

# 高精度可搬运钙离子光钟\*

黄焱 管桦 高克林<sup>†</sup>

(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)

2021-01-21 收到

<sup>†</sup> email: klgao@wipm.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20210301

## Portable high-precision Ca<sup>+</sup> optical clocks

HUANG Yao GUAN Hua GAO Ke-Lin<sup>†</sup>

(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** 时间的计量一直是人们所关心的基本问题,它与人们的日常生活息息相关。随着科学技术的发展与进步,人类对时间的计量也越来越精确。近年来,光钟已经成为当前世界上最精确的计时工具。然而,往往因体积庞大、仅能在实验室环境工作,极大地限制了光钟的应用范围。实现可搬运、可靠、准连续运行的高精度光钟是科学家的愿望,也是对光钟科研工作者的挑战。文章将简单介绍光钟的原理,然后介绍可搬运钙离子光钟的研究进展,最后浅谈可搬运原子光钟的未来发展。

**关键词** 离子囚禁, 原子频标, 窄线宽激光, 光钟

**Abstract** How can we measure time? That is one of the basic concerns of mankind, and is closely related to people's daily life. With the development of science and technology, time measurement has become more and more accurate. In recent years, optical clocks have made great progress, and have become the world's most accurate time measurement tools. However, they are often bulky and can only work in the laboratory environment, which greatly limits their application. Scientists would like to have a portable, reliable, quasi-continuous running, and high-precision optical clock, but this is a challenging task. In this article, we will first briefly introduce the principle of optical clocks, then describe our recent research on a portable Ca<sup>+</sup> optical clock, and finally discuss some possible improvements for the near future.

**Keywords** ion trapping, atomic frequency standard, narrow-linewidth laser, optical clock

## 1 引言

时间是物理学中七个基本物理量之一,也是目前测量精度最高的物理量。其他的诸多物理量都可以通过时间或者频率测量来直接或间接确定,例如长度、质量等。我们都知道,尺子测量长度时,尺子的刻度越小,测量就越精密。对时

间的测量也是如此,钟的振荡频率越高,往往对时间的测量就越准确。时间的准确测量无论是在人们的日常生活中,还是在物理规律的验证和新物理的探索、国民经济以及国防建设领域等都具有重要的意义。人类的计时可以追溯到五千多年前,最初人们利用日月星辰的运行规律等天象来计时,往往以天为单位,在人们的生活和生产中

\* 科技部重点研发计划(批准号: 2017YFA0304404; 2017YFA0304401; 2018YFA0307500; 2017YFF0212003)、国家自然科学基金(批准号: 91736310; 11634013; 11774388)、中国科学院先导B项目(批准号: XDB21030100)和中国科学院青年创新促进会(批准号: Y201963; 2018364)资助项目

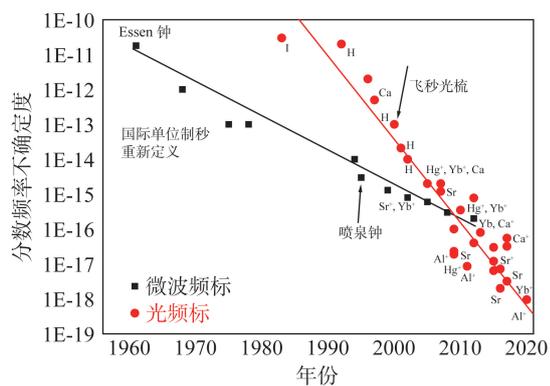


图1 微波钟和光钟系统不确定度发展对比图

发挥重要作用。随着人类文明的进步，计时变得越来越重要，人们也陆续研制出各种基于不同原理的钟作为计时工具。从20世纪初开始，科学家们意识到可以参考原子内部固有的能级跃迁频率来提供计时参考。相比于根据天体运动规律计时的方式，利用原子能级之间固定的跃迁频率计时要可靠很多。目前，科学家们在实验室研制出的世界上精度最高的钟——光钟，系统不确定度已经达到 $10^{-18}$ 或 $10^{-19}$ 量级，相当于百亿年不差一秒的水平。然而，光钟往往体积庞大，仅能在实验室环境工作，极大地限制了光钟的应用范围。实现可搬运、可靠和准连续运行的高精度光钟一直是科学家的愿望，也是对研究光钟的科研工作者的挑战。钙离子光钟是光钟大家庭里的一员，和其他成员相比，有着鲜明的特点：能级结构相对简单，所需激光的频率处于可见光频段，且能用半导体激光器实现。因此，较易实现高集成化、高可靠性和高运行率的可搬运光钟。本文中我们将首先详细介绍钙离子光钟的原理、发展历程，然后介绍可搬运钙离子光钟的研究进展，最后介绍其在生产和生活中的应用前景。

## 2 钙离子光钟

光钟随着20世纪60年代激光器的诞生成为科学家实现梦想的追求，是原子钟中的一员。原子钟是参考原子内部稳定能级的量子跃迁频率制成的频率标准，也被称为原子频标，当作为一台设

备时被称为原子钟。原子钟诞生于20世纪初，基于其准确度和稳定度方面的优势，20世纪60年代，国际计量局将时间频率的基本单位“秒”定义在了原子钟上，人类的计时从“天文秒”进入了“原子秒”。至今为止，原子钟仍然代表了最高准确度的时间频率标准。随着原子钟准确度和稳定度的提高，以此为基础的卫星导航、精确定位武器以及高码率通信同步系统等性能都将得到提高，因此，人们需要精度更高的原子钟。

在目前众多种类的原子钟中，光钟是准确度和稳定度最高的一种原子钟。它是输出频率处于可见光频率甚至更高频率的原子钟，输出激光的波长为200—1000 nm。光钟最早由诺贝尔奖获得者 Dehmelt 教授于20世纪70年代末提出：利用单个离子的能级跃迁能实现超高精度的光钟<sup>[1]</sup>。光钟的输出频率比目前秒定义的参考(铯喷泉钟)要高几个数量级，其准确度和稳定度也有明显的优势，可能会在不远的将来取代铯喷泉原子钟，成为新一代的国际秒定义参考。图1显示了微波钟和光钟系统不确定度发展的对比<sup>[2]</sup>，横坐标为年份，纵坐标表示原子钟的系统不确定度，该数值越小，原子钟的计时就越精确。从图中可见，2010年以来，光钟的精度已经超过了微波钟；与此同时，光钟的发展速度也远远高于微波钟。

光钟由物理系统、振荡器和计数器三个基本部分组成。物理系统由不受相互碰撞及外界环境干扰的原子、离子或分子体系组成。目前的光钟主要参考两种物理体系：一是光晶格中囚禁的中性原子，二是离子阱中囚禁的单离子。振荡器为超窄线宽超稳激光。计数器用于实现光波与微波的连接和传递，由飞秒光梳和微波钟基准组成。

就参考的原子体系不同来划分，目前存在各式各样的光钟，钙离子光钟是其中的重要成员。

钙离子属于碱土族离子，其最外层仅有一个电子，为类氢原子结构，能级结构相对简单，激光冷却和光频跃迁探测所需的激光都可以利用固体激光器特别是半导体激光器实现。因此，钙离子是搭建高精度光钟和实现应用的理想参考体

系。图2列出了钙离子光钟相关的能量最低的几个能级。其中， $4^2S_{1/2}$ 态为离子的基态； $3^2D$ 态为能量最低的离子激发态，同时也是亚稳态，寿命约为1 s，对应的 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D$ 跃迁的自然线宽约为0.14 Hz。 $3^2D$ 态的长寿命(窄自然线宽)使得 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D$ 跃迁成为理想的光钟参考跃迁，在实验中选择 $4^2S_{1/2}$ — $3^2D_{5/2}$ 跃迁作为光钟的参考跃迁。

接下来将简单介绍一下钙离子光钟的原理。首先，需要用一台离子阱装置，采用交变电场来囚禁单个钙离子，然后进行激光冷却，来降低钙离子的运动速度；接下来，利用一台超稳定的窄线宽激光器以实现钟跃迁光谱的探测；最后，利用飞秒光梳实现由可见光频率到微波频率的转换，最终实现可直接使用的超高稳定度的频率输出。目前，开展钙离子光钟研究工作的小组除了中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(下称中科院精密测量院，原中国科学院武汉物理与数学研究所)外<sup>[2-5]</sup>，还有奥地利 Innsbruck 大学<sup>[6]</sup>、日本国家信息与通讯研究所(NICT)<sup>[7]</sup>以及法国 Provence 大学<sup>[8]</sup>等。

基本物理定律告诉我们：理想条件下(原子/离子是无干扰、静止的)，原子/离子内在能级跃迁频率是恒定不变的，不会随时间地点发生变化。但事实上，人们无法给原子/离子创造一个理想的条件，原子/离子总会感受到各种各样的外场：电场、磁场、黑体辐射场等；同时原子/离子也无法被控制到完全“静止”。上述非理想的情况都会导致原子内部能级跃迁频率发生变化。要提高光钟的准确度，需要对各种外场、原子/离子的运动进行精确的评估和控制，这些评估和控制都是十分困难的，是科学和技术上的挑战。需要坚持不断的努力才能得到突破。

对于钙离子光钟的研制而言，需要考虑的物理效应导致的系统频移包括但不限于：一阶 Zeeman 频移、二阶 Doppler 频移、电四极频移、dc Stark 频移、黑体辐射频移、ac Stark 频移、二阶 Zeeman 频移、引力红移等。

中科院精密测量院自21世纪初开始开展钙离子光钟的研究工作，至今已近20年。2005年首次

实现了单个钙离子的囚禁和冷却<sup>[9]</sup>；2009年实现了钟跃迁的探测<sup>[10]</sup>；2011年实现了国内首台光钟的闭环锁定和系统误差评估，系统不确定度达 $10^{-16}$ 量级<sup>[11]</sup>，成为国际上系统不确定度水平最高的钙离子光钟。2012年实现了 $10^{-15}$ 量级的绝对频率测量，测量数据被国际计量局时间频率咨询委员会(CCTF)采纳，参与国际钙离子光频推荐值的计算<sup>[12]</sup>。2016年，中科院精密测量院搭建了第二台钙离子光钟，同时对第一台光钟的性能进行了优化，通过两台光钟的比对，测得光钟的稳定度达到 $10^{-17}$ 量级，且两台钟的频率不一致程度也达到 $10^{-17}$ 量级以内<sup>[3]</sup>。同年，国际计量局时间频率咨询委员会再次采纳了中科院精密测量院新的频率测量数据<sup>[13]</sup>。近两年来，中科院精密测量院再次提高了钙离子光钟的性能，通过对原子参数的精确测量，提高了黑体辐射频移和微运动频移的评估精度，系统不确定度达到 $2.2 \times 10^{-17}$ <sup>[4]</sup>。同时，随着测量值被采纳，钙离子光频跃迁频率国际推荐值也被不断更新，该团队测量结果所占权重也不断增加。近期，中科院精密测量院研制的钙离子光钟的稳定度已达 $10^{-18}$ 量级<sup>[2]</sup>，这意味着该光钟能分辨出约二十亿亿分之一(1/200000000000000000，2后面有17个0)的微弱时间/频率变化，是继德国联邦物理技术研究院(PTB)研制的镱离子光钟后，第二种能达到如此高分辨能力的离子光钟。

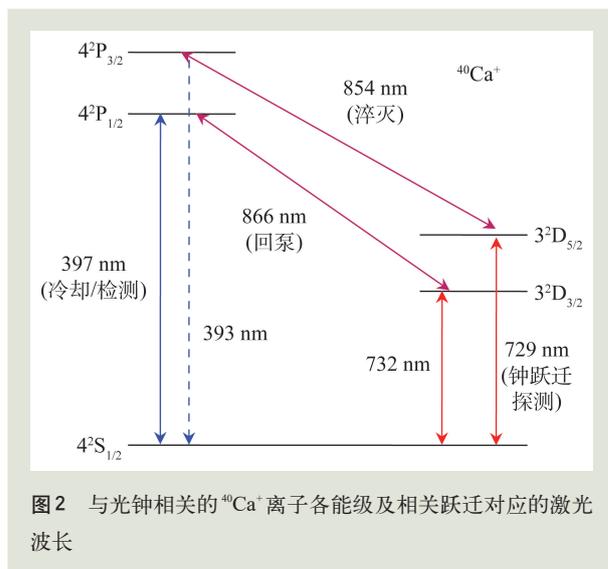


图2 与光钟相关的 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子各能级及相关跃迁对应的激光波长



图3 可搬运钙离子光钟。左图：车厢外观；右图：车厢内部

### 3 可搬运钙离子光钟

虽然在人们的日常生活中，对计时的需求不需要达到“多少亿年不差一秒”的精准程度，但由于其准确度和稳定度高，除了秒定义基准方面的应用外，还可能在基本物理常数测量、基本物理规律检验、新一代导航、相对论大地测量等方面具有重要应用。而上述很多应用都要求光钟是“可移动”的，只有实现光钟的可移动，才能极大地拓展光钟的应用范围。因此“可搬运光钟”对于光钟走出实验室，面向多种类广泛的科学应用展示了光明的前景。

但是，光钟并非大众想象的那样，是一台简单的仪器设备。事实上，光钟是一个复杂的系统，包含成百上千个具体设备和部件。一个光钟实验室里，所有的设备加在一起，才构成一台光钟。因此，由于光钟的系统复杂性，往往体积庞大、运行率低。要实现光钟的车载，需要实现光钟的集成化，让庞大的设备尽可能缩小体积、降低功耗，能放在狭小的车厢内，整合成为一台可移动的设备；同时需要提高光钟的可靠性，提高其运行率和抗干扰能力，在复杂环境下也能保证各零部件不被损坏，确保光钟搬运后的可靠运行。

要在完成光钟集成化、可搬运的同时保证较高的光钟指标，对于光钟研制而言是很大的挑战。除了尽可能缩小设备的体积、降低功耗之外，还需考虑各种外界环境的影响：相较于实验

室环境，车厢环境恶劣得多，对于光钟正常运行而言会造成较大影响。车厢环境热容较小，厢内温度波动较大；车厢置于地面时，振动较实验室环境大一个量级以上，车厢搬运过程中的振动环境更是对光钟可靠性的严重考

验。为此研究人员进行了大量的技术改进：首先，搭建了隔热较好的车厢，通过对厢内空调实现智能化控制，有效抑制了温度波动；为了解决阳光直射情况下车厢局部温度急剧升高的问题，在车厢外加上了一层热屏蔽层；温度波动小于1度，甚至比实验室环境更好。其次，为了有效降低车厢搬运过程中振动对设备的可能损坏，使用被动隔震系统对核心设备进行了振动的有效隔离；搭建可搬运的窄线宽激光器参考腔，通过精心设计的机械结构大幅降低了参考腔的振动敏感度，使得搬运后的振动环境也能够满足窄线宽激光器的需求。另外，采用了抗磁光学平台、多层磁屏蔽等手段，有效改善了光钟的磁场环境。最后，开发了半自动控制系統，能实现智能化的光钟锁定，提高了光钟的鲁棒性和运行率。以上技术改进使得高精度可搬运光钟的应用成为可能。

中科院精密测量院通过集成化设计提高了光钟的鲁棒性；研制出可搬运的超窄线宽稳频激光器；开发了一套半自动化锁定软件，使光钟的运行率达到75%以上；实现了光钟的千公里级的长途搬运，与中国计量科学研究院合作，首次将钙离子钟跃迁绝对频率的测量不确定度推进至 $10^{-16}$ 量级<sup>[5]</sup>。中科院精密测量院研制的可搬运光钟，也是继德国联邦物理技术研究院研制的铯原子光钟后，第二种实现千公里级长途搬运的光钟(图3)。

这台可搬运光钟将系统不确定度的指标提高到 $1.3 \times 10^{-17}$ <sup>[5]</sup>，相当于24亿年不差1秒，是目前国

实际上系统不确定度水平最高的钙离子光钟。在这里，“相当于多少年不差1秒”是一个描述原子钟不确定度的概念，假设我们能实现长达几十亿年的持续测量，原子钟保持计时的不确定度也不会超过1秒；由于事实上我们无法实现如此长时间的持续观测，更确切的说法是1天不差一万亿分之一秒(即 $1/10^{12}$  s)。要验证车载光钟是否达到24亿年不差1秒，需要对各种物理效应对频率的影响进行精确的测量和评估，并证明这些物理效应对原子/离子内在能级跃迁频率的影响不超过其频率的 $1/7.7\times 10^{16}$ 。与此同时，还可以通过两台独立的光钟频率比对来进一步验证光钟的准确度：就像验证两块手表的计时准确度一样，将两块手表对一下时，同时设置为某一时刻，比如上午八点钟，过一天后，再比较两块手表上显示的时间，如果两块手表都为一天不差一秒的水平，两块手表显示的时间偏差最多应不超过两秒，如果偏差大于两秒，则至少有一块表的实际水平没有达到一天不差一秒。光钟的频率比对也是一样的道理，如果两台光钟都达到了“24亿年不差1秒”，即一天不差一万亿分之一秒，简单地说，两台光钟进行频率比对，其频率差应该不会超过 $1/5.5\times 10^{16}$ 。

可搬运光钟有着很多潜在应用，这里简单介绍其中的应用之一——测地学上的应用。光钟参考跃迁频率在引力势作用下会发生频移，可为研究地球的形状和质量分布、精确确定全球地面高程网提供帮助<sup>[4]</sup>。目前，传统的大地测量方案适用于较短距离的高程差测量，不确定度高达毫米级，但对于测量相距千米两地的高程差，由于需要多次测量，不确定度被放大了分米级<sup>[5]</sup>；对于跨国两地的高程差测量，由于不同国家的海拔高度系统参考于不同的潮汐测量站，而这些测量站的参考面并不相同，导致不同国家的参考基准差别高达米量级<sup>[6]</sup>。因此，对于相距较远两地的高程差测量，通常采用卫星大地测量方法。由于卫星测量的空间分辨率仅百千米，必须结合地面测量数据来实现厘米级高精度测量，需要获得测量点附近高分辨率、高质量的引力和地形数据，

而这些数据在全球绝大部分区域是缺失的。与此同时，几何大地测量和卫星大地测量两种方法对于相距几千千米两地的高程差测量结果并不一致，测量结果有分米级的差别<sup>[7]</sup>。因此，科学家们迫切需要第三种独立测量方法，来检验上述两种方法的可靠性。早在几十年前科学家们就提出了利用光钟的比对实现两地高程差的测量方法<sup>[8]</sup>：原子的能级跃迁在引力势作用下会发生引力红移，根据广义相对论，通过精确测量两地两台光钟的频率差，就能直接推算出两地的高程差。该方法避免了传统高程测量方法中多步测量产生的误差累加效应，并且随着高精度光钟及其比对技术的不断发展，测量精度有望不断提高。在地表附近，高度每变化1 cm就对应 $10^{-18}$ 的频移变化，因此若能将光钟运用于测地学研究，有望进一步提高高程测量精度。

## 4 小结

经过短短几十年的发展，目前光钟的精度已经超过了世界上最好的微波钟，可能会在不远的将来取代铯喷泉钟成为新一代的国际秒定义参考。我国光钟的研发水平决定了我国在新一代国际秒定义的实现中的权重，意味着我国是否具有“话语权”。凭借对时间频率的超高精度测量，光钟的应用将不仅仅局限于时间标准及计量领域，在推动基础物理和前沿应用等方面也会有重要的应用。上述许多方面的应用都要求实现可搬运、可靠运行的光钟。中科院精密测量院经过二十余年的努力，已实现系统不确定度达 $1.3\times 10^{-17}$ 的可搬运钙离子光钟。尽管我国在推广光钟应用方面已经走出了重要的“第一步”，但距离实现光钟测地学应用还有较大距离：首先钟激光的稳定度和鲁棒性还待优化，长期连续锁定、 $10^{-16}$ 稳定度的钟激光可帮助实现天稳定度达 $10^{-18}$ 量级的可搬运光钟；另外光钟的总体性能无法满足测地学需求：系统不确定度需达到或超过 $10^{-18}$ 水平、易操作。通过在上述方向的进一步努力，可搬运光钟有望极大地拓宽光钟的运用范围，还可

以实现空间高精度的光钟，在基本物理常数测量、基础物理定律检验、测地学和导航等方面得到广泛的应用。

**致谢** 感谢陈群峰研究员课题组在可搬运窄线宽激光器参考腔方面的研究工作；感谢研

究生张华青、张宝林、郝艳梅、曾孟彦、王斌的辛勤工作。感谢中国计量科学研究院李天初、方占军、林戈戈、王玉琢、曹士英、梁坤、房芳的帮助。感谢叶朝辉老师的关怀、鼓励和帮助。

**参考文献**

[1] Dehmelt H. Bull. Am. Phys. Soc., 1973, 18: 1521  
 [2] Gao K L. Nat. Sci. Rev., 2020, 7: 1799  
 [3] Huang Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 013001  
 [4] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2019, 99: 011401(R)  
 [5] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2020, 102: 050802(R)  
 [6] Chwalla M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2009, 102: 023002  
 [7] Matsubara K *et al.* Opt. Express, 2012, 20: 22034  
 [8] Champenois C *et al.* Phys. Lett. A, 2014, 331: 298  
 [9] Shu H L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2005, 22: 1641  
 [10] Guo B *et al.* Frontier Physics of China, 2009, 4: 144  
 [11] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2011, 84: 053841  
 [12] CCTF-2012-(CIPM)  
 [13] CCTF-2015-(CIPM)  
 [14] Mehlstäubler T *et al.* Rep. Prog. Phys., 2018, 81: 064401  
 [15] Rebischung P *et al.* EUREF 2008 Symp.(Brussels, Belgium, 18-21 June 2008)  
 [16] Smith D *et al.* J. Geod., 2013, 87: 885  
 [17] Denker H *et al.* J. Geod., 2017, 92: 487  
 [18] Bjerhammar A. Tellus, 1975, 27: 97

## 业界领先的量子计算模拟器+云平台

### Huawei Quantum Computing





助力量子前沿技术开发



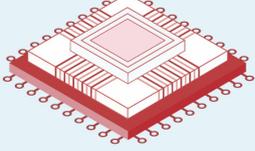
量子电路模拟  
HiQ Circuit



量子化学模拟  
HiQ Fermion



量子脉冲模拟  
HiQ Pulse



更多模块将会  
持续上线和开源发布

构建万物互联的智能世界



华为HiQ官网  
<https://hiq.huaweicloud.com>