating R E. *Science*, 1972, 177: 166
- [2] Hafele J C, Keating R E. *Science*, 1972, 177: 168
- [3] Briatore L, Leschiutta S. *Nuovo Cim. B*, 1977, 37: 219
- [4] Torge W, Müller J, *Geodesy*, 4th ed. De Gruyter, 2012
- [5] Kelsey J, Gray D A, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1972, 272: 141
- [6] Rebischung P, Duquenne H, Duquenne F. *The New French Zero-order Levelling Network-first Global Results and Possible Consequences for UELN. EUREF Symposium*, 2008
- [7] Véronneau M, Duvai R, Huang J, *Geomatica*, 2006, 60: 165
- [8] Tapley B D, Bettadpur S, Watkins M *et al.* *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31: 9
- [9] Bondarescu R, Bondarescu M, Hetényi G *et al.* *Geophys. J. Int.*, 2012, 191: 78
- [10] Bjerhammar A. *Bull. Geod.*, 1985, 59: 207
- [11] Vessot R F C, Levine M W, Mattison E M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1980, 45: 2081
- [12] Delva P, Puchades N, Schönemann E *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 231101
- [13] Ashby N, Parker T E, Patla B R. *Nat. Phys.*, 2018, 14: 822
- [14] Takamoto M, Hong F L, Higashi R. *Nature*, 2005, 435: 321
- [15] McGrew W F, Zhang X, Fasano R J *et al.* *Nature*, 2018, 564: 87
- [16] Oelker E, Hutson R B, Kennedy C J *et al.* *Nature Photonics*, 2019, 13: 714
- [17] Bothwell T, Kennedy C J, Aepli A *et al.* *Nature*, 2022, 602: 420
- [18] Takamoto M, Ushijima I, Noriaki Ohmae *et al.* *Nat. Phys.*, 2020, 14: 41
- [19] Lisdat C, Grosche G, Quintin N *et al.* *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12443
- [20] Clausius R. *The Mechanical Theory of Heat-with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies.* London: John van Voorst, 1867
- [21] Erker P, Mitchison M T, Silva R *et al.* *Phys. Rev. X*, 2017, 7: 031022
- [22] Pearson A N, Guryanova Y, Erker P *et al.* *Phys. Rev. X*, 2021, 11: 021029
- [23] Schwarzhans E, Lock M P E, Erker P *et al.* *Phys. Rev. X*, 2021, 11: 011046


CIOE
 中国光博会

光学全产业链 展示及交流平台


**精密光学展&
摄像头技术及应用展**
PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

第24届中国国际光电博览会

240,000M²展示面积 | 100,000+专业观众 | 3,000+参展企业

2023年9月6-8日

深圳国际会展中心(宝安新馆)



扫码登记免费参观

同期展会


信息通信展
INFORMATION & COMMUNICATIONS EXPO


**激光技术
及智能制造展**
LASER TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO


红外技术及应用展
INFRARED APPLICATIONS EXPO


智能传感展
INTELLIGENT SENSING EXPO


光电子创新展
PHOTONICS INNOVATION EXPO


新型显示璀璨展
DISPLAY TECHNOLOGY EXPO