

# 空间载钟的天体物理学实验

翟造成

(中国科学院上海天文台)

## 提 要

原子钟在空间天体物理测量中起着重要作用。最近研制的氢原子钟,对于超过 1,000 秒的平均时间间隔,其稳定度好到 $10^{-16}$ 。这些装置对空间VLBI高精度的角度测量以及多普勒技术高精度测距和测速是非常适用的。本文主要概述几个通常感兴趣的空间载钟的天体物理实验。为了作这些测量,实验必须扩展到太阳系内进行。

## 一、引 言

随着空间技术的发展以及与之平行发展的微波通讯技术的应用,为把进行天体物理测量的空间探测器放置到太阳系中创造了条件。高稳定度的原子钟在这些测量中起着重要的作用。最近研制的氢原子钟,对于超过 1,000 秒的平均时间间隔已经达到  $10^{-16}$  的稳定度,它们对于空间实验和天体物理测量是非常适用的。应用 VLBI 的高精度角度测量以及应用多普勒技术的测距和测速;建议中的空间飞行以进行太阳引力场分布的测量和引力波的检测以及空间 VLBI 站等,是目前天体物理测量工作的活跃课题,原子钟在这些课题中有着重要的应用。当然,在引力和相对论测试中,原子钟还以“原时”钟的意义测量时间,并且能使我们在有不同引力势和相对运动的空间范围内进行时间比对。

本文的目的是概述几个应用钟的天体物理测量实验,特别是空间载钟实验,说明原子钟在这些测量中的重要作用。随着空间时代的到来,在这些工作中可以考虑把整个太阳系作为一个实验室,利用天体(包括太阳)作为这个实验室的一部分设备。而原子钟和大规模的微波和激光通讯系统,便组成这个实验室设备的其他一些基本部件。

适用于这种工作的高稳定度原子钟的现状如图 1 所示<sup>[1]</sup>。图 1 描述了用于 VLBI 和空间跟踪上的目前稳定度最好的氢原子钟的性能。从这些数据很清楚地看到,原子钟是科学上可利用的最灵敏的测量仪器。图 2 表示具有这样性能的飞船用的第一个氢原子钟<sup>[2]</sup>,重 40 公斤,于 1976 年为测量重力红移用火箭系统发射到 10,000 公里的高度。其设计正在不断的改进中,最近的空间任务倾向于使它在空间工作五年。

## 二、原子钟的性能对测量的意义<sup>[3]</sup>

高稳定度的原子钟在空间和天体物理测量中,除了测量时间外,也用来通过多普勒和雷

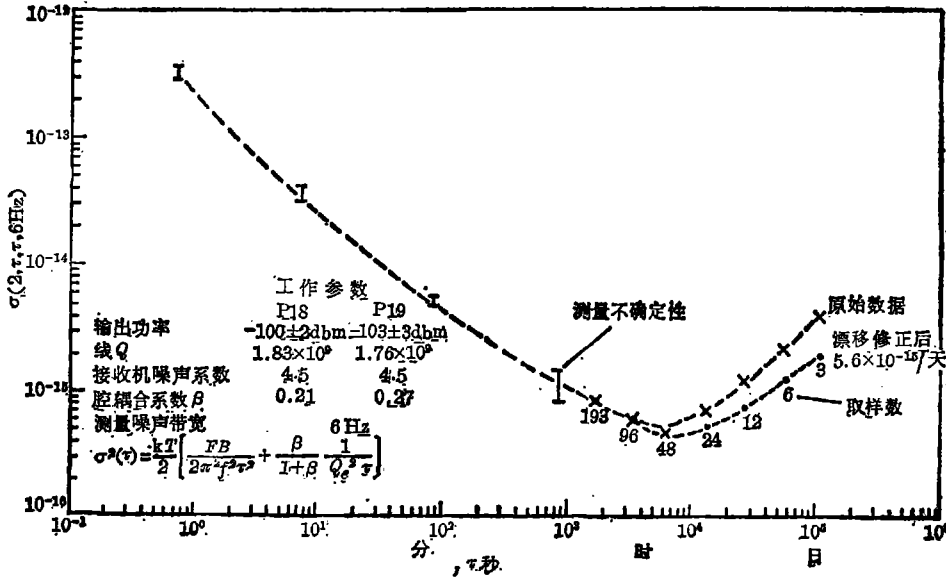


图 1

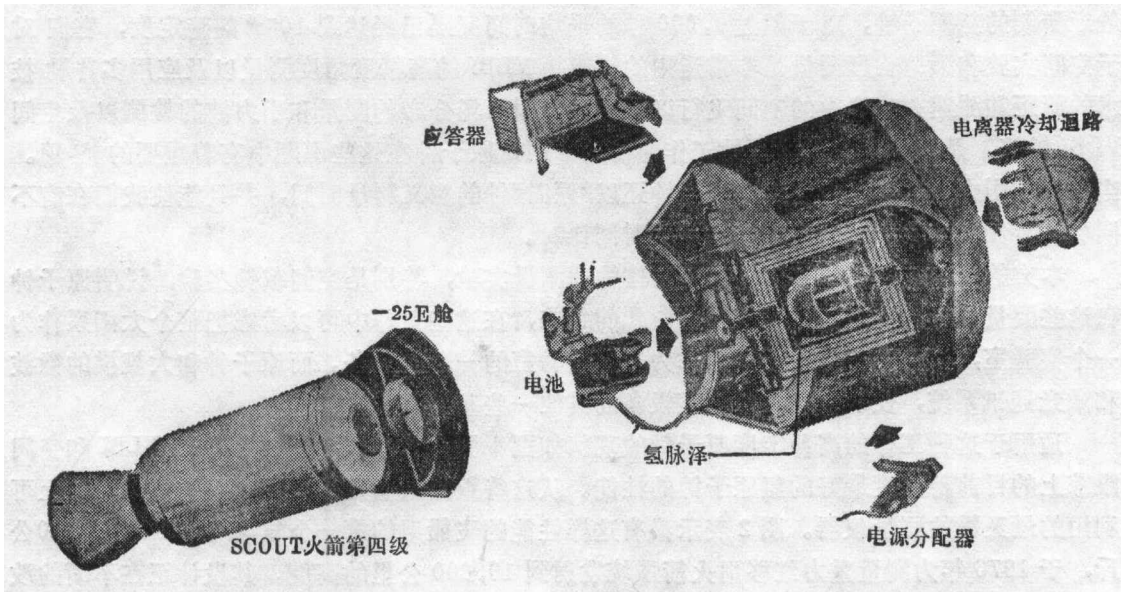


图 2

达技术测距、测速和测角度。现在通常描述频率稳定度的 Allan 方差，也能用来估价测速、测距和测角度系统中的振荡器不稳定性效应。因此，有必要把钟的稳定度性能  $\sigma_c(\tau)$  和这些参数联系起来。

由于采用多普勒频率测量和雷达脉冲技术，所以飞船跟踪技术与光速有关。钟的稳定度

对测速的影响，由一阶多普勒表达式  $f' = f_0 \left( 1 \pm \frac{v}{c} \right)$  给出，这里  $f_0$  是发射频率，而  $v$  是速度在沿发射机和接收机连线方向上的分量。用  $\sigma_v(\tau)$  代替  $\Delta f/f_0$ ，则测速的准确度为  $\sigma_r(\tau) = c\sigma_v(\tau)$ 。我们看到，如果氢原子钟的稳定度  $\sigma_y(\tau) = 6 \times 10^{-16}$ /小时，对于 3,600 秒取样时间所进行的速度测量，来自原子钟的预期误差为  $\sigma_r(3,600) \approx 1.8 \times 10^{-5}$  厘米/秒。

用单路或双路雷达脉冲方法测距，在时间间隔  $\tau$  中测量的距离间隔的准确度，可以从  $\sigma_{\Delta r}(\tau)$  给出的时间弥散测量得到。而时间弥散测量可用关系式  $\Delta f/f_0 = \Delta\tau/\tau$  进行，结果在下一个相邻的时间间隔  $\tau$  中时间弥散的  $1\sigma$  期望值  $\sigma_{\Delta\tau}(\tau)$ ，可以用关系式  $\sigma_{\Delta\tau}(\tau) = \tau\sigma_y(\tau)$  得到。因此，距离弥散是  $\sigma_{\Delta r}(\tau) = c\tau\sigma_y(\tau)$ 。对于每一次进行一小时的相邻的距离测量，应用上面给出的稳定度  $\sigma_y(\tau)$  性能，距离测量误差则大约为一毫米。距离和时间方差与 Allan 方差  $\sigma_y(\tau)$  之间的关系如图 3 所示，并且假设氢原子钟的性能如图 1 所示。

在利用 VLBI 方法进行角度测量情况下，其精度受到相干信号的积分时间以及台站间基线距离的限制。已经证明，VLBI 测量相对角差的能力是  $10^{-5}$  角秒，角灵敏度的表达式是  $\Delta\theta = c\Delta t/L\sin\theta$ ，其中  $\Delta t$  为时间间隔的测量准确度， $c$  为光速， $L$  为基线长度， $\theta$  是天线到接

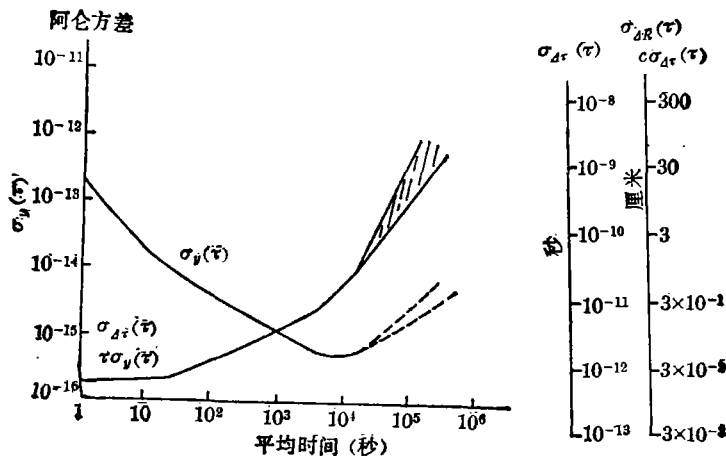


图3. 以Allan方差表示的时间和距离弥散。

收机的连线与两站基线  $L$  之间的夹角 (图 4)。用时间弥散  $\sigma_{\Delta\tau}(\tau) = \tau\sigma_y(\tau)$  代替  $\Delta t$ ，我们可以估计钟的性能对角度测量准确度的影响： $\sigma_{\Delta\theta}(\tau) \approx c\tau\sigma_y(\tau) / L\sin\theta$ 。假设两个空载 VLBI 终端分开 18,000 公里，而积分时间为 1,000 秒，且  $\sigma_y(1,000) = 1 \times 10^{-15}$ 。在这些条件下， $\sigma_{\Delta\theta} \approx 3 \times 10^{-6}$  角秒。如果达到这样的灵敏度，就有可能检测出很遥远的天体如类星体的自行以及宇宙膨胀的横向速度。

以上就是利用现有原子钟所期望达到的灵敏度。

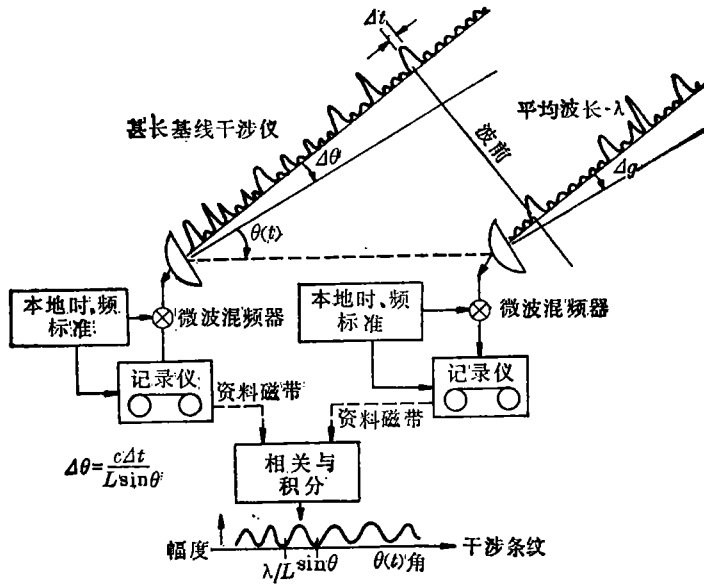


图 4. 甚长基线干涉技术方块图。

### 三、地面 VLBI 对钟的要求

甚长基线干涉仪是天文学的一种很新的测量技术。在过去几十年内已有很大的发展，并有着相当重要的应用。通过各种波长的观测，能使我们绘制银河系及类星体等天体的非常详细的结构图。这些可为天文学家提供关于类星体、活动星系核、星际脉泽以及其他天体的物理过程的非常有价值的信息。VLBI 技术的工作描述如图 4 所示。这个技术成功的关键是各站作为独立本振的原子钟的稳定度。平均波长为  $\lambda$  的信号频率，外差到基带，并与准确的时间信息一起记录在磁带上。各站磁带上的信号放在一起交叉相关和积分，以给出干涉条纹，其幅度与信噪比有关。

在短于 1cm 波长下工作，要求较长的相干积分时间，以保证最大的干涉仪灵敏度，这对用作独立本振的原子钟的稳定度，提出了苛刻的要求。我们上面已经提到，时、频标准的稳定度性能，最好是用 Allan 方差表示，图 5 表示各种原子标准的性能比较 [4]。

测地和天体测量工作，要求每小时相位稳定度好于 20 度，或要求在这个时间内的频率稳定度为  $几 \times 10^{-15}$ ，同时也要求较长的相干时间，以便得到最佳的信噪比。相干时间与观测频率和频率标准的 Allan 方差有关。Rogers 和 Moran(1981) 已经研究了 this 关系，并且计算了相干性损失随积分时间和观测频率的变化。这种计算是在两个氢原子钟和两个铷频标的情况下进行的，如图 6 所示 [4]。

由图 5 和图 6 可见，目前只有氢脉泽能提供 VLBI 所要求的稳定度。

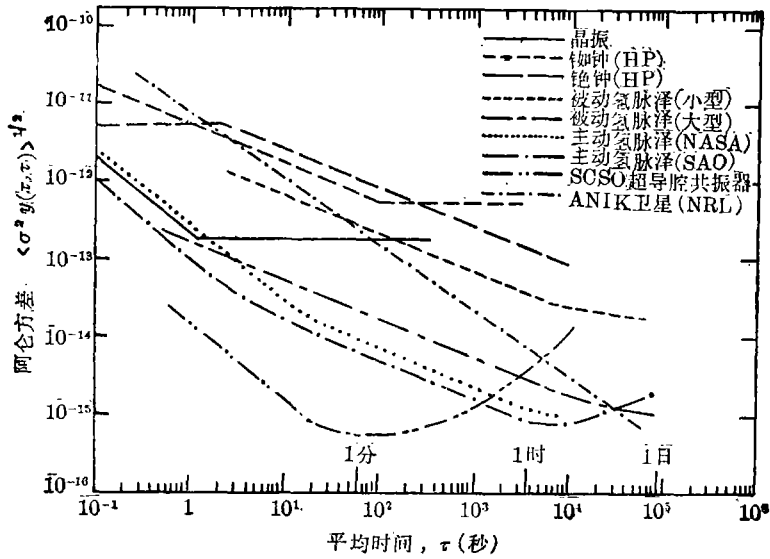


图 5

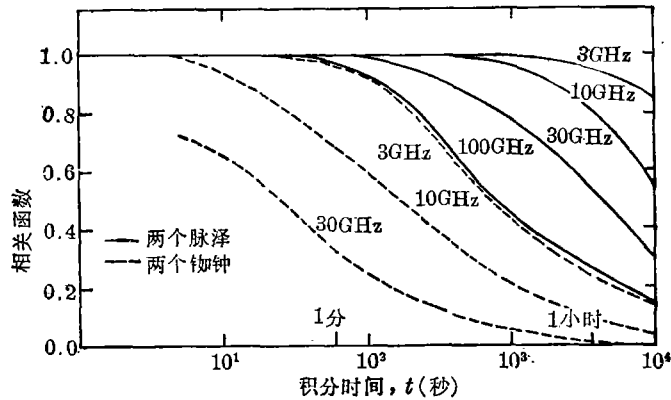


图6. 铷频标和氢脉泽标准的相关性作为频率和积分时间的函数。

电离层和大气相位波动也给相干带来附加损失。在波长长于 15cm 时，电离层波动占优势，而主要由于对流层水蒸汽起作用的大气波动效应在短波长下限制相干。Rogers 和 Moran 已经估算出大气波动的 Allan 方差，他们的结果也会绘在图 5 中。很清楚，对于短于  $10^4$  秒的相干积分时间，使用氢脉泽的干涉仪主要受电离层和大气波动的限制，而不是受频标性能的限制。

图 5 也表示出超导腔稳定的振荡器性能，它在几百秒范围内的相位稳定度超过氢脉泽一个量级。但它在长时间间隔内还不够稳定，必须锁定到别的标准上对长的相干时间才有用。目前 SCSO 还仅是一个实验室设备，尚未能证实是一个有用的标准。

## 四、空间 VLBI

很明显,把 VLBI 扩展到飞船载射电望远镜,就可以消除地球大气层波动和电离层折射

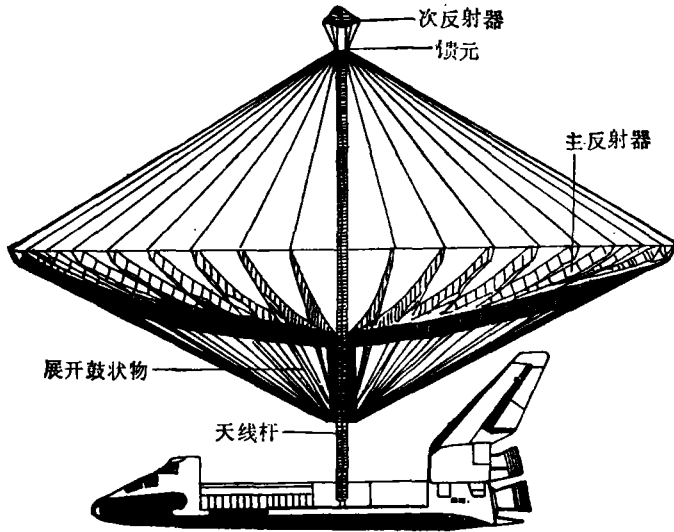


图7. 航天飞机50米可展开天线的概念。

等的限制,我们就可以自由地选择波长。通过适当选择飞船的轨道,以便提供宽的覆盖范围和大的综合孔径;并且基线可以任意长,可以在各个不同的方向搜索天空。

美国 NASA 正在准备把一个大的 VLBI 天线放在航天飞机的轨道中,同时携带一个氢原子钟。天线直径计划 50 米,在航天飞机上可以撑开,如图 7 所示<sup>[5]</sup>。所计划的第一个测试将用这个轨道终端与地面现有的各

VLBI 站连接起来,以得出几个被选定的射电源的射电图象。已经证明,空间环境对于这样一个天线是很理想的。没有重力影响和振动很小是明显的优点。对于原子钟,没有比这种环境更好的了,因为磁场很弱,被太阳照射时引起的加热,已由空间的高真空所补偿,这是通过多层反射材料(超隔热材料)的应用,能做到几乎十全十美的热隔离。一旦航天飞机做到常规飞行,空间 VLBI 就可能实现。

## 五、太阳探测飞行<sup>[5-7]</sup>

有许多很好的理由发射一个飞船接近太阳。一个称为“Starprobe”的飞行计划已在 NASA 的支持下进行了几年。几年的研究已在太阳探测飞行任务上取得了进展。在这里,一个自由落体的飞船将落到离太阳中心 4 个太阳半径的范围内。这个飞船首先朝向木星发射,然后利用木星的重力改变飞船的航线,沿偏心率很大的太阳轨道直飞向太阳,如图 8 所示。与可利用的推进能量有关,3.5 年至 5 年后探测器将接近太阳,并从它的抛物线轨道的一边经过太阳到另一边,历时 14 小时左右。在很接近太阳的这段时间内,探测器将这样工作:来自太阳的辐射和粒子压力将由仔细控制的拖曳补偿系统补偿掉。这个系统实际上是一些用来补偿这些非重力的小火箭。

这次飞行的主要目的是测定太阳引力场的形状,并由此得出它的质量分布。太阳的四极矩

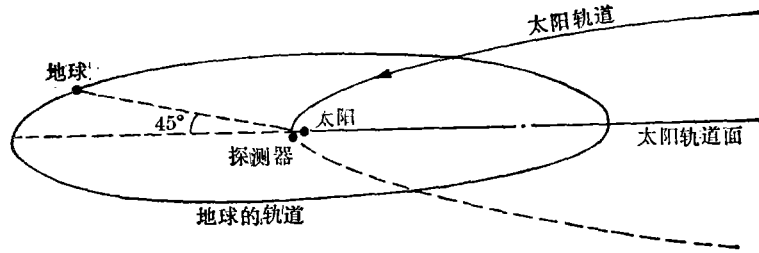


图8. “Starprobe”太阳探测器的轨道。

$J_2$ 可以测定到  $1 \times 10^{-6}$  的准确度, 这将为太阳和恒星物理学家了解恒星内部提供重要数据。这些信息将来自一个自由落体(飞船)的行为, 在地面站仔细地跟踪此自由落体。很明显, 这就要求高精度的跟踪系统, 原子钟在此系统中将有明显的作用。实现此目的的一个方法是将氢原子钟载到空间, 并利用多链微波系统<sup>[8]</sup>, 如图9所示。

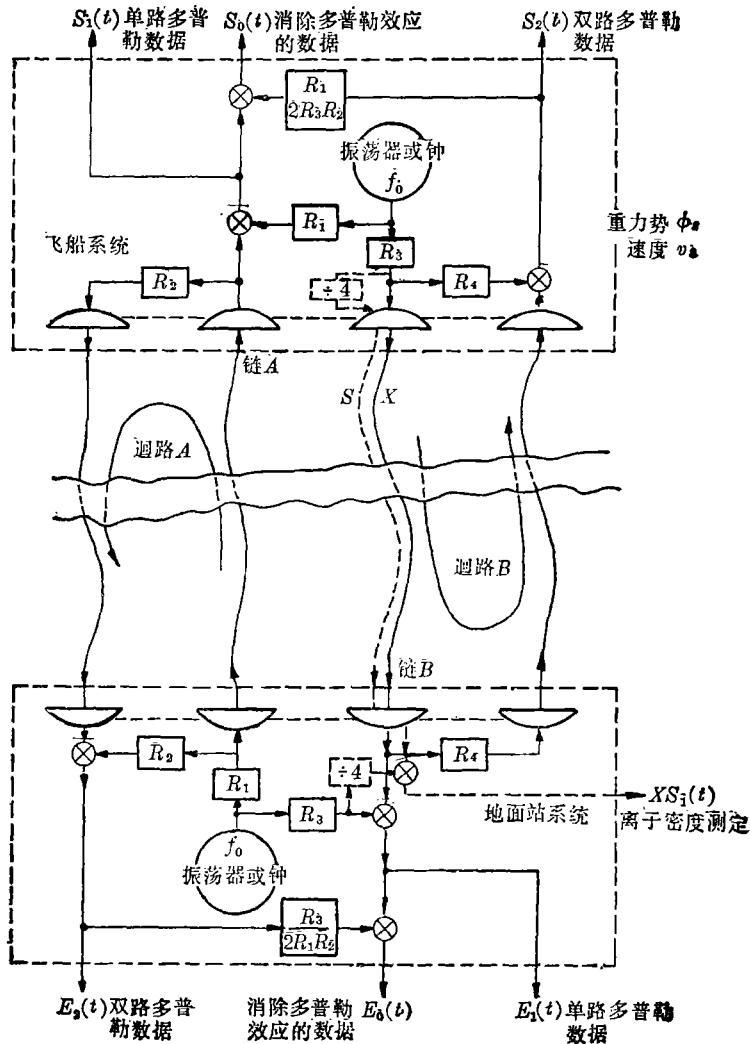


图9. 四链时间相关多普勒跟踪系统。

应用带有钟和四链微波系统的太阳探测器，在它接近太阳的短暂期间，我们可以得到更多的数据用来寻找高阶重力矩。在飞船上载氢钟的意义是能得到对消了多普勒效应的数据。在这个测试中，预期的待测量的效应要比在地面上大得多。

## 六、用深空探测器检测引力波

现在提出的测试引力理论的实验室实验的能力，受到太阳系中可利用的质量的限制。为了寻找引力理论有限性范围的实验，必须寻找包括超致密物质和巨大质量的自然天文现象。太阳探测飞行，正如所想象的，需5年时间到达太阳，在此期间，可以利用飞船跟踪系统来寻找引力辐射的甚低频脉冲。在可能的引力波信号中，甚低频( $10^{-9}\text{Hz}$ )脉冲源被认为是由超巨黑洞坍缩引起的，这种黑洞是太阳质量的 $10^6$ 到 $10^7$ 倍，有证据表明，这样的天体存在于星系核中，并与这种星系核的早期形成有关。因为引力脉冲波被认为是以光速运行的，因此为接收它们要求有足够大的距离。深空探测器，像到木星的太阳探测器，提供了跨越这种距离的一个方法。预期能够观测到引力脉冲，因为这种脉冲能引起经长距离传播的多普勒信号频率产生 $10^{-15}$ — $10^{-14}$ 的变化。这项研究正在进行，以试验所提到的四链微波系统如何能在系统干扰存在的情况下用来检测这些脉冲。为了鉴别引力波脉冲和噪声波，T. Piran<sup>[5]</sup>设计了最佳滤波器，他应用对现代深空跟踪系统合适的噪声电平进行了计算机模拟，此深空跟踪系统工作在X频带，并使用氢原子钟。假设对流层和电离层传播噪声占优势，并且对频率不稳定度的影响为 $\sigma_r(\tau) \approx 10^{-12}$ ，这种滤波器能在500秒的平均时间内，为检测引力波脉冲提供 $5-7 \times 10^{-15}$ 的背景电平。SAO正在进行相当的努力，以证实此系统为检测引力波所具备的灵敏度。

引力波的观测和研究，对于物理学和天文学将是重要事情。为检测甚低频率脉冲的多普勒技术，已经进展到实际检测这些脉冲所要求的灵敏度。低频脉冲的性质，它们的发生速率以及时间特征，仍然是需要探讨的问题。可是，目前任何能建立实际实验的测试都是非常重要的。

## 七、将来的钟工艺

将来，在空间科学实验中高稳定度的钟将会显示出越来越大的作用，这将要求钟的可靠工作寿命为5年或更长以及减小它的重量、尺寸和功率。目前，看来氢原子钟能在100秒以上的时间提供最好的稳定度，而超导腔稳定的振荡器(正如图5所表明的)能在短于100秒的时间间隔提供最好的性能。氢脉泽已出现在低温下工作的前景<sup>[9]</sup>，有理由认为其稳定度可改善10倍。那时，把超导腔系统锁定到冷冻氢脉泽上，将会组成一个新颖的长、短期稳定度兼优的最高稳定度的SCSO-H-Maser标准。

同时，正在研制为空间应用的冷冻仪器。对空间应用工作在8GHz或更高频率的四链微波系统，把8GHz接收机低噪声放大器和大部分高相位灵敏度电路，一起放进同样冷的低温环境中，将会使空间实验出现新局面。



## 八、结 束 语

在空间进行天文学和天体物理学的观测和实验, 要求原子钟具有很高的准确度和稳定性, 以进行角度、距离、速度和时间的高精度测量。而整个太阳系却是进行这些测量的最好的实验室。我们所希望的是, 这些为很好地了解我们宇宙的空间活动, 将继续成为不断改善钟、微波和激光技术的动力。

### 参 考 文 献

- [1] Atomic Hydrogen Maser VLG-11 Operating and Maintenance Manual, SAO, (1984).
- [2] Vessot, R. F. C., Levine, M. W., Mattison, E. M., Hoffmen, T. E., Jmbier, E. A., Tetu, M., Nystroms G., Kelt, J. J., Jr., Trucks, H. F. and Vaniman, J. L., Space borne hydrogen maser design, 8th PTI meeting, (1976), 227.
- [3] Vessot, R. F. C., The atomic hydrogen maser is it the best clock for gravity and relativity measurement? Third Marcel Grossmann Meeting on the Recent Developments of General Relativity, Shanghai, China, (1982).
- [4] The Very Long Baseline Array Radio Telescope (VLBI) Manual, NRAO, (1982), IV-20.
- [5] Vessot, R. F. C. and Mattison, E. M., Atomic clocks for astrophysical measurements, COSPAR Session 4.1- Increasing spatial resolution in space, (1982).
- [6] Vessot, R. F. C., Relativity experiments with clocks, *Radio Science*, 14 (1979), 629.
- [7] Vessot, R. F. C., Gravitation and relativity experiments using atomic clocks, *Journal de Physique*, 42 (1981), C8-359.
- [8] Vessot, R. F. C., Lectures on frequency stability and clocks and on the gravitational redshift experiment, in *Experimental Gravitation*, 111, ed. by B. Bertotti, Academic Press, New York, (1974).
- [9] Vessot, R. F. C., Mattison, E. M. and Blombery, E. L., Research with a cold atomic hydrogen maser, *Proc. 33rd Ann. Frequency Control Symposium*, (1979), 511.

(责任编辑 刘金铭)

## Spaceborne Atomic Hydrogen Clocks for Astrophysical Measurements

Zhai Zaocheng

(Shanghai Observatory, Academia Sinica)

### Abstract

Atomic clocks play a fundamental role in the space astrophysical measurements. Recently developed atomic hydrogen masers have achieved stability well into the  $10^{-16}$  domain for averaging time intervals beyond 1,000 sec. These devices are very adaptable for space use in very high precision measurements of angle through VLBI and of range and range-rate through Doppler techniques. This paper outlines several spaceborne clock experiments of current interest, which would use the entire planetary space as a laboratory for astrophysical measurements.