

文章编号: 1000-8349(2007)02-0161-08

空间钟与基础物理测试

翟造成

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 原子钟当前已经发展到很高的水平, 它们在空间科学试验中发挥了重要的作用。该文介绍了世界上正在开展的高精度空间钟计划及其对科学测量的意义。对应用空间钟可能进行的某些感兴趣的基础物理测试也进行了描述。

关键词: 天文观测设备与技术; 空间钟; 综述; 基础物理; 测试

中图分类号: TN82 ; P111.44 **文献标识码:** A

1 引 言

现代物理学的发展改变了人们的传统概念。一些理论上的预言需要通过科学试验进行验证。目前已经提出和正在进行的某些科学项目, 如爱因斯坦相对论的验证、包括重力理论在内的相对论测试以及天体物理学领域的某些课题、所建议的深空飞行以进行太阳重力场分布的测量、重力波检测以及轨道 VLBI 阵、月球探测等, 都是空间科学试验的活跃课题。由于现代物理学的科学试验所观测的物理量的变化非常小, 其测量的准确度通常受到人类掌握时空尺度的水平及相应环境的限制。空间科学试验能够提供提供一个理想的实验环境, 它可以摆脱大气和电离层所强加的观测限制。随着空间技术的发展和与之平行发展的微波和激光通信技术的应用, 为在太阳系中的空间探测器上进行这些空间科学试验创造了条件。这些技术的应用和科学实验本身都涉及人类掌握时空尺度的水平, 其中对时间尺度的要求就是必须要有频率稳定性和准确度都好于 1×10^{-15} 的高稳定度的钟。但就目前而言, 尚没有哪一种标准能够同时满足准确度和稳定度等全性能指标。几年前, 一类准确度性能比传统原子钟高得多的新型频标——冷原子钟的研制成功, 在原子频标领域产生了重要影响, 另外, 氢脉泽标准迄今为止仍是国际公认的中期频率稳定度最高的标准。为了满足空间科学试验的需要, 人们着手整合不同种类原子频标的各自优势, 将它们组合成一个各项性能指标都较好的新型频标。

高性能组合空间原子钟将使包括地面和空间在内的许多应用获益。组合钟优秀的全性能指标能够用于解决时间、导航、地球动力学, 测地及地球大气物理以及天体物理学等各个领域的一系列科学和应用问题。这些应用包括:

收稿日期: 2006-03-16 ; 修回日期: 2006-07-12

基金项目: 中国科学院重大方向性项目 (KG CX2-SW-T12)

- 1) 国家主要守时单位在 100 ps 水平上的时间同步;
- 2) 全球通信和导航系统的同步和协调;
- 3) 应用空间和月亮终端的极长基线 VLBI 技术的天文学和天体物理学的研究;
- 4) 为引力波检测设置空间终端阵;
- 5) 发射太阳系深空探测器以进行相对论引力测试等。

组合钟的高稳定度在这些方面将发挥重要作用。本文介绍世界上正在开展的高精度空间钟计划及其对科学测量的意义,也介绍了高精度的空间钟在某些感兴趣的基础物理测试方面可能的应用。而对于小型、相对较低性能指标的星载钟,在这篇文章中将不涉及。

2 高精度空间原子钟计划^[1]

2.1 简述

自从 1974 年,世界上第一台空间钟研制成功并用于空间飞行后,利用空载原子钟进行空间飞行的科学研究十分活跃。空间原子钟已成为卫星导航系统的频率标准。随着空间技术与科学实验的发展,某些测量量要求时频标准的稳定度和准确度必须达到 10^{-16} 。研制高精度的原子钟用于空间目的就被提到议事日程上来。特别是 1976 年 6 月美国 NASA 和 SAO 成功进行的重力红移实验证实了将具有极高稳定度的氢钟送到地球轨道上工作的可行性。从此包括氢钟和冷原子钟在内的空间钟研制工作日趋活跃,国外已建议和正在开展一系列用于空间科学试验的高精度空间钟计划。

近年来,美国 NIST/JPL 的 PARCS(Precise Atomic Reference Clock in Space) 计划以及欧洲正在进行的 ACES(Atomic Clock Ensemble in Space) 计划,其有效载荷包括一台冷铯原子微重力钟和一台氢脉泽钟。两个钟互“锁”在一起,构成一个准确度和稳定度均为 10^{-16} 的极

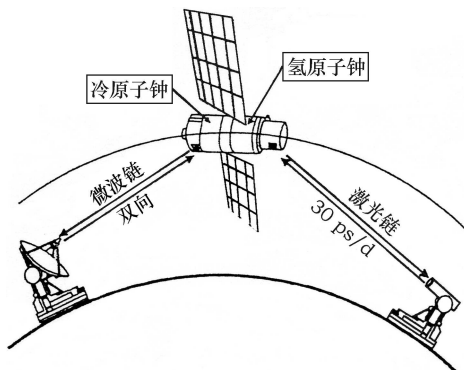


图 1 高精度空间原子钟计划示意图

高性能的组合原子基准。它们装置于国际空间站 (ISS) 上,利用微波通信链和激光链 (T_2L_2) 与地面用户进行时间和频率传递与比对。图 1 为其示意图。空间组合原子钟的极高稳定度和准确度以及两个高性能的通信链,能以很高稳定度使空间钟与地面钟进行时、频比对而很少受大气传播效应的影响。这个系统每天 30 ps 的时间比对精度,使它不仅成为全球共享的极高精度的轨道时频基准,也为利用空间科学试验进行某些基础物理测试提供了有效的途径。

2.2 高精度的空间钟

美国的 PARCS 计划和欧洲正在开展的 ACES 计划,拟采用铯原子鉴频器 (冷原子钟,准确度为 1×10^{-16}) 作为空间钟;而其本机振荡器 (即飞轮振荡器) 则采用频率步进调节分辨率为 10^{-17} 的氢原子钟。两者“锁”在一起组合成新型组合原子钟以满足这些计划的要求。这种组合原子钟计划于 2008 年载于国际空间站 (ISS) 上,作为全球共享的高精度国际轨道时频基准。

微重力冷原子钟的原理如图 2 所示。位于顶部的光学盒,通过光纤把激光束导入类似铯

束管的真空器件, 以制备超冷原子样品、发射和探测信号原子。冷原子云被收集于左边汽室内, 并冷却至约 $1 \mu\text{K}$, 然后发射到右边探测室。当它们进入谐振腔时, 相继两次与微波场相

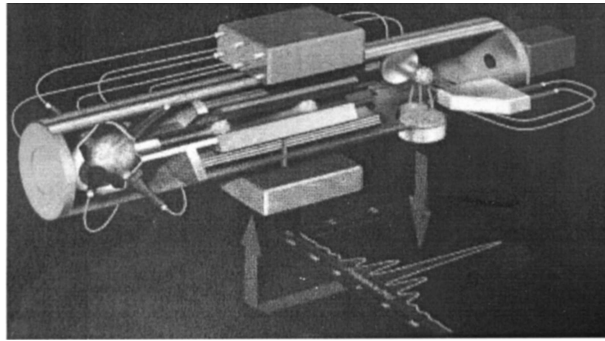


图 2 冷铯原子钟原理示意

互作用, 激发 Ramsey 谐振。用荧光探测已跃迁和未跃迁原子, 可得到 Ramsey 谐振信号, 利用它即可把主控振荡器的频率锁到铯原子的跃迁频率上。相对于铯原子 5 cm/s 的发射速度, Ramsey 共振线宽仅 0.1 Hz , 相当于地面铯喷泉的线宽的 $1/10$ 。这使它的准确度好于 1×10^{-15} , 稳定度达 10^{-16} (10 d), 成为当今最准确、长期稳定度最好的原子钟。

氢脉泽的工作原理如图 3 所示。氢原子束源发射原子到六极能态选择器中, 被选出的高能级氢原子进入位于谐振腔中的储存泡中与调谐频率约为 $1\,420\,405\,751 \text{ Hz}$ 的微波场相互作用。由于储存泡原理的作用, 使原子与这个场相互作用时间长至 1 s , 从而谐振宽度仅 1 Hz 。这使它的稳定度达到 1×10^{-15} ($10^3 \sim 10^4 \text{ s}$), 成为中期频率稳定度最好的标准。然而由于储存泡涂层复现性差, 氢脉泽的准确度仅为 1×10^{-12} 。氢脉泽的价值仅在于它的稳定度好。

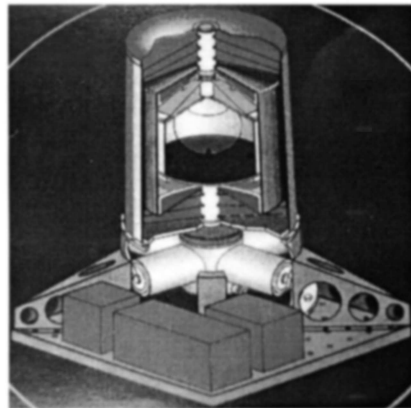


图 3 氢原子脉泽原理

由上可见, 两种原子钟各自的优点都很明显, 可以互相取长补短。高精度空间钟采用如图 4 的方式将两者“锁”在一起, 构成一个各种性能都很好的组合原子钟。

2.3 高精度空间钟的性能

高精度空间钟计划中的组合原子钟所预期的性能如图 5 所示。氢原子脉泽不受微重力的影响, 而铯冷原子鉴别器则利用微重力环境工作。由图 5 可见, 在 $10 \sim 1\,000 \text{ s}$ 取样时间内, 氢脉泽的频率稳定度好于冷原子钟, 而取样时间超过 $1\,000 \text{ s}$ 时冷原子钟的频率稳定度好于氢脉泽。对于 1 s 取样, 铯冷原子钟的稳定度可达 1×10^{-13} ; 对于 1 d 取样, 则为 3×10^{-16} ; 10 d 取样则为 1×10^{-16} , 其准确度好于 1×10^{-15} 。而由于氢脉泽具有优秀的中期稳定度, 它可以用来评价影响冷原子钟准确度的各种频率偏差, 并以 7×10^{-17} 的频率分辨率受锁于冷原子钟, 从而获得高准确度和短、中、长期稳定度等皆优的各项性能指标。在高精度空间钟中, 冷原子钟

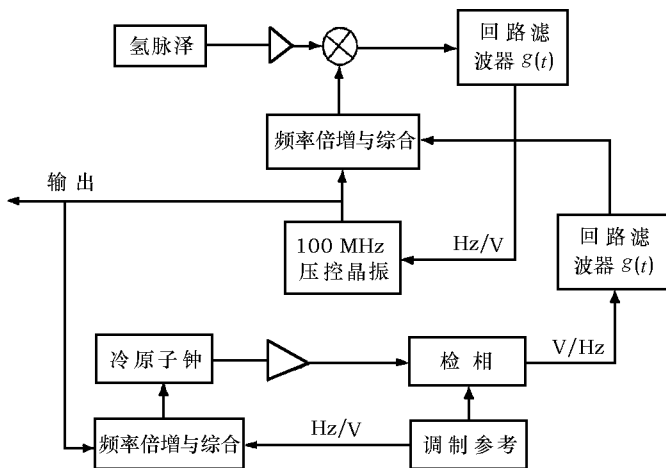


图 4 冷铯钟控制氢钟的组合原子钟系统

决定了其准确度和长期稳定度指标，而氢脉泽则决定其短、中期稳定度指标并提供有用输出。

2.4 高精度空间钟计划的目标

高精度空间钟计划的首要目标是以非常高的稳定度 (10^{-16}) 的组合原子钟建立全球共享的最高精度的轨道时间尺度，采用 T2L2 和 MWL 两种通信技术，进行空间钟与地面钟、地面钟与地面钟之间以 30 ps 的精度进行时间比对和以 10^{-16} 的相对准确度进行频率比对。这将比目前应用的 GPS 比对技术改善 100 倍。

该计划的第二个目标是，以高精度水平进行某些基础物理测试。重力红移测量将达到 3×10^{-6} 的准确度，比 1976 年 NASA 的 GP-A 测试改善 25 倍。精确测试光速的各向同性以及寻找基本物理常数——精细结构常数 α 的可能的漂移变化也将成为可能。

对于引力场和广义相对论的验证、精密轨道测定等许多科学目标，高精度空间钟也将可以发挥重要的作用。

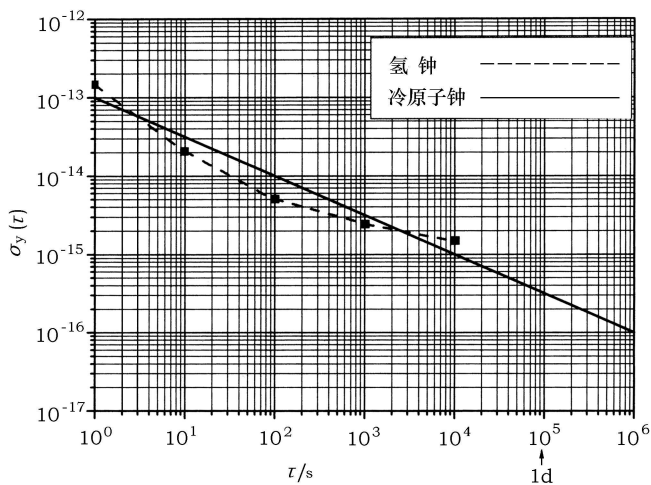


图 5 高精度组合空间钟性能

3 钟的性能对空间测量的意义

在空间和天体物理测试中, 高稳定度的钟也用于通过多普勒和雷达技术测距和测速^[2,3]。钟的稳定度对测速的影响可由一阶多普勒表达式 $f' = f_0 \left(1 \pm \frac{\dot{r}}{c} \right)$ 给出, 这里 f_0 是发射频率, 而 \dot{r} 是速度沿发射机和接收机连线方向的分量。用 $\sigma_y(\tau)$ 表示钟的稳定度 $\frac{\Delta f}{f_0}$, 则测速的准确度为 $\sigma_{\dot{r}}(\tau) = c\sigma_y(\tau)$ 。若 $\sigma_{(\tau)y} = 6 \times 10^{-16} (1 \text{ h})$, 对于 3 600 s 取样时间所进行的速度测量, 来自钟的预期误差为 $\sigma_{\dot{r},3600} \approx 1.8 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 。钟的稳定度对测距的影响, 可以从 $\sigma_{\Delta r}(\tau)$ 给出的时间弥散测量得到。由 $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{\Delta \tau}{\tau}$, 则相邻的时间间隔 τ 中时间弥散的 1σ 期望值 $\sigma_{\Delta \tau}(\tau)$, 可以由关系式 $\sigma_{\Delta \tau}(\tau) = \tau\sigma_y(\tau)$ 得到。因此, 距离弥散是 $\sigma_{\Delta r}(\tau) = c\tau\sigma_y(\tau)$ 。对于每次进行 1 h 相邻的距离测量, 应用以上给出的稳定度数据, 测距误差大约为 1 mm。测距、测速和时间方差与 Allan 方差 $\sigma_y(\tau)$ 的关系如图 6 所示。通过以上的讨论也就得到了利用高精度空间钟在空间测量中所期望达到的灵敏度。

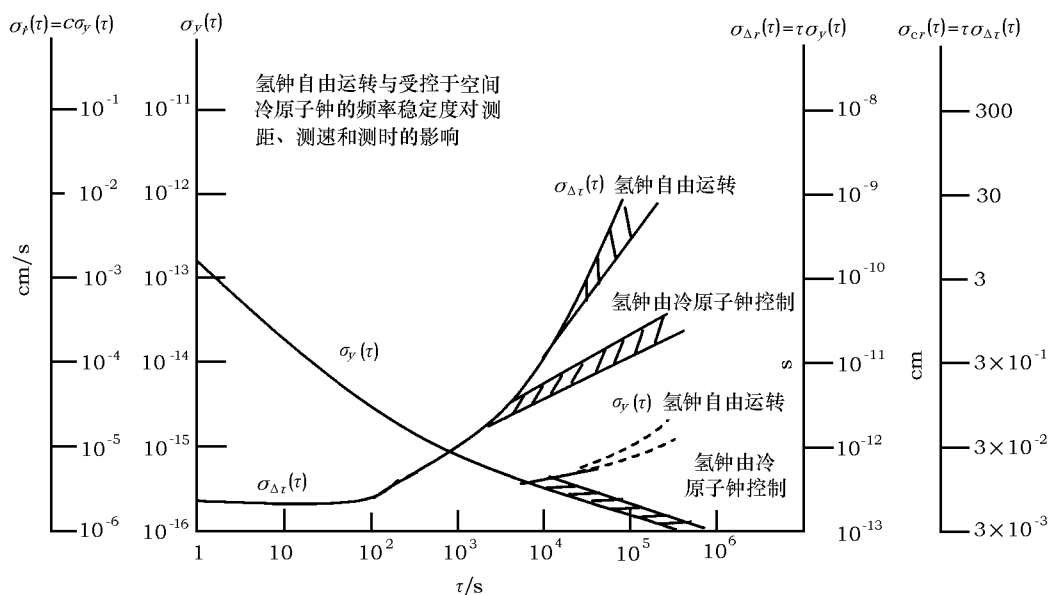


图 6 空间组合原子钟的性能和对空间测量的影响

4 某些基础物理测试^[1]

4.1 重力红移的测量

爱因斯坦等效性原理的直接结果是: 在一个引力势 U_s 处的辐射源对在另一引力势 U_0 处的观测者来说, 它的频率偏移了 $\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta U}{c^2}$ 的量。这里 $\Delta U = U_s - U_0$ 是源“S”和观测者“0”位置之间的重力势之差。Pound 和 Rebka^[4] 在 1960 年应用 Mossbauer 效应对这个重

力势效应进行了实验室直接测定。结果证实,与广义相对论的预言符合到 $\pm 1\%$ 的精度。对重力红移最精密的测量是 Vessot 和 Levine^[5] 于 1976 年所进行的 GP-A 实验。

高精度空间钟计划 (ACES) 红移测量将应用不同的技术。与 GP-A 实验改变卫星高度来变化红移的做法不同, ACES 将应用高准确度的冷原子组合钟 (准确度为 10^{-16}) 和地面钟 (准确度为 10^{-16} 或更好) 去进行空间钟和地面铯喷泉钟之间的频差的“绝对”测量。由于精确知道空间站 (ISS) 的轨道参数 (位置和速度), 地面钟和空间钟之间的频差可以被测量和计算并与理论值进行比较。因为 ISS 轨道随时间而缓慢变化, 则引力红移也将被调制变化, 但其变化仅大约为它的大小的 10%。如果频率比中所应用的地面钟和空间钟均具有 10^{-6} 的准确度, 并且如果通讯链没有降低钟的性能, 则爱因斯坦效应可以被测定到 3×10^{-6} 的相对精度。这个结果比 GP-A 实验要好 25 倍。

4.2 寻找精细结构常数可能的时间变化

精细结构常数 $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c = 1/137.035\ 989\ 5\ (61)$ 表征原子或分子中的电磁相互作用的强度。

1937 年狄拉克就建议验证物理基本常数是否会随着时间而变化。长期以来人们为了研究这个问题已经以高精度进行了大量的努力。像在重力的度规理论中那样, 在广义相对论中非重力常数的时间变化是被禁的。这是爱因斯坦等效性原理的一个直接结果。但是一些现代理论预言存在新的违背爱因斯坦等效性原理的相互作用。例如 Damour 和 Polyakov^[6] 预言基本常数存在随时间的变化, 特别是精细结构常数。

在为检查等效性原理所设计的大量实验中, 利用空间环境 (STEP) 和高稳定度的钟进行研究的方法已有很长历史。ACES 钟和地面冷原子钟的高稳定性和高准确度, 能够使我们利用原子频率来检验 α 的漂移。与类星体光线被星际云的吸收等天体物理测试相比, 实验室测试可以在不同的位置重复进行, 且可利用交叉检测达到相当高的精度。

正在进行的这些测试的原理是将基于不同元素的原子钟的频率作为时间的函数进行比较, 两个钟之间的频率差的任何变化都可能归因于基本常数的变化, 当然, 也存在钟的长期性能不完美等因素。因此为了进行可令人信服的测试, 必须使用大量的钟并且对测量数据进行交叉相关。ACES 的出现将能够为世界上许多实验室的钟提供这种研究条件。这将包括许多基于不同元素 (例如铯, 铷, 氢, 汞离子, 镱离子等) 的原子频率标准。这些频率标准有的工作在微波范围 (如 Cs、Rb 喷泉、H、Hg⁺、Yb⁺、Cd⁺……钟), 有的工作在可见光范围。

对具有原子数 Z 和在微波范围有超精细跃迁的碱金属原子, Tjoelker 和 Maleki^[7] 从超精细能量作为 Z 的函数计算了 α 的可能的漂移效应。计算结果表明, 在高 Z 值情况下超精细能量的相对论修正相对显著。如果能得到不同的 Z 数的两种 (或多种) 原子的超精细能量之间的比值, 就能得到 α 不变性测试的灵敏度。例如, $(d\alpha/dt)/\alpha = 1 \times 10^{-14}/a$, 则 Cs 钟 ($Z \approx 55$) 和汞离子钟 ($Z = 80$) 之间将产生 $1.4 \times 10^{-14}/a$ 的频率漂移。对于 Cs 和 Rb ($Z = 35$), 这个值是 $0.45 \times 10^{-14}/a$ 。至今最好的实验室测试是基于铯喷泉和铷喷泉之间的比对, 并且给出的上限是 $\frac{d\alpha}{dt}/\alpha < 6.9 \times 10^{-15}/a$ 。由于 ACES 的铯喷泉钟和地面铷喷泉钟有一个预期的 10^{-16} 的准确度, 则任何频率漂移都可以以 $\sqrt{2} \times 10^{-16}/a$ 的分辨率被测定出, 给出每年有 20 倍的改善。对于一个 3 年的飞行, 则得到的增益将接近 100。超精细能量的相对论修正对 Z 值的依赖性意味着 α 的漂移 (如果发现的话) 将是明确存在的。这一发现对于了解物理基本常数是否会随着时间而变化将是一种突破, 具有着深远的意义。

4.3 光的各向同性

对于测量单向信号传输的某些类型的实验, 经常使用一种基于参数 $\delta c/c$ 的简单测试理论。在这种情况下, 遥远的钟是用缓慢钟移动方法在惯性参考系 S 中被同步的。 c 是光往返一次的光速 (与选择的同步模式无关), δc 是光信号沿特定方向单向传输并在 S 系中由同步的钟所测量的光速的偏差。这些实验是寻求 $\delta c/c$ 作为光信号在 S 系中传递方向的函数的变化情况。在狭义相对论中 $\delta c/c = 0$ 。

已经进行过一些寻求 $\delta c/c$ 非零值的实验。有的是直接测量遥远钟之间光信号单向传输时间的变化, 有的是寻找一级 Doppler 偏移的变化的间接测量。前者是用美国 JPL 深空跟踪网中的钟和时间链以及 GPS 系统进行的; 后者是基于莫斯保尔效应以及 GP-A 实验的频率链路^[8]。在这些实验中, 狭义相对论的验证是与特定空间方向相联系, 而实验就是寻找当信号传输方向改变时这个效应是否也改变。依赖于地球转动而改变方向的这些实验实际上是只对 $\delta c/c$ 在赤道面上的分量敏感。

空间钟实验有望能比以前 $\delta c/c$ 的实验在检测灵敏度上提高一个量级。这种实验是在 ISS 飞过时进行空间钟和地面钟的连续比对。时间传递链是由微波信号组成, 钟之间的传递可逆向转换。所有发射时间和接收时间分别在空间时间尺度和地面时间尺度中进行测量。接收和发射时间之差能提供信号单向传递时间和某些固定偏差 ΔS 的信息, 这个 ΔS 是由钟之间采用不同同步方法带来的。上下传递时间之差对沿检测方向上 $\delta c/c$ 的非 0 值敏感, 从而有:

$$T_{\uparrow} - T_{\downarrow} = \Delta_s + \Delta_m + 2\frac{\delta c}{c}T \cos \theta$$

这里 T 是光往返传递时间的一半, θ 是时间传递链路中所希望的方向之间的夹角, Δ_m 是已知的由于路径不对称、大气延迟等所致的小的修正, Δ_s 是未知 (不同步) 但保持不变的量, 对飞过时所测数据按 $\cos \theta$ 调节使能测量到 $\delta c/c$ 。

实验的灵敏度取决于 ISS 一次飞过时两钟的不稳定度和 T-F 链路的相位不稳定度。在连续飞过期间 T 的值在 1.5 ms 到 8 ms 之间变化。当 ISS 一次飞过的时间段中两钟的不稳定度为 1 ps 时, 对 $\delta c/c$ 所期望能达到的检测灵敏度在 10^{-10} 左右, 这比以前的测量提高了一个量级以上。对 GPS 实验所存在的那些不确定的误差源 (大气延迟, 轨道准确度, 钟稳定度等) 在使用 ACES 检测的情况下似乎都可以忽略, 因为检测中应用了双向系统 (上、下链之间可以相互抵消) 和高稳定度的 ACES 钟。

参考文献:

- [1] Salomon Ch, Dimareq N, Abgrall M, et al. Cold atoms in space and atomic clocks: ACES, 交流资料
- [2] Vessot R F C. The atomic hydrogen Maser, is it the best clock for gravity and relativity measurement? A lecture given in Shanghai, 1982
- [3] 翟造成. 天文学进展, 1986, 4(1): 62
- [4] Pound R V, Rebka G A. Phys.Rev. letters, 1960, 4: 274
- [5] Vessot R F C, Levine M W. Journal of General Relativity and Gravitation, 1979, 10: 181
- [6] Damour T, Polyakov A. Nucl. Phys. B, 1994, 42: 423
- [7] Tjoelker P R, Maleki L. Phys. Rev. Letters, 1995, 74: 3511
- [8] Vessot R F C. Journal de physique, 1981, 42: 359

Space Clocks and Fundamental Physics Tests

ZHAI Zhao-cheng

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: In the last decades since the advent of Einstein's General Theory, astronomical observation has benefited greatly from the ongoing developments of high technology that has led to the discovery of many exciting new physical phenomena, such as the highly energetic apparently extremely distant quasi-stellar objects, pulsars and the phenomena relating to superdense matter in the form of neutron stars and the discovery of black holes. All these have added to the interest in experimental tests of the General Theory of Relativity and its cornerstone, the Principle of Equivalence, and have led us to refocus our attention on the validity of the Einstein Theory of Gravitation and Relativity and have led to a number of competing theories, which, in turn, have led us to continue thinking of experiments to confirm or deny the validity of these theories. Today, one of the most precise tools for testing these theories is the time or frequency standards (clock). The last fifty years have been a period of outstanding developments in the field of atomic frequency standards. At the present day, frequency stabilities reach 10^{-16} range in hydrogen masers and accuracies are better than 1×10^{-15} in cold atomic clock. They will play a fundamental role in the space scientific measurements.

This paper introduces some space clock schemes and experiments with ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) which are being proceeded abroad and are to be performed in the microgravity environment of the International Space Station as well as the significance of high precision space clocks to scientific testing. Several fundamental physics tests of current interest with space clocks, such as the test of universality of the gravitation red shift, the test of the constancy of the speed of light as well as the test of the time dependence of fine structure constant are also outlined in this paper.

Key words: astronomical facilities and technique; space clocks; review; fundamental physics; tests