

天文光学频率梳及其在天体视向速度 高精度测量中的应用^{*}

韩海年^{1,†} 魏志义¹ 赵刚²

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100195)

摘要 光学频率梳技术用于高分辨率天文光谱仪的波长定标可以大大提高视向速度测量精度,从而为搜寻类地行星、确定宇宙膨胀速度和测量基本物理常数等重大前沿科学问题提供有利的工具.文章结合视向速度测量技术与天文光学频率梳波长定标技术的最新进展,介绍了天文光学频率梳原理及技术,多普勒光谱位移探测天体的原理,以及天文光梳定标高分辨率天文光谱仪未来发展的趋势和展望.

关键词 天文光学频率梳,视向速度测量,高分辨率天文光谱仪,法布里-珀罗腔

Astro-frequency-combs and high precision measurement of the radial velocity of celestial bodies

HAN Hai-Nian^{1,†} WEI Zhi-Yi¹ ZHAO Gang²

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 National Astronomy Observatory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100195, China)

Abstract The wavelength calibration of high resolution astronomical spectrographs with a femtosecond optical frequency comb can significantly increase the accuracy of radial velocity measurements. This provides a powerful research tool for various cutting-edge scientific problems, such as the detection of earth-like planets, the determination of the expansion of the universe, and the measurement of fundamental constants. With reference to the recent developments in radial velocity measurements and frequency combs, we describe the principles of such techniques and discuss the future development of astro-comb wavelength calibration for high resolution astronomical spectrographs.

Keywords astro-frequency-combs, radial velocity, high resolution astronomical spectrograph, Fabry-Perot cavity

1 引言

进入 21 世纪以来,在激光技术领域及计量科学领域中,同时具有里程碑式重要意义的科技进展当属飞秒激光频率梳技术^[1-4].由于飞秒激光频率梳巧妙地实现了光学频率与微波频率的直接连接,从而完美地解决了几十年来一直困扰计量科学家的光学频率绝对测量瓶颈^[5-10],为新一代更高精度的光钟发展铺平了道路^[11,12].同时作为目前精密测量精度最高的先进技术,光学频率梳在精密光谱学研究、

基本物理常数测量、阿秒脉冲产生等方面也发挥了重要作用^[13],例如通过精确测量氢原子 1s—2s 光频跃迁研究里德伯常数,获得了目前所有常数测量中最小的不确定度结果: 1.6×10^{-12} ^[14],通过控制驱动飞秒脉冲源的载波包络相移频率,得到了 80as 的最短脉冲记录^[15].正是由于光学频率梳技术以上重要的应用,2005 年当瑞典皇家科学院将诺贝尔

^{*} 国家自然科学基金(批准号:60808007,11078022)资助项目
2011-06-17 收到

[†] 通讯联系人. Email: hnhn@iphy. ac. cn

物理学奖颁发给德国的 Hänsch 教授和美国的 Hall 教授时,特别地指出了其重要贡献包括激光频率梳技术^[16,17].

2007年,随着激光频率梳技术及应用的发展,天文学家首次提出将频率梳技术应用到天文多普勒视向速度测量中^[18],其构想是,利用光学频率梳输出的在频域上间隔均匀和强度均匀的分立光学频率梳齿,为高分辨率的天文光谱仪做波长定标,通过这种高密度、高稳定的波长定标,可以将现有光谱仪的视向速度测量精度提高两个数量级以上,理论上可以达到 1cm/s 量级.这无疑给很多以高精度视向速度测量技术为主要研究手段的天体物理学研究展现了诱人的研究前景.例如,寻找类似地球质量的行星需要 5cm/s 的视向速度测量精度,研究宇宙膨胀速度需要 1cm/s 的视向速度测量精度等.而利用传统的波长定标技术远远无法满足这些需求(传统波长定标现在能达到的最高视向速度的测量精度为 60cm/s^[19]),光学频率梳波长定标技术的提出,使人们在以上具有挑战性的天文前沿科学研究中看到了希望.

由于通常光学频率梳的重复频率(频率间隔)在 100MHz—1GHz 之间,而高分辨率的天文阶梯光栅光谱仪能分辨的频率间隔在 10GHz—30GHz 之间,所以常规的光学频率梳不能直接用于天文光谱仪的波长定标.为了匹配高分辨率天文光谱仪的分辨本领,必须将常规光学频率梳的重复频率提高.2008年,美国哈佛大学的 Li 等人在英国 *Nature* 杂志上发表了有关采用法布里—珀罗腔(F—P腔)技术的文章^[20],该技术可以将钛宝石光学频率梳的重复频率从 1GHz 提高到 40GHz,并且稳定地锁定在一台半导体激光器上,他们称这种超高重复频率的光学频率梳为“天文光学频率梳”,用于高分辨率光谱仪的波长定标,可望达到 1cm/s 的视向速度测量精度.同年,德国马普量子光学研究所和欧洲南方天文台合作,将基于光纤光梳的“天文光学频率梳”用到了放置在真空腔的高分辨光谱仪中,并对太阳的光谱线进行了测量,研究结果令人振奋.他们发现,天文光梳定标技术不但能有效地提高视向速度测量精度,而且对光谱仪等的抖动造成的系统误差也有良好的校正作用,这对于宇宙膨胀速度的测量将大为有益,该研究结果发表在了当年的 *Science* 杂志上^[21].

天文光学频率梳及用于天体高精度视向速度测量的研究才刚刚开始,本文将就这一前沿交叉领域做一详细的介绍,从高精度视向速度测量技术与天

文光学频率梳技术相结合的角度探讨其研究进展及未来的应用前景,侧重于系外类地行星探测方向的应用.

2 高精度视向速度测量技术

视向速度测量技术又称多普勒光谱位移测量技术,在系外行星搜索、宇宙膨胀速度测量及基本物理常数细微变化的精密测量等前沿天文学和物理学研究中扮演着重要角色,尤其是在系外行星搜索方面,其有效性和正确性更是其他测量技术难以比拟的.据统计,截至 2010年3月,采用视向速度测量技术一共发现了 378 颗系外行星,占整个已发现系外行星总数的 90%,而且基本上所有已发现的系外行星都经视向速度测量技术验证了其正确性.正是由于这些优势,使之成为地面望远镜探测系外行星最有力的手段之一.

2.1 基本原理及测量方法

视向速度测量的基本原理与运动物体引起的多普勒频移有关,从天体理论分析,当行星绕其主星作周期性运动时,主星受行星运动的影响也会作相应的周期性轨道运动,根据牛顿万有引力及开普勒第三运动定律,可得出主星及行星的视向速度为

$$V_R = \frac{2\pi a_{1,2} \sin i}{P \sqrt{1-e^2}} [\cos(\theta + \omega) + e \cos(\omega)] \quad (1)$$

其中 a_1 为主星椭圆轨道半长轴, a_2 为行星椭圆轨道半长轴, e 为椭圆偏心率, P 为运动周期, i 为视向观察角度, θ, ω 为坐标系中主星和行星之间的角度,这里可以将中括号之前的项用 K 表示,代表天体视向速度的半幅值,即

$$K = \frac{2\pi a_{1,2} \sin i}{P \sqrt{1-e^2}} \quad (2)$$

而根据多普勒频移定律,凡是运动的物体都会引起自身频率的红移或蓝移,因此恒星运动引起的多普勒位移量 Δf 与视向速度 V_R 的关系为

$$\Delta f = \frac{V_R}{c} f \quad (3)$$

式中 c 为光速, f 为频率.

多普勒视向速度测量的实际过程正是基于以上原理,通过天文望远镜收集主星光,然后再进入天文光谱仪中形成光谱,经精确的波长定标并与实验室中的标准光谱模板进行比较,从而确定其视向速度,将视向速度随时间的变化记录下来,就可以表示成如图 1 所示的视向速度变化曲线,如果主星附近有

一颗行星围绕它作周期性轨道运转,则记录到的视向速度变化曲线会呈周期性正弦函数变化.图1中的数据是理论模拟观察3年记录到的某主星的视向速度变化曲线,可以看出其运动周期为2年,也就是说,有一颗行星围绕该主星转一圈所需的时间是2年,图1中K代表视向速度的半振幅值,与(2)式中的K含义相同.由此可见,只要从实际中得到多普勒视向速度的变化曲线图,就可以再倒推回去,算出行星的运动半径及质量极限,从而帮助人们判断行星的质量,这在系外行星搜索中是非常有效的方法.

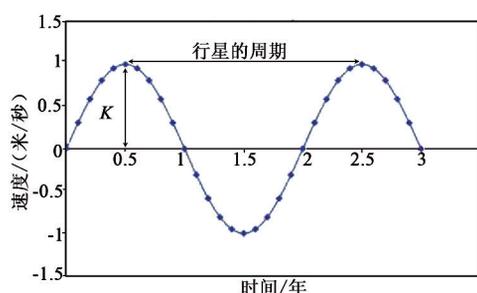


图1 理论模拟多普勒视向速度随观察时间的周期性变化曲线图

2.2 几种定标技术

从图1也可以看出,利用视向速度技术搜索系外行星需要长时间的观测记录,这个时间的长短与行星绕恒星的运动周期有关,通常类地行星需要一年左右的记录时间,而宇宙膨胀速度研究则需要10年以上长期的记录和观测.这不仅要求光谱仪的视向速度测量有很高的精度,而且还要求有很好的长期稳定性.

视向速度测量技术的精度与光谱仪的波长定标技术密切相关,如图1曲线所示.曲线中每一点都是通过测量光谱的变化得到的,所以视向速度测量技术精度提高的过程实际是波长定标技术不断发展的过程.最初,Griffin等人采用钍气体作为吸收定标源^[22],精度可达100m/s;后来,Campbell等人改用HF气体^[23],其主要吸收线在870nm左右,用6条谱线定标,定标精度可达15m/s.现在常用的是钍氩灯和碘吸收气体定标,精度可达1m/s,目前高精度的视向速度测量通常都采用这两种定标技术.但Th/Ar灯及碘吸收波长定标也各有千秋.Th/Ar灯定标的最大优点在于光谱范围宽,能覆盖310—1100nm,在此范围内Th/Ar灯能提供4000条定标谱线,但空心阴极灯结构限制了它的长期稳定性.随着时间和运行状态的变化,Th/Ar灯谱线波长及强度都会发生细小的变化,进而引入速度测量的系统误差.碘吸收定标能提供可靠的、可复现的吸收谱线,但缺点在于光谱带

宽只有490—640nm,与Th/Ar灯相比,留下了很大的无法标定的光谱区;此外,碘吸收定标需要从碘的吸收谱线中反卷积得出天体的谱线,大大降低了信噪比.总之,传统的Th/Ar灯及碘吸收波长定标技术都存在谱线稀疏、空间分布不均、谱线强度不同、长期稳定性不好等缺点.

针对以上波长定标技术存在的问题,2007年,英国剑桥大学Murphy等人^[18]联合德国马普量子光学研究所Hänsch教授及欧洲南方天文台的科学家提出,采用稳定的飞秒光学频率梳为高分辨率天文光谱仪进行波长定标,他们设想利用成熟的飞秒光学频率梳技术及F-P腔滤波技术,提供绝对稳定的光学频率等间隔纵模分布,这种梳状分布的谱线具有空间分布均匀、单位谱线密度高、强度基本一致等特点,并且经过锁定到外部稳定的原子钟后,可以达到钟的稳定度并保持长期稳定不变.例如,如果锁定到稳定度为 10^{-10} 量级的铷钟上,则理论上可以达到的视向速度测量精度为1cm/s,如果锁定到稳定度为 10^{-13} 量级的氢钟上,则理论可达到的视向速度测量精度为0.01cm/s,而后者已经超出了目前天文光谱仪的最高分辨率.因此,只需要锁定到普通的小型铷钟上,就可以满足1cm/s的视向速度精度,如此巨大的优越性使光学频率梳成为高分辨率光谱仪理想的波长定标方法.

3 飞秒光学频率梳

光学频率梳实际上是飞秒锁模激光器在频域的名称.根据傅里叶变换,可得到飞秒锁模激光器输出的飞秒脉冲在时域和频域上的分布,如图2所示.在频域上,飞秒脉冲列的频谱组成了一个光学频率梳,每个梳的谱线可表示为

$$f_n = n f_{\text{rep}} + \delta, \quad (4)$$

式中 $\delta = \Delta\phi f_{\text{rep}} / 2\pi$, $f_{\text{rep}} = 1/\tau$ 是重复频率.梳的位置与重复频率的整数倍之间有一频率差 δ ,称为载波包络相移频率,它是由脉冲之间的相移差 $\Delta\phi$ 决定的,式中 n 是一个整数(在百万量级),它是频梳谱线的标记.

由于光学频率梳中每个梳频谱都可以用 n 倍的重复频率和载波包络相移频率之和表示,而重复频率(100MHz—1GHz)和载波包络相移频率(小于重复频率)都在微波频率范围,因此通过直接将重复频率和载波包络相移频率反馈稳定到外部的微波参考源上,就可以实现整个光梳的频率稳定.其中重复

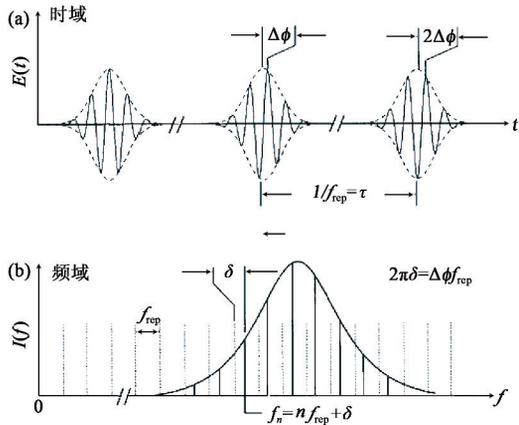


图2 飞秒激光脉冲串在时域与频域的对对应关系

频率信号容易得到,关键是如何测出飞秒脉冲的载波包络相移频率,已经报道的测量方法有很多种,我们将其分为较常用的两种:一种是自参考测量技术^[1,2,24,25];另一种是基于差频的测量技术^[26-29].利用这两种技术建立的光梳系统分别称为自参考光学频率梳和单块光学频率梳.

自参考技术测量飞秒脉冲的载波包络相移频率的原理是在宽度大于一个光学倍频程的光谱中取出低频成分 $f_l = n_l f_{rep} + \delta$ 和 高频成分 $f_h = n_h f_{rep} + \delta$, 将低频成分倍频,可得到 $2f_l = 2n_l f_{rep} + 2\delta$, 然后再与高频成分拍频,如果保证 $n_h = 2n_l$, 则拍频信号 $f_h - 2f_l = \delta$ 正好为载波包络相移频率. 这里要求飞秒脉冲光谱范围必须大于一个光学倍频程,这种光谱既可以从飞秒振荡器直接获得,也可以在腔外利用光子晶体光纤产生超连续扩展光谱. 直接输出大于一个光学倍频程光谱的飞秒振荡器,在技术上实现是非常困难的,目前也只有美国麻省理工学院一家报道他们采用自己设计的双啁啾镜获得了这样的飞秒脉冲,而其他单位都是采用光子晶体光纤扩展得到的. 利用光子晶体光纤扩展光谱在自参考光梳中是很重要的技术,但是由于其芯径很细,因而具有不易耦合和耦合效率过低的弊端. 如果采用直接输出倍频程的飞秒脉冲,则无需利用光子晶体光纤扩展光谱,而且由于功率很高,也无需将光分为两路去相干测量载波包络相移频率,可以直接地将其耦合到倍频晶体中产生载波包络相移拍频信号,大大提高自参考光梳的稳定性.

然而,前面提到直接输出倍频程的飞秒振荡器很难实现,我们采用商用的啁啾镜搭建了输出光谱宽度接近光学倍频程的脉冲宽度稍低于 10fs 的振荡器,并且不用腔外光子晶体光纤展宽,而是采用一块差频晶体,也实现了高信噪比的载波包络相移拍

频测量. 采用这种技术建立的光学频率梳称为“单块光梳”. 单块光学频率梳采用差频法测量飞秒脉冲载波包络相移频率 (f_{ceo}), 假设光谱中某些低频成分与高频成分在非线性晶体中产生差频效应, 则差频光谱的表达式为

$$f_d = (n_1 f_{rep} + f_{ceo}) - (n_2 f_{rep} + f_{ceo}) = (n_1 - n_2) f_{rep} \quad (5)$$

由上式可以看出,差频光中 f_{ceo} 为 0, 也就是说,差频光梳是相位自稳定的, 此类光可作为种子光进一步放大, 从而得到相位为 0 的自稳定的强飞秒激光脉冲, 这在强场物理的高次谐波产生研究中具有重要应用. 如果令 $(n f_{rep} + f_{ceo}) = f_n$, 并将 f_n 与 f_d 相减 (式中假设 n 与 $n_1 - n_2$ 相同), 就可得到 f_{ceo} 拍频信号为

$$f_n - f_d = n f_{rep} + f_{ceo} - (n_1 - n_2) f_{rep} = f_{ceo} \quad (6)$$

与单块光梳相比,自参考光梳由于取消了光子晶体光纤腔外扩谱,从而增大了系统的稳定性,又由于采用商用啁啾镜使振荡器直接输出接近倍频程的光谱带宽,从而大大降低了自参考技术中对飞秒振荡器直接输出大于一个光学倍频程的谱宽要求,因此具有很强的实用性. 我们通过光谱整形等技术增大非线性晶体中的差频效应,将单块光梳的重复频率提高到 350MHz. 图 3 为我们建成的单块光梳示意图,通过两套差频测量载波包络相移光路装置,我们还对比了环内和环外的飞秒激光频率的相位噪声,得到比光子晶体光纤明显小得多的时间抖动^[28],证明基于这种差频测量原理的单块光梳具有优越的噪声性能和稳定性能.

4 超高重复频率天文光梳

4.1 一般考虑

光学频率梳作为天文光谱仪波长定标源所提供的致密的纵模频率无疑会大大提高定标精度,但是考虑到光谱仪的分辨率有限 (通常高分辨率的天文光谱仪的分辨本领在 30000—150000 之间), 太高的光梳谱线密度反而会降低相邻谱线的对比度从而影响波长定标精度, 因此必然存在一个最佳的频梳谱线间距, 这可以通过计算阶梯光栅对应级次的电荷耦合器件 (CCD) 像素对光谱线的响应积分误差获得, 简单的光梳间距 (重复频率) 与光谱仪分辨率的关系为^[30] $f_{rep} \approx \frac{1.5 \times 10^6}{R} \text{GHz}$. 由此可以看出,光

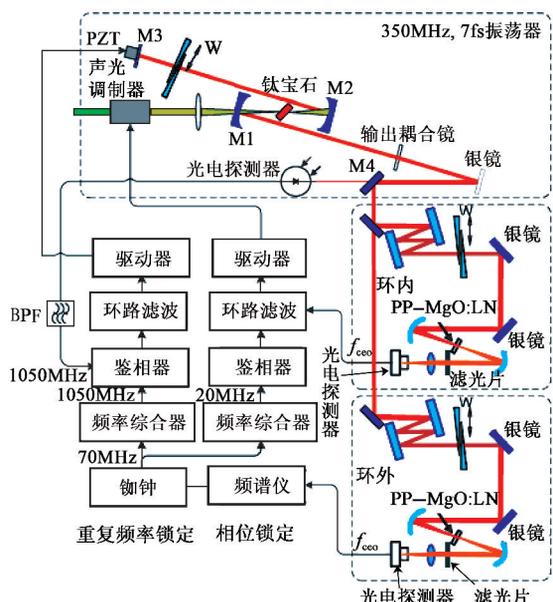


图3 350MHz单梳示意图(包括环内与环外差频测量光路)(PZT为压电陶瓷,M1—M4为镜片,W为尖劈,BPF为带通滤波器,PP—MgO:LN为掺MgO的单片铌酸锂晶体)

谱仪分辨率越高,所需要的定标飞秒光梳的梳间距越小,如果分辨本领为150000,则重复频率为10GHz的飞秒光梳就可以可靠地实现波长定标。

4.2 提高光梳的重复频率

如何得到重复频率在10—30GHz之间的光学频率梳是实现天文光梳的关键技术。最近,美国国家标准研究所(NIST)的科学家报道了重复频率为10GHz的钛宝石光梳^[31],这台飞秒钛宝石振荡器采用啁啾镜色散补偿技术,腔长只有3cm,它输出的10GHz的窄谱线飞秒脉冲,经过腔外的光子晶体光纤展宽后,采用自参考技术测量载波包络相移频率,这样的飞秒光梳可以直接为分辨本领大于10万以上的光谱仪定标,但是对于分辨本领小于10万的光谱仪而言,需要的定标光梳重复频率在20GHz以上,直接的飞秒振荡器无法输出如此高的重复频率飞秒脉冲,此时可以采用腔外法布里—珀罗(F—P)腔滤波技术。

F—P腔滤波技术提高飞秒脉冲重复频率的原理很简单,如图4所示。由两块高反镜片组成的F—P腔的自由光谱程如图4右图中的高斯型黑线所示,调整F—P腔的腔长为飞秒光梳腔长的 $1/n$,则F—P腔的自由光谱程为飞秒光梳重复频率的 n 倍,这时,只有与自由光谱程匹配的红线表示的光梳谱线才能透过F—P腔,其他灰色梳谱线都将被滤掉,因此在F—P腔后得到的就是重复频率提高 n 倍的光梳。

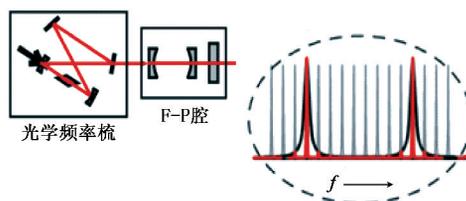


图4 F—P腔滤波提高飞秒光梳重复频率原理图

第一个在天文望远镜上使用天文光梳定标并记录了太阳的光谱线变化的实验,是由欧洲南方天文台和马克斯量子光学研究所 H ä n s c h 教授领导的研究组合作完成的^[21],实验装置如图5所示。天文光学频率梳系统是以重复频率为250MHz的光纤光梳为基础,通过腔外F—P腔滤波,将其重复频率提高到15GHz,然后再经一段多模光纤传输,与待测星光一起送入天文光谱仪中做波长定标,CCD记录到的光谱(见图6)中的黑线是太阳光谱经大气传输后的吸收线,下方排列整齐的亮线为光学频率梳谱线。在这个实验中,他们仅用了57条梳线为太阳谱线定标。虽然由于望远镜的系统抖动引入的误差使视向速度精度只有9m/s,离光梳定标所能达到的理论值相距甚远,但是利用光梳的复现性极好的特性意外地检测出了望远镜和光谱仪的微小抖动,这对于帮助找到影响光谱仪稳定的因素,并提升仪器本身的稳定性,具有重要的意义,尤其是对于宇宙膨胀速度、基本物理常数测量等需要5年以上的长期测量的高精密天文科学研究尤为重要。

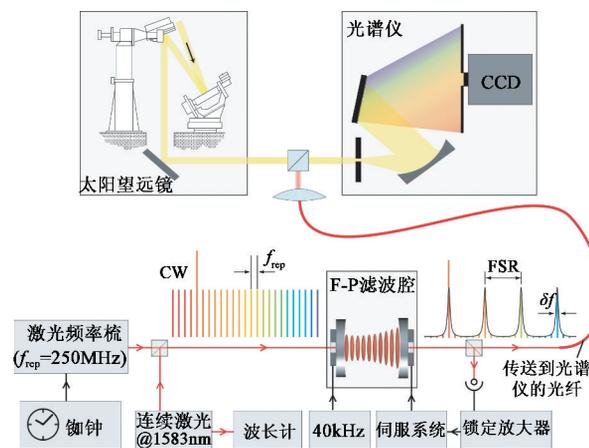


图5 天文光梳定标测量太阳谱线的实验装置(CCD为电荷耦合器件,CW为连续激光频率,FSR为自由光谱程, δf 为谱线宽度, f_{ceo} 为载波包络相移频率)

采用F—P腔滤波技术提高飞秒脉冲的重复频率,虽然原理和操作都比较简单,但却有几个明显的缺点:(1)重复频率提高到原来 n 倍的同时,功率减小为原来的 $1/n$;(2)由于色散原因,导致经F—P腔滤波后透过的激光光谱宽度大大窄化,通常经过一

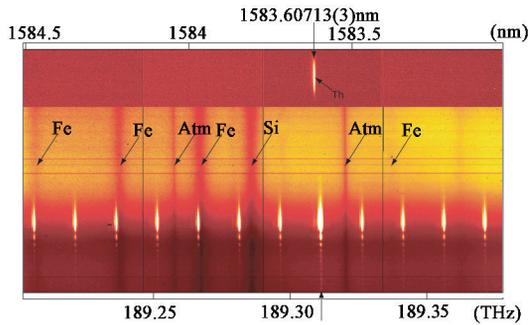


图6 光梳定标的光谱图(图中的 Atm 表示大气吸收线)

个 F-P 腔滤波得到的天文光梳的光谱覆盖范围最宽只有 70nm,这远不能满足天文光谱仪要求的可见光到近红外全覆盖的条件;(3)目前的光梳覆盖范围集中在 700nm 以上的红外波段,没有直接到紫外波段的光梳.针对这些问题,最近 Tilo^[32]等人提出,采用 2 个或 2 个以上的低精细度 F-P 腔代替一个高精度的 F-P 腔,可以解决光谱窄化的问题,但是同时也需要增加放大级,以应对经 F-P 腔后功率减小的问题;同时,美国 MIT 的 Benedick 等人利用他们研制的 1GHz 的钛宝石飞秒光梳,经腔外偏硼酸钡(BBO)晶体倍频得到中心波长为 400nm 的蓝光,然后再经过 F-P 腔将重复频率提高到 20GHz 以上,但是由于其中没有加放大系统,所以得到的透过光的功率非常低,光谱带宽为 15nm,单根梳齿功率约为 20nW.利用这台天文光梳,他们对剑桥大学史密斯天文研究所的 TRES 光谱仪进行了定标研究,得到了小于 1m/s 的视向速度测量值.图 7 是他们的实验装置图.

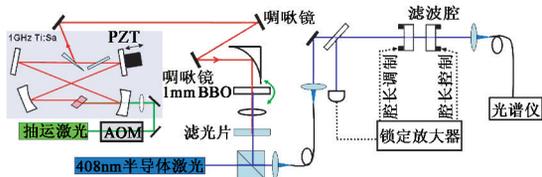


图7 基于钛宝石飞秒激光器的蓝光天文光梳实验装置图(Ti:Sa 为钛宝石振荡器;PZT 为压电陶瓷;AOM 为声光调制器)

5 结论与展望

浩瀚无垠的宇宙蕴藏着无数人类未知的奥秘,到底有没有系外生命存在?宇宙是否在膨胀?基本物理常数的数值是否会变化?诸如此类的问题还有很多,而对这些问题的探索是揭示人类所生存的宇宙的起源乃至未来命运的重要线索,因此历来为科学家所高度重视.

高精度的天文光谱仪作为研究天体物理的一种

重要工具,对于系外行星搜索、宇宙膨胀速度测量等研究具有重要意义,可以预期,未来几年内天文光梳将成为高精度天文光谱仪的常规波长定标源.前面讨论中都是以钛宝石飞秒激光器为核心器件,钛宝石光梳虽然技术相对成熟,但是调节操作都有一定难度,而且对环境要求苛刻,最近几年发展起来的光纤飞秒激光器,由于采用半导体激光器抽运,体积大大缩小,而且具有免维护、便携性好以及 24 小时以上长期锁定等优点,因此以光纤光梳为基础的天文光梳势必将成为未来的发展趋势.例如,德国的 MPQ 及美国的 NIST 正在着手实施的天文光梳计划都建立在掺镱的光纤光梳上,通过两级放大及两级 F-P 腔滤波,得到可见蓝绿光波段的超高重复频率的天文光梳.

总之,随着光纤光梳技术及相关的超高重复频率飞秒激光技术的发展,科学家会找到更多稳定的新型的超高重复频率光梳源,它们都基于半导体或微腔等技术.一旦天文光学频率梳将天文光谱仪视向速度测量精度提高到 1cm/s 量级,则人类距离揭示类地行星、地外文明、宇宙膨胀等重大科学问题的答案将会越来越近.

参考文献

- [1] Jones D J, Diddams S A *et al.* Science, 2000,288:635
- [2] Apolonski A, Poppe A, Tempea G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000,85:740
- [3] Holzwarth R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000,85:2264
- [4] Udem Th, Holzwarth R, Hänsch T W. Nature, 2002,416:233
- [5] Schnatz H, Lipphardt B, Helmcke J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996,76:18
- [6] Udem T, Reichert J, Holzwarth R *et al.* Opt. Lett., 1999,24:881
- [7] Udem T, Reichert J, Hänsch T W *et al.* Phys. Rev. A, 2000, 62:031801
- [8] Reichert J, Holzwarth R, Udem T *et al.* Opt. Commun., 1999,172:59
- [9] Udem Th, Diddams S A, Vogel K R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001,86:4996
- [10] Wilpers G, Oates C W, Diddams S A *et al.* Metrologia, 2007, 44:146
- [11] Diddams S A, Hollberg L, Ma L S *et al.* Opt. Lett., 2002,27: 58
- [12] Diddams S A, Udem Th, Bergquist J C *et al.* Science, 2001, 293:825
- [13] Ye J, Cundiff S T. Femtosecond optical frequency comb: principle, operation and applications. Kluwer Academic Publishers; Springer Norwell, MA
- [14] Fischer M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004,92:230802
- [15] Goulielmakis E *et al.* Science, 2008, 320:1614

- [16] Hänsch T W, Hall J L. received the 2005 Nobel Prize in Physics for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique
- [17] 魏志义. 物理, 2006, 35(3): 213 [Wei Z Y. Wuli (Physics), 2006, 35(3): 213 (in Chinese)]
- [18] Murphy M T, Udem Th *et al.* Mon. Not. R. Astron. Soc. , 2007, 380: 839
- [19] Lovis C, Pepe F. A&A, 2007, 468: 1115
- [20] Li Chih-Hao, Benedick Andrew J *et al.* Nature, 2008, 452: 610
- [21] Steinmetz T, Wilken T *et al.* Science, 2008, 321: 1335
- [22] Griffin R F, Griffin R E. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1973, 162: 243
- [23] Campbell B, Walker G A H. Publication of the Astronomical Society of the Pacific, 1979, 91: 540
- [24] 韩海年, 魏志义, 张军等. 物理学报, 2005, 54(1): 149 [Han H N, Wei Z Y, Zhang J *et al.* Acta Physica Sinica, 2005, 54(1): 149 (in Chinese)]
- [25] 韩海年, 张炜, 佟娟娟等. 物理学报, 2007, 56(1): 291 [Han H N, Zhang W, Tong J J *et al.* Acta Physica Sinica, 2007, 56(1): 291 (in Chinese)]
- [26] Takao F, Jens R *et al.* Opt. Lett. , 2005, 30: 332
- [27] Takao F, Alexander A, Ferenc K. Opt. Lett. , 2004, 29: 632
- [28] Zhang W, Han H N, Zhao Y Y *et al.* Optics Express, 2009, 17: 6059
- [29] 韩海年, 赵研英, 张炜等. 物理学报, 2007, 56(5): 2756 [Han H N, Zhao Y Y, Zhang W *et al.* Acta Physica Sinica, 2007, 56(5): 2756 (in Chinese)]
- [30] Braje D A, Kirchner M S, Osterman S *et al.* European Physical Journal D, 2008, 48: 57
- [31] Albrecht B, Dirk H, Scott A D. Science, 2009, 326: 30
- [32] Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C *et al.* Appl. Phys. B, 2009, 96: 251