

太赫兹空间探测技术研究进展

梁美彦^{1*}, 任竹云¹, 张存林^{2,3,4}

¹山西大学电子信息工程系, 山西 太原 030006;

²首都师范大学太赫兹波谱与成像北京市重点实验室, 北京 100048;

³首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048;

⁴首都师范大学物理系, 北京 100048

摘要 太赫兹辐射因其具有独特的空间传输优势以及大气敏感特性, 具有很大的应用潜力。总结了国内外各大研究机构近年来在太赫兹空间探测方面的研究进展, 简述了大型太赫兹地基、空基、天基探测平台的结构参数、工作环境及探测结果, 并对不同探测平台的研究结果进行了对比, 分析了不同太赫兹遥感设备的特点, 提出了太赫兹在空间探测方面的应用前景和未来的发展趋势等。太赫兹空间探测将是一个实用性很强的研究领域, 可以获取光学和微波所不可探测的信息, 太赫兹空间探测技术的发展将为高分辨空间遥感奠定重要的研究基础。

关键词 太赫兹; 空间探测; 地基; 机载; 星载

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.180004

Progress of Terahertz Space Exploration Technology

Liang Meiyun¹, Ren Zhuyun¹, Zhang Cunlin^{2,3,4}

¹Department of Electronics and Information Engineering, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

²Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

³Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Capital Normal University,

Beijing 100048, China;

⁴Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract Terahertz (THz) waves have great application potential because of their unique atmosphere sensitivity features and spatial transmission properties. This study summarizes the research achievements of major research institutions at home and abroad in THz space exploration. Further, we describe the parameters, working environment, and detection results of large ground-, aircraft-, and space-based THz space exploration platforms and compare the experimental results of these platforms. In addition, the features of THz remote sensing equipment are also analyzed. Finally, we present the application prospect and future development trends of THz space exploration. The THz space exploration technique can obtain unique information that cannot be acquired using optical methods or microwave technology, which makes it a prospective research area in the future. The development of THz space exploration technology will lay an important foundation for high-resolution space remote sensing.

Key words terahertz; space exploration; ground; airborne; satellite-borne

OCIS codes 280.4991; 040.2235; 300.6495

1 引言

空间遥感技术一直是人类认识宇宙的重要途径。在以探空火箭、人造地球卫星、人造行星和宇宙

飞船等飞行器为主, 同时与地面观测台站网、气球相配合, 共同构成的完整空间探测体系中, 空间遥感技术发挥着至关重要的作用。

2016年8月, 国务院发布了《“十三五”国家科

收稿日期: 2019-01-18; 修回日期: 2019-03-12; 录用日期: 2019-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(11804209)

* E-mail: meiyunliang@sxu.edu.cn

技术创新规划》,提出了“推进我国空间探测新机制、加强空间科学新技术新理论的研究,开展新机理新体制遥感载荷与平台”的发展战略。在空间遥感探测应用中,微波和红外遥感技术目前相对成熟,而太赫兹探测技术尚在快速发展阶段。由于宇宙背景辐射集中于太赫兹波段,例如银河系有50%的辐射光功率存在于太赫兹波段^[1],因此,太赫兹空间探测对于推测星体演化、推测星云气体成分和状态有着重要的价值。目前,太赫兹探测技术的研究已经取得了关键性的技术突破,其应用层面的研究也不断拓展到新的领域^[2-3]。

太赫兹亚毫米波在大气遥感中具有广泛的应用前景。大气中的微粒对光束有散射作用,散射强度与波长的四次方成反比,因此,当大气中不存在吸收物质时,太赫兹波的衰减低于可见光;当大气中存在的微粒尺寸与探测波长接近时,探测信号明显改变。因此,使用太赫兹探测技术可以监测沙尘天气^[4]。此外,由于许多气体分子的振动和转动能谱处于太赫兹频段,探测时可以产生该频段特征吸收线,因而,太赫兹技术可以用来探测大气中具有特定种类或相态的大气踪迹成分,如水气、冰云、臭氧等^[5-8],从而给出有关对流层和平流层中上升气流运动的信息,实现环境降水分布监测。太赫兹波对人类活动排放的含氯、氮、硫、氟等元素废气有特殊敏感性,可用于臭氧层的大气环保监控。

太赫兹辐射与毫米波相比波长较短,因而提供了更好的空间分辨率,且支持更小的光学组件^[9]。但由于大气对流层中含有大量水气等极性分子,水气转动和振动吸收谱线的展宽效应使得太赫兹波在地面附近无法传播很长距离,再加上氧气和氮气等分子的吸收效应,对于地面附近较长距离的传输和探测,300 GHz以上频段不是理想的选择^[10],相应的观测手段也还存在很大困难^[11],因此,地面附近太赫兹遥感技术大规模应用还需要进行深入探索。

2 国外太赫兹空间探测设备及探测结果

卫星遥感是利用辐射感应器接收空间发射、反射以及散射目标产生的电磁波来获取目标物的特征信息。感应器不能接收所有波段的电磁波,仅能接收与目标物波段相近的电磁波段辐射。为了突出目标信息,在感应器前必须设置滤光器件,只让与探测目标相关的电磁波通过,滤光器件限定的这个光学间隔通常称为卫星通道。对于大气遥感,探测器的

通道通常选择在一些特定成分的吸收带上,每个吸收带包含很窄的吸收线,吸收带在中心频率处吸收很强,在两侧的翼区吸收较弱。如果选择吸收带中心通道,来自大气底层的辐射基本完全被高层大气吸收,卫星仪器将接收几乎全部来自高层大气的辐射。相反,如果选择位于吸收带翼区的通道,则可接收主要来自低层大气或地表的辐射。因此,通常选择一组吸收特性不同的最佳组合通道进行观测,实现卫星探测器对大气不同高度层物理特性的探测。

垂直探测的物理特性除了大气温度、湿度、垂直廓线外,还有一些大气组分含量的垂直分布,例如臭氧和二氧化氮等,或一些物理参数的垂直廓线,如消光系数。探测器通道一般选择能够反映不同大气层目标物最大辐射的波段,该波段处目标物的辐射信号最强,以易于获得目标物的垂直分布特征。

遥感方式按照平台可分为地面平台、航空平台(悬浮在海拔80 km以下的大气层如对流层、平流层中的遥感平台)、航天平台(位于海拔80 km以上的遥感平台)和人造卫星平台。按照其探测形式可分为主动式遥感和被动式遥感,传统意义上的遥感仪器可分为紫外、可见光、红外和微波四类。由于太赫兹探测技术可以从不同角度反映空间物质的信息,因此该技术的兴起为空间遥感提供了新的探测方法和手段。

太赫兹空间探测技术在部分领域已经得到了工程化应用,已经发射的用于星载太赫兹遥感装置主要有瑞典的Odin^[12]、美国NASA的Aura^[13]、SOFIA和欧洲航天局(ESA)的Herschel等,这些装置为宇宙探测、大气遥感、气候变化和环境监测提供了平台。此外,还有一些太赫兹观测的地基平台。

由于太赫兹波在地表大气中传输时易被水分吸收,对于地基平台,观测条件的选择至关重要。世界上性能优良的太赫兹波平台台址主要分布在夏威夷海拔4000 m以上的Mauna Kea岛、智利的Atacama沙漠。这些地方由于地势高,空气干燥,空气和水分衰减减小,是最佳的地基观测平台。其中,坐落在Mauna Kea岛上有Caltech Submillimeter Observatory(CSO)、James Clerk Maxwell Telescope(JCMT)和Submillimeter Array(SMA)3台亚毫米波观测设备;坐落在Atacama沙漠上有5台亚毫米波天文观测设备。

2.1 太赫兹地基探测平台

美国Caltech Submillimeter Observatory(CSO)是世界上最早的太赫兹地基天文观测设备之

一,外观如图 1 所示。CSO 坐落在海拔 4092 m 的 Mauna Kea 岛上,该地天气条件非常适合 CSO 工作,它从 1986 年开始正式观测,主要用于观测太阳系、银河系甚至宇宙中的物质,研究星际气体的化学组分、恒星产生条件、星球演化阶段和星球形成的历史。CSO 的观测波长为 $350 \sim 2000 \mu\text{m}$,主镜直径为 10.4 m,表面精度小于 $15 \mu\text{m}$,可观测银河最远距离是 120 亿光年。图 2 是观测处女座星云中 M100 (NGC4321) 星系中 $^{12}\text{CO}_{J=4-3}$ 和 $^{12}\text{CO}_{J=2-1}$ ($J=2-1$ 为从能级 2 到能级 1 的发射谱) 的光谱的结果,星系相应速度的中心频率是 458.7 GHz 和 229.3 GHz^[14]。



图 1 夏威夷岛上的 CSO^[14]
Fig. 1 CSO on Hawaii Island^[14]

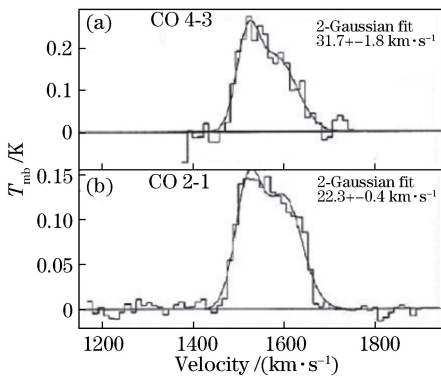


图 2 M100 (NGC4321) 星系的光谱^[14]。
(a) $^{12}\text{CO}_{J=4-3}$; (b) $^{12}\text{CO}_{J=2-1}$
Fig. 2 Spectra of M100 (NGC4321) galaxy^[14].
(a) $^{12}\text{CO}_{J=4-3}$; (b) $^{12}\text{CO}_{J=2-1}$

1987 年 4 月正式投入使用的 JCMT 是一个亚毫米波望远镜,其直径为 15 m,是世界上到目前为止口径最大的望远镜,可观测频率在 215~680 GHz 之间,主要用于观测太阳系、星际尘埃气体以及遥远的星系^[15-16],图 3 是 JCMT 的设计图。

JCMT 上搭载的 Scuba-2 是一台具有 1 万像素的先进热辐射计相机,该相机上有两个工作波长分别为 $450 \mu\text{m}$ 和 $850 \mu\text{m}$ 的阵列,图 4 是利用该相机

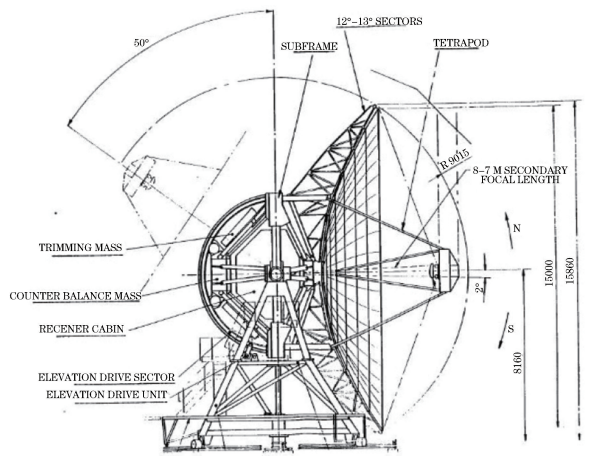


图 3 JCMT 的设计^[16]

Fig. 3 Design of JCMT^[16]

对猎户座星云的观测结果^[17]。

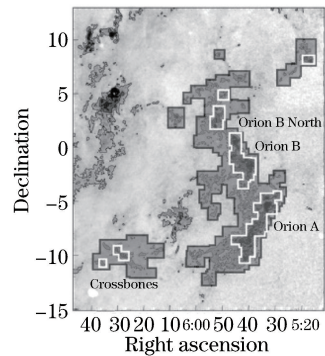


图 4 猎户座星云观测结果^[17]

Fig. 4 Observation result of Orion^[17]

2002 年建成的 SMA,一共有 8 个天线阵列,每个天线口径为 6 m,工作频率范围为 180~700 GHz,基线为 509 m,图 5 为 SMA 天线阵列^[18]。SMA 接收的辐射主要来自星际的冷物质,包括气体、尘埃和小的类岩体。由于这些物质是形成恒星和星体的物质,因此,探测亚毫米辐射对于研究恒星的产生和消亡有重要作用。当恒星在星际云里形成的时候,可见光被这些星云阻挡,此时光学望远镜和人眼看到的是一片黑暗,但 SMA 能够穿透

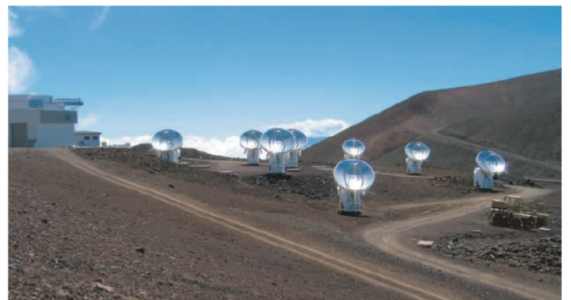


图 5 SMA 的外观^[18]

Fig. 5 Appearance of SMA^[18]

星云获得亚毫米波的图像^[19],图6是SMA对猎户座星云观测的结果^[20]。

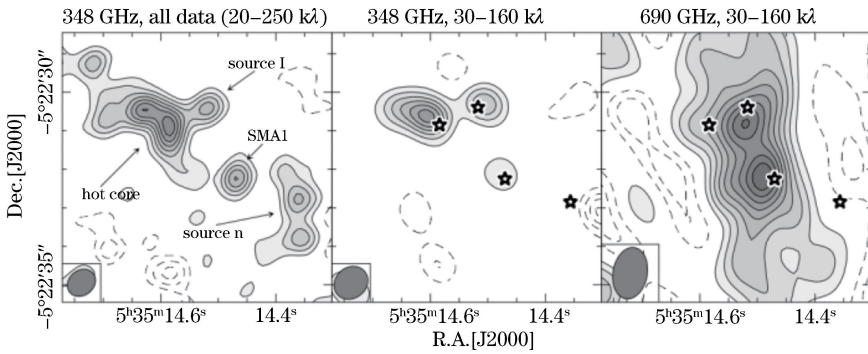


图6 SMA观测猎户座星云的结果^[20]

Fig. 6 Observation results of Orion obtained from SMA^[20]

智利在空间遥感领域已具备世界领先水平,许多国际合作已初具规模,智利现在托管地球上大多数功能强大的地基天文观测平台。由于空气干燥且海拔较高,智利北部的Atacama沙漠也是良好的观测位置。Atacama沙漠平均年降雨量低于100 mm,空气清洁度高,每年有超过320个晴朗的夜晚,对于亚毫米波探测是理想的环境。

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array(ALMA)是一个庞大的地基天文计划,用于全球天文学研究。该计划实施周期为2003—2013年,是一个全球合作计划,合作地区和国家包括欧洲、日本、北美和智利。ALMA由150~18000 m的基线和66个直径为12 m的高精度天线阵列构成,架设在智利北部海拔5 km的Atacama沙漠,最远距离达14 km,最近仅150 m,拥有0.01"的分辨率,相当于能看清500多千米外的一分钱硬币,精确度是哈勃太空望远镜的10倍,工作波段在3~9600 μm (0.03~100 THz)^[21]。由于其高分辨率和灵敏度,ALMA将从一个全新的“窗口”了解宇宙,获得有关星系和行星演变的数据,寻找宇宙起源,图7和图8为ALMA地基天文台的仿真效果图及内部的高速数字转换器。

Atacama Cosmology Telescope(ACT)同样位于智利的Atacama沙漠,海拔5190 m,是一个直径6 m的望远镜(图9),旨在绘制各向异性的大型天空区域的宇宙微波背景(CMB)并获得1'的角分辨率,并且通过Sunyaev-Zel'dovich效应检测星系团。该望远镜能够在148,218,277 GHz三个频率上实现观测,每个频率的视场范围为22'×26'^[22],图10为ACT各个反射镜的位置和光路图。

苏尼亚耶夫-泽尔多维奇效应(Sunyaev-Zel'dovich effect)是苏联物理学家Sunyaev和Zel'dovich在1972年提出的,但是一直没有得到证实,S-Z效应是宇宙微波背景辐射的光子与星系团等天

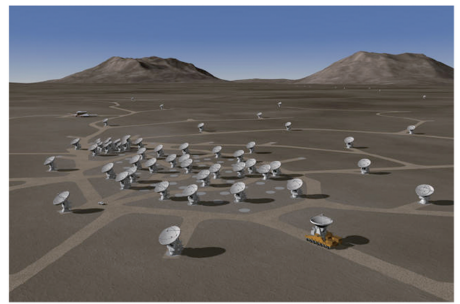


图7 ALMA地基天文台的仿真效果图^[21]

Fig. 7 Simulation result of ALMA ground-based observatory^[21]

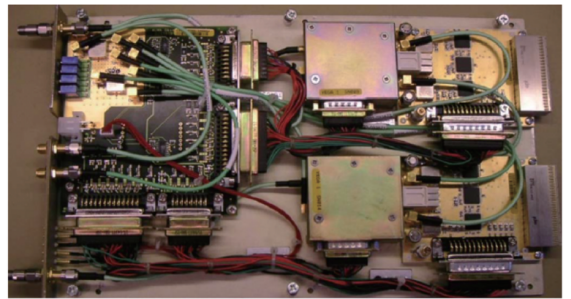


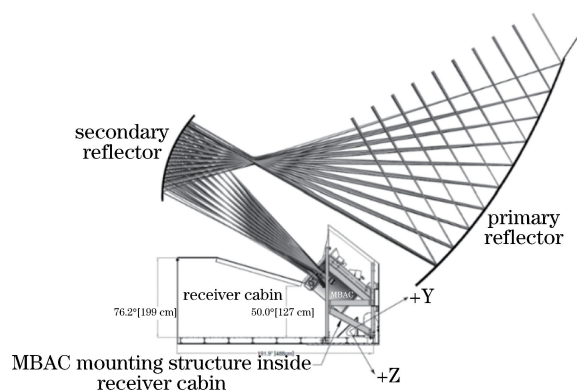
图8 ALMA开发的高速数字转换器^[21]

Fig. 8 High-speed digitizer developed for ALMA^[21]



图9 ACT的外观^[22]

Fig. 9 Appearance of ACT^[22]

图 10 ACT 的结构和光路图^[22]Fig. 10 Structure and light path of ACT^[22]

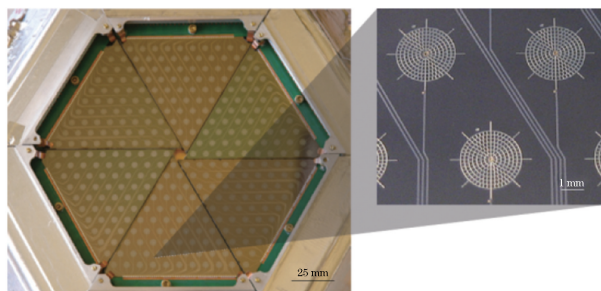
体中的高能电子发生逆康普顿散射而导致温度分布产生变化的现象。ACT 检测到速度为 600 km/s 的银星团影响着宇宙微波背景,第一次探测到 S-Z 效应,证实了苏尼亚耶夫-泽尔多维奇效应,提供了一个在宇宙中研究大型结构演化的新方法。这些发现有助于确定使宇宙加速膨胀的神秘力量所具有的性质^[23]。

Atacama Pathfinder Experiment (APEX) 是由 Max Planck Institut für Radioastronomie (MPIfR) (占比 50%)、瑞典的 Onsala Space Observatory (OSO) (占比 23%)、以及 European Southern Observatory (ESO) (占比 27%) 三个机构合作的太赫兹天文观测系统,目的是建造一个改进的 ALMA 天线模型(图 11)。接收设备包括三个频段,分别是 SHeFI (line, 211~500 GHz 和 1250~1384 GHz), LABOCA (continuum, 345 GHz) 和 SABOCA (continuum, 850 GHz)^[24-25]。

APEX 用来研究银河系和遥远星系的冷尘埃和气体,通过跟踪连续发射的热量,分析高频率谱线,了解消亡的恒星、恒星形成区、星爆星系、行星中大气的化学成分和结构。2011 年, APEX 采用改进的 APEX-SZ (150 GHz) 接收器,利用超导跃迁边缘传感器辐射热计 (TES) (图 12) 探测了 S-Z 效应,获得了更好的灵敏度以及更大的视场^[26-27]。

Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) 位于智利北部 Atacama 沙漠海拔 4860 m 位置,是一个高精度的太赫兹望远镜,它的天线直径为 10 m, ASTE 及其配套设施如图 13 所示。可观测频率范围为 270 GHz, 324~366 GHz, 798~818 GHz^[28], 该工程的主要目标为

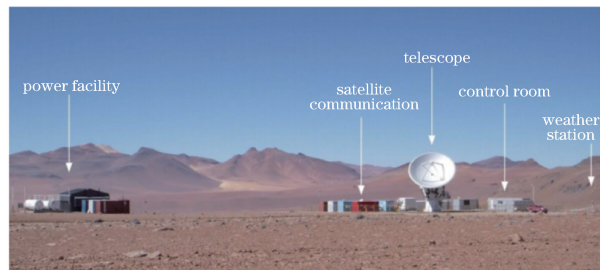
1) 用频率高达 900 GHz 的亚毫米波探测南方天空, 该区域有很多天文学家感兴趣的星体, 比如银

图 11 APEX 望远镜的照片^[26]Fig. 11 Photograph of APEX telescope^[26]图 12 APEX 的热传感器阵列^[27]Fig. 12 Thermal sensor array of APEX^[27]

河系中心、麦哲伦星云和船底座海山二星, 都是银河系质量较大的恒星。

2) 开发现场评估观测技术。该项工程由日本国家天文台会同智利大学以及当地一些研究机构, 例如名古屋大学、大阪大学、茨城县大学和北海道大学, 一同进行仪器开发研究。

ASTE 从 2004 年开始观测, 已经成功在 0.87 mm (350 GHz) 波段进行观测。图 14 为首次使用 ASTE 上的 CATS345 (345 GHz band) 和 WHSF (Wide-band High resolution Spectrometer with FFX correlator) 观察红外星 IRC+10216 光谱的结果^[29]。

图 13 ASTE 及其配套设施^[28]Fig. 13 ASTE and its ancillary infrastructure^[28]

2010—2015 年, 地基太赫兹望远镜——Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT) 采用亚毫米波段探测宇宙, 图 15 为 CCAT 的概念图, 其设计口径

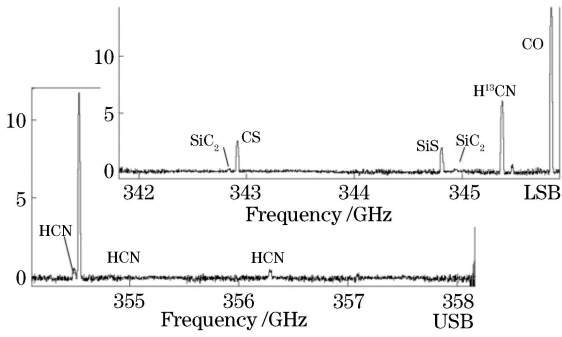


图 14 ASTE 观测红巨星 IRC+10216 光谱的结果^[29]

Fig. 14 Spectra of IRC+10216 observed by ASTE^[29]

为 25 m, 位于智利北部海拔 5612 m 处, CCAT 将集合高灵敏度、大视场和大带宽进行多波段观测, 观测频率范围为 200 GHz~1.5 THz。科学研究的目标包括星系形成和整个宇宙演化的历史、热气体弥漫的星云、恒星的形成、原生行星盘、银河系碎片以及柯伊伯带天体外太阳系。CCAT 的观测设备将包括测辐射热计相机、直接探测光谱分析仪以及外差接收机阵列^[30]。



图 15 地基太赫兹望远镜 CCAT^[30]

Fig. 15 Ground-based terahertz telescope CCAT^[30]

2.2 太赫兹空基探测平台

美国 NASA 的 SOFIA (Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy) 是目前世界上最大的机载探测平台, 可提供可见光、红外、太赫兹三个波段上的信息。SOFIA 飞行于平流层之上, 距地面高度为 12~14 km, 携带一个直径为 2.7 m 的望远镜, 如图 16 所示, 可以获得大气中 99.8% 的水蒸气信息, 并且可以探测 0.3~1600 μm 波长中 80% 的辐射。图 17 是在晴朗的晚上, 飞行于 45000 ft (~13.72 km) 的 SOFIA 和位于 13800 ft (~4.21 km) 高度的 Mauna Kea 利用波长 1~1000 μm 范围观测星云情况的对比结果^[31-32]。图 18 是可见光、近红外和 SOFIA 远红外成像的结果, 可以实现不同波长下对猎户座星云的观测^[33]。

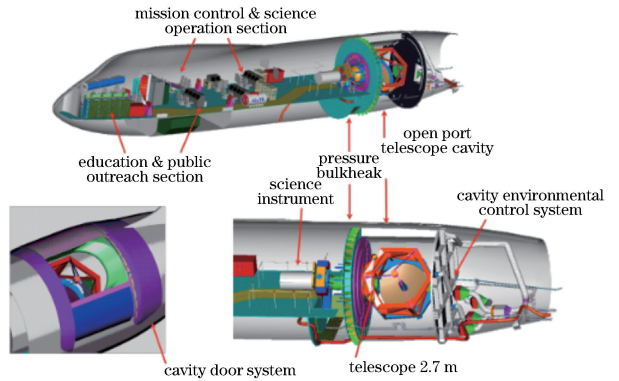


图 16 SOFIA 机身剖面图^[32]

Fig. 16 Cutaway view of SOFIA fuselage^[32]

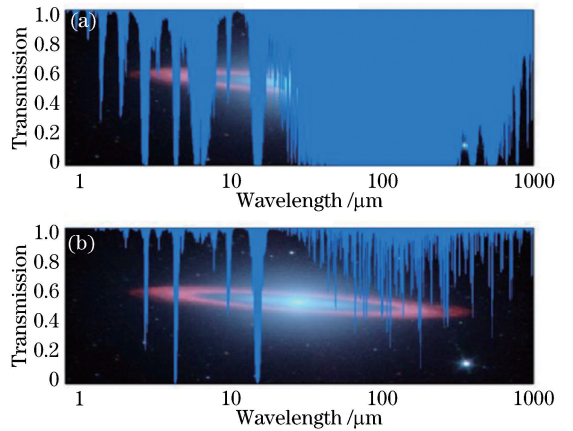


图 17 Mauna Kea 和 SOFIA 观测情况对比^[32]。

(a) Mauna Kea; (b) SOFIA

Fig. 17 Observation results of Mauna Kea and SOFIA^[32] .

(a) Mauna Kea; (b) SOFIA

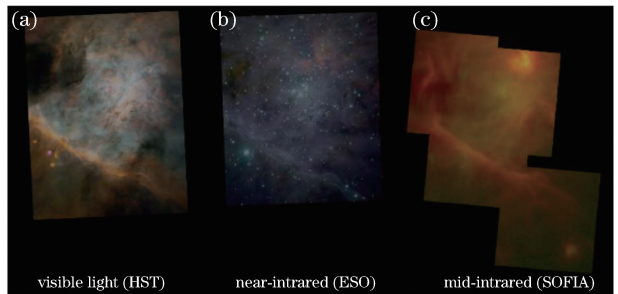


图 18 对猎户座星云 (Messier 42) 的混合成像^[33]。(a) HST 可见光成像结果; (b) ESO 近红外成像结果; (c) SOFIA 中红外成像结果

Fig. 18 Composite images of Messier 42 (Orion Nebula)^[33]. (a) HST using visible light; (b) ESO using near-infrared light; (c) SOFIA using mid-infrared light

2.3 太赫兹地基探测平台

第一代宇宙背景探测器 COBE 由美国 NASA 于 1989 年 11 月 8 日发射, 是第一颗用于专门研究宇宙学的人造卫星。图 19 为 COBE 卫星的轨道示

意图,它用来测量宇宙早期弥漫的红外和微波辐射。它搭载了三种波长的观测设备,一个设备为 DIRBE,其波长范围为 $1.25 \sim 240 \mu\text{m}$,主要用来寻找宇宙红外背景辐射;一个设备为微差微波辐射计(DMR),用来绘制各种不同的宇宙微波辐射;第三个设备为远红外游离光谱仪(FIRAS)^[34]。

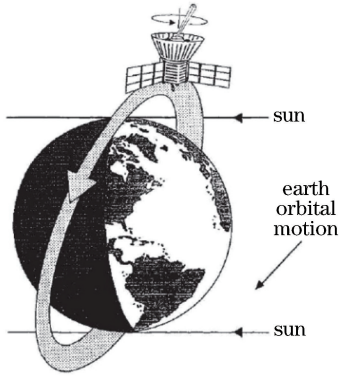


图 19 COBE 人造卫星的轨道^[34]

Fig. 19 Orbit of COBE satellite^[34]

NASA 于 2001 年 6 月 30 日发射的威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)属于第二代宇宙微波背景探测器,它是一个背靠背的光学系统,能对天空进行差分测量,底部装有防止来自太阳和地球强辐射的设备,如图 20 所示^[35]。WMAP 的目的是探测宇宙中大爆炸后残留的热辐射,找出与宇宙微波背景辐射的温度之间的微小差异,以验证有关宇宙产生的各种理论。WMAP 继承了 COBE 的任务,是中级探索者卫星系列之一。

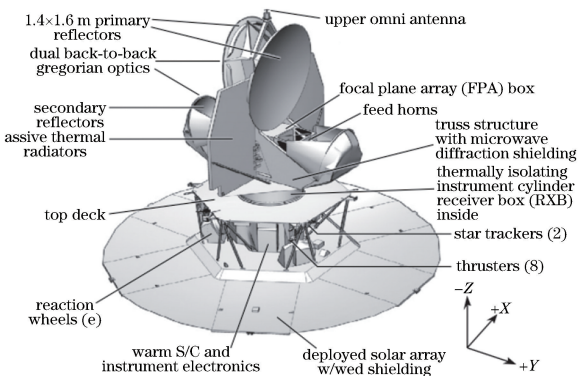


图 20 WMAP 示意图^[35]

Fig. 20 Diagram of WMAP^[35]

WMAP 由一组被动冷却微波辐射计和口径为 $1.4 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 的主反射镜来提供所需的角分辨率。探测波长为 3.2 mm (W 波段)到 13 mm (K 波段)范围内 5 个波段的微波涨落。所探测的 5 个波段不仅是为了相互印证,也是为了将来自银河系的一些邻近微波源辐射加以区别。光子强度涨落包含大量的

早期宇宙信息,同时光子偏振同样携带重要的早期宇宙信息,且该类信息仅通过强度无法测量,因此探测器不仅可以测量强度,还可测量光子的偏振等参量。偏振又可以分为两类,一类叫 E 模,类似电场模;一类叫 B 模,类似磁场模。根据目前研究进展,磁场效应往往弱于电场效应,所以 WMAP 只探测到了 E 模,没有探测到 B 模。而 B 模是早期涨落中引力波的部分,因此 B 模的探测不仅可以区别不同的暴涨理论以及其他理论的争议,还可以间接验证引力波的存在。在未来的应用中,普朗克效应将探测到 B 模。

将 WMAP 五个波段(23,33,41,61,94 GHz)的多频数据减去银河背景信号所产生的早期宇宙微波背景辐射,如图 21 所示,在宇宙微波背景辐射图中,显示的温度范围为 $0 \sim 400 \mu\text{K}$,这些信息有助于推断出第一代恒星形成时间,同时为推断在第一个亿万分之一秒宇宙发生的事件提供新的线索^[36-37]。

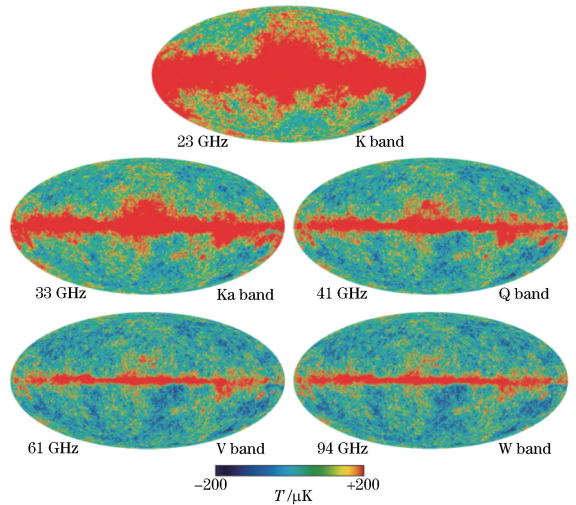


图 21 宇宙背景温度图^[36-37]

Fig. 21 Temperatures of cosmic background^[36-37]

2009 年 5 月 14 日与 Herschel 一起发射的 Planck 卫星探测器是由 ESA 和 NASA 合作研制的第三代宇宙微波背景探测卫星(第一代和第二代分别是 COBE 和 WMAP),工作波长为 $350 \sim 10000 \mu\text{m}$,它可以测量宇宙微波背景辐射微弱的涨落^[38]。该卫星携带两个探测器:低频探测器($26 \sim 77 \text{ GHz}$)和高频探测器($83 \sim 1000 \text{ GHz}$),用来探测宇宙微波背景辐射,以较大的灵敏度和高的空间分辨率对整个天空中宇宙背景辐射的各向异性进行成像研究。Planck 探测器的灵敏度比 WMAP 高 10 倍,比 COBE 卫星灵敏度高 10 倍以上,角分辨率比 COBE 高 50 多倍。Planck 的温度分辨率为 $1 \mu\text{K}$,

角分辨率在 $10'$ 以下。它可以高精度测量宇宙微波背景辐射各向异性,由此可确定一些宇宙基本参数,如宇宙空间曲率、哈勃常数、暗物质密度等,这将有助于研究早期宇宙形成和物质起源的奥秘。图 22 为 Planck 卫星的结构图。

图 23 是用普朗克卫星探测的全天空 1227 个普朗克星系团和候选星系团的分布图,用点标记^[39]。

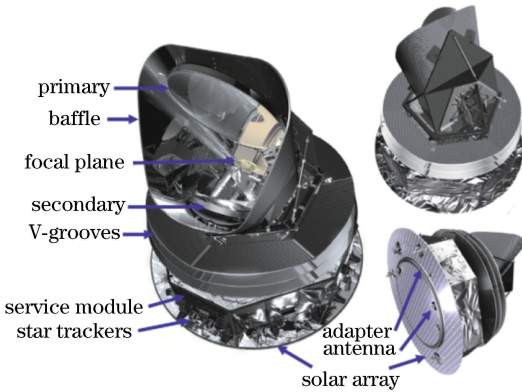


图 22 普朗克卫星的结构图^[38]

Fig. 22 Structure of the Planck satellite^[38]

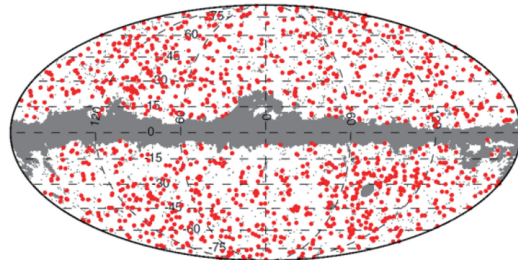


图 23 1227 个普朗克星系团及备选星系团的分布^[39]

Fig. 23 Sky distribution of the 1227 Planck clusters and candidates^[39]

1998 年 12 月 5 日,美国发射的亚毫米波人造天文卫星 SWAS(Submillimeter Wave Astronomy Satellite, $0.487 \sim 0.557$ THz)是 NASA 的小探险家程序(SMEX)。这是 NASA 研究恒星结构及星际化学物质的小型卫星,主要用途是寻找宇宙星云间的氧(487 GHz)、水(557 GHz 和 547 GHz)、碳(492 GHz)及一氧化碳分子(^{13}CO , 551 GHz),从而确定构成恒星的星际云的成分。SWAS 卫星同时携带了冷却到 170 K 的肖特基混频外差接收系统,该肖特基混频外差接收系统观察波段的中心频率为 550 GHz 与 490 GHz,带宽为 ± 350 MHz,首次实现亚毫米波范围内的高精度外差探测,它的结构如图 24 所示^[40]。SWAS 已经探测到猎户座星云中 H_2O 和 H_2^{18}O 的光谱(图 25),辐射显示为强度与视在速度(或等效频率)的关系,这些线的强度取决于分子

的丰度^[41]。从图 25 可以看出, H_2O 比其同位素 H_2^{18}O 丰度高。这些都是射电天文学用于探测分子云的典型实例^[42]。此外,SWAS 还提供三个轴的稳定平台来观测银河云的结构,可以用变化的角度观察银道面,因此能在更广阔的范围观察和探索不同的目标。

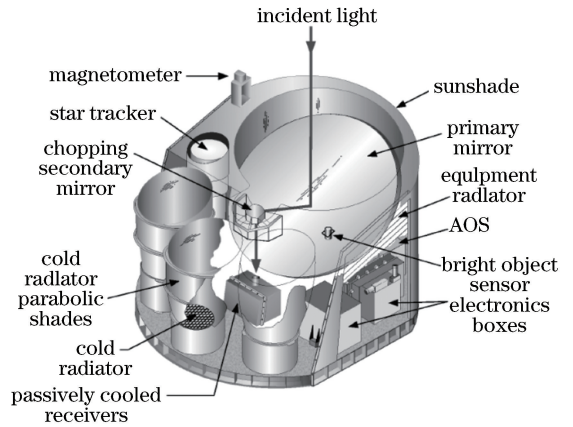


图 24 SWAS 卫星的结构^[40]

Fig. 24 Structure of the SWAS satellite^[40]

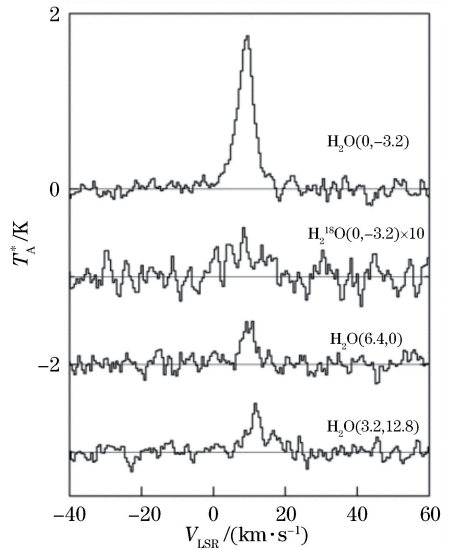


图 25 猎户座星云 H_2O 和 H_2^{18}O 的谱^[41]

Fig. 25 Spectra of H_2O and H_2^{18}O obtained with SWAS

2001 年 2 月 20 日,瑞典发射的 Odin 遥感卫星,位于距地球高度 600 km 的太阳同步轨道,运行周期为 96 min,观测分为三个波段,分别是 118.25 ~ 119.25 GHz、486.1 ~ 503.9 GHz 和 541.0 ~ 580.4 GHz,带宽为 100 ~ 1000 MHz,本振基于耿氏二极管和混频器原理,低噪放利用低温高电子迁移率晶体管(HEMT)实现,Odin 利用探测空间中的水、氧气、一氧化碳和臭氧的光谱来研究星系和太阳系的早期特征^[43]。由于氟利昂的排放导致了臭氧层的变

化,Odin 通过研究氯的化合物导致臭氧耗竭的原因来探究减少氟利昂排放对臭氧的改善作用。图 26 和图 27 分别为 Odin 卫星的外观和内部光路图。

从 2007 年开始,Odin 开始对地球的大气进行观测,当卫星面向地球的时候,可以在很宽的太赫兹频带上对大气物理过程进行研究。图 28 为 Odin 在 C/2001 A2 彗星上观测到水在 557 GHz 的谱线^[44]。

2004 年,欧洲航天局 (ESA) 发射的罗塞塔 (Rosetta) 人造飞行器 (MIRO),工作频率为 188 GHz 和 560 GHz,用以探测 Comet67P/Churyumov-Gerasimenko (C-G) 彗尾和彗核中存在的水、一氧化

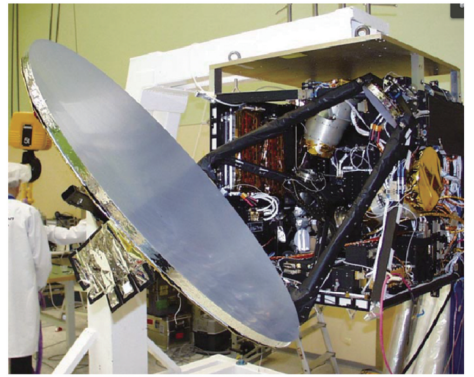


图 26 Odin 人造卫星的反射镜^[43]

Fig. 26 Reflector of the Odin satellite^[43]

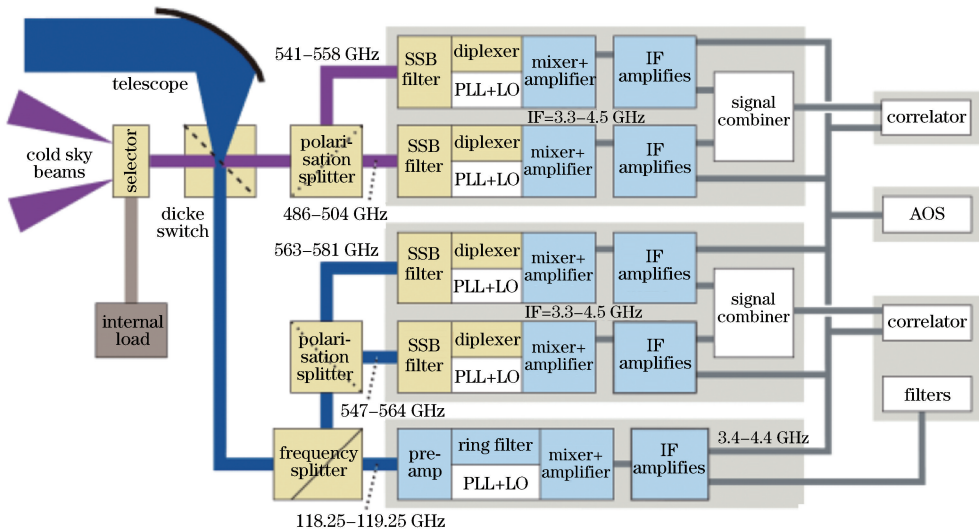


图 27 Odin 内部光路图^[43]

Fig. 27 Internal light path of the Odin^[43]

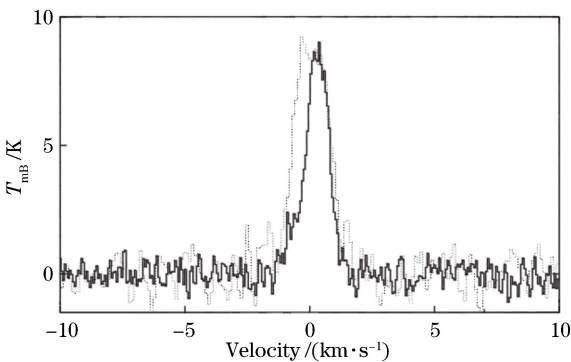


图 28 Odin 在 C/2001 A2 彗星上观测到水在 557 GHz 的谱线^[44]

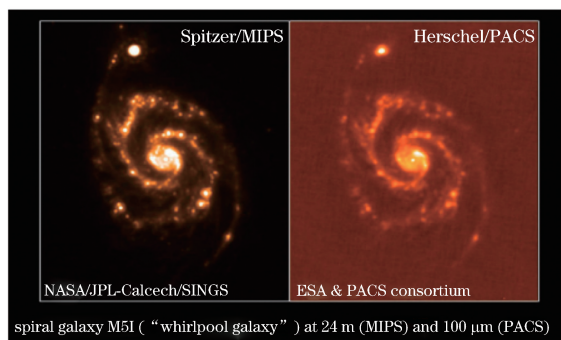
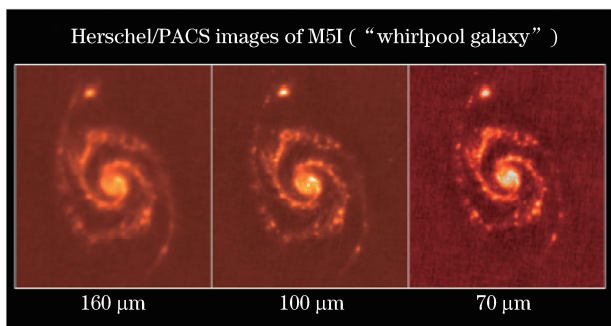
Fig. 28 Spectral line at 557 GHz of water observed by Odin in comet C/2001 A2^[44]

碳、氨、甲醇等物质的含量。最近,JPL(喷气推进实验室)在分析氨方面已经获取了完整、准确的实验数据,可以用于全面分析基态和第一激发态^[45]。

2009 年 5 月 14 日,欧洲航天局 (ESA) 发射的

Herschel 沿着太阳与地球之间位于第二拉格朗日点上的轨道缓慢运动,并携带了迄今为止最大的天文望远镜(图 29),主镜 3.5 m 宽,在红外和太赫兹两个波段对冷的宇宙背景进行探测。Herschel 携带了超外差光谱仪(HIFI)、两波段光子探测阵列相机(PACS)和三波段光子影像接收器(SPIRE)三个设备,用于探索恒星和银河系的发展历史,研究星际介质的相互作用,Herschel 也可以对太阳系中的小行星及彗星进行物理状态的探测和化学组分的分析,溯源行星的形成机理^[46]。

图 30 显示了 Herschel 上的载荷 PACS (100 μm)与 Spitzer 上搭载的 MIPS (24 μm)对 M51 星云的观测结果,星系螺旋结构在这两张图中都清晰可见;图 31 是 Herschel 采用 160, 100, 70 μm 三个波段对 M51 星云的观测结果,可以发现采用短波观测时,角分辨率更高^[47]。

图 29 Herschel 航天器^[47]Fig. 29 Herschel spacecraft^[47]图 30 Spitzer/PACS 与 Herschel/MIPS 对 M51 星系的成像结果^[47]Fig. 30 Imaging results of M51 galaxy from Spitzer/MIPS and Herschel/PACS M51^[47]图 31 不同波长对 M51 的观测结果^[47]Fig. 31 Observation results of M51 at different wavelengths^[47]

3 国内太赫兹空间遥感设备

中国的风云三号卫星系列是第二代极轨气象卫星系列, FY-3A 和 FY-3B 分别于 2008 年 5 月 27 日和 2010 年 11 月 5 日发射并投入使用。FY-3A 轨道倾角为 98.753° 、高度为 836.4 km、偏心率为 0.0025、周期为 101.603 min, 与风云一号相比, FY-3A 搭载的遥感仪器数量扩展到 11 个, 同时, 风云三

号卫星上搭载了频率为 150~183 GHz 的 5 通道湿度计。由于大气中的水汽在 183.31 GHz 频点有最强的吸收线, 因此选择 183.31 GHz 作为主探测频点, 并且在其附近设置了三个通道对大气中不同高度层水汽的太赫兹辐射进行探测, 可以分别探测大气在 850, 500, 300 hPa 情况下, 不同高度层水汽的分布特征。另外, 湿度计在 150 GHz 大气窗口区设置了双极化探测通道, 用于探测地表的背景微波辐射。综合应用微波湿度计 5 个通道的探测结果, 可以反演得到大气湿度的垂直分布。FY-3 首次实现了我国在太赫兹波段对大气中的水蒸气探测的目标^[48]。

2011 年 8 月, 中国第一架可用于常规天文观测的亚毫米波望远镜 KOSMA 在海拔 4800 m 的西藏羊八井天文观测站建成。望远镜口径为 3 m (图 32), 这架望远镜主要用来接收宇宙中的亚毫米波辐射, 研究一般光学天文望远镜观测不到的处于婴儿时期的恒星。

KOSMA 上安装了三个接收器, 两个频率分别为 78~116 GHz 和 345 GHz 附近波段的 Schottkys 探测器, 以及一个频率范围为 125~170 GHz 的超导-绝缘-超导型接收器。利用该望远镜可探测高频分子谱线, 研究深埋于星际气体及尘埃中的天体以及恒星的形成过程等^[49]。

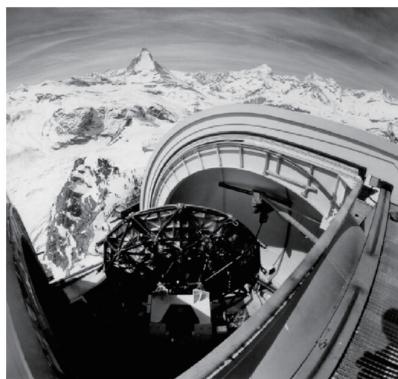
图 32 KOSMA 外观^[49]Fig. 32 Appearance of KOSMA^[49]

图 33 为 2016 年 KOSMA 观测 IRDC (Infrared Dark Clouds) 源所激发谱线的结果。

4 太赫兹技术在空间探测中的应用及展望

目前, 世界各国都对太赫兹新技术的研发十分重视, 美国《技术评论》称“改变未来世界的十大技术之一为太赫兹射线”。美国《大众机械》杂志 2008 年 12 月预测了 2009 年将可能出现的十大科技概念, T

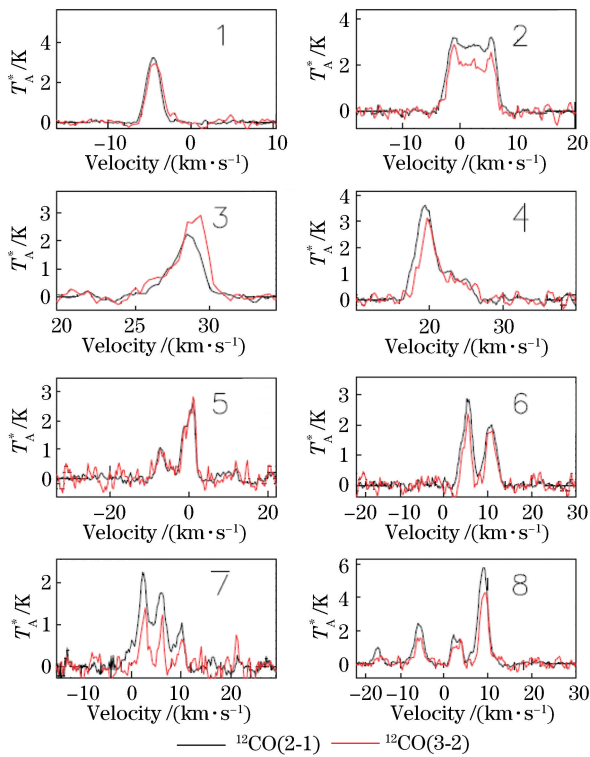


图 33 KOSMA 观测 IRDC 源的发射谱线^[50]

Fig. 33 Emission lines of IRDC source observed by KOSMA^[50]

射线技术排名第一。太赫兹虽然已经实现对武器和危险品等物品的探测,相比 X 射线也更安全,但是其应用还存在以下技术瓶颈:第一,现有的太赫兹源功率非常低,在低温环境下,也只能到毫瓦量级^[51];第二,水分吸收严重^[52];第三,在室温下,探测器的灵敏度有限。鉴于上述原因,在地面附近用 0.3 THz 以上的波段进行探测难以实现,但当探测器跟随卫星、空间站、航天飞机等到达平流层上方后,由于星际间稀薄的气体对太赫兹衰减效应已不明显,从遥远星体上发射出来的太赫兹波就可以被探测到。这些来自星际物质的太赫兹波往往会包含各种气态分子的信息,通过研究特定分子吸收谱线的峰位、半峰全宽、形状的变化就能获得该处气态分子压力、温度、气流速度的信息,通过研究辐射源的空间分布就可以获得由星际尘埃构成的螺旋星系的空问结构。此外,宇宙膨胀退行速度导致了光谱红移,使得最遥远星系的辐射偏移到太赫兹波段,利用太赫兹波就可以探测宇宙的演化。根据黑体辐射维恩位移定律,星际中大量的冷物质的辐射频率刚好在 0.1~1.0 THz 频率范围内。一方面,可以对以太阳为代表的星体本身的太赫兹辐射特性进行探测,从而对星体的成分及演化过程进行分析与推演;另

一方面,可以针对以月球为代表的星体对日光的反射特性进行太赫兹频段探测,从而在另一个角度获取星体成分以及演化过程信息;最后,从更广阔的空间来讲,对宇宙背景进行太赫兹空间探测,由此获得宇宙的演化过程信息^[2]。

由此可见,太赫兹空间探测领域的深入研究,对于人类认识宇宙有着至关重要的意义。同时,近年来,随着探月计划的实施以及空间站的发射,我国越来越重视空间探测,开拓太赫兹空间探测领域势在必行。KOSMA 观测站的建成标志着我国太赫兹探测技术以及核心器件的研究已经取得了一定成果,但在应用方面与国际先进水平还有差距。因此,推进太赫兹空间探测技术的研究,以期在该应用层面上取得突破,不仅可以增强我国在太赫兹研究领域的实力,还能够提高我国在空间探测体制研究方面的国际竞争力和影响力。

参 考 文 献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Siegel P H. THz instruments for space [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 2957-2965.
- [3] Siegel P H. Terahertz technology in outer and inner space [C]//2007 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2007, Baltimore, MD, USA. Washington, DC: OSA, 2007: CThU1.
- [4] Li Y Y, Wang X K, Zhang P, *et al.* The transmission characters of terahertz radiation to stimulant sand-dust storm [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(9): 921-924.
李宇晔, 王新柯, 张平, 等. 模拟沙尘暴条件下的太赫兹辐射传输研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(9): 921-924.
- [5] Corti T, Luo B P, Fu Q, *et al.* The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(9): 2539-2547.
- [6] Emde C, Buehler S A, Eriksson P, *et al.* The effect of cirrus clouds on microwave limb radiances [J]. Atmospheric Research, 2004, 72: 383-401.
- [7] Künzi K. Cloud ice water sub-millimeter imaging radiometer [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2001, 126: 1281-1300.
- [8] de Maagt P. Terahertz technology for space and

- Earth applications [C]//2007 International workshop on Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications, March 21-23, 2007, Cambridge, UK. New York: IEEE, 2007: 111-115.
- [9] Kellarev A, Sheffer D. Terahertz remote sensing[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8023: 80230N.
- [10] Phillips D J, Tanner E A, Everitt H O, *et al.* Infrared/terahertz double resonance spectroscopy remote sensing[C]//2011 International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, October 2-7, 2011, Houston, TX, USA. New York: IEEE, 2011: 6105115.
- [11] Appleby R, Wallace H B. Standoff detection of weapons and contraband in the 100 GHz to 1 THz region [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2007, 55(11): 2944-2956.
- [12] Zhu Z B, Dong S W, Wang Y, *et al.* The way of THz signal generation and THz detection techniques for remote sensing [C]//2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), September 9-11, 2011, Ningbo, China. New York: IEEE, 2011: 4601-4604.
- [13] Waters J W, Froidevaux L, Harwood R S, *et al.* The Earth observing system microwave limb sounder (EOS MLS) on the Aura satellite [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(5): 1075-1092.
- [14] Kooi J W. Heterodyne receiver development at the Caltech submillimeter observatory [C]//Submillimeter astrophysics and technology: a symposium honoring Thomas G. Phillips, February 23-24, 2009, San Francisco, CA, USA. USA: Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2009, 417: 377-410.
- [15] Dempsey J T, Ho P T P, Friberg P, *et al.* Current and near-term instrumentation at the James Clerk Maxwell telescope [C]//2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC), August 21-25, 2016, Seoul, Korea. New York: IEEE, 2016: 563-565.
- [16] Hills R E, Edwards B W H, Hall J E. Aspects of the design of the James Clerk Maxwell Telescope [C]//IEE Colloquium on Mechanical Aspects of Antenna Design, April 24-24, 1989, London, UK. UK: IET, 1989: 3417208.
- [17] Holland W S, Bintley D, Chapin E L, *et al.* SCUBA-2: the 10000 pixel bolometer camera on the James Clerk Maxwell Telescope[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013, 430(4): 2513-2533.
- [18] Ho P T P, Moran J M, Lo K Y. The submillimeter array[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2004, 616(1): L1-L6.
- [19] Rathborne J M, Jackson J M, Zhang Q, *et al.* Submillimeter array observations of infrared dark clouds: a tale of two cores[J]. The Astrophysical Journal, 2008, 689(2): 1141-1149.
- [20] Beuther H, Zhang Q, Reid M J, *et al.* Submillimeter array 440 μm /690 GHz line and continuum observations of Orion KL [J]. The Astrophysical Journal, 2006, 636(1): 323-331.
- [21] Bachiller R, Cerbicharo J. Science with the Atacama Large Millimeter Array: a new era for astrophysics [M]. Dordrecht: Springer, 2008: 1-3.
- [22] Swetz D S, Ade P A R, Amiri M, *et al.* Overview of the Atacama Cosmology Telescope: receiver, instrumentation, and telescope systems [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 194(2): 41.
- [23] Hand N, Addison G E, Aubourg E, *et al.* Evidence of galaxy cluster motions with the kinematic Sunyaev-Zel'dovich effect[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(4): 041101.
- [24] Immer K, Belitsky V, Olberg M, *et al.* SEPIA-a new instrument for the Atacama Pathfinder Experiment (APEX) telescope[J]. The Messenger, 2016, 165: 13-17.
- [25] Güsten R, Booth R S, Cesarsky C, *et al.* APEX: the Atacama Pathfinder Experiment[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 626714.
- [26] Schwan D, Ade P A R, Basu K, *et al.* Invited article: millimeter-wave bolometer array receiver for the Atacama Pathfinder Experiment Sunyaev-Zel'dovich (APEX-SZ) instrument [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(9): 091301.
- [27] Schwan D, Kneissl R, Ade P, *et al.* APEX-SZ: the Atacama Pathfinder Experiment Sunyaev-Zel'dovich instrument[J]. The Messenger, 2012, 147: 7-12.
- [28] Kamazaki T, Ezawa H, Tatematsu K, *et al.* The remote control system for the ASTE telescope[C]//Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV ASP Conference Series, October 24-27, 2004, Pasadena, California, USA. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 2005, 347: 533-537.
- [29] Ezawa H, Stepp L M, Gilmozzi R. Ground-based

- and airborne telescopes II[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 701208.
- [30] Sebring T A, Giovanelli R, Radford S, *et al.* Cornell Caltech Atacama Telescope (CCAT): a 25-m aperture telescope above 5000-m altitude [J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6267: 62672C.
- [31] Glaser S T, Strovers B K. Handling qualities flight testing of the stratospheric observatory for infrared astronomy (SOFIA) [C]//Society of Flight Test Engineers Symposium 2011 (SFTE Symposium), August 8-12, 2011, Seattle, WA, United States. United States: NASA Dryden Flight Research Center, 2011.
- [32] Gehrz R D, Becklin E E. The stratospheric observatory for infrared astronomy (SOFIA) [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7012: 70121R.
- [33] Lampater U, Keas P, Brewster R, *et al.* Pointing stability and image quality of the SOFIA Airborne Telescope during initial science missions [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8336: 833608.
- [34] Reach W T, Franz B A, Weiland J L, *et al.* Observational confirmation of a circumsolar dust ring by the COBE satellite[J]. Nature, 1995, 374(6522): 521-523.
- [35] Bennett C L, Bay M, Halpern M, *et al.* The microwave anisotropy probe (MAP) mission[J]. The Astrophysical Journal, 2003, 583(1): 1-23.
- [36] Bennett C L, Larson D, Weiland J L, *et al.* Nine-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP) observations: final maps and results[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2013, 208(2): 20.
- [37] Jarosik N, Bennett C L, Dunkley J, *et al.* Seven-year Wilkinson microwave anisotropy probe (WMAP*) observations: sky maps, systematic errors, and basic results [J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2011, 192(2): 14.
- [38] Tauber J A, Mandolesi N, Puget J L, *et al.* Planck pre-launch status: the Planck mission [J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 520: A1.
- [39] Ade P A R, Aghanim N, Armitage-Caplan C, *et al.* Planck 2013 results. XXIX. The Planck catalogue of Sunyaev-Zeldovich sources [J]. Astronomy & Astrophysics, 2014, 571: A29.
- [40] Melnick G J, Stauffer J R, Ashby M L N, *et al.* The submillimeter wave astronomy satellite: science objectives and instrument description [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2000, 539(2): L77-L85.
- [41] Snell R L, Howe J E, Ashby M L N, *et al.* Submillimeter wave astronomy satellite observations of extended water emission in Orion[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2000, 539(2): L93-L96.
- [42] Bergin E. Chemistry in the void[J]. Chemistry & Industry, 2001(20): 659-662.
- [43] Frisk U, Hagström M, Ala-Laurinaho J, *et al.* The Odin satellite-I. Radiometer design and test [J]. Astronomy & Astrophysics, 2003, 402(3): L27-L34.
- [44] Lecacheux A, Biver N, Crovisier J, *et al.* Observations of water in comets with Odin [J]. Astronomy & Astrophysics, 2003, 402(3): L55-L58.
- [45] Drouin B J, Yu S S, Pearson J C, *et al.* Terahertz spectroscopy for space applications: 2.5-2.7 THz spectra of HD, H₂O and NH₃ [J]. Journal of Molecular Structure, 2011, 1006(1/2/3): 2-12.
- [46] Griffin M, Pilbratt G, de Graauw T, *et al.* The Herschel space observatory [C]//2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, September 15-19, 2008, Pasadena, CA, USA. New York: IEEE, 2008: 10384061.
- [47] Pilbratt G L, Riedinger J R, Passvogel T, *et al.* Herschel space observatory-an ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy[J]. Astronomy & Astrophysics, 2010, 518: L1.
- [48] Yu S L. Application of terahertz technology in atmospheric remote sensing [C]//The 1st National Terahertz Conference on Science, Technology and Applications, September 14-17, 2012, Beijing, China, 2012.
余世里. 太赫兹技术在大气遥感中的应用[C]//第一届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2012年9月14日—17日, 中国, 北京, 2012.
- [49] Stutzki J. Sub-mm-instrumentation: current projects at KOSMA/Universität zu Köln[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5498: 113-128.
- [50] Li D L, Esimbek J, Zhou J J, *et al.* KOSMA ¹²CO (2-1) and (3-2) observations toward infrared dark clouds[J]. Astrophysics and Space Science, 2016, 361(7): 220.
- [51] Hu Q. Terahertz quantum cascade lasers and applications [C]//Optical Sensors, Sensors 2012, June 24-28, 2012, Monterey, California, United States. Washington, DC: OSA, 2012: SW3C.1.
- [52] Armstrong C M. The truth about terahertz[J]. IEEE Spectrum, 2012, 49(9): 36-41.