

傅利叶变换光谱仪及其在天文中的应用

林 严 观

(中国科学院南京天文仪器厂)

提 要

傅利叶变换光谱仪(FTS)是第三代也是最现代化的光谱仪器,与色散型光谱仪相比,具有明显的优点,20余年来在天体光谱测量领域中发挥了巨大作用。本文对FTS的概况、原理、有关技术及其在天文中的应用作了简单而系统的介绍。

傅利叶变换光谱仪(Fourier Transform Spectrometers, 以下简称 FTS), 是继棱镜和光栅光谱仪之后的第三代光谱测量设备, 它是一种利用双光束干涉办法, 对被测样品光谱产生的干涉图进行采样, 并用快速傅利叶变换算法进行数据处理, 以获得复原光谱信息的调制型仪器。与常规狭缝光谱仪相比, 具有多路性(multiplex), 高通光力(throughput), 高分辨率, 高信噪比, 高波数精度, 工作波段宽, 杂散光影响小, 结构紧凑等优点^[1]。自从60年代正式投入使用以来, 不断得到完善和发展, 在天文、化学、物理等学科的许多领域中获得广泛的应用。它是现代光谱仪器中最现代化的, 如果按照某些学者提出的, 能在最短的时间内, 以最高的分辨率和信噪比记录的光源信号弱而光谱区间大的仪器是最好的光谱仪器这种评判标准^[2], FTS无疑是综合性能最好的仪器。它所具有的许多优点, 对天文光谱观测尤为重要, 60和70年代FTS在天文光谱观测工作中所取得的一系列成果, 已为天文学家们所瞩目。现在世界上许多大、中型望远镜都配上了FTS, 用它观测所得资料远非光栅光谱仪所能比拟。

一、FTS的发展概况^[3-6]

19世纪80年代, 迈克尔逊首先提出可用他所发明的干涉仪进行光谱分析, 为了进行数据处理, 他还制作了原始的机械式计算装置。进入20世纪以后, 虽然有人也把迈克尔逊干涉仪在光谱测量中应用了许多年, 但最主要的一些优点(多路性, 高通光力, 高分辨率), 始终未被认识。直到1949年, 英国的 Fellgett 考虑用干涉仪作暗星红外光谱测量的可能性时, 发现了FTS的多路性优点。法国的 J. Connes 对多路性优点作理论分析后指出, 当噪声与光源强度无关时(例如红外), 在测量时间、谱线宽度和分辨率都一样的情况下, FTS的信噪比, 比常规光谱仪提高了 \sqrt{n} 倍。 $n = \sigma / \delta\sigma$, σ 为被测光谱宽度, $\delta\sigma$ 为光谱元宽。50年代初, 法国的 Jacquinet 提出了干涉仪具有高通光力特性, 认为在分辨率、准直镜面积和焦距都相等的情况下, 干涉仪比色散型仪器可以让更多的光通过。Jacquinet 的学生, P. Connes

还指出, FTS 还具有波数精度高, 测量的光谱范围宽等优点。50 年代末美国的 Strong 和 Vanasse 制成了层栅(lamellar grating)干涉仪, 使被测光谱扩展到远红外区。20 世纪 50 年代到 60 年代中期, FTS 迅速得到应用, 美、英、法的许多空间探测和天文工作者, 纷纷把它作为地球大气和某些天体红外光谱测量的工具, 证明了这种观测方法和工具的可行性, 并获得一批有价值的资料。

理论和实践证明, FTS 能大大超过常规光谱仪性能的工作, 应归功于 P.Connes 和 J.Connes 夫妇。他们发明了加宽干涉仪视场的方法, 首先提出步进驱动、干涉控制的扫描方案, 第一个在 FTS 中应用猫眼后向反射器(Cat's-eye retroreflector), 提出应从增大干涉仪的光程差, 提高干涉仪动态和每次采样精度, 对干涉图作相差改正等方面入手来完善并提高 FTS 性能。这期间 Cooley 和 Tukey 发表的文章, 解决了快速傅利叶变换的计算方法问题, 计算机和有关技术也得到了相应发展。P.Connes 于 1966 年建成了一具性能较好的干涉仪, 用它观测太阳系行星大气, 所得惊人的成果, 几乎一夜间改变了人们对 FTS 在天文中应用所持的谨慎和怀疑的态度。

60 年代后期和整个 70 年代, 是 FTS 在天文中应用得到发展的时期, 仅美、法两国就研制了数十台不同性能和用途的 FTS, 测量的光谱范围从紫外到毫米波, 分辨率从 80cm^{-1} 到 0.01cm^{-1} (法国巴黎大学红外光谱实验室的一台 FTS, 最小分辨率达 0.0009cm^{-1}), 采样点数高的达百万, 波数定准精度 0.0001cm^{-1} , 信噪比大至 10000(一般情况可比光栅光谱仪高 1 至 2 数量级), 重量轻的只有十几公斤, 扫描时间短的只有几分之一秒。地面上大中型望远镜如美国的 5 米, 4 米, 2.29 米, 1.93 米, 0.91 米镜, 夏威夷的 3.6 米镜, 和 Kuiper 机载观测台, 雨云 III, IV 气象卫星, 双子座以及水手, 海盗, 旅行者宇宙飞船上都配有 FTS^[7-13]。由于它在天体光谱测量中的应用, 使人们对某些天体的认识又有了新的进展。

进入 80 年代, FTS 已经历过实验与发展阶段, 更加成熟稳定, 已成为天文学家不可缺少的光谱设备, 许多技术不断得到深化和完善, 更加重视提高仪器整体效率和性能, 尤其注意减少或消除热背景的影响。据预测, 在可见的将来, FTS 在天体物理中的应用, 将会继续受到重视和发展。

二、FTS 有关技术及天文用 FTS 的特点

FTS 的工作原理如图 1 所示, 被测光源 1(对天文用 FTS 而言, 就是由望远镜所成的天体像)产生的光谱, 经准直镜 2 后成平行光投射在分束器 3 上, 其中透射光经定镜 5 反射, 反射光经动镜 4 反射后, 重新回到分束器 3 处。由于两束光具有相同的振幅与周期, 便产生干涉, 干涉光经会聚镜 6 后由探测器 7 接收。探测器所接收的是光源 1 经干涉仪调制后产生的干涉图, 它与光源 1 互成傅利叶变换对关系。采样器 8 对干涉图作离散采样, 并控制采样的起点、终点位置、采样频率和点数。经信号放大和模/数转换器 9 后, 送到电子计算机 10, 用快速傅利叶变换技术处理, 处理过的数据, 经模/数转换后, 就可在显示器 11 上显示光源 1 的复原光谱信息。

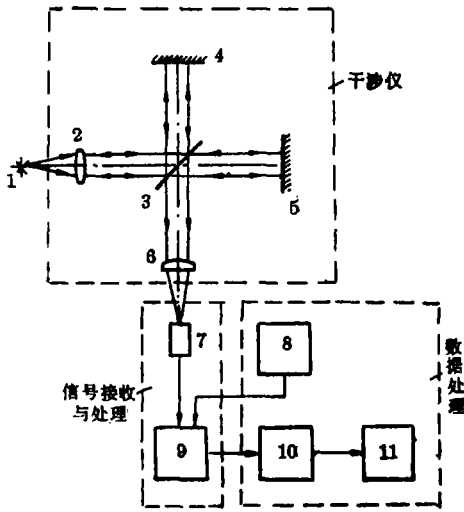


图 1 FTS原理

1. 被测光源; 2. 准直镜; 3. 分束器; 4. 动镜;
5. 定镜; 6. 聚光镜; 7. 探测器; 8. 采样器;
9. 信号处理; 10. 计算机; 11. 显示器

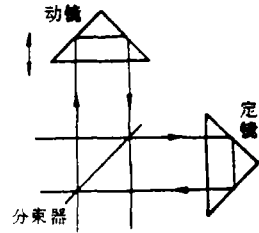
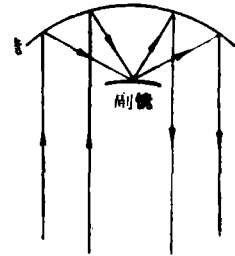


图 2 立方角镜

图 3 猫眼后向反射器
(副镜为凸曲面)

FTS 的核心是干涉仪, 干涉仪的主要功能是对被测光源作频率调制, 要求动镜作精确的扫描运动。早期的干涉仪, 以平面反射镜作定镜与动镜, 由于它对方向倾斜十分敏感, 对于较高精度的 FTS, 实际机构难于保证其要求。50 年代初 Fellgett 首先采用立方角镜(corner-cubes)代替平面镜作定镜与动镜, 如图 2 所示。此方案较好地满足了入射光与反射光方向一致的要求, 但调整工作既费事又困难。60 年代, P. Connes 提出用猫眼后向反射器作反射镜的方案, 如图 3 所示。该方案定镜、动镜都由一组曲面反射镜组成, 大的为主镜, 一般用抛物面镜, 小的为副镜, 有用凹的, 也有用凸的曲面。以副镜为凸镜的为例, 只要入射光与光轴夹角 $< 1^\circ$, 反射镜就能精确地使入射光按 180° 方向返回。其最大误差对于分辨力 $R = 10^6$, 焦比 $f = 4$ 的 FTS 来说, 返回的波前与平面波的偏差为 $0.04\mu\text{m}$ 。用猫眼后向反射器, 主要要求是严格保证主、副镜间的距离, 如要求波前偏差 $< \lambda/5$, 对于可见光来说, 主、副镜距离精度为 $6\mu\text{m}$ 。用抛物面作主镜, 凹曲面作副镜, 据说性能比凸面作副镜更好, 前者产生圆形干涉条纹, 且视场可达 10° , 后者产生双曲线干涉条纹^[14,15]。

分束器是 FTS 的关键零件之一, 理想的分束器应为透射和反射均为 50% 的光学零件。对于特定的分束器, 其折射率和膜厚所对应的最佳工作波长是有限制的, 由于 FTS 允许工作的波段很宽, 一般是根据不同的波长选择不同的材料和膜厚作分束器。波长长的远红外, 要求的膜较厚, 可以用聚酯薄膜拉紧后作自承型分束器, 中、近红外和可见光、紫外, 所需的膜很薄, 只能在对该波段透明的基体材料表面, 用真空镀膜技术镀上某些半导体或金属材料, 组成他承型分束器。在远红外, 除聚酯薄膜外, 也有用金属电铸方法制成网格形方阵的所谓线栅(wire grid)作分束器。还有一种利用前后两个互相平行的条状平面或球面组成的所谓层栅作干涉仪, 它与迈克尔逊干涉仪不同, 前者使入射的波前分开, 后者使入射的振幅分裂。Richards 曾对此作过研究, 认为波数 $< 100\text{cm}^{-1}$ 时, 层栅干涉仪比迈克尔逊干涉仪

性能更好^[16-18]。

动镜扫描驱动系统，是使 FTS 产生正确干涉图的重要环节，有快速扫描和内调制技术两种方案。不管那一种，都必须保证动镜在整个扫描过程位置和方向的正确性。要让离散傅利叶变换后所得的复原光谱不产生叠谱(alasing)效应，采样频率必须满足采样定理的要求，即时域采样间隔必须小于被测光谱两倍波数的倒数($T \leq 1/2\sigma_c$, σ_c 为奈奎斯特频率)。对于中、高波数的光谱，要求扫描机构十分灵敏、平稳、精确。一般驱动源都用直线或步进电机，动镜必须支承在阻力很小的液压、气动或滚动导轨上。

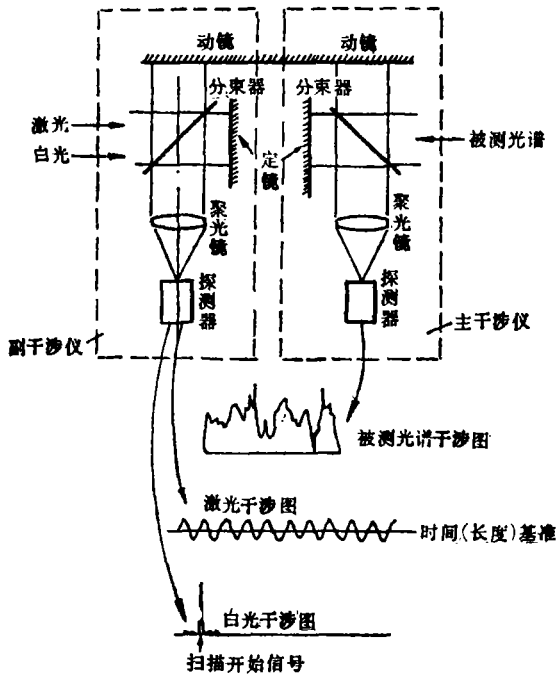


图 4 参比干涉原理

采样系统的精确性对复原光谱精度有直接影响，要求通过原点(光程差为零的点)采样，否则将产生相差，使谱线变形。为保证采样精度，采用了参比干涉技术，如图 4 所示^[19]。用主副两个干涉仪，主干涉仪使被测光谱产生干涉图，副干涉仪使激光产生干涉图，并让一白光通过。两干涉仪由同一机构驱动，保证其同步性。当两干涉仪的动、定镜光程差为零时，副干涉仪中白光探测器就产生极大输出，并以此作为正式扫描的起点。由于激光波长稳定性高，单色性好，用它直接测定波数的方法，比色散型光谱仪需要通过已知位置的谱线间的内插处理而得到波数值的间接方法，波数测定精度要高很多(至少一个数量级)。也由于用激光波长作为采样依据，动镜运动均匀性即使差些，对采样精度影响也不大。

探测器^[20-22]，按被测光谱不同的波长，有紫外—可见光和红外探测器两大类。紫外—可见光探测器主要是光电探测器，如光电二极管和光电倍增管。红外探测器有热探测器和光子探测器。热探测器包括热敏电阻、热电偶、气动探测器等，这三种探测器响应速度慢，不适宜在大波数快速扫描使用。还有一种热电探测器，如 TGS (硫酸三甘酞晶体)，即使在室温下，反应速度也快，可用在大波数扫描场合。光子探测器，如 HgCdTe, PbS, InSb, 锗掺杂等，探测本领强，响应时间快，但必须在低温下使用，又由于这种探测器输出信号与入射光子数成正比，用它时 FTS 的多路性优点就不复存在。

探测器所接收的并不是被测光谱本身的原始信号，而是干涉图，它必须经过数据处理后才能复原。数据处理所用的技术，一般是快速傅利叶变换，它比常规傅利叶变换可节省几个数量级的计算时间。即使这样，对于大波数、高精度的观测，采样点数也要高达百万，对计算机的要求也很高。J. Connes 提出用单边干涉图测量法，可保证在相同精度的情况下，节省观测和计算时间。现在有人正在研究一种最大平均信息测量法(MEM)，据说可以从很少

的数据点中获得高分辨率光谱^[23,24]。

天文用 FTS 观测的目标亮度低, 而且受到视宁度、闪烁及天空、环境、望远镜、仪器等热背景辐射的影响大, 除少数天体外, 天空中的红外源(FTS主要用于测量红外光谱)要比背景辐射的信号弱几个量级, 尤其 $10\mu\text{m}$ 区域, 大气、望远镜和仪器辐射出的热流, 使仪器信噪比大大降低^[25]。此外, 地面上使用的望远镜, 还要受大气吸收的影响。这些因素加在一起, 使得天文上用的 FTS 更要强调增加信噪比, 提高光学效率。

为解决提高信噪比和光学效率的问题, 天文上用的 FTS 一般采用两个光学输入和两个光学输出的方案, 如图 5 所示^[26]。非天文用的 FTS 只有一个探测器 D, 它只接收经过一次反射和一次透射及经过一次透射和一次反射的光线 (TR + RT), 而经过两次透射和两次反射的这部分光线 (TT + RR), 又返回到光源处未被利用。所谓双输入和双输出的方案, 就是用另外一个探测器 D' 来接收 RR 和 TT 光线, 然后再把 D' 与 D 的信号相加, 这样就利用了全部的入射能, 比常规 FTS 光学效率提高一倍。由于大气透射、薄雾、闪烁等变化所引起的光源波动, 在 T 与 R 光中的表现是同相位的, 用有关技术进行处理, 可互相抵销, 结果使信噪比得到改善。这种波动消除的完善程度, 取决于分束器的完善性、干涉仪两臂及两探测器 D 和 D' 的匹配性能等。即使这些因素不太完善, 光源波动的影响不能完全消除, 但也将被大大削弱, 这对于天文用的 FTS 也有非常大的贡献。

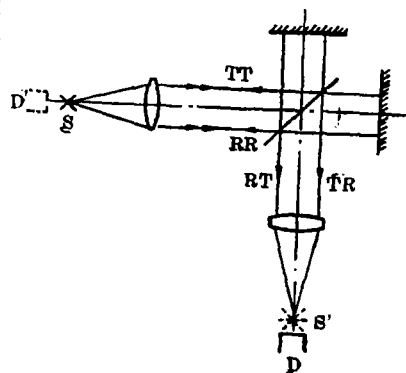


图 5 双输入输出原理

S—光源; S'—光源像; D—光源探测器;
D'—光源像S'探测器; TT—经两次反射的光线;
RR—经两次透射的光线;
RT—经一次反射, 一次透射的光线;
TR—经一次透射, 一次反射的光线。

三、FTS 在天文观测中的应用^[27—57]

作为光谱观测手段之一的 FTS, 在天文中的应用虽然只有 20 余年, 但由于它所具有许多优点, 在许多波段的观测, 尤其红外波段, 发挥了重要作用, 取得一个又一个成果, 不少工作是前所未有的。虽然本文仅列出它在行星大气、固体光谱、太阳、恒星等方面观测的一小部分成果, 但已足见其价值一斑。

太阳系中各行星大气, FTS 几乎都作过观测, 并取得许多新发现。Fink 等用它观测水星 CO_2 光谱, 所得资料比 Steward 2.29 米望远镜所配的光栅光谱仪要好, Broadfoot 认为金星—水星宇宙飞船上所携带的 FTS, 可观测到水星上 $2 \times 10^{-15} \text{atm}$ 含量的大气。Connes 等人, 用中等分辨率的 FTS 观测金星, 得到远比光栅光谱仪为好的资料(见图 6, 7), 并立即导致 HCl , HF , CO , ^{13}C , ^{17}O , ^{18}O 等的发现。Kuiper 机载观测台上的 FTS 观测结果, 证认金星云是由硫酸微滴而不是冰晶组成。火星大气光谱资料主要是靠 FTS 提供, 它确定了火星上 CO_2 浓度, H_2O 和 O_3 含量, 发现了 HCl , H_2S , N_2O 等分子。Larson 等人认为水手 9 号 FTS 观测所得大量新的有意义的光谱资料, 是色散型光谱仪所无法完成的。对于离太阳远的行星大气的观测, FTS 有更大的优越性。木星 FTS 资料表明, 木星大气化学

成分及形成机理要比早先所知道和想象的复杂得多, 并发现了大气成分中 NH_3 , H_2S , C_2H_2 , C_2N_2 , NH_2 等十余种分子。Bjoraker 等人观测到令人振奋的木星水蒸汽光谱, 并确定了其丰富度和分布。Larson 等人所得木星 GeH_4 的丰富度为 6×10^{-10} 的资料, 这种只相当于地球大气污染物质的含量, 据认为是地球外天体的大气中所观测到的最低的分子浓度。Ridgway 在 $10\mu\text{m}$ 观测到乙烷和乙炔发射线, 证明了木星上层大气甲烷光解可产生乙烷和乙炔的理论。土星 FTS 光谱资料证明了 pH_3 和其他痕量成分的存在, 并测出其丰富度。Bergstralh 等人分别用像管技术、光电技术和 FTS 观测土星甲烷 $1.1\mu\text{m}$ 光谱, 证明 FTS 分辨率最高。Fink 等人用 FTS 观测天王星和海王星的近红外光谱, 表明它们和木星, 土星一样, 具有很强的甲烷吸收带。

FTS 还对木卫, 土卫和小行星作过观测, 资料表明木卫二、三、四和土卫三、五、八都存在水冰。在对灶神星和爱神星这两颗小行星的观测中显示, 这些小行星有二价铁的矿物质吸收。Brown 在可见光区, 观测到从未预计到的木卫一的钠发射线。

Ayres 等人用 FTS 观测太阳 CO 振动—转动带, 在 2200cm^{-1} 和 4300cm^{-1} 波段获得 5.2×10^5 分辨力的光谱, 认为在 $\tau_{6000} \text{ \AA} = 10^{-3.5}$ 处存在色球温度逆转。他们还用 FTS 同时观测宁静和活动区太阳 CO 和 Ca II K 光谱, 认为存在分叉结构。Hamann 等从太阳光球 FTS 光谱中, 获得精度为 $0.03\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的铁线速度, 认为太阳光球中对流运动有很强的制约。

此外, FTS 还作过许多恒星、星系的光谱观测。Cudaback 等人在 α Ori 星中检测到 SiO_2 , OH 和 NH。Gautier 等人从猎户座星云 BN 源的 FTS 光谱中, 得到 CO 线多普勒频移与环绕 BN 源的内在联系的资料, 还观测到 100K 左右几种原子氢发射线和行星云 NGC 7027 中分子氢的发射。Ridgway 在 IRC + 10216 中观测到 C_2H_2 和 CH_4 。有人把 FTS 用于速度分辨的观测, 如 Hamann 等人从 MWC 349 FTS 光谱中认为热和冷光电离气是转动介质引起的, Mitchell 等人观测 M8E-IR, 测出气体以 $90\text{—}160\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 速度外流, Kenyon 等人观测猎户座 Fu, 从高分辨率 FTS 光谱中, 算出该星外层区质量损失率为 $10^{-7}M_{\odot}/\text{yr}$ 。Walker 等人观测证明 NGC4736 中有星爆。Moorwood 等人观测 NGC7538、M49 和 M8 上的 S III ($18\mu\text{m}$ 和 $33\mu\text{m}$), O III ($52\mu\text{m}$) 和 N III ($57\mu\text{m}$) 光谱, 获得了绝对辐射资料。Lowe 等人测出猎户座星云 He/H 为 0.087 ± 0.006 等数据, Buigs 等人观测碳星 $3\mu\text{m}$ 光谱, 检测到 C_2H_2 。Hartmann 等人从 FTS 高分辨光谱中, 认为 V1057 Cygni 在 $2.3\mu\text{m}$ 比 6000 \AA 转动更慢, 强烈地支持了吸积盘模型。

Woody 等人把 FTS 用于毫米波观测, 获得宇宙黑体辐射为 2.9K 的资料。

为了具体说明 FTS 所具有的优越性, 下面选择几个有代表性的分别用 FTS 和光栅光谱仪对同一目标观测所得资料加以比较。图 6 是用 McDonald 2.1 米望远镜观测所得的金星大气 CO_2 光栅光谱, 据说用该设备观测不可能再有明显改善, 其分辨率为 8cm^{-1} 。图 7 是 Connes 用中等分辨率 FTS 和 Steward 天文台 0.91 米望远镜观测所得金星 CO_2 光谱, FTS 所用的望远镜虽然比光栅光谱仪所配的望远镜小了一倍多, 但其分辨率与光栅光谱比却得到实质性的提高, 据说这是天文学家首次从地球上观测得到其他行星大气完全被分解开来的分子带的转动光谱。图 8 是用同一台 FTS, 但由于观测时间更长, 信噪比大大改善, 分辨率又得到明显提高(这次观测所配置的望远镜稍大, 但仍小于 2.1 米, 分辨率的提高主要不是望远镜口

径增加所致)。图 9 是用更好的 FTS, 光程差为一米, 装在 5 米望远镜折轴焦点上观测所得的金星 CO_2 光谱, 该光谱的实际分辨率达到 0.01cm^{-1} , 不仅把 CO_2 分子光谱转动结构完全分解开来, 而且看清了实际线形, 许多 CO_2 线间丢失的弱线, 也变得清晰可见。将图 9 和图 6 直接进行比较, 就会对 FTS 与光栅光谱仪相比所具有的优势确信无疑^[58]。

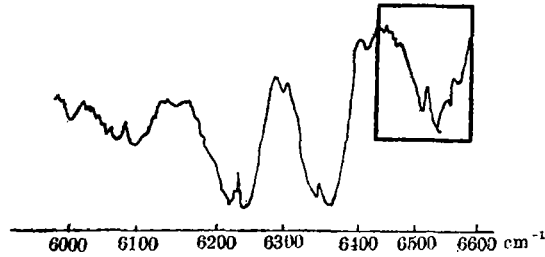


图 6 2.1 米望远镜配光栅光谱仪观测所得金星大气 CO_2 光谱, 分辨率为 8cm^{-1}

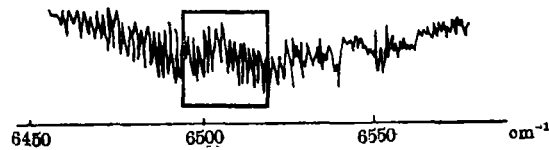


图 7 0.91 米望远镜配 FTS 观测所得金星大气 CO_2 光谱, 可看清分子带的转动光谱

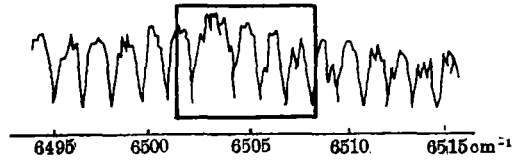


图 8 1.93 米望远镜配 FTS, 并延长观测时间所得金星大气 CO_2 光谱

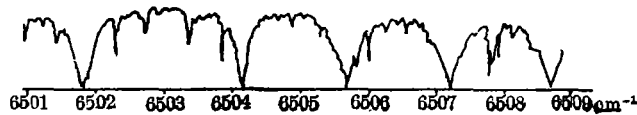


图 9 5 米望远镜配光程差为 1 米的 FTS, 观测所得金星大气 CO_2 光谱, 分辨率为 0.01cm^{-1}

参 考 文 献

- [1] 林严观, 傅利叶变换光谱仪简介, 天文仪器与技术, (1988), 1.
- [2] C. F. 劳季安主编, 现代光谱学技术, 成龙飞译, p. 150, 机械工业出版社, (1987).
- [3] Baker, D., Steed, A. and stair, A. T., *Appl. Opt.*, 20 (1981), 1734.
- [4] Loewenstein, E. V., *Appl. Opt.*, 5 (1966), 845.
- [5] Bell, B. J., in *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*, Chapter 1, 2, New York, (1972).
- [6] Griffiths, P. R., in *Fourier Transform Infrared Spectrometry*, Preface, New York, (1986).
- [7] Gerstenkorn, S., *Appl. Opt.*, 17 (1978), 1327.
- [8] Sakai, K. and Masumoto, H., *Appl. Opt.*, 17 (1978), 1709.

- [9] C. F. 劳季安主编, 现代光谱学技术, 成龙飞译, p. 204, 机械工业出版社, (1987).
- [10] Guelachvili, G., *Appl. Opt.*, 17 (1978), 1322.
- [11] Brault, J. W., in *Solar Fourier Transform Spectroscopy*, p.7, (1980).
- [12] Hanel, R. A., Chlachman, B., Clark, F. D., Prokes, C. H., Taylar, J. B., Wilson, W. M. and Chaney, L., *Appl. Opt.*, 9 (1970), 1767.
- [13] Balutean, J. P., Anderegg, M., Moorwood, A. F., M. Coron, N., Beckman, J. E., Bussoletti, E. and Hipplein, H. H., *Appl. Opt.*, 16 (1977), 1843.
- [14] Beer, R., *Appl. Opt.*, 5 (1966), 1191.
- [15] Bell, B. J., in *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*, Appendix C, New York, (1972).
- [16] Bell, B. J., in *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*, Chapter 9, New York, (1972).
- [17] 虞宝珠, 物理, (1984), No. 9.
- [18] Bell, B. J., in *Introductory Fourier Transform Spectroscopy*, Chapter 15, New York, (1972).
- [19] 查尔斯·K·曼等著, 冉顺善译, 仪器分析, p. 341, 化学工业出版社, (1983).
- [20] R. J. 凯斯主编, 董培芝等译, 光探测器与红外探测器, 第 3, 4 章, (1984).
- [21] 黄天祥等编著, 可见光外天文学, p. 54, 科学出版社, (1986).
- [22] 黄佑然等编著, 实测天体物理学, p. 567, 科学出版社, (1987).
- [23] E. O. 布赖姆著, 柳群译, 快速傅利叶变换, 上海科学出版社, (1979).
- [24] 三石明善, 水野皓司, 赤外線技术, 江涛译, 红外, (1985), No. 1, p. 6.
- [25] E. H. 阿佛雷特主编, 李致森等译, 天体物理学前沿, 第 6 章, 科学出版社, (1982).
- [26] Ferraro, J. R. et al., in *Fourier Transform Infrared Spectroscopy Application to Chemical Systems*, Vol. 2, p. 283, New York, (1979).
- [27] Ferraro, J. R. et al., in *Fourier Transform Infrared Spectroscopy Application to Chemical Systems*, Vol. 2, Chapter 7, New York, (1979).
- [28] Ferraro, J. R. and Basile, L. J., in *Fourier Transform Infrared Spectroscopy Application to Chemical Systems*, Vol. 1, Chapter 7, New York, (1978).
- [29] Connes, P., Connes, J., Benedict, W. S. and Kaplan, L. D., *Astrophys. J.*, 147 (1967), 1230.
- [30] Connes, P., Connes, J., Kaplan, L. D. and Benedict, W. S., *Astrophys. J.*, 152 (1968), 731.
- [31] Hanel, R. A., Chlachman, B. S., Breihan, E., Bywaters, F., Champan, F., Rhodes, M., Rodges, D. and Vanous, D., *Appl. Opt.*, 11 (1972), 2625.
- [32] Ridgway, S. T., *Astrophys. J.*, 187 (1974), L41.
- [33] Fink, U., Dekkers, N. H., Larson, H. P., *Astrophys. J.*, 197 (1973), L155.
- [34] Fink, U., Larson, H. P., Gautier, T. N. and Treffer, R. R., *Astrophys. J.*, 207 (1976), L63.
- [35] Cudaback, D. D., Gausted, J. E. and Knacke, R. F., *Astrophys. J.*, 166 (1971), L49.
- [36] Treffers, R. R. and Cohen, M., *Astrophys. J.*, 188 (1974), 545.
- [37] Thompson, R. I., Strittmatter, P. A., Erickson, E. F., Witterborn, F. C. and Strecker, D. W., *Astrophys. J.*, 218 (1977), 170.
- [38] Tokunage, A. T., Knacke, R. F., Ridgway, S. T. and Wallace, L., *Astrophys. J.*, 232 (1979), 603.
- [39] Bjoraker, G. L., Larson, H. P. and Kunde, V. G., *Astrophys. J.*, 311 (1986), 1058.
- [40] Larson, H. P., Fink, U. K., Smith, H. A. and Davis, D. S., *Astrophys. J.*, 240 (1980), 327.
- [41] Ayres, T. R. and Testerman, L., *Astrophys. J.*, 245 (1981), 1124.
- [42] Ayres T. R. and Testerman, L., *Astrophys. J.*, 304 (1986), 542.
- [43] Nadeau, D., *Astrophys. J.*, 325 (1988), 480.
- [44] Hamann, F. and Simon, M., *Astrophys. J.*, 311 (1986), 909.
- [45] Mitchell, G. F., Allen, M., Beer, R., Dekany, R., Huntress, W., and Maillard, J. P., *Astrophys. J.*, 327 (1988), L17.
- [46] Hamann, F. and Simon, M., *Astrophys. J.*, 318 (1987), 356.
- [47] Kenyon, S. J. and Hartmann, Lee *Astrophys. J.*, 342 (1989), 1134.
- [48] Walker, C. E., Lebofsky, M. J. and Rieke, G. H. *Astrophys. J.*, 325 (1988), 687.
- [49] Hamann, F., Simon, M. and Ridgway, S. T., *Astrophys. J.*, 326 (1988), 859.
- [50] Moorwood, A. F. M., Baluteau, J. P., Anderegg, M., Coron, N., Biraud, Y. and Fitton, B., *Astrophys. J.*, 238 (1980), 565.
- [51] Baluteau, J. P., Moorwood, A. F. M., Biraud, Y., Coron, N., Anderegg, M. and Fitton, B., *Astrophys. J.*, 244 (1981), 66.
- [52] Lowe, R. P., Moorhead, J. M. and Wehlau, W. H., *Astrophys. J.*, 228 (1979), 191.
- [53] Buigs, H. L. and Ramsay, D. A., *Astrophys. J.*, 235 (1980), L115.

- [54] Erickson, E. F., Knacke, R. F., Tokunage, A. T. and Haas, M. R., *Astrophys. J.*, 245 (1981), 148.
[55] Keady, I. J., Hall, D. N. B. and Ridgway, S. T., *Astrophys. J.*, 326 (1988), 832.
[56] Maillard, J. P., Wehlan, W. H. and Bernath, P. F., *Astrophys. J.*, 326 (1988), 899.
[57] Hartmann, I. and Kenyon, S. J., *Astrophys. J.*, 322 (1987), 393.
[58] Ferraro, I. R. et al., in *Fourier Transform Infrared Spectroscopy Application to Chemical Systems*, Vol. 2, p. 248, New York, (1979).

(责任编辑 林一梅)

Fourier Transform Spectrometer and Its Application to the Astronomy

Lin Yanguan

(*Nanjing Astronomical Instruments Factory, Academia Sinica*)

Abstract

Fourier Transform Spectrometer (FTS) is the third generation and up to date spectrometer. It has many advantages Comparing with the dispersion type spectrometer and plays an important role in the domain of astronomical spectroscopy in recent 20 years. This article has introduced briefly and systematically about the general situation, principle. technigue of FTS and its application to the astronomy.