

高精度可移动原子钟

(北京大学 朱星 编译自 Rachel M. Godun. *Physics*, February 13, 2017)

任何一位戴手表的人都享受在不同地点读出时间的便利, 或者使用它去校准不同的钟表。与此类似的是, 从事最高精度原子钟的工作人员也需要在边远地区获得时间和频率的信息。他们也需要比对世界各地不同实验室中同一时刻运行的时钟。这就需要原子钟能被移动到不同地区而仍能正常工作。然而, 当需要将原子钟移动到没有实验室可控环境, 而且将其尺寸减小到可以移动时, 人们不得不在精确度和稳定性之间寻找折中方案。现在, 德国国家计量研究院(PTB)的 Christian Lisdat 等研制成功一台可移动原子钟, 其频率不确定度达到 7×10^{-17} , 相当于 4 亿年的误差不超过一秒。中国武汉物理与数学研究所黄学人课题组也取得类似成果。他们的小型化原子钟达到类似的不确定度, 近期内也可以移动。到此为止, 可移动的原子钟的不确定度首次优于最好的微波频率铯钟的 10^{-16} , 这是目前使用中的时间基

准。这一指标与目前实验室光钟的不确定度 10^{-18} 很接近。

原子钟的节律是按照电磁波振荡运行, 其频率锁定在原子跃迁过程。光钟比微波铯钟的优越之处在于光波具有比微波更高的节律。光钟在频率稳定性和精确度方面较铯标准钟高两个数量级。这个突出表现推动国际单位制标准(SI)秒的定义从铯钟定义转移到光频标准¹⁾。但是, 在这一新单位制启动前, 我们必须用最先进的方法进行比对, 以确认世界各地光钟的可重复性。

目前, 对于不同大陆的光钟, 卫星校准方法是对时钟频率最佳的选择, 但是由于卫星连接造成的测量噪音影响时钟比较的稳定性。光纤连接方法当然很好, 但是在不同大陆之间的连接并不可行。因此, 现在由 Lisdat 和黄学人课题组所研发的可移动光钟能够在位于世界任意位置的实验室光钟之间通行, 并且进行一系列时钟比对, 其性能超过卫星连接方法和以前研发的可移动时钟。这将大大推动新的 SI 秒单位的实现。

可移动的光钟也可以用于其他很多场合。一种有趣的应用是寻找地球引力势, 依照广义相对论, 时间在不同的引力势中传播的速度不同。具有频率不确定度 10^{-17}

数量级的钟可以分辨相对于固定钟 10 cm 高度差产生的引力势变化。与其他探测相距数百公里两地高度差的方法相比较, 这个原子钟方法具有足够的竞争性。未来可移动光钟可以在不同国家校正(海拔)高度基准系统, 这对于如建设跨国大桥或者石油管线非常重要。设立于边远地区的光钟也可以用于长期的环境监测, 如测量冰山或者海平面高度的变化。

设计用于现场的坚固耐用光钟是个重要的挑战, 光钟对于环境振动和温度微小变化非常敏感。Lisdat 令人信服地展示了他们的光钟系统, 可以安装在汽车拖车内, 构成一个移动实验室。尽管 Lisdat 和黄学人课题组的光钟设计使用不同的原子体系, 但是两者都是模块式, 结构坚固, 可以抵御环境因素的影响。Lisdat 的钟使用数千个铯-87 中性原子, 而黄学人课题组的钟基于单个钙-40 正离子。其优势是激光系统简单, 因此体积小, 价格较低, 可以放入 0.54 m^3 空间中。而 Lisdat 系统采用大量原子, 因此在探测每个原子跃迁频率时获得较高的信噪比。这种铯原子钟仅通过几个探测周期就获得较低的统计噪声, 因此得到某个统计不确定度的时间比单离子原子钟快 300 倍。这一优势使得测量过程可以从几天缩短到几分钟。

更多内容详见: S. B. Koller et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2017, 118: 073601; J. Cao et al. arXiv: 1607.03731.



可移动光钟能够用于边远地区的引力势探测, 或者对位于不同实验室的原子钟频率进行比对, 其精度将优于目前使用的标准铯钟或者卫星连接方法

1) 国际单位制(SI)将引入根据自然恒量的新国际单位制: 频率、速度、作用、电荷、热容量、物质的量和发光强度, 取代现行的 7 个基本量: 秒、米、千克、安培、开尔文、摩尔和坎德拉。详见《物理》第 43 卷(2014 年)第 7 期第 468 页。——译者注