

光钟的发展和應用

管桦 黄垚 高克林

(中国科学院武汉物理与数学研究所 430071)

原子频标(原子频率标准的简称)是利用量子力学原理制成的高稳定性和高准确度的频率、时间信号产生系统(成为一个装置时又称为原子钟)。通俗地说,原子钟就像一个计时器一样,记录着时间的流逝。而今天所说的光钟,作为原子钟的一员,顾名思义,就是利用光学频率作参考的原子钟。

古语云:一日不见,如隔三秋;当描述人很紧张或难过,常用“度日如年”来形容;当我们很兴奋时,总希望时间停留在这一刻;当我们后悔做某件事时,我们又希望时间能倒流,可以避免当初的错误。这都是我们主观的感觉,现实中时间是一分一秒均匀的流逝的。我们常以“一年之计在于春,一日之计在于晨”和“一寸光阴一寸金,寸金难买寸光阴”来勉励我们自己要勤奋和努力。由此可见,时间与我们每个人都息息相关,并无处不在。大尺度可追溯到138亿年前的宇宙大爆炸,中等尺度如我们常说的斗转星移,微观尺度如皮秒或者飞秒量级的化学反应和阿秒量级的电子的运动,我们无时无刻不与时间打交道。

时间是物理学中的七个基本物理量之一,时间的基本单位是秒。许多其他物理量都可以通过时间或频率的确定来确定,如最直观的就是长度——米。根据爱因斯坦的狭义相对论,光速是恒定值,根据距离等于速度乘以时间,那么距离也就确定了。因此,在我们的日常生活和生产活动中,时间是非常重要的。

时间的流逝需要用一把尺子来度量,就像我们去菜市场买菜一样,需要规定多重为1斤。同样需要时间的计量标准,也就是我们通常所说的计时。

一、原子钟之前的计时

具有周期运动的现象能够表征时间。在古代,人类主要利用日月星辰的运行规律来计算四季更替。如地球的公转周期约为365天,月亮的圆缺周期约为30天,两者比值约为12,因此,人们选择12对一天进行细分,把一天分为子、丑、寅、卯、辰、巳、午、未、申、酉、戌、亥十二时辰,基于此规律,远古的人们发明了日晷。古巴比伦和中国分别在6000年前和3000年前开始使用日晷。但日晷的使用受到很多限制,譬如在晚上和阴天就不能使用,并随季节发生变化。



图1 中国计量院的日晷

早期的计时工具除了日晷之外,还有水钟和沙漏,原理都是利用特殊的容器记录水或者沙漏完的时间,这些计时工具在晚上或阴天也可以正常工作,且不需要经过复杂的校准;水钟或沙漏可以放在室内,使用起来较为方便,同时可以利用日晷来校准,达到和日晷相当的精度。

13世纪,欧洲的修道院中,出现了以砵码带



图2 古代水钟



图3 沙漏

动的机械钟。到了16世纪,意大利著名的物理学家和天文学家伽利略(G. Galileo)根据比萨大教堂来回摆动的长明灯,发明了单摆。1657年,荷兰物理学家和天文学家惠更斯(C. Huygens)将重力摆引入机械钟,发明了摆钟,1周的误差大概是1分钟。

随着18世纪航海时代的来临,虽然指南针和简单的天体导航方法对纬度的测量已经达到了相当的水平,但在经度测量方面仍需要提高,从而对时钟的准确度也提出了更高的要求。1761年,英国钟表匠哈里森(J. Harrison)发明了弹簧平衡擒纵轮式的航海钟,精度比摆钟提高了两个量级,达到 10^6 的水平,相当于10天才差1秒。这是计时工具首次在

导航中发挥重要作用。

1851年,美国哈佛大学天文台首次提供了授时服务,次年英国皇家天文台也开始了授时服务并独立设立了英国标准时间。这种公共的准确时间计量服务主要是为了服务于迅速发展的铁路系统,便于车辆调度和行驶。20世纪初,英国铁路工程师的肖特(W. Shortt)发明了准确度达到 10^{-9} 水平的机械钟,为英国国家铁路系统的车辆调度和行驶提供了极大的便利和支持。

19世纪末,美国贝尔实验室的工程师莫里森(W. Morrison)利用石英晶体在外加特定频率电场驱动下发生谐振的特性,制成了世界上第一台石英钟,精度达到了 10^{-8} ,标志着人类计时从机械时代跨入了电磁时代。到20世纪中叶,石英钟的精度已经达到小系数 10^{-9} 。同时,石英钟有一个比较大的优势是石英晶体体积小,可以做成小的挂钟,也可以做成手表,便于携带,现在石英表还是非常流行的手表之一。

二、原子钟的到来

20世纪初,随着量子力学的发展,科学家们发现原子分立能级之间固定的跃迁频率比天体运动规律更加适合用来做时间频率标准。1945年,美国科学家拉比(I. Rabi)首次提出利用铯原子基态的超精细结构跃迁作为参考基准的原子钟方案。1949年,美国国家标准局(NBS,美国国家技术标准局NIST的前身)的里昂(H. Lyons)以氦分子23.8 GHz的反演跃迁为参考,研制出世界上第一台原子钟。1955年,拉比当年设想的铯原子钟在英国国家物理实验室(NPL)研制成功,其崭新的工作原理和巨大的潜在优势激起人们极大的兴趣和重视。由于铯原子钟研究的发展,1967年,第十三届国际计量大会决定将无干扰的铯-133原子基态超精细结构跃迁周期的9,192,631,770倍作为新的秒定义,从此原子时正式进入了历史舞台。随着激光冷却技术与拉姆齐(Ramsey)分离场振荡技术的先后应用,以铯喷泉原子钟为代表的微波原子钟取得了飞跃式发

展,其中NPL、NIST和法国巴黎天文台等单位的铯喷泉钟精度已达到 10^{-16} 水平。

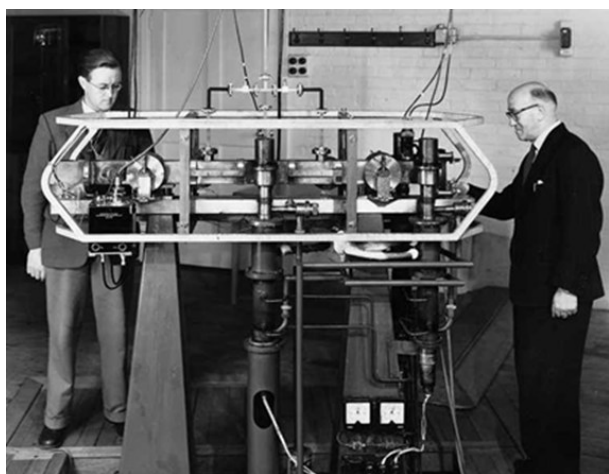


图4 世界上第一台铯原子钟

三、光钟的诞生

人类对精度的要求是无止境的。例如,汽车上装的导航系统,导航精度大约为10米,定位精度很大程度取决于原子钟的精度,如果要更精确地定位,势必需要精度更高的原子钟;应对日益复杂的交通运输、金融证券和邮电通信等国家命脉的需求,需要同步性越来越高的时间频率网络,对原子钟的精度也提出了越来越高的要求;同时,对自然规律的探索是人类永恒的主题,在物理学上有些奇妙的常数,如精细结构常数为 $1/137$,它是否真的为一个常数,还是一个随时间变化的量,不同的理论给出不同的解释,这需在实验上给出验证,而高精度原子钟之间的比对是非常有前景的检验方案之一。因此,无论是科学上,还是在人们的生产生活中,都需要发展精度更高的原子钟。

原子钟的发展与科学和技术进步密切相关。原子钟发展过程中,微波钟起了重要的作用。

微波钟的原子参考跃迁处于微波波段($10^9 \sim 10^{10}$ Hz),而光波段($10^{14} \sim 10^{15}$ Hz)比微波波段高4~5个量级,科学家们很自然地想到是否可以采用原子的光学跃迁作参考,制成精度更高的原子钟。

光钟的概念由美国华盛顿大学的德默尔特(H.

Dehmelt)在1975年提出。然而,要实现光钟,需要解决工作物质(原子或者离子)的长时间囚禁和冷却、超窄线宽钟跃迁探测光的实现以及光频测量等问题。

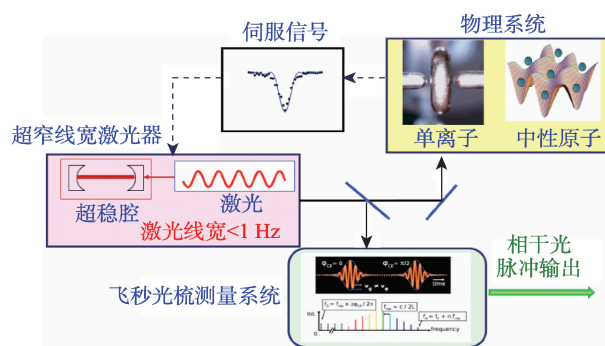


图5 中性原子或单离子光钟结构图

目前采用的原子光钟有两种原子体系:一是囚禁冷却的中性原子团,二是囚禁冷却的单离子。

离子阱可利用射频场将单个带电离子约束在超高真空中,使被研究的原子体系处于几乎孤立的不受“干扰”的环境,并且有很长的囚禁时间以便“观察”,是研究原子特性的理想手段,特别有利于原子钟的研究。

首先是离子囚禁方面,1936年,美国科学家彭宁(F. Penning)在电子放电实验中,在轴向施加磁场以增加放电电子运动路径的长度,这是彭宁阱的雏形。1953年,德国物理学家保罗(W. Paul)发明了无磁场的四极质量过滤器,从而引发了质谱领域的革命。几年后,基于射频电场的离子阱被发明并被命名为保罗阱。1959年,美国科学家德默尔特创建了世界上第一个采用磁场加电场囚禁带电粒子的离子阱,并将其命名为彭宁阱,离子阱的发明使得长时间囚禁单个带电粒子成为可能。德默尔特和保罗因为离子囚禁方面的贡献,与发明分离振荡场的拉姆齐共同获得了1989年诺贝尔物理学奖。

在离子冷却方面,较为传统的是缓冲气体冷却,离子冷却之后的温度取决于缓冲气体的温度,只能到室温左右。激光的发明使科学家们思考采用激光进行离子冷却的方案。1975年,德国科学家汉斯(T. Hänsch)和肖洛(A. Schawlow)以及美国科学

家瓦恩兰(D. Wineland)和德默尔特分别提出了激光冷却离子的方案,并在1978年实现了Ba⁺和Mg⁺激光冷却。

离子光钟采用单个囚禁冷却离子作为工作物质,没有采用多离子的原因是离子之间会有库伦相互作用,运动效应会造成谱线增宽。但单离子的信噪比是比较突出的问题,因为光钟的稳定度与原子数有关,原子数越多,同样的取样时间内获得稳定度越高。

由于中性原子不带电,不能像离子一样采用射频场囚禁,需要利用磁光阱或者光晶格进行囚禁,如果采用光晶格囚禁原子,囚禁的原子不受相互碰撞及外界环境的干扰,同时由于原子在光晶格中移动的范围小于光波长,可以消除一阶多普勒频移;然而,光场会引起原子的交流斯塔克效应,如果使用“魔术”波长(即激光对原子光频跃迁的基态和激发态的交流斯塔克频移相等)来构成光晶格,这样原子钟跃迁频率保持不变。基于此,高精度的光晶格原子钟才成为可能。

原子钟跃迁探测光的超窄线宽和高的稳定度是冷原子光钟需要攻克的关键技术之一。一般选择的光频跃迁的自然线宽在Hz量级,这样需要一个亚赫兹量级线宽的超稳激光源,品质因子(Q值)要达到10¹⁵量级。

国际上广泛采用庞德(Pound)德雷弗(Drever)霍尔(Hall)(PDH)稳频方法得到线宽为亚赫兹量级的激光器(图6),通过伺服系统将激光频率锁定到超高细度的光学谐振腔上来实现,该光学谐振腔由超低膨胀系数(ULE)材料制成并被放置于温度非常稳定、环境噪声极小的环境中。

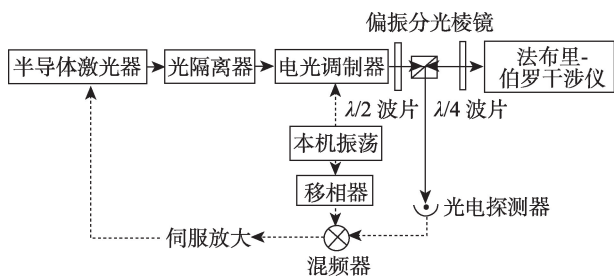


图6 PDH稳频方法原理图

激光稳频需要一个精细度极高、同时稳定性很好的参考腔,目前采用超低膨胀系数的参考腔。这类腔主要由ULE材料制成。整个光学谐振腔被放置在一个真空室内,进行温度控制和振动隔离。

1999年,NIST用PDH方法锁定了激光器,并用几根长为3米的橡皮拉力带将整个真空室垂直吊起,首次将激光的线宽压缩到亚赫兹量级。

而美国天体物理联合实验室(JILA)将光学谐振腔垂直支撑,使腔的光轴方向垂直,并且把支撑点选择在通过腔体重心的水平面上,此时总的腔长对垂直方向的振动不敏感。由此也可将激光的线宽压缩到亚赫兹量级。

最新的进展是:JILA选用硅腔,实现了线宽达到几十mHz的稳频激光。

在光频测量方面,由于一般的电子设备都只能测量微波频率的信号,因此需要把光频率转化成微波频率甚至更低的频率才能读出光波频率,科学家们提出了频率链的方案将光学频率一步步向微波频率进行传递,将待测的激光频率经过差频、和频以及拍频等手段逐步与微波频率联系起来,由于传统的光频测量采用很多激光器的拍频和和频产生,非常复杂、体积庞大,同时只能测一个光学频率,使用起来非常麻烦,还需要庞大的经费支持,世界上仅有少数几个实验室有这样的条件。随着20世纪90年代钛宝石激光器的克尔棱镜锁模技术以及超短脉冲钛宝石飞秒激光技术的发展,飞秒光学频率梳(简称飞秒光梳)得以诞生,飞秒光梳就像一把梳齿均匀的梳子一样,每根梳齿代表一个光学频率。1999年德国马普研究所的汉斯利用自锁模的飞秒激光器研制出飞秒光梳。同年,JILA的霍尔(J. Hall)等人研制出了自溯源的飞秒光梳装置。飞秒光梳的诞生使得从可见光频率直接向微波频率的传递得以实现,可以取代原来的光频链用于光钟中钟跃迁频率的测量,并且可以产生波长范围很宽的激光,从而实现多种光学频率的测量。由于在精密激光光谱和飞秒光梳领域的突出贡献,霍尔和汉斯获得了2005年的诺贝尔物理学奖。

目前,离子光钟的候选离子有 Ca^+ 、 Sr^+ 、 Ba^+ 、 Yb^+ 、 Hg^+ 、 In^+ 和 Al^+ 等。不难看出候选离子分为两类:一类以 Ca^+ 、 Sr^+ 、 Ba^+ 、 Yb^+ 、 Hg^+ 为代表,其核外都只有一个价电子,均为类氢离子,能级结构比较简单。而另一类是 In^+ 和 Al^+ ,为什么选他们呢? 对于 In^+ 和 Al^+ ,由于光频跃迁 $5^1\text{S}_0-5^3\text{P}_0$ 的基态和激发态的电子的总角动量都等于0,因此其交流斯塔克频移和相对论时间膨胀频移非常小。可望成为高性能的光钟。同时提醒大家注意的是 $^{171}\text{Yb}^+$ 的 $6\text{s}^2\text{F}_{7/2}$ 的自然寿命约为3700天,因此,电八极钟跃迁 $6\text{s}^2\text{S}_{1/2}(F=0)-6\text{s}^2\text{F}_{7/2}(F=3)$ 的谱线的Q值达 10^{24} ,是目前已知的所有光钟参考谱线中最高的。

2000年,NIST的科学家瓦恩兰小组实现了第一台光钟-Hg⁺光钟。

在中性原子光钟领域,国际上开展了Ca、Yb、Sr、Mg和Hg等原子光钟的实验研究。

目前,光钟不确定度指标和稳定度指标均进入了 10^{-19} 量级。其中不确定度指标最高达到了 9.5×10^{-19} (Al^+),相当于330亿年不差一秒,时间尺度比宇宙的年龄还要长。美国JILA的叶军小组的Sr光钟和NIST的奥兹(C. Oates)小组的Yb光钟的稳定度指标分别达到了 6×10^{-19} 和 3.2×10^{-19} 。

四、光钟在中国

光钟的研究在我国达到了高度重视和广泛关注。在国家基金委重大研究项目和国家基础重大

项目(973)支持下,我国及时开展了光钟的研究,如中国科学院武汉物理与数学所(Ca^+ 离子、 Al^+ 离子和Yb原子)、华东师范大学(Yb原子)、中国计量科学研究院(Sr原子)、中国科学院国家授时中心(Sr原子)、清华大学(Ba^+ 和 In^+ 离子),和中国科学院上海光机所(Hg原子)、国防科技大学(Hg^+ 离子)、华中科技大学(Al^+ 离子)等。当前,已实现了 Ca^+ 离子、Sr原子和Yb原子光钟。实现了 Al^+ 离子的量子逻辑谱读出,开展了Hg原子和 Hg^+ 离子的激光冷却和光谱的初步测量实验。此外,在主动光钟研究方面,北京大学也取得了突破。

2001年,中国科学院武汉物理与数学研究所的囚禁离子物理研究团队开始了钙离子光钟的探索,开展了关键物理和技术攻关。在2004年实现了单个钙离子的囚禁,并第一次观察到了单个钙离子的荧光信号。通过对环境的改进和离子运动效应的克服,有效提高了离子囚禁能力,单个钙离子的连续囚禁时间可达2个月以上。

同时,该团队开展了光钟核心技术之一的超窄线宽激光器的研究,采用前面介绍的PDH方法将一台钛宝石激光器的频率锁定到一台超稳定的法布里-泊罗干涉仪上,获得了用于钙离子钟跃迁探测的超窄线宽激光。

基于以上两个重要突破,2011年,该团队成功将729 nm钟跃迁激光器的频率锁定到钙离子钟跃迁参考跃迁频率上,实现了钙离子光钟的锁定,该

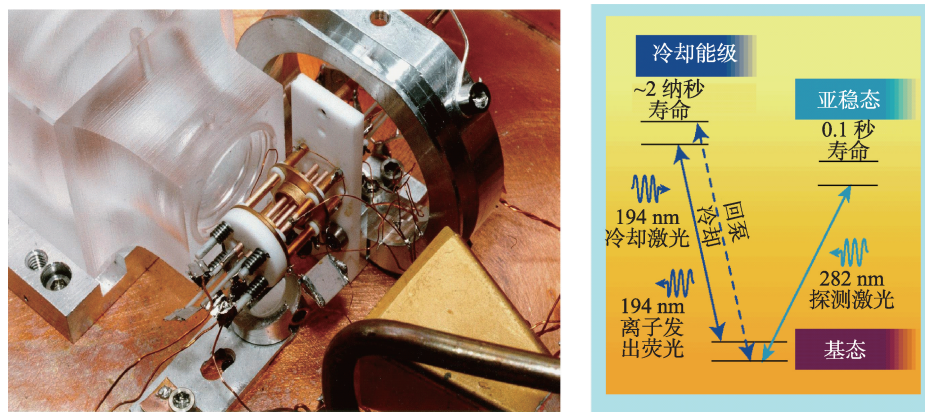


图7 NIST的汞离子光钟

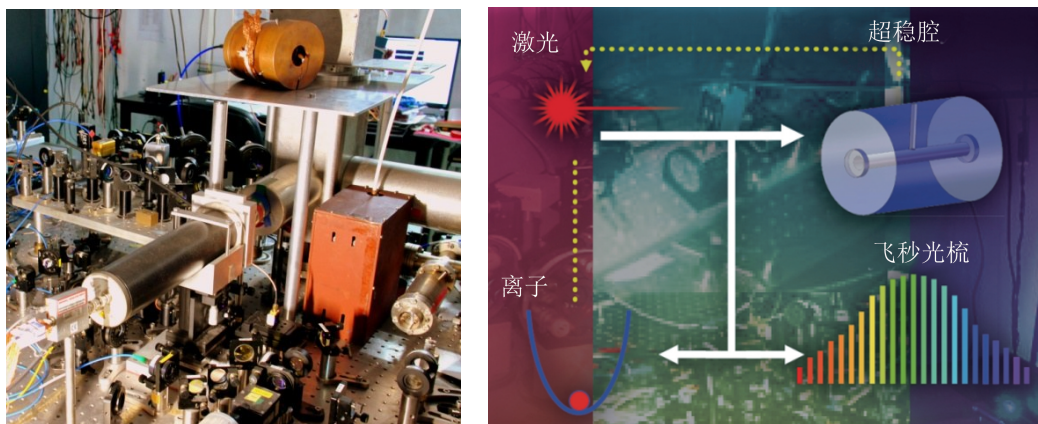


图8 中国科学院武汉物理与数学研究所的钙离子光钟

钙离子光钟的实现标志着国内首台光钟的诞生。

随着研究的深入,钙离子光钟的性能不断提高,目前,钙离子光钟的不确定度达到了 2.0×10^{-17} ,相当于15亿年不差一秒。另一个重要指标-稳定度达到了 7×10^{-18} ,为目前离子光钟的最好水平。

同时,该团队在没有本地基准钟的条件下,采用基于全球卫星导航系统(GPS)远程溯源的高精度光频绝对值测量方案,两次测量了钙离子光频跃迁绝对频率,绝对频率测量值三次被国际计量局时间频率咨询委员会(CCTF)采纳,随着测量值被采纳,钙离子光频跃迁推荐值也被不断更新,该团队测量结果的占权重也得到大幅增加。

五、光钟应用

1. 计量标准

光钟的一个重要应用就是定义时间。现在时间的基本单位-秒是定义在微波段铯原子基态超精细结构跃迁。目前,光频的测量精度已接近或超越目前用于“秒”定义的铯原子频率基准的精度。在2006年召开的国际计量委员会(CIPM)上第一次确定了汞离子、铯离子和镱离子的电四极跃迁和铯原子的光学跃迁频率作为国际单位制“秒”的次级定义,所谓次级定义,就是未来有可能作为秒的新定义;2009年国际计量委员会再次确定了上述“秒”定义的次级标准;2012年国际计量委员会又增加了铝离子和镱离子的电八极跃迁和镱原子的光学跃迁

频率作为“秒”定义的次级标准。2015年国际计量委员会再次确定了汞离子、铯离子和镱离子的电四极和电八极跃迁、铝离子、铯原子和镱原子的光学跃迁频率作为“秒”定义的次级标准,2017年又增加了汞原子作为“秒”定义的次级标准。

随着光钟的精度不断的提高,科学家们正在讨论2026年重新讨论秒的定义。

2. 物理量的精密测量和物理规律的检验

原子钟选择的原子或离子跃迁依赖于基本物理常数:如精细结构常数、电子和质子质量比和轻夸克质量等。

光钟跃迁通过对跃迁频率的相对论修正与精细结构常数相关联。不同元素的原子性质不同,对物理量的依赖程度和变化的敏感程度不同。因此不同元素的绝对频率测量可用于测量精细结构常数和质子电荷比可能的随时间变化。

2004年,德国联邦物理研究院(PTB)比较了镱离子光钟和铯原子钟微波的频率。为了降低统计不确定度,测量了两台原子钟两周之内的平均频率,并花了一年时间改进它们,然后重新测量了频率。数据显示精细结构常数的变化幅度不超过每年一千万亿分之二,这个限制仍然大约为Webb望远镜从遥远星系观测得到的精细结构常数变化幅度的两倍。

2008年,NIST的研究者利用两种不同囚禁离

子(汞离子/铝离子)光频的连接和比对测量了精细结构常数随时间的变化,上限推至为 10^{-17} 量级。2014年PTB的团队基于对镱离子钟两个光频跃迁的比较测量和铯原子钟的观测,把精细结构常数随时间变化的上限进一步减小,到目前为止,依旧未能在实验室内观察到精细结构常数随时间的变化。

3. 相对论及大地精密测量

原子钟可用于物理量随时间和空间的变化和与重力场的耦合。结合天体观测和其他测量可以揭示宇宙的起源等。高精度的光学原子钟已经能比现有方法更精确地测量地球表面时空的引力扭曲。因此可用于检测广义相对论,开展重力场的测量和引力势的测量。

比较不同地点的光钟,可以得到由于地球转动和相对高度导致的相对时间流逝变慢效应。给出不同地方的高度差等。结合重力仪测量的重力势和光钟提供的引力势,可以导出在地球探测中对此地的尺寸和密度的确定。

一台精度达到 1×10^{-17} 的光钟可用于测量10厘米高度差的引力势,测量引力红移。2018年5月,德国PTB小组实现了首台可搬运(车载)的铯原子光钟与阿尔比斯山90 km外的位于意大利的镱原子光钟的比对,测得的引力红移在 10^{-13} 量级。

NIST研制的Yb光钟和JILA的Sr光钟测量不稳定度均进入了 10^{-19} 量级,已经可以确保大地水准面测定不确定度小于1厘米,远超现有技术。这将大地水准面的精密测量推进到一个新时代。

4. 光钟的空间应用

光频比微波频率高4~5个量级,由此可增加频率的精度和带宽(携带信息的能力)。可以预计,发展空间光钟可以对现有的GPS系统进行改进。加强深空通信和导航的能力。

在导航领域,将光钟应用到卫星导航系统的地面和空间部分,卫星钟的预报精度可以提高2~3个

数量级,这将大大减少对时钟参数定期更新的依赖,从而给导航系统的空间节点提供更高的自主权。

在地球观测领域,空间光钟能够在测地学和遥感大气灵敏探测方面获得应用,地球的重力势(精度达到厘米量级)测量能应用于土木工程及建筑、石油及天然气勘探。引力势的长时间测量也用于监视冰层质量、洋流变迁和洋流的总体质量的季节性和长期趋势。

建立高精度的空间光钟可开展在不同地点和不同原子钟的比对实验,精确测量时空特性。如:空间钟在远地点(Apogee)和近地点(Perigee)处的反复比较;地面和空间(远地点)钟的绝对比较;地面钟的比较。可在更高精度上研究洛仑兹(Lorentz)不变性:如光的各向同性等,进一步验证爱因斯坦的相对论理论,与位置相关的重力红移(如地球引力时间膨胀、太阳引力时间膨胀以及重力时间膨胀),基本物理常数随时间和空间的变化,以及标准模型的物质反常耦合等。

目前,各国都在发展空间光钟。欧洲提出的空间光钟计划中,布局了两种离子光钟(铯离子和铝离子)和两种光晶格原子钟(铯原子和汞原子)。

下一代原子钟对引力的相对论效应非常灵敏,甚至可以用作引力波探测器-测量引力波、寻找暗物质,加深我们对世界的认识 and 了解。

