

引用格式: LIU Tongjun, YE Huiqi, TANG Liang, et al. Research Advance in Astronomical High-precision Wavelength Calibration Technology (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(5):0552203

刘桐君,叶慧琪,唐靓,等. 天文光谱高精度波长定标技术研究进展(特邀)[J]. 光子学报, 2023, 52(5):0552203

天文光谱高精度波长定标技术研究进展(特邀)

刘桐君^{1,2,3}, 叶慧琪^{1,2}, 唐靓^{1,2}, 郝志博^{1,2}, 韩建^{1,2}, 翟洋^{1,2}, 肖东^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 基于多普勒效应的视向速度法是探测太阳系外行星的重要方法, 探测类地岩石行星需要至少 10 cm/s 的长期测量精度, 这对波长定标技术提出了较高的要求。自 2008 年锁模激光器天文光梳系统在天文台光谱仪上进行波长定标测试以来, 高精度波长定标技术得到了飞速发展, 并在之后几年相继出现了使用连续光法布里珀罗标准具、电光调制天文光梳、微腔天文光梳等进行波长定标测试的报道。这些技术所实现的定标精度已经超越上一代基于气体吸收池或空心阴极灯的定标精度, 并具有支持 10 cm/s 或更高长期定标精度的潜力。本文总结了这几种技术的现状并对其未来发展做了展望。

关键词: 多普勒视向速度法; 波长定标; 天文光梳; 法布里珀罗标准具; 系外行星探测

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235205.0552203

0 引言

类地系外行星的探测和研究是目前天文界最关注的焦点之一。目前基于不同技术原理已开发出微透镜^[1,2], 凌日搜索^[3,4], 直接成像^[5,6], 多普勒视向速度法等一系列方法, 其中基于多普勒效应的视向速度法适用范围广泛, 是系外行星探索的重要技术^[7]。1995 年使用该技术发现了一颗围绕太阳类型恒星运行的系外行星^[8], 即著名的 51 Peg b, 该发现也在 2019 年获得诺贝尔物理学奖。这开启了质量为地球质量 100 倍及以上的巨大行星密集发现的时代^[9](已发现的系外行星可查询 <http://exoplanet.eu/catalog/>)。多普勒视向速度法通过测量恒星光谱的多普勒频率移动计算恒星在观察方向上的速度分量, 并通过视向速度的大小与变化周期来确定是否有环绕恒星运行的行星。恒星的视向速度大小及变化周期受自身质量和环绕行星的质量、行星运行轨道、观测方向等参数的影响。20 世纪 80 年代到 90 年代, 视向速度的测量精度为 3 m/s~15 m/s, 这种精度的测量只能发现质量远大于地球的系外行星。探测类地行星的视向速度测量精度需要进一步提高, 以地球围绕太阳运行带来的太阳视向速度作为参考, 类地行星的探测预估需要 9 cm/s^[10]左右的测量精度并保持一年以上。而一些其他应用如通过视向速度法直接测量宇宙的膨胀甚至需要更高的 1 cm/s 的测量精度^[11]。这也对光谱波长定标技术提出了更高的要求。

利用已知物质的吸收或发射光谱(如碘元素吸收池和钷-氙灯)进行波长定标的技术被广泛应用于世界各地的天文台^[12-14]。此类波长定标方法由于受到天然的谱线展宽, 谱线位置分布不均, 元素灯老化等问题的影响^[12], 波长定标的精度的极限大约为 1 m/s, 无法满足类地行星探测所需的 10 cm/s 的定标精度要求^[13]。激光技术特别是激光频率梳的快速发展为新一代高精度波长定标带来了机遇, 2002 年, UDEM T 等^[15]提出激光频率梳可能用于高精度光谱测量。2008 年, 研究人员通过将基于锁模激光器的激光频率梳和法布里珀罗腔相结合, 研制出与天文光谱仪分辨能力相匹配的天文光梳^[16-17]并将其应用于天文台的光谱仪上, 这种天

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 12293054, 12273082, 11903060), 中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费

第一作者: 刘桐君, tjliu2022@niaot.ac.cn

通讯作者: 肖东, dxiao@niaot.ac.cn

收稿日期: 2023-01-01; 录用日期: 2023-03-14

<http://www.photon.ac.cn>

文光梳有望达到 cm/s 级别的定标精度。在这之后,基于锁模激光器的天文光梳系统得到了快速发展和进一步改进,如通过多个法布里珀罗腔级联进一步提高天文光梳梳齿中心频率准确性^[10,18],通过光子晶体光纤扩展天文光梳的波长覆盖范围^[18,19],通过八边形光纤或者光纤扰动的办法降低多模光纤模式噪声^[20-22],光谱整形技术改善定标谱线信噪比^[23]等等。这些技术进一步拓宽了天文光梳的工作波段并提高了波长定标精度,正由于此,天文光梳已在全球多个天文台光谱仪上作为波长定标源成功应用。目前天文光梳系统最高精度的测试是 PROBST R 等^[24]在欧洲南方天文台高精度视向速度行星搜索者(The High Accuracy Radial velocity Planet Searcher, HARPS)光谱仪上的测试,在这次测试中,使用了两个独立的具有相同等级精度的天文光梳互相验证,结果显示天文光梳系统在 101 min 实现了 1 cm/s 的定标精度。虽然基于锁模激光器的天文光梳系统是目前实际测量精度最高的波长定标系统,但是该技术还是存在着短板。一般来说商用基于锁模激光器的激光频率梳的重复频率(几百 MHz)小于光谱仪能够分辨的频率差(几个 GHz),系统需要配备几个锁定的法布里珀罗腔进行滤波,这不可避免的导致整个系统复杂,造价高昂。同一时期,连续光源配合法布里-珀罗标准具产生类光梳的定标光源,通过电光调制直接产生与光谱仪分辨能力相匹配的光梳等技术也在快速发展并被用于实际测量中。在最近几年,基于耗散克尔孤子的微腔激光频率梳由于其尺寸小,功耗较低,无需滤波的优点,也开始进行视向速度测量的波长定标验证测试,并取得了不错的结果。

本文分别介绍使用碘吸收池以及钷-氩灯的波长定标情况以及 2008 年之后开发的能实现更高波长定标精度的基于锁模激光器的天文光梳、连续光法布里珀罗标准具定标源、电光调制天文光梳、微腔天文光梳的基本原理与典型系统,以及它们目前在全世界各地天文台的实际使用及测试情况,最后总结并展望未来可能的发展方向。

1 气体吸收池及空心阴极灯定标源

使用已知的元素吸收或发射谱线对待测光谱进行波长定标是一种常见的方法。对于测量天体的视向速度的应用来说,早在 1979 年, CAMPBELL B 和 WALKER G^[25]使用氟化氢的吸收光谱对太阳光谱进行了标定,实现了 15 m/s 的视向速度测量精度。使用吸收光谱作为波长定标参考时,通常把充满某种物质的气体吸收池插入到光谱仪的光路中,待测的光谱会通过气体吸收池并被其中的物质吸收,此时待测光谱中将包含已知的元素吸收峰。这种方法使用最为常见的是碘吸收池。碘吸收池的材料一般是玻璃,一个 Subaru 望远镜高色散光谱仪(High Dispersion Spectrograph, HDS)设计的碘吸收池实物图^[26]如图 1(a)所示。图中位于中间的透明玻璃器具即为碘吸收池,碘吸收池会在加入碘单质后进行密封。在实际使用时,需要进行温度控制将碘吸收池的温度控制在 50°C 左右以保证碘以气体的形式存在于池中。碘吸收池在 20 世纪 80 年代被广泛用于世界各天文台的波长定标中,如 1987 年到 2011 年之间, Lick 天文台的 Hamilton 光谱仪^[27]使用了碘吸收池进行了视向速度测量,能实现 3 m/s 的单次测量精度,并在此期间发现了第一颗处于偏心轨道的行星以及第一个主序星多行星系统。从 1996 年起,在 10 m Keck-1 望远镜的高分辨率阶梯光谱仪(High Resolution Echelle Spectrometer, HIRES)^[28]上也使用了碘吸收池进行视向速度测量,能实现 3 m/s 的单次测量精度,在此期间对上千颗恒星进行了观测。除此之外,还有 McDonald 天文台 Tull 光谱仪^[29], 3.9 m 英-澳

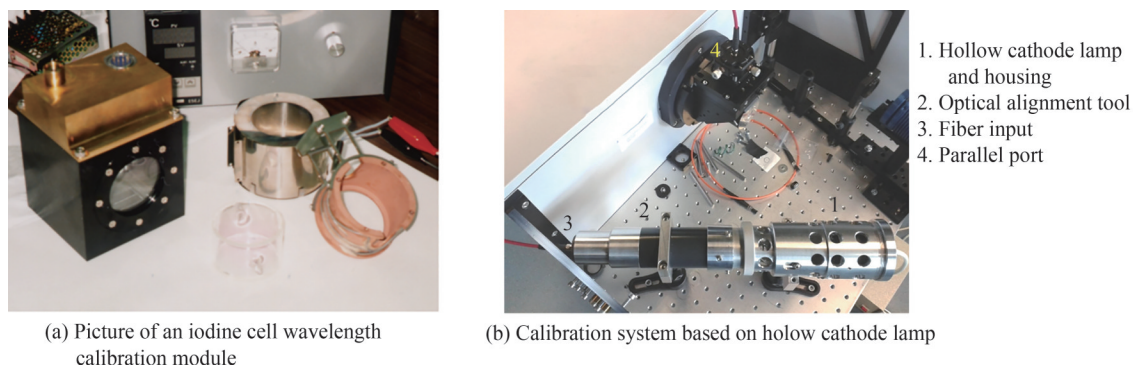


图 1 碘吸收池^[26]及空心阴极灯^[33]实物图
Fig.1 Pictures of iodine cell^[26] and hollow cathode lamp^[33]

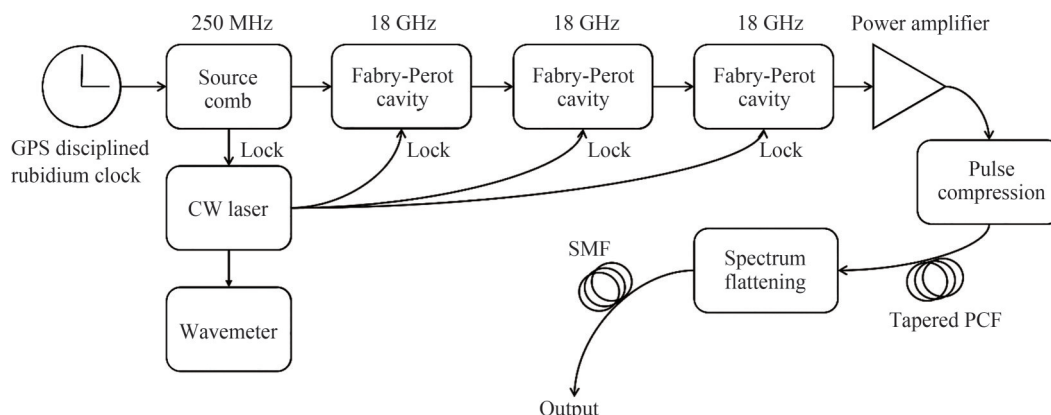
望远镜伦敦大学学院阶梯光谱仪(University College London Echelle Spectrograph, UCLES)^[30], 1.5米托洛洛山美洲天文台(Cerro Tololo Inter-American Observatory, CTIO)望远镜 CHIRON 光谱仪^[31]等都使用了碘吸收池进行波长定标。碘吸收池的波长定标性能受到其谱线分布的限制,主要工作在 510 nm~620 nm 之间,除此之外,碘吸收池的温度对标定精度也有着一定影响^[32]。这些因素都一定程度上限制了使用碘吸收池定标的精度。

而和碘吸收池不同的是,钷-氩灯作为另一种较为常见的定标光源,使用的是发射光谱进行波长定标。钷-氩灯是一种空心阴极灯,一个被应用到 Calar Alto 天文台的用于搜索 M 矮星系内行星的光学近红外阶梯光谱仪(Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs, CARMENES)的空心阴极灯实物图^[33]如图 1(b)所示,图中数字 1 对应的物体就是空心阴极灯及其外壳。空心阴极灯的阴极一般由金属或金属氧化物组成,空心阴极灯中还会填充不与阴极金属发生反应的惰性气体。在进行工作时会在阴极与阳极之间加上几百伏特的电压,阴极的金属原子在此过程中会溅射离开阴极,并在之后从激发态返回基态并发射出各个波长的光。钷-氩灯发射谱线锐利并完全覆盖可见光及近红外波段,且在自然界中,钷元素基本只有²³²Th,没有其它同位素,避免了因为同位素带来的光谱谱线改变^[34],这些特性使得其很适合被应用到波长定标中。世界很多天文台都使用了钷-氩灯进行了波长定标,欧洲南方天文台 3.6 m 望远镜的 HARPS 光谱仪^[35]就使用了钷-氩灯进行了波长定标,实现了 0.8 m/s 的定标精度并进行了一系列对 M 矮星系内行星^[36]和 FGK 型恒星周围行星的探测^[37]。Haute Provence 1.93 m 望远镜的用于观测恒星内部和系外行星现象光谱仪(Spectrographe pour l'Observation des Phénomènes des Intérieurs stellaires et des Exoplanètes, SOPHIE)^[38],印度 Mount Abu 1.2 m 望远镜的物理研究实验室先进视向速度搜索(Physical Research Laboratory Advance Radial-velocity Abu-sky Search, PARAS)光谱仪^[39]等都使用了钷-氩灯作为定标光源。从定标精度上看,使用钷-氩灯进行波长定标的精度会略高于使用碘吸收池进行波长定标的精度,但是这两种技术由于受到谱线分布不均匀,谱线存在随时间发生改变的因素的影响,都无法支持 10 cm/s 的定标精度^[12]。于此同时钷-氩灯还面临着另一些问题,如生产商由于敏感材料管制使用氧化钷而不是金属钷作为阴极带来的光谱污染^[40]。为了能够进一步提高波长定标精度以满足探测系外类地行星的要求,研究人员开始开发新的定标光源如天文光梳系统以及连续光法布里珀罗标准具定标源。尽管如此,钷-氩灯这类定标源由于其性价比高,使用方便,依旧是现在各天文台光谱仪波长定标模块的重要组成部分。

2 基于锁模激光器激光频率梳的天文光梳

使用基于锁模激光器激光频率梳的天文光梳进行波长定标是目前精度最高的波长定标方法,该系统的复杂程度也是最高的。以 PROBST R 等^[24]在 HARPS 光谱仪上测试的激光频率梳 1(Laser Frequency Comb 1, LFC1)系统为例介绍该系统的组成和各部分的作用。该系统研制于德国马克斯普朗克量子光学研究所并被应用于欧洲南方天文台 3.6 m 望远镜的 HARPS 光谱仪的校准,是比较完备和典型的锁模激光器天文光梳。该系统的示意图如图 2 所示。

激光频率梳由锁模掺镱光纤激光器产生,其重复频率 250 MHz,中心波长 1 040 nm。激光频率梳各个模式的频率可以用公式 $f = mf_r + f_0$ 表示,式中的 f_r 代表重复频率, m 代表一个较大的整数, f_0 代表相移频率。重复频率和相移频率都被锁定到经过全球定位系统(Global Positioning System, GPS)信号校准的铷原子钟,这使得该激光频率梳在几个小时的时间尺度上具有 $\Delta f/f = 5.6 \times 10^{-12}$ 的精度,这相当于 0.3 cm/s 的视向速度测量精度。HARPS 光谱仪^[14]的分辨率 R 为 115 000,这相当于在波长 515 nm 处的能够分辨的频率间隔为 5.2 GHz^[23]。而为了使激光频率梳能够被光谱仪清晰分辨,一般需要将重复频率提高到光谱仪分辨能力的 3~4 倍。所以该系统使用了三个级联的精细度为 2 600 的法布里珀罗腔将激光频率梳 250 MHz 的重复频率提高到 18 GHz,这相当于每 72 个模式中只保留一个模式。在法布里珀罗腔中的大部分模式的传输受到限制,但这些模式并不是完全消失,一般单个法布里珀罗腔对于边模的抑制比在 20~30 dB,而无法被光谱仪分辨的未完全消失的边模将会使得光梳梳齿中心发生偏移。使用多个法布里珀罗腔级联有助于提高对于边模的抑制,进而减小梳齿的偏移。同时为了保持法布里珀罗腔的稳定,采用 PDH(Pound-Drever-Hall, PDH)激光稳频方法^[41]将法布里珀罗腔锁定到一个连续波激光器上,连续波激光器本身则被锁定在频率梳



CW laser: continue wave laser, tapered PCF: tapered photonics crystal fiber, SMF: single mode fiber

图2 锁模激光器天文光梳系统示意图^[24]

Fig.2 Diagram of mode lock laser astro-comb system^[24]

透过腔体传输的模式频率之一上。经过滤波的频率梳会进行光功率放大和光脉冲压缩以补偿经过法布里珀罗腔之后的功率损失,此系统中光功率放大和光脉冲压缩使得脉冲的平均功率达到 12 W,脉冲宽度达到 130 fs。放大后的光梳有足够大的峰值功率以通过光子晶体光纤实现光谱展宽,从红外波段展宽到可见光波段。之后光梳被色散后送入基于空间光调制器的光谱整形系统,利用空间光调制器可以调整不同波长的强度,以实现光梳全谱流量均衡。天文光梳在送往光谱仪的过程中,往往还需要在多模光纤中进行传输,传输过程中形成的散斑,会影响高分辨率光谱的信噪比。一般使用八边形光纤和动态扰模的方法使得多模光纤中各模式均匀混合,获得更均匀的输出光。此类天文光梳已经进行了实际的对天测试,并作为某些天文台的标准定标源。目前报道的基于锁模激光器的天文光梳在各天文台测试或运行的情况如表 1 所示。

表 1 锁模激光器天文光梳运行和测试报告

Table 1 Operation and test reports of astro-comb of mode-locked laser

Test location and equipment	Repetition frequency	Frequency band	Accuracy
Vacuum tower telescope ^[16, 42, 43]	15 GHz	480 nm~640 nm	Highest at 3 cm/s
Multiple mirror telescope ^[17]	25 GHz	850 nm~950 nm	No measurement (estimated 1 cm/s)
Tillinghast telescope(Tillinghast Reflector Echelle Spectrograph, TERS) ^[44]	400 nm 50 GHz 800 nm 30 GHz	390 nm~410 nm 750 nm~850 nm	A few hours testing 1 m/s
Hobby-Eberly telescope(Pathfinder) ^[45]	25 GHz	1 450 nm~1 700 nm	Four nights testing 10 m/s
Telescopio Nazionale Galileo telescope(Northern hemisphere High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher, HARPS-N) ^[19]	16 GHz	500 nm~620 nm	Single measurement 6 cm/s
Xinglong 2.16 m telescope(high resolution spectrograph) ^[46, 47]	25 GHz	460 nm~730 nm	Highest at 11 cm/s
Vacuum tower telescope(Laser-based Absolute Reference Spectrograph, LARS) ^[48]	8 GHz	480 nm~700 nm	A few hours testing 1 m/s
10 m Southern African Large telescope (High Resolution Spectrograph, HRS) ^[49]	15 GHz	550 nm~890 nm	10 m/s
4.3 m Lowell Discovery telescope(The Extreme Precision Spectrograph, EXPRES) ^[50, 51]	30 GHz	450 nm~700 nm	Highest at 30 cm/s
Fraunhofer telescope(Fiber Optics Cassegrain Echelle Spectrograph, FOCES) ^[24, 52, 53]	25 GHz	455 nm~690 nm	3.5 h testing 12 cm/s
Very large telescope (Echelle Spectrograph for Rocky Exoplanets and Stable Spectroscopic Observations, ESPRESSO) ^[54-56]	18 GHz	510 nm~710 nm	Higher than 1 m/s
ESO 3.6 m telescope(HARPS) ^[18, 23, 24, 57]	18 GHz	438 nm~690 nm	101 minutes testing 1 cm/s

从表1可以得知,锁模激光器天文光梳目前的工作波段主要集中在可见光波段,少部分工作在红外,经过滤波后频率梳的重复频率一般在8~30 GHz范围内,具体由光谱仪的分辨率决定。自2008年马克思普朗克量子光学研究所的STEINMETZ T等^[16]在德国真空塔望远镜上以及哈佛大学LIC等^[17]在多镜面望远镜分别使用商用锁模激光器和法布里珀罗腔组合构成天文光梳系统进行波长定标测试,并在之后的几年时间里持续改进。此类系统得到了快速发展并在世界多个天文台进行了验证,大概经过10年左右成为较为成熟的定标系统,目前锁模激光器天文光梳系统最高精度为在101 min的运行中实现了1 cm/s的精度^[24]。由于系统的复杂度高,将锁模激光器天文光梳系统作成交钥匙系统具有挑战,目前只有德国门罗系统公司对外出售这种天文光梳。兴隆2.16 m望远镜等望远镜运行的光梳系统即来自该公司,根据本组最近的数据分析,兴隆2.16 m望远镜天文光梳系统的实际波长定标精度30 cm/s左右,如果进一步的叠加数据消除噪声可以提高到11 cm/s左右,更高的精度则受到光谱仪的限制而无法达到。使用光谱仪配合天文光梳进行视向速度测量的精度不仅和光梳自身稳定度有关,还和所使用光谱仪的分辨率、数据处理方法等息息相关。如在FOCES光谱仪工作的光梳被借用到HARPS光谱仪作为对比光梳之后,和HARPS原本配备的光梳互相验证具有最高1 cm/s的精度,而这一台光梳在FOCES光谱仪上的定标精度为12 cm/s。但就普遍情况来看,基于锁模激光器的天文光梳已成为最高精度的定标工具,远高于使用气体吸收池或空心阴极灯定标精度。同时该定标系统也在持续发展,朝着更加操作友好、更长时间稳定工作、覆盖更宽光谱的方向改进。此外,还有很多建造中的锁模激光器天文光梳系统,如2022年南非天文台CRAUSE L等^[58]关于10 m南非大型望远镜(Southern African Large Telescope, SALT)上高分辨率光谱仪(High Resolution Spectrograph, HRS)的定标光梳的研发报告,他们正在为该光谱仪红色通道部分(555 nm~890 nm)搭建可靠的锁模激光器天文光梳系统,并计划在之后扩展到蓝色通道(370 nm~555 nm)。2022年8月门罗系统公司WU Yuanjie等^[59]报告了该公司为Keck望远镜行星发现者(Keck Planet Finder, KPF)光谱仪设计的锁模激光器天文光梳交钥匙系统,该系统为全光纤耦合,具有无需调节对准的滤波模块和可选择的分别覆盖445 nm至870 nm波段和915 nm至1450 nm的工作波段。除此之外英国赫瑞瓦特大学CHENG Y等^[60]针对极大望远镜(Extremely Large Telescope, ELT)的高分辨率红外辐射探测器(High-resolution Infrared Radiation Sounder, HIRS)光谱仪定标需求研制了基于简并光参量振荡器(Optical Parametric Oscillator, OPO)的,覆盖1.15 μm~1.8 μm的天文光梳等。这都说明锁模激光器天文光梳已经成为高精度波长定标最重要的技术之一。当然锁模激光器天文光梳技术也存在着一些短板,如系统十分复杂,造价高昂,其中一些部件如光子晶体光纤需要经常更换以维持正常使用等。这些短板也促使人们对其他定标工具如连续光法布里珀罗标准具定标源、电光调制天文光梳、微腔天文光梳进行研究。这些定标源目前的综合能力还不能和锁模激光器天文光梳相比,但在某些方面已经体现出优势或者潜力。

3 连续光法布里珀罗标准具定标源

在锁模激光器天文光梳出现的同一时代,出现了使用连续光源配合法布里珀罗腔的定标光源进行高精度定标的报道。往前追溯将法布里珀罗标准具应用到天文探测早在20世纪80年代就有尝试^[61]。法布里珀罗腔是一种由双镜面组成的谐振腔,可以用作滤波器件、谐振器件、传感器件等。对于法布里珀罗标准具条件下的麦克斯韦方程的解已经有比较完善的研究^[62],经过法布里珀罗标准具过滤后的两个强度极大值之间的间隔也就是标准具的自由光谱范围和频率的关系可以被表示为

$$\Delta f_{\text{FSR}}(f) = \frac{c}{2nL + \frac{c}{\pi} \frac{\partial \phi(f)}{\partial f}} \quad (1)$$

式中, f 表示光的频率, n 表示腔内折射率, L 表示腔的物理长度, c 表示光速, $\phi(f)$ 表示镜面反射带来的相位延迟。这个延迟和频率相关的,在实际情况中会导致经过法布里珀罗标准具过滤后的模式之间的频率间距不完全相等。不过相差的比较小,所以在一般情况下,镜面带来的相位延迟被忽略,可以得到简化式为

$$\Delta f_{\text{FSR}} = \frac{c}{2nL} \quad (2)$$

而存在的各模式的频率可以表示为

$$f_{m_0} = m_0 \cdot \Delta f_{\text{FSR}} \quad (3)$$

式中, m_0 是一个整数。式(3)表明连续光经过法布里珀罗标准具的传播后, 只有一系列特定频率的光会在法布里珀罗标准具中得到极大增强。如果法布里珀罗标准具参数是确定和不变的, 按照式(2)和式(3)这些特定频率也是固定的而且是等频率间隔的, 这也意味着可以通过连续光和法布里珀罗标准具组合获得频率域上类似光梳分布的定标源。当然这和锁模激光器产生的激光频率梳有区别, 激光频率梳可以实现自参考并锁定到原子钟, 其模式频率具有较高的稳定性和确定性。在实际应用中经过法布里珀罗标准具过滤的光源需要参考原子吸收谱线等已知频率来确定其透过峰的频率, 和激光频率梳的精度及稳定程度并不在同一个等级上。当法布里珀罗标准具的参数(折射率、腔长等)由于环境改变而变化时, 透过的模式频率也会发生漂移, 其长时间稳定性相对来说会更差。尽管如此, 连续光法布里珀罗标准具定标源相对于激光频率梳还是拥有一些优势, 其系统相对简单, 造价比较低, 而且在满足较高的环境控制条件下, 能实现比气体吸收池, 空心阴极灯等精度更高的定标。正是由于这个原因, 随着锁模激光器天文光梳的进一步发展, 连续光法布里珀罗标准具和锁模激光器天文光梳构成了互补的关系, 逐渐被应用于世界各天文台的波长标定过程中。目前已经报道的在世界各天文台实现定标测试的连续光法布里珀罗标准具定标源的报告如表2所示。

表2 连续光法布里珀罗标准具运行及测试报告
Table 2 Operation and test reports of white light Fabry Perot etalon

Test location and equipment	Frequency band	Etalon type	Stable method	Accuracy
ESO 3.6 m telescope (HARPS) ^[63-65]	380 nm~690 nm	Air gap etalon	Passive stable	One night testing 10 cm/s Sixty days measurements 1 m/s
Calar Alto 3.5 m telescope (CARMENES) ^[66-68]	600 nm~1 050 nm 900 nm~1 350 nm	Air gap etalon	Passive stable	At the visible band 1.6 m/s At the near infrared band 6.5 m/s
Hobby-Eberly telescope (The Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, APOGEE) ^[69]	1.5 μm ~1.7 μm	Fiber etalon	Passive stable	12 hours testing 2 m/s
Large Binocular Telescope (Potsdam Echelle Polarimetric and Spectroscopic Instrument, PEPSI) ^[70, 71]	400 nm~900 nm	Air gap etalon	Passive stable	10 m/s
Anglo-Australian telescope (High Efficiency and Resolution Multi- Element Spectrograph, HERMES) ^[72]	450 nm~800 nm	Fiber etalon	Lock at rubidium peak	Few minutes testing at m/s level
Himalayan Chandra telescope (Hanle Echelle Spectrograph, HESP) ^[73]	500 nm~750 nm	Air gap etalon	Passive stable	No measurement (estimated 1~10 m/s)
Hobby-Eberly telescope (HPF) ^[74]	820 nm~1 280 nm	Air gap etalon	Passive stable	No measurement (Support 10 cm/s of a night, 30 cm/s of ten days)
Canada-France-Hawaii telescope (SpectroPolarimètre Infra-Rouge, SPIRou) ^[75]	950 nm~1 700 nm	Air gap etalon	Passive stable	No measurement (estimated <1 m/s)
Gemini North telescope (Magellan Advanced Radial Velocity Observer of Neighboring Exoplanets, MAROON-X) ^[76]	500 nm~920 nm	Air gap etalon	Lock at rubidium peak	Two weeks measurements 30 cm/s

从表2中可以得知, 目前已经报道的法布里珀罗标准具定标源的工作波段为可见光波段和近红外波段, 主要使用空气间隙法布里珀罗标准具, 这种标准具的示意图和在 HARPS 上进行定标测试的标准具^[63]实物图如图3所示。这种标准具的反射镜一般由具有高反射系数和低热膨胀系数的材料构成, 如镀上贵金属膜的低热膨胀系数玻璃, 两镜面之间的空隙由空气或真空组成并使用低热膨胀系数的材料作为间隔件。这种腔的优点在于由于腔的热膨胀系数也十分低且两镜面之间空隙为真空或空气, 所以该标准具的参数随着温

度的变化比较小,有利于产生稳定的定标光源谱。为了保持环境参数的稳定,一般需要放置在真空腔中并进行温度控制,这对环境控制方案提出了较高的要求。同时,光源的耦合对标准具也十分重要,光从自由空间中耦合进法布里珀罗标准具所要求的精度较高,不良的耦合会直接影响到产生的定标光谱。HAO Jun 等^[77, 78]对光纤输入情况下的法布里珀罗标准具进行了模拟,模拟结果说明输入光纤光的近场分布的改变会降低定标光谱的精度,并通过实验采用八边形光纤和扰模器改善了这一状况。

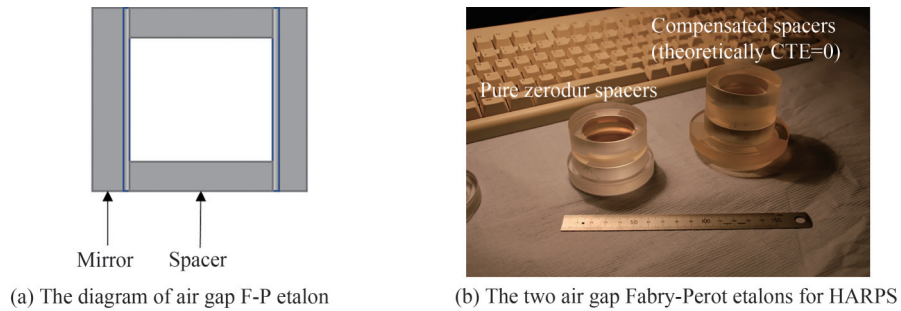


图3 空气间隙法布里珀罗标准具的示意图和实物图^[63]
Fig.3 Diagram and picture for air gap Fabry-Perot etalon^[63]

除了常见的空气间隙标准具,也有研究人员设计出其它新型标准具作为经典空气间隙法布里珀罗标准具的替代,如光纤法布里珀罗标准具,回音壁模式微腔标准具等。其中光纤法布里珀罗定标具是一种由镜面配合光纤组成的标准具,具有体积更小,易实现光源耦合,对震动不敏感等优点。HALVERSON S等^[69]在2014年设计了一种工作在 $1.5\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$ 的光纤法布里珀罗标准具,其实物图和示意图如图4(a)、(b)所示。这个标准具在APOGEE光谱仪上进行了测试,12 h定标精度达到 $2\ \text{m/s}$ 。除此之外BETTERS C等^[72]以及TANG Liang等^[79]测试的光纤法布里珀罗标准具。光纤法布里标准具虽然有很多优势,但由于两镜面之间的间隙由光纤材料填充,标准具的参数(折射率,物理长度等)容易受到热效应的影响,就目前的测试报告其定标精度不如空气间隙的法布里珀罗腔。

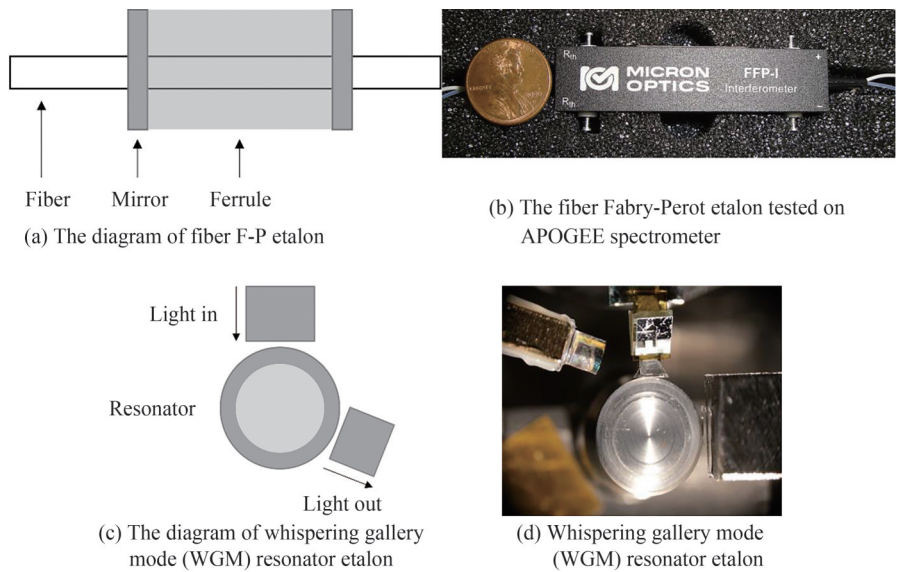


图4 光纤法布里珀罗标准具^[69]和回音壁模式标准具^[80]的示意图和实物图
Fig.4 Diagrams and pictures for fiber Fabry-Perot etalon^[69] and whispering gallery mode resonator etalon^[80]

对于非镜面的标准具目前也有尝试,回音壁模式微腔是一种能实现窄线宽、自由光谱范围可调的滤波器,具有应用到波长定标上的潜力。2020年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)的研究人员报道了一种基于回音壁模式谐振腔的标准具^[80],他们计划使用 CaF_2 或 MgF_2 材料制作一个配合白光工作在 $400\ \text{nm}\sim 800\ \text{nm}$ 具有高

稳定性的标准具。这个标准具的示意图和报道中的实物图如图4(c)、(d)所示,该标准具还在初步测试,可能具有体积小、无需镜面、高消光比等优势。

虽然新型标准具具有一些传统的气体间隙标准具不具备的优势,但使用镜面的气体间隙标准具是目前的主流。连续光配合法布里珀罗标准具完成长时间、高精度的波长定标需要分别解决透过模式频率确定和标准具长时间稳定这两个问题。法布里珀罗腔的稳定方法有很多,但和锁模激光器天文光梳系统中使用的法布里珀罗腔主动稳定方法不同的是,连续光法布里珀罗标准具定标源目前使用的稳定方式基本都为被动稳定,即放置在真空环境或对温度进行控制,不加入某种负反馈系统去主动调节法布里珀罗标准具的参数。除了被动的稳定方法之外,也有将法布里珀罗标准具锁定到铷元素吸收峰的一些尝试,2015年BETTERS C等^[72]设计的HERMES光谱仪光纤法布里珀罗标准具,让光纤法布里珀罗标准具其中一个模式锁定到了铷元素D2吸收峰,并使用积分微分控制的热电冷却器进行温度控制以实现该模式与铷元素吸收峰之间的稳定,能实现10 min运行的均方根误差小于10 cm/s。SCHWAB C等^[81]设计了一套锁定到铷D2吸收峰的法布里珀罗标准具定标系统并使用了光谱仪对该定标源进行了一些测试,实现了 10^{-10} 的锁定精度,这相当于3 cm/s的视向速度测量精度,该技术有望应用于MAROON-X^[76, 82]红外大双筒望远镜系外行星探测(Infrared large binocular telescope exoplanet reconnaissance, Ilocater)^[83]光谱仪的定标。其他还有一些尝试如使用双精细度法布里珀罗腔^[84],或两个精细度不同的腔放置在同一块低膨胀系数材料的板子上^[85],使用其中高精细度腔或者波段进行锁定等。总的来说目前主动稳定的连续光法布里珀罗标准具定标源的实际测量报告非常少,其中一些锁定技术在测试中有较好的表现并具有实现更高精度的潜力,但这些锁定技术的实际表现还需长期测试。最近有研究表明法布里珀罗标准具长期漂移具有波长相关性^[74, 86, 87],TERRIEN R等^[74]对宜居行星发现者(Habitable Zone Planet Finder, HPF)光谱仪上的标准具长达六个月的持续观察以及SCHMIDT T等^[86]对ESPRESSO光谱仪上的标准具两年半的数据分析都发现气体间隙法布里珀罗标准具每天的漂移在几cm/s,且不同波长处的漂移大小并不相等。这个长期漂移是一个波长的复杂函数,并不符合简单的标准具长度改变导致漂移的模型,被认为是和标准具镜面膜老化相关,但目前还没有确定。这些不同光谱仪上标准具的相似漂移结果说明波长相关的长期漂移在法布里珀罗标准具中普遍存在,这意味着高精度宽谱段的法布里珀罗标准具定标时需要校正这个误差,SCHMIDT T等也验证了使用空心阴极灯对这个误差进行校正的可能性。但对于主动稳定的法布里珀罗标准具来说,锁定于一个波长的标准具是否在整个工作波段都是稳定的还是一个未知的问题,可能需要进一步测试。

为了精确确定透过模式的波长,一般需要借助已知定标源的波长,如钷-氩灯、铷吸收峰做参考求解,现在已经提出了一些方法。BAUER F等^[88]在2015年提出了一种组合钷-氩灯和法布里珀罗标准具求波长解的方法并在HARPS光谱仪上进行验证,将结果和用天文光梳系统求波长解的结果做了对比,发现差异在10 m/s左右。2019年CERSULLO F等^[89]提出了一种将钷-氩灯和法布里珀罗标准具组合求得波长解的方法,实测表明该方法相比于只使用钷-氩灯定标的精度来说精度提高了一倍。2021年HAO Zhibo等^[90]对钷-氩灯联合法布里珀罗标准具求波长解的方法进行了验证,验证结果表明使用该方法获得波长解的法布里珀罗标准具具有高于钷-氩灯的定标精度。相比于锁模激光器天文光梳,连续光法布里珀罗标准具定标源长期定标精度和短期定标精度都更低,所以不论是开发新的主动稳定的方法还是研究长期漂移误差的波长相关性,都是在朝着提高这种定标源的稳定性和定标精度方向发展。虽然想要达到和锁模激光器天文光梳同一等级的定标精度较为困难,但法布里珀罗标准具有可能在未来支持10 cm/s精度的长期定标,更由于其系统简单、造价低等优势,是未来紧凑定标系统甚至空间望远镜定标系统^[91]的一个好的选择。

4 电光调制天文光梳

随着锁模激光器天文光梳在高精度波长定标领域中的成功应用,研究人员也开始尝试使用基于其它原理产生的频率梳进行波长定标,比如通过电光调制的频率梳和基于克尔效应的微腔梳等。其中电光调制的频率梳^[92, 93]基于晶体的电光效应,通过加上电压改变晶体折射率以实现相位调制,通过调制可以使光在其原有的频率附近产生具有一定频率间隔的新频率的光,也就是激光频率梳的各个模式。如果驱动源是微波信号,那么可以产生重复频率10 GHz以上的频率梳。正因如此电光调制天文光梳具有直接产生与高分辨率

光谱仪分辨能力相匹配的 10 GHz 以上重复频率的频率梳的能力,系统中可以省去用于滤波的法布里珀罗腔部分,在兼具激光频率梳高精度的同时简化了系统构成。

以 METCALF A 等^[94]测试的电光调制天文光梳系统为例,介绍电光调制天文光梳系统的具体组成。该电光调制梳覆盖波段 700 nm~1 600 nm,重复频率 30 GHz,于 2018 年被安装到 9.2 m 哈伯-艾伯里望远镜的宜居行星发现者光谱仪(HPF)上并做了实际视向速度测量。实际测量已经实现接近 1 m/s 的测量精度,根据数据推测该系统可能支持小于 10 cm/s 的视向速度测量精度。该电光调制天文光梳系统如图 5 所示,光源部分包含一个连续波激光器;电光调制部分包含相位调制和振幅调制;频率展宽部分包含光放大器件、光脉冲压缩器件、非线性晶体;以及其他部分如滤波部分等。该电光调制天文光梳系统使用的是一个 1 064 nm 中心波长的连续波激光器,连续波激光被输入电光调制部分,电光调制部分由一个 30 GHz 的微波信号驱动,这个微波信号以及连续波激光器都锁定到一个 GPS 校准的原子钟。这样生成了初始频率梳,约有 100 个梳齿。之后进行频谱展宽,将初始频率梳进行光功率放大和光脉冲压缩,使其具有 70 fs 的脉冲宽度,然后使用一个 25 mm 的非线性氮化硅晶体进行频谱展宽。在该部分之后还有一个可以对光梳的光谱包络进行调制的振幅滤波系统。

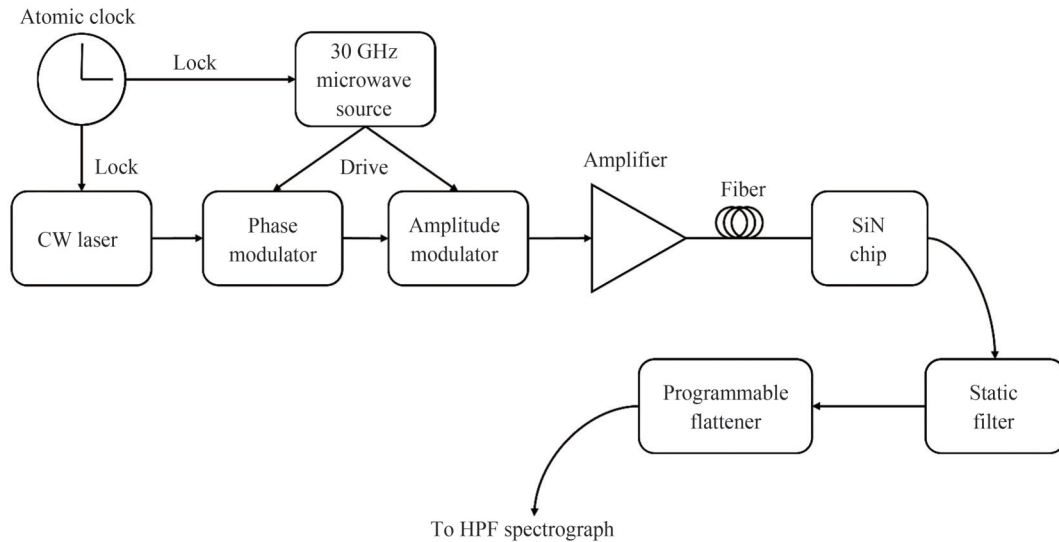


图 5 电光调制天文光梳系统^[94]示意图

Fig.5 Diagram of electro-optical modulation astronomical optical comb system^[94]

除了上面的电光调制天文光梳系统外,其它的运行报道还有 2015 年 YI X 等^[95]在 NASA 的红外望远镜(Infrared Telescope Facility, IRTF)的低温阶梯光谱仪(Cryogenic Echelle Spectrograph, CSHELL)以及在 Keck-II 望远镜近红外光谱仪(Near Infrared Spectrograph, NIRSPEC)上进行了红外电光调制天文光梳试运行和概念验证。该天文光梳覆盖红外 H 波段,重复频率 12 GHz,验证结果表明该系统可以适用于小于 1 m/s 定标精度的测量。2017 年, OBRZUD E 等^[96]在西班牙伽利略国家望远镜(Telescopio Nazionale Galileo, TNG)的 GIANO-B 近红外阶梯光谱仪上运行了一个交钥匙电光调制天文光梳系统,覆盖波长 1 400 nm~1 800 nm,重复频率 14.5 GHz,实际测试证明该定标系统的光子噪声极限精度小于 10 cm/s。SERIZAWA T 等^[97]报道,从 2019 年 2 月开始,在 Subaru 望远镜开始运行的红外多普勒(The Infrared Doppler, IRD)仪器上,使用一个电光调制,重复频率 12.5 GHz,工作波段覆盖 970 nm~1 750 nm 的激光频率梳。该仪器在三年的时间里进行了超过 100 个夜晚的观测,激光频率梳定标系统实现了长期波长定标 2 m/s 的精度。

总的来说,电光调制天文光梳系统出现于锁模激光器天文光梳系统之后,其稳定性与精度和锁模激光器天文光梳相当,具有能直接产生符合光谱仪分辨能力定标光谱的优势,在红外波段已经被实际应用于天文观测中了。但该技术还是有一些限制,直接生成的电光调制光梳波长尚未覆盖可见光波段,在模式间距较宽(30 GHz 及以上)的电光调制天文光梳系统中,还需要加入法布里珀罗腔进行滤波^[96],这在一定程度上增加了系统复杂度。还有研究^[98]表明驱动微波中的噪声容易传导给生成的电光梳,特别是对于远离连续波激光器波长的模式。

5 微腔天文光梳

微腔频率梳也被称为克尔频率梳,基于克尔效应和四波混频产生^[99]。基于耗散克尔孤子^[100]机制的微腔频率梳克服了早期的微腔频率梳容易进入调制不稳定状态,稳定性不好,无法形成稳定的锁模超短脉冲的缺点^[101],有望实现实际应用。对于视向速度测量的实际应用来说,微腔频率梳具有体积小,功耗低^[102]、稳定度高^[103],能直接产生符合光谱仪分辨能力的定标光谱等优势。最近几年,已有对微腔天文光梳进行概念验证及试运行的报道。

2017年SUH M等^[105]在Keck-II望远镜NIRSPEC光谱仪上对搭建的微腔天文光梳系统进行了验证。微腔由二氧化硅材料制成,直径3 mm,放置在硅片上,泵浦源是一个经过声光调制的连续激光。调制源和连续激光,微腔生成的频率梳都锁定到一个铷原子钟上以获得高精度。该微腔频率梳重复频率为22.1 GHz,经过光谱展宽后覆盖1 435~1 685 nm波段。和一个电光调制天文光梳系统^[95]对比,该系统能支持小于5 m/s级别的定标精度。2018年OBRZUD E等^[104]在西班牙TNG望远镜GIANO-B阶梯光谱仪上验证了一个基于氮化硅微腔,重复频率23.5 GHz的天文光梳系统,系统的示意图如图6所示。该系统中的微腔频率梳的泵浦源是电光调制1 560 nm连续激光产生的皮秒脉冲,该调制源锁定到一个经过GPS校准的铷原子钟上,而微腔频率梳自锁到泵浦源上,实现了相同的精度。在谐振腔产生激光频率梳之后通过光纤布拉格光栅对泵浦光进行了过滤以避免探测器上出现过饱和。通过和一个铀-氦空心阴极灯的定标光谱做对比并对采集的数据进行分析后得出,该微腔天文光梳系统理论上可以在测量1 s的情况下支持1 cm/s的定标精度。

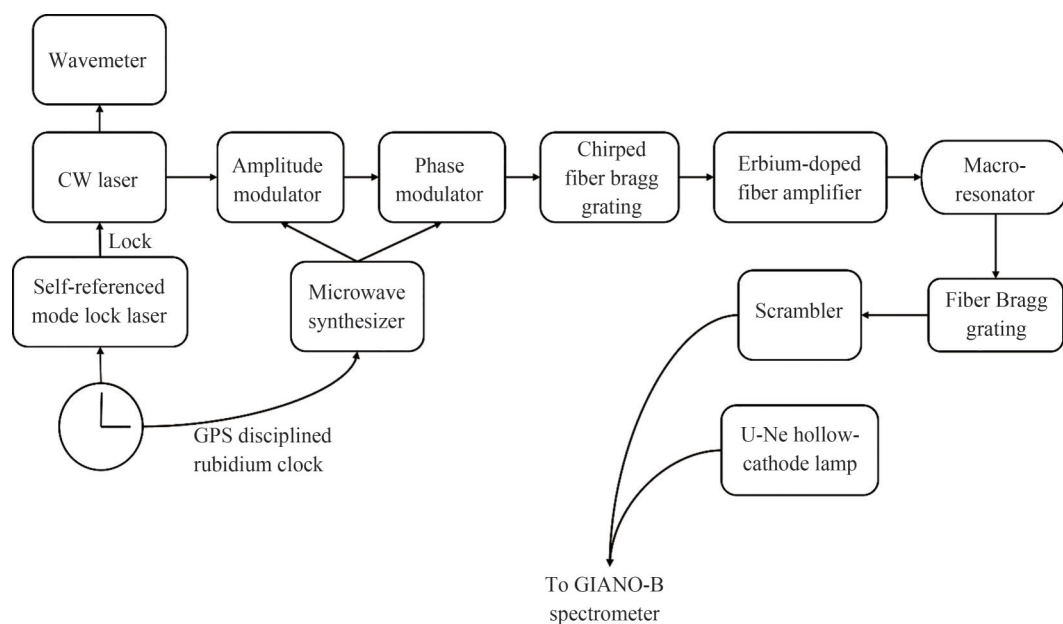


图6 GIANO-B光谱仪上测试的微腔天文光梳系统^[104]示意图

Fig.6 Diagram of microcavity astronomical comb system^[104] tested on GIANO-B spectrometer

目前微腔天文光梳还只是一些初步的概念性验证,离实际使用还有距离,可能还需要克服其本身的一些问题,如微腔频率梳主要集中在红外通信波段,可见光波段的微腔频率梳由于腔的正常色散特性而不易产生^[99]。当重复频率下降到符合天文光谱仪的分辨率时候(15~30 GHz),其带宽受限等问题。但微腔天文光梳展示了巨大的潜力,该系统在具有高定标精度的同时拥有体积小,功耗少,无需滤波等一系列优势,是未来紧凑型高精度波长定标系统的最佳选择和重要发展方向。

6 总结与展望

本文对使用碘吸收池以及钷-氩灯的波长定标技术以及自2008年以来新一代波长定标技术的发展和现状进行了介绍。这些新一代定标光源包括锁模激光器天文光梳、连续光法布里珀罗标准具定标源、电光调制天文光梳、微腔天文光梳。这些技术相比于上一代气体吸收池和空心阴极灯的定标源的最大区别在于生

成的定标光谱都具有频率域上密集、等间距分布的一系列峰值,克服了原子吸收或发射光谱分布和强度不均匀的缺点,使得视向速度的短期测量精度首次达到了1 cm/s的级别。其中最成功的莫过于基于锁模激光器的天文光梳系统,已经被广泛应用于世界各天文台的波长定标中。该系统中的典型的激光频率梳重复频率一般在几百 MHz,离适合光谱仪分辨能力的10 GHz有较大的差距,这使得该系统在实际使用时需配备滤波模块,这不可避免的增加了系统复杂度。使用锁模激光器技术直接生成较高的重复频率(GHz)的频率梳也有研究尝试^[106,107],但目前没有实际应用于天文光梳系统中。锁模激光器天文光梳在未来可能朝着使用友好、更宽工作波段等方向进行发展,特别是对宽波段天文光梳系统。目前天文光梳系统内的频率展宽模块主要使用的是光子晶体光纤,光子晶体光纤面临着容易损坏,可见光短波端附近无法覆盖的问题。利用二阶非线性效应如二次谐波^[108]或者三阶非线性效应^[109]可能解决这个问题并让天文光梳系统能在宽波段上工作。而电光调制天文光梳和微腔天文光梳都具有直接产生高重复频率的适合光谱仪分辨率频率梳的能力,与基于锁模激光器的天文光梳系统相比,可以省略用于提高光梳重复频率的滤波模块,在系统复杂度上天然优于基于锁模激光器天文光梳系统,因此成为了基于锁模激光器天文光梳的强有力竞争者,但目前这两种技术的工作波段还存在着限制,突破波长覆盖的限制是未来发展的方向之一。对于电光调制天文光梳来说,直接生成的电光调制光梳集中在红外波段,但和基于锁模激光器的天文光梳系统类似的是,在系统中加入频率展宽模块可以实现对可见光波段的覆盖,目前也有一些通过合频将电光梳的波段转移到可见光波段的尝试^[110,111]。而对于微腔天文光梳来说,目前只进行了概念验证和试运行,离完善的可长期运行的系统还有距离。从工作波段上看,现有的微腔光梳主要工作在红外波段,但已有很多将微腔生成的光梳扩展到可见光波段的尝试,如通过设计波导的几何色散以及利用模式混合^[112,113],利用暗脉冲^[114]等技术。有可能在未来开发出工作在可见光波段的微腔光梳系统,考虑到其体积小、功耗低的优点,该技术具有很大的潜力,在研发成功后还有利于未来实现波长定标功能模块小型化、集成化、甚至实现空间望远镜光谱仪的定标,在未来会是最受关注的波长定标技术之一。相比于天文光学频率梳这种较为复杂,造价高昂的定标系统,连续光法布里珀罗标准具定标源具有相当的优势。虽然目前无法达到和锁模激光器天文光梳同一等级的定标精度,但也具有超越气体吸收池或空心阴极灯定标精度,并具有支持10 cm/s长期定标精度的潜力。正在发展的新的锁定技术和对长期漂移波长相关性的研究或许有助于进一步提高这种定标源的长期稳定度,实现长期高精度定标。在目前的各天文台光谱仪的波长定标模块中,一般会包含空心阴极灯、连续光法布里珀罗标准具定标源、天文光梳系统这样一个定标精度由低到高,复杂程度也由低到高的定标组合^[51,70,115,116]。这能够使得定标模块具有高精度定标能力的同时适用于多种场景并能应对一些突发情况。随着高精度波长定标技术进一步发展,可以预见定标模块的定标精度、长期稳定度都会有所提升,成本会有所下降,实现长期10 cm/s的波长定标精度,并成为系外类地岩石行星发现和研究的的关键技术。

参考文献

- [1] MAO S, PACZYNSKI B. Gravitational microlensing by double stars and planetary systems [J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, 374: L37.
- [2] GOULD A, LOEB A. Discovering planetary systems through gravitational microlenses [J]. *The Astrophysical Journal*, 1992, 396: 104.
- [3] SOUTHWORTH J. Homogeneous studies of transiting extrasolar planets-I. Light-curve analyses [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2008, 386(3): 1644-1666.
- [4] TORRES G, WINN J, HOLMAN M. Improved parameters for extrasolar transiting planets [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, 677(2): 1324.
- [5] MAROIS C, MACINTOSH B, BARMAN T, et al. Direct imaging of multiple planets orbiting the star HR 8799 [J]. *Science*, 2008, 322(5906): 1348-1352.
- [6] WAGNER K, APAID, KASPER M, et al. Direct imaging discovery of a Jovian exoplanet within a triple-star system [J]. *Science*, 2016, 353(6300): 673-678.
- [7] MAYOR M, LOVIS C, SANTOS N C. Doppler spectroscopy as a path to the detection of Earth-like planets [J]. *Nature*, 2014, 513(7518): 328-335.
- [8] MAYOR M, QUELOZ D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star [J]. *Nature*, 1995, 378(6555): 355-359.
- [9] PEPE F, EHRENREICH D, MEYER M. Instrumentation for the detection and characterization of exoplanets [J]. *Nature*, 2014, 513(7518): 358-366.
- [10] WILKEN T, LOVIS C, MANESCAU A, et al. High-precision calibration of spectrographs [J]. *Monthly Notices of the*

- Royal Astronomical Society: Letters, 2010, 405(1): L16-L20.
- [11] LISKE J, GRAZIAN A, VANZELLA E, et al. Cosmic dynamics in the era of extremely large telescopes [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2008, 386(3): 1192-1218.
- [12] FISCHER D, ANGLADA-ESCUDE G, ARRIAGADA P, et al. State of the field: extreme precision radial velocities [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2016, 128(964): 66001.
- [13] LOVIS C, PEPE F. A new list of thorium and argon spectral lines in the visible [J]. Astronomy & Astrophysics, 2007, 468(3): 1115-1121.
- [14] LOVIS C, PEPE F, BOUCHY F, et al. The exoplanet hunter HARPS: unequalled accuracy and perspectives toward 1 cm s⁻¹ precision [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, SPIE, 2006, 6269: 249-257.
- [15] UDEM T, HOLZWARTH R, HÄNSCH T. Optical frequency metrology [J]. Nature, 2002, 416(6877): 233-237.
- [16] STEINMETZ T, WILKEN T, ARAUJO-HAUCK C, et al. Laser frequency combs for astronomical observations [J]. Science, 2008, 321(5894): 1335-1337.
- [17] LI C, BENEDICK A, FENDEL P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹ [J]. Nature, 2008, 452(7187): 610-612.
- [18] WILKEN T, CURTO G, PROBST R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level [J]. Nature, 2012, 485(7400): 611-614.
- [19] GLENDAY A, LI C, LANGELLIER N, et al. Operation of a broadband visible-wavelength astro-comb with a high-resolution astrophysical spectrograph [J]. Optica, 2015, 2(3):250-254.
- [20] LEMKE U, CORBETT J, ALLINGTON-SMITH J, et al. Modal noise prediction in fibre spectroscopy- I . Visibility and the coherent model [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2011, 417(1): 689-697.
- [21] SPRONCK J, KAPLAN Z, FISCHER D, et al. Extreme Doppler precision with octagonal fiber scramblers[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, SPIE, 2012, 8446: 1210-1219.
- [22] MCCOY K, RAMSEY L, MAHADEVAN S, et al. Optical fiber modal noise in the 0.8 to 1.5 micron region and implications for near infrared precision radial velocity measurements[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, SPIE, 2012, 8446: 1161-1168.
- [23] PROBST R, CURTO G, ÁVILA G, et al. Relative stability of two laser frequency combs for routine operation on HARPS and FOCES [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, SPIE, 2016, 9908: 1839-1854.
- [24] PROBST R, MILAKOVIĆ D, TOLEDO-PADRÓN B, et al. A crucial test for astronomical spectrograph calibration with frequency combs [J]. Nature Astronomy, 2020, 4(6): 603-608.
- [25] CAMPBELL B, WALKER G. Precision radial velocities with an absorption cell [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1979, 91(542): 540.
- [26] KAMBE E, SATO B, TAKEDA Y, et al. Development of iodine cells for the subaru HDS and the okayama HIDES: I. instrumentation and performance of the spectrographs [J]. Publications of the Astronomical Society of Japan, 2002, 54(6): 865-871.
- [27] FISCHER D, MARCY G, SPRONCK J. The twenty-five year lick planet search [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2014, 210(1): 5.
- [28] BUTLER R, MARCY G, WILLIAMS E, et al. Attaining doppler precision of 3 M S⁻¹ [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1996, 108(724): 500.
- [29] ENDL M, KÜRSTER M, ELS S, et al. The planet search program at the ESO Coudé Echelle spectrometer [J]. Astronomy and Astrophysics, 2002, 392(2): 671-690.
- [30] BUTLER R, TINNEY C, MARCY G, et al. Two new planets from the anglo-australian planet search [J]. The Astrophysical Journal, 2001, 555(1): 410.
- [31] TOKOVININ A, FISCHER D, BONATI M, et al. CHIRON—a fiber fed spectrometer for precise radial velocities [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2013, 125(933): 1336.
- [32] WANG S, WRIGHT J, MACQUEEN P, et al. Calibrating iodine cells for precise radial velocities [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2020, 132(1007): 014503.
- [33] SARMIENTO L, REINERS A, SEEMANN U, et al. Characterizing U-Ne hollow cathode lamps at near-IR wavelengths for the CARMENES survey[C]. Ground-based and airborne instrumentation for astronomy V, SPIE, 2014, 9147: 1669-1677.
- [34] KERBER F, NAVE G, SANSONETTI C, et al. The spectrum of Th-Ar hollow-cathode lamps in the 900-4 500 nm region: establishing wavelength standards for the calibration of VLT spectrographs [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy, SPIE, 2006, 6269: 850-860.
- [35] PEPE F, MAYOR M, RUPPRECHT G, et al. HARPS: ESO's coming planet searcher: chasing exoplanets with the La Silla 3.6-m telescope [J]. The Messenger, 2002, 110: 9-14.

- [36] BONFILS X, FORVEILLE T, DELFOSSE X, et al. The HARPS search for southern extra-solar planets [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2005, 443(3): L15-L18.
- [37] PEPE F, LOVIS C, SÉGRANSAN D, et al. The HARPS search for Earth-like planets in the habitable zone [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2011, 534:A58.
- [38] PERRUCHOT S, KOHLER D, BOUCHY F, et al. The SOPHIE spectrograph: design and technical key-points for high throughput and high stability[C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*, SPIE, 2008, 7014: 235-246.
- [39] CHAKRABORTY A, MAHADEVAN S, ROY A, et al. The PRL stabilized high-resolution echelle fiber-fed spectrograph: instrument description and first radial velocity results [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2014, 126(936): 133.
- [40] NAVE G, KERBER F, DEN HARTOG E, et al. The dirt in astronomy's genie lamp: ThO contamination of Th-Ar calibration lamps[C]. *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*, SPIE, 2018, 10704: 80-92.
- [41] DREVER R, HALL J, KOWALSKI F, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator [J]. *Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry*, 1983, 31(2): 97-105.
- [42] DOERR H, STEINMETZ T, HOLZWARTH R, et al. A laser frequency comb system for absolute calibration of the VTT echelle spectrograph [J]. *Solar Physics*, 2012, 280(2): 663-670.
- [43] PROBST R, WANG L, DOERR H, et al. Comb-calibrated solar spectroscopy through a multiplexed single-mode fiber channel [J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(2): 023048.
- [44] PHILLIPS D, GLENDAY A, LI C, et al. Calibration of an astrophysical spectrograph below 1 m/s using a laser frequency comb [J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 13711-13726.
- [45] YCAS G, QUINLAN F, DIDDAMS S, et al. Demonstration of on-sky calibration of astronomical spectra using a 25 GHz near-IR laser frequency comb [J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6631-6643.
- [46] WU Yuanjie, YE Huiqi, HAN Jian, et al. Astronomical laser frequency comb for high resolution spectrograph of a 2.16-m telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6):0614001.
吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 2.16m望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6):0614001.
- [47] HAO Z, YE H, HAN J, et al. Calibration tests of a 25-GHz mode-spacing broadband astro-comb on the fiber-fed High Resolution Spectrograph (HRS) of the chinese 2.16-m telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130(994): 125001.
- [48] LÖHNER-BÖTTCHER J, SCHMIDT W, DOERR H, et al. LARS: an absolute reference spectrograph for solar observations [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2017: 607A12.
- [49] MCCracken R, DEPAGNE E, KUHN R, et al. Wavelength calibration of a high resolution spectrograph with a partially stabilized 15-GHz astrocomb from 550 to 890 nm [J]. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6450-6460.
- [50] PETERSBURG R, JOEL ONG J, ZHAO L, et al. An extreme-precision radial-velocity pipeline: first radial velocities from EXPRES [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(5):187.
- [51] BLACKMAN R, FISCHER D, JURGENSON C, et al. Performance verification of the extreme precision spectrograph [J]. *The Astronomical Journal*, 2020, 159(5): 238.
- [52] CURTO G L O, WEBB J, PASQUINI L, et al. Precision and consistency of astrocombs [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, 493(3): 3997-4011.
- [53] WANG L, GRUPP F, KELLERMANN H, et al. Line profile analysis of the laser frequency comb in FOCES [C]. *Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets VIII*, SPIE, 2017, 10400: 532-539.
- [54] PEPE F, MOLARO P, CRISTIANI S, et al. ESPRESSO: the next European exoplanet hunter [J]. *Astronomische Nachrichten*, 2014, 335(1): 8-20.
- [55] SCHMIDT T, MOLARO P, MURPHY M, et al. Fundamental physics with ESPRESSO: Towards an accurate wavelength calibration for a precision test of the fine-structure constant [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2021, 646:A144.
- [56] MURPHY M, MOLARO P, LEITE A, et al. Fundamental physics with ESPRESSO: precise limit on variations in the fine-structure constant towards the bright quasar HE 0515-4414 [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2022, 658:A123.
- [57] PROBST R, CURTO G, AVILA G, et al. A laser frequency comb featuring sub-cm/s precision for routine operation on HARPS[C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V*, SPIE, 2014, 9147: 498-509.
- [58] CRAUSE L, MCCracken R, REID D, et al. Development of a laser frequency comb and precision radial velocity pipeline for SALT's HRS [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*, SPIE, 2022, 12184: 1589-1596.
- [59] WU Y, HUANG Z, STEINMETZ T, et al. 20 GHz astronomical laser frequency comb with super-broadband spectral coverage [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*, SPIE, 2022, 12184: 1J.
- [60] CHENG Y, XIAO D, MCCracken R, et al. Laser-frequency-comb calibration for the Extremely Large Telescope: an OPO-based infrared astrocomb covering the H and J bands [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021,

- 38(7): A15-A20.
- [61] CAMPBELL B. Precision radial velocities [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1983, 95(571): 577.
- [62] DEVOE R G, FABRE C, JUNGSMANN K, et al. Precision optical-frequency-difference measurements [J]. Physical Review A, 1988, 37(5): 1802-1805.
- [63] WILDI F, PEPE F, CHAZELAS B, et al. A Fabry-Perot calibrator of the HARPS radial velocity spectrograph: performance report[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III, SPIE, 2010, 7735: 1853-1863.
- [64] WILDI F, PEPE F, CHAZELAS B, et al. The performance of the new Fabry-Perot calibration system of the radial velocity spectrograph HARPS[C]. Techniques and Instrumentation for Detection of Exoplanets V, SPIE, 2011, 8151: 535-543.
- [65] WILDI F, CHAZELAS B, PEPE F. A passive cost-effective solution for the high accuracy wavelength calibration of radial velocity spectrographs[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, SPIE, 2012, 8446: 1122-1129.
- [66] SCHÄFER S, REINERS A. Two Fabry-Perot interferometers for high precision wavelength calibration in the near-infrared[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, SPIE, 2012, 8446: 1306-1313.
- [67] QUIRRENBACH A, AMADO P, CABALLERO J, et al. CARMENES: an overview six months after first light[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VI, SPIE, 2016, 9908: 296-309.
- [68] QUIRRENBACH A, AMADO P, RIBAS I, et al. CARMENES: high-resolution spectra and precise radial velocities in the red and infrared[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII, SPIE, 2018, 10702: 246-263.
- [69] HALVERSON S, MAHADEVAN S, RAMSEY L, et al. Development of fiber Fabry-Perot interferometers as stable near-infrared calibration sources for high resolution spectrographs [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2014, 126(939): 445-458.
- [70] STRASSMEIER K, ILYIN I, STEFFEN M. PEPsi deep spectra [J]. Astronomy & Astrophysics, 2018, 612: A44.
- [71] STRASSMEIER K, ILYIN I, JÄRVINEN A, et al. PEPsi: The high-resolution échelle spectrograph and polarimeter for the large binocular telescope [J]. Astronomische Nachrichten, 2015, 336(4): 324-361.
- [72] BETTERS C, HERMOUET M, BLANC T, et al. Low cost photonic comb for sub-m/s wavelength calibration[C]. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, SPIE, 2016, 9912: 2156-2162.
- [73] DAS T, BANYAL R, SIVARANI T, et al. Development of a stabilized Fabry-Perot etalon-based calibrator for Hanle échelle spectrograph [J]. Applied Optics, 2020, 59(18): 5464-5472.
- [74] TERRIEN R, NINAN J, DIDDAMS S, et al. Broadband stability of the habitable zone planet finder Fabry-Perot etalon calibration system: evidence for chromatic variation [J]. The Astronomical Journal, 2021, 161(6): 252.
- [75] CERSULLO F, WILDI F, CHAZELAS B, et al. A new infrared Fabry-Perot-based radial-velocity-reference module for the SPIRou radial-velocity spectrograph [J]. Astronomy & Astrophysics, 2017, 601: 1-12.
- [76] SEIFAHRT A, BEAN J, KASPER D, et al. MAROON-X: the first two years of EPRVs from Gemini North[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX, SPIE, 2022, 12184: 498-512.
- [77] HAO J, TANG L, YE H, et al. Development of a calibrator based on Fabry-Perot etalon for high resolution spectrograph [C]. AOPC 2021: Novel Technologies and Instruments for Astronomical Multi-Band Observations, 2021.
- [78] HAO J, TANG L, YE H, et al. Effect of near-field distribution on transmission characteristics of fiber-fed Fabry-Perot etalons[J]. The Astronomical Journal, 2021, 161(6): A102.
- [79] TANG L, YE H, HAO J, et al. Design and characterization of a thermally stabilized fiber Fabry-Perot etalon as a wavelength calibrator for high-precision spectroscopy [J]. Applied Optics, 2021, 60(19): D1-D8.
- [80] LEIFER S, SAVCHENKOV A, AMILI AEL, et al. A microresonator-based etalon for visible light precision radial velocity measurements [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VIII, SPIE, 2020, 11447: 326-336.
- [81] SCHWAB C, STÜRMER J, GUREVICH Y, et al. Stabilizing a Fabry-Perot etalon peak to 3 cm s⁻¹ for spectrograph calibration [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2015, 127(955): 880-889.
- [82] STÜRMER J, SEIFAHRT A, SCHWAB C, et al. Rubidium-traced white-light etalon calibrator for radial velocity measurements at the cm s⁻¹ level [J]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2017, 3(2): 54206397.
- [83] CRASS J, AIKENS D, MASON J, et al. The final design of the iLocater spectrograph: an optimized architecture for diffraction-limited EPRV instruments[C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX, SPIE, 2022, 12184: 579-589.
- [84] REINERS A, BANYAL R, ULBRICH R. A laser-lock concept to reach cm s⁻¹-precision in Doppler experiments with Fabry-Perot wavelength calibrators [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 569: A77.
- [85] BANYAL R, REINERS A. A dual cavity Fabry-Perot device for high precision Doppler measurements in astronomy [J].

- Journal of Astronomical Instrumentation, 2017, 6(1): 1750001.
- [86] SCHMIDT T, CHAZELAS B, LOVIS C, et al. Chromatic drift of the Espresso Fabry-Pérot etalon[J]. Astronomy & Astrophysics, 2022, 664: A191.
- [87] JENNINGS J, TERRIEN R, FREDRICK C, et al. Frequency stability of the mode spectrum of broad bandwidth Fabry-Pérot interferometers [J]. OSA Continuum, 2020, 3(5): 1177-1193.
- [88] BAUER F, ZECHMEISTER M, REINERS A. Calibrating echelle spectrographs with Fabry-Pérot etalons [J]. Astronomy & Astrophysics, 2015, 581: A117.
- [89] CERSULLO F, COFFINET A, CHAZELAS B, et al. New wavelength calibration for echelle spectrographs using Fabry-Pérot etalons [J]. Astronomy & Astrophysics, 2019, 624: A122.
- [90] HAO Zhibo, YE Huiqi, TANG Liang, et al. Improvement of wavelength calibration accuracy of astronomical high-resolution spectrometers with Fabry-Perot etalons [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0112001.
郝志博, 叶慧琪, 唐靛, 等. 利用法布里-珀罗标准具提高天文高分辨光谱仪的波长定标精度 [J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0112001.
- [91] SCHUERMANS J, RASKIN G, BOWMAN D, et al. CubeSpec: LED-based calibration system[C]. Space Telescopes and Instrumentation 2022: Optical, Infrared, and Millimeter Wave, SPIE, 2022, 12180: 1064-1072.
- [92] KOBAYASHI T, SUETA T, CHO Y, et al. High-repetition-rate optical pulse generator using a Fabry-Perot electro-optic modulator [J]. Applied Physics Letters, 1972, 21(8): 341-343.
- [93] KOBAYASHI T, YAO H, AMANO K, et al. Optical pulse compression using high-frequency electrooptic phase modulation [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1988, 24(2): 382-387.
- [94] METCALF A, ANDERSON T, BENDER C, et al. Stellar spectroscopy in the near-infrared with a laser frequency comb [J]. Optica, 2019, 6(2): 233-239.
- [95] YI X, VAHALA K, LI J, et al. Demonstration of a near-IR line-referenced electro-optical laser frequency comb for precision radial velocity measurements in astronomy [J]. Nature Communications, 2016, 7: 10436.
- [96] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. Broadband near-infrared astronomical spectrometer calibration and on-sky validation with an electro-optic laser frequency comb [J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34830-34841.
- [97] SERIZAWA T, KUROKAWA T, TANAKA Y, et al. Laser frequency comb system for the infrared Doppler spectrograph on the Subaru Telescope [C]. Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation V, SPIE, 2022, 12188: 1689-1695.
- [98] ISHIZAWA A, NISHIKAWA T, MIZUTORI A, et al. Phase-noise characteristics of a 25-GHz-spaced optical frequency comb based on a phase- and intensity-modulated laser [J]. Optics Express, 2013, 21(24): 29186-29194.
- [99] TANABE T, FUJII S, SUZUKI R. Review on microresonator frequency combs [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2019, 58: SJ0801.
- [100] HERR T, BRASCH V, JOST J D, et al. Temporal solitons in optical microresonators [J]. Nature Photonics, 2013, 8(2): 145-52.
- [101] ZHANG Xinliang, ZHAO Yanjing. Research progress of microresonator-based optical frequency combs [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823014.
张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823014.
- [102] KIPPENBERG T, GAETA A, LIPSON M, et al. Dissipative Kerr solitons in optical microresonators [J]. Science, 2018, 361(6402): eaan8083.
- [103] NEWMAN Z, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock [J]. Optica, 2019, 6(5): 680-685.
- [104] OBRZUD E, RAINER M, HARUTYUNYAN A, et al. A microphotonic astrocomb [J]. Nature Photonics, 2018, 13(1): 31-35.
- [105] SUH M, YI X, LAI Y, et al. Searching for exoplanets using a microresonator astrocomb [J]. Nature Photonics, 2019, 13: 25-30.
- [106] BARTELS A, HEINECKE D, DIDDAMS S. Passively mode-locked 10 GHz femtosecond Ti:sapphire laser [J]. Optics Letters, 2008, 33(16): 1905-1907.
- [107] CHEN H, CHANG G, XU S, et al. 3GHz, fundamentally mode-locked, femtosecond Yb-fiber laser [J]. Optics Letters, 2012, 37(17): 3522-3524.
- [108] MÉGEVAND D, ZERBI F, CABRAL A, et al. ESPRESSO: the ultimate rocky exoplanets hunter for the VLT [C]. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV, SPIE, 2012, 8446: 609-623.
- [109] LIU X, BRUCH A, LU J, et al. Beyond 100 THz-spanning ultraviolet frequency combs in a non-centrosymmetric crystalline waveguide [J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 2971.
- [110] METCALF A, FREDRICK C, TERRIEN R, et al. 30 GHz electro-optic frequency comb spanning 300 THz in the near infrared and visible [J]. Optics Letters, 2019, 44(11): 2673-2676.

- [111] OBRZUD E, BRASCH V, VOUMARD T, et al. Visible blue-to-red 10GHz frequency comb via on-chip triple-sum-frequency generation [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(21): 5290-5293.
- [112] LEE S, OH D, YANG Q, et al. Towards visible soliton microcomb generation [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1295.
- [113] ZHAO Y, JI X, KIM B, et al. Near-visible microresonator-based soliton combs[C]. *CLEO: Science and Innovations*, Optica Publishing Group, 2019.
- [114] XUE X, XUAN Y, LIU Y, et al. Mode-locked dark pulse Kerr combs in normal-dispersion microresonators [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(9): 594-600.
- [115] DORN R, BRISTOW P, SMOKER J, et al. CRIRES+ on sky: high spectral resolution at infrared wavelength enabling better science at the ESO VLT [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX*, SPIE, 2022, 12184: 478-497.
- [116] MARCONI A, PRIETO C, PAMADO et al. ELT-HIRES, the high resolution spectrograph for the ELT: results from the Phase A study [C]. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII*, SPIE, 2018, 10702: 619-634.

Research Advance in Astronomical High-precision Wavelength Calibration Technology (Invited)

LIU Tongjun^{1,2,3}, YE Huiqi^{1,2}, TANG Liang^{1,2}, HAO Zhibo^{1,2}, HAN Jian^{1,2},
ZHAI Yang^{1,2}, XIAO Dong^{1,2}

(1 *National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China*)

(2 *CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042, China*)

(3 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The radial velocity or Doppler spectroscopy is one of the most important methods to detect exoplanets and investigate astrophysical processes. This technique has made immense success in discovering hundreds of planets with various masses since 1990 s, leading to the era of intensive discovery of exoplanets. Typically, as the mass of exoplanets decreases, a higher precision of the radial velocity is required. It was estimated that detecting an earth-size planet around a sun-like star requires at least 10 cm/s precision over timescales of a year, which demands high precision and high stability wavelength calibration technology. However, the widely used wavelength calibration technology based on atomic absorption cells and hollow cathode lamps could not support 10 cm/s measurement precision due to the influence of a series of factors such as uneven distribution of spectral lines and spectral line broadening. The development of laser technology, especially the laser frequency comb, opens new horizons to the high precision wavelength calibration.

In 2008, researchers brought an astro-comb system based on mode-locked laser generating high repetition frequency (>10 GHz) comb teeth which could be resolved clearly by spectrometer as a brand-new calibration source. The test results suggested that wavelength calibration with astro-comb had the potential to realize cm/s level precision, and in the next few years, the astro-comb system has been rapidly developed and further improved, gradually becoming the most successful high-precision wavelength calibration system available. Meanwhile, other high precision wavelength calibration technologies were also reported, including white light Fabry Perot etalon, electro-optic modulated astro-comb, micro resonator based astro-comb. These techniques also are the potential candidates to support 10 cm/s precision measurement, and are superior to the astro-comb system based on mode-locked laser in some aspects, such as system complexity and cost. Unlike the last generation techniques using atomic absorption cell and hollow cathode lamp, the calibration spectra of new generation techniques provide massive and dense peaks in frequency domain, which overcomes the defect of uneven distribution of atomic spectral lines.

Nevertheless, there are still some issues that need to be addressed in order to achieve long-term wavelength calibration with 10 cm/s precision. The mode-locked laser astro-comb system inheriting high precision and high system complexity, more user-friendly turnkey system and wider frequency coverage are

the focus of future development. On the contrary, although the white light Fabry Perot etalon has low system complexity, its absolute frequency acquisition of the transmission peaks and long-term stability need to be further improved. For the electro-optical modulated astro-comb and micro resonator based astro-comb, they could directly generate high repetition frequency combs without complicate filter system required in mode-locked laser astro-comb, but at present, their main working bands are in the near-infrared, and the visible wavelength coverage will be the main direction in the future. With the development of high-precision wavelength calibration techniques, it is foreseeable that the precision, long-term stability and coverage frequency will be improved, which would guarantee long-term wavelength calibration precision of 10 cm/s and meet the requirement of finding earth-analogs within the habitable zone of stars.

In this paper, we summarized and illustrated the development and current status of wavelength calibration techniques using iodine absorption cells and Th-Ar lamps, as well as the new generation of high precision wavelength calibration techniques based on astro-combs and etalons. The basic principles and typical systems of new generation techniques are presented, their advantages and disadvantages are analyzed, and the future development prospects.

Key words: Doppler radial velocity; Wavelength calibration; Astro-comb; Fabry-Perot etalon; Exoplanets detection

OCIS Codes: 140.4050; 350.1260; 120.2230