

文章编号: 1672-8785(2024)01-0001-11

## 太周探测: 从 60 年代四大天文发现说起(下)

张永刚<sup>1,2\*</sup> 顾 溢<sup>1,2,3</sup> 马英杰<sup>1,2</sup> 邵秀梅<sup>1,2</sup> 李 雪<sup>1,2,3</sup> 龚海梅<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

3. 无锡中科德芯感知科技有限公司, 江苏 无锡 214135)

**摘 要:** 人类的探索欲望及数千年来的不断积累促成了 20 世纪 60 年代的四大天文发现, 而大气层对天文观测的一些根本性限制促使人们在 20 世纪冲出地球进入太空。在宽广的波段进行天文观测有着极为苛刻的要求, 新猜想和模型的提出也要求进行新的验证, 这些都促进了观测设备及器件的性能趋于极致。本文旨在对此进行简要的回顾分析并列举一些典型实例, 侧重考察其探测波段、主镜或天线的口径、探测仪器及所用器件的类型和性能等, 以便进行纵向和横向的比较, 温故而思新。

**关键词:** 天文观测; 红外; 太赫兹; 毫米波; 射频与微波

中图分类号: TN2 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.01.001

### Teracycle Detection: Starting from the Four Major Astronomical Discoveries in 1960s (II)

ZHANG Yong-Gang<sup>1,2\*</sup>, GU Yi<sup>1,2,3</sup>, MA Ying-Jie<sup>1,2</sup>, SHAO Xiu-Mei<sup>1,2</sup>, LI Xue<sup>1,2,3</sup>, GONG Hai-Mei<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai 200083, China;

3. Wuxi Zhongke Dexin Sensing Technology Co., Ltd., Wuxi 214135, China)

**Abstract:** The explore desires of human being and the accumulations of thousands year causes four major astronomical discoveries in 1960s; whereas some fundamental limitations of our atmosphere on astronomical observation impel us rush out of earth into space. The astronomical observation in such wide of bands arises very critical requirements, new conjectures and models needs new test and verify; all this promote the performance of instruments and devices towards perfection. This article aims to review and analysis the evolution briefly in conjunction with some typical examples, especially their detection bands, diameter of the primary mirror or antenna, types of detection instruments and devices as well as related performances. The purpose is for carry on longitudinal and lateral comparisons easier, and gain new ideas by reviewing old.

**Key words:** astronomical observation; infrared; terahertz; millimeter wave; radio frequency and microwave

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(62175250; 62075229; 62174169; 62104238); 上海市重点科研计划项目(2019SHZDZX01); 上海市优秀学科带头人计划项目(21XD1404200); 上海市国际科技合作项目(20520711200)

作者简介: 张永刚(1957-), 男, 上海人, 研究员, 主要从事化合物半导体光电材料、器件及应用研究。

\*通讯作者: E-mail: zhangyonggang@mail.sitp.ac.cn

### 3 20 世纪的发展：冲出地球

60 年代之后，地面上的天文探索仍在发展，并且延续至今。例如：1963 年，美国国家天文和电离层中心 (NAIC) 在波多黎各一个山岙中建成了球形主反射面直径达 305 m、馈源舱高度为 168 m 的阿雷希博射电望远镜 (AO)。此射电望远镜的噪声温度约为 18 K，角分辨率约为  $10'$ ，一直工作到 2020 年才因事故报废。其在 430 MHz 的频率上执行了脉冲星搜索计划，并观测到一系列脉冲星<sup>[30]</sup>。1975 年，马萨诸塞大学的赫尔斯 (Hulse R A) 和泰勒 (Taylor L A) 利用此射电望远镜首次观测到周期仅为 59 ms 的毫秒脉冲双星<sup>[31]</sup>，由此获得 1993 年的诺贝尔物理学奖<sup>[32]</sup>。其后用此望远镜还观测到系外行星系统等，但受设备设计所限其可观测的只是天空中一窄条区域，效果难免受掣肘。如前所述，大气层的根本性限制使得人类期望能到大气层之外进行天文观察，也即冲出地球，并且拓展到一些更具吸引力的电磁波段。20 世纪中航天技术的发展以及一些“新型”探测器件的出现使其成为可能并初见成效。以下结合几个具体实例做简单介绍。

60 年代地面上在微波波段进行的宇宙背景辐射探测得到的基本结论是其为各项同性均匀分布的。在较低空间分辨率观测条件下，这虽然已可以对大爆炸理论进行初步解释，但从逻辑上讲人们还是预期宇宙背景辐射应该会有一个非均匀的空间分布即各向异性。要证实这一点需要有更精确的观测，特别是在高分辨率及更宽广的波段上。为此，美国国家航空航天局 (NASA) 于 1989 年向近地轨道发射了宇宙背景探测器 (COBE)。宇航中的探测器 (Explorer、Probe、Detector 等) 常指整个航天器或者其上的某种仪器载荷，当然有时也指具体的探测器件。COBE 的目标比较单一明确，旨在从微波到近红外的宽广波段上用多种仪器对宇宙背景进行大范围的扫描观测，以期测得其空间分布。

COBE 携带的探测仪器主要有三种，具体包括：(1) 工作于 31 GHz、53 GHz 和 90 GHz 三个微波频率的差分微波辐射计 (DMR)<sup>[33-35]</sup>，其采用小型号角天线和冷却到 140 K 的混频前置放大器进行全天空扫描差分探测，并用获得的数据进行成像，以期展示 CMBR 的非均匀分布。

(2) 工作于近红外到远红外波段的漫射红外背景实验装置 (DIRBE)<sup>[36]</sup>，其作用是观测宇宙的红外背景 (CIRB) 而非微波背景 (CMB)，这在地球上难以进行的。此装置采用主反射镜直径为 19 cm 的反射式望远镜光路，光度计在  $1.25 \sim 240 \mu\text{m}$  波长范围内被分成 10 个波段，形成 3 组，采用了多种类型的光电探测器来适应各个波段。其短波一侧的近红外波段使用了 4 个光伏型 InSb 探测器 (与窗片和滤光片组合后中心波长分别优化到  $1.25 \mu\text{m}$ 、 $2.2 \mu\text{m}$ 、 $3.9 \mu\text{m}$  和  $4.9 \mu\text{m}$ )，利用半导体的带间吸收并由 pn 结产生光伏效应，其长波截止波长约为  $5 \mu\text{m}$  (已进入中红外波段)；在中间部分使用了杂质带电导 (Impurity Band Conduction, IBC) 探测器，其利用半导体的浅杂质带吸收来产生光电导，历史要更“悠久”。

COBE 使用的 IBC 器件有两种，分别为 2 个硅掺镓 (Si:Ga,  $12 \& 25 \mu\text{m}$ ) 和 2 个锗掺镓 (Ge:Ga,  $60 \& 100 \mu\text{m}$ )。其中 Si:Ga 还采用阻挡杂质带 (Blocked Impurity Band, BIB) 结构来提高器件性能。BIB 结构是通过插入一个低掺杂或者异质超薄层来抑制热激发载流子产生的暗电流。由于这一层很薄，所以光电流仍可以由隧道效应通过，基本不受影响。以上两类都是光子型探测器，具有确定的长波截止波长和相应的最佳探测波段。与光伏探测器的长波截止波长由材料的禁带宽度决定不同，杂质光电导探测器由杂质能级的深度决定长波截止波长。由于所用 n 型杂质的能级一般较浅 (接近导带)，可远低于禁带宽度，因此会有更长的截止波长。简而言之，例如半导体硅之类的禁带宽度在 1 eV 量级，对应的带间长波截止波

长在  $1\ \mu\text{m}$  量级; 对于 IBC 探测器, 杂质带的长波截止波长要达到  $100\ \mu\text{m}$  (已进入 THz 波段), 就要求浅杂质能级不大于  $12.4\ \text{meV}$ 。而且, 此类杂质带光电导 IBC 器件使用时必然需要较低的工作温度。室温  $300\ \text{K}$  下电子的热激活能约为  $26\ \text{meV}$  且按概率分布, 这样要探测能量为  $12.4\ \text{meV}$  的光子(电子的热激发能按其十分之一计), 工作温度就需低于  $14.3\ \text{K}$ 。

对于更长的波长, IBC 也无法工作了, 因此 CODE 的 DIRBE 采用了测辐射热计(Bolometer)。众所周知, 温差会引起电阻变化, 两种不同材料接触后在温差下也会产生热电势即形成热电偶。而 Bolometer 是一种通过微细加工工艺形成的热敏电阻或热偶堆, 可将吸收光能量后产生的热量转换为电信号, 本质上是一种热探测器。Bolometer 能探测的光与其波长无关而只取决于吸收的总能量, 但可对结构进行优化使之适合特定波段, 并可制成阵列器件。DIRBE 采用了 2 个金刚石上硅 Bolometer, 通过不同结构结合窗片和滤光优化到中心波长分别为  $140\ \mu\text{m}$  和  $240\ \mu\text{m}$ 。由于温度不在  $0\ \text{K}$  的物体都能产生电磁辐射, 而原理上热探测器对任何波长的电磁辐射均有响应, 因此 Bolometer 探测器需要有极低的工作温度才能有效探测弱信号, 其他除目标外所有 Bolometer 能“看到”的部件也都需冷却到足够低的温度。

对于天文观测探测器, 工作温度在  $4.2\ \text{K}$  液氮温度也常显过高。为此, COBE 发射时携带了装有  $650\ \text{L}$  超流液氮(即氦 3 同位素, 其液化温度为  $0.1\ \text{K}$ )的杜瓦, 作为几种探测器(包括 Bolometer、IBC 以及长波 InSb 等)工作时的冷却剂, 将其工作温度在  $1.8\ \text{K}$  以下维持 6 个月。因此, COBE 上使用这几种长波探测器的仪器实际也只工作了约 6 个月, 恰好保证其完成基本的探测计划, 而其他无需如此低工作温度的仪器如 DMR 和 DIRBE 中的短波单元则工作了 3 年以上。携带超流液氮做冷却剂虽然时间有限但便于估计, 也避免了可能的电磁

和机械干扰并简化了系统, 其时不失为一种优化方案。

(3) 远红外绝对光谱仪(FIRAS)是 COBE 携带的另一件仪器<sup>[37]</sup>, 其目的是进行全天空扫描。它采用号角天线获得约  $7^\circ$  视场角, 并用迈克耳逊干涉仪以及工作温度约为  $1.5\ \text{K}$  的 Bolometer 探测器进行差分测量来提高相对精度。测量分为  $0.1\sim 0.5\ \text{mm}$  和  $0.5\sim 10\ \text{mm}$  两段。FIRAS 直接测量出宇宙背景辐射  $0.1\sim 10\ \text{mm}$  的远红外和毫米波光谱及其全天空分布, 同时测量了星际分子(如 C、N 和 CO 等)的发射光谱并进行了空间成像<sup>[38]</sup>。通过对 FIRAS 观测数据的详细解读和标定<sup>[39-40]</sup>, 其时 CBR 的温度已被确定为  $2.725\pm 0.002\ \text{K}$ 。

COBE 三件仪器的扫描观测面避开太阳和地球方向, 由太阳地球遮挡板遮挡并屏蔽电磁干扰。COBE 在大气层外约  $900\ \text{km}$  的圆形太阳同步轨道上进行的宽频谱(约 4 个量级)范围的观测取得了满意的效果, 从微波和红外两个大的方面了解到宇宙背景辐射确是呈非均匀分布的, 即具有各向异性, 其在空间上相对波动的量级约为  $1\%$  ( $3\ \text{K}$  背景温度下约  $30\ \text{mK}$  的波动), 这在地球上是无法进行的。用其获得的数据进行的全天空成像展示十分形象。这样的结果在逻辑上应该更符合人类对大爆炸的理解, 马瑟(Mather J C)和斯穆特(Smoot G F)因此获得 2006 年诺贝尔物理学奖。

与 COBE 相对应, 其后欧洲空间局(ESA)也在 1995 年发射了红外空间天文台(ISO)<sup>[41]</sup>。ISO 载荷的波段和功能甚至所用器件与 COBE 颇有相似之处, 其采用  $60\ \text{cm}$  主镜的红外相机使用了 InSb 及 IBC 两种  $32\times 32$  面阵器件, 覆盖  $2.5\sim 17\ \mu\text{m}$  波段; 短波光栅型光谱仪采用 4 个 InSb 和 16 个 IBC 器件, 覆盖  $2.4\sim 45\ \mu\text{m}$  波长范围; 长波干涉型光谱仪采用 10 个 IBC 器件, 覆盖  $43\sim 197\ \mu\text{m}$  波长范围, 其中对部分 IBC 器件通过施加应力来延伸其探测波长; 偏振仪也采用 IBC 器件, 覆盖  $2.5\sim 240\ \mu\text{m}$  范围。

表 1 60 年代四大天文发现及其在 20 世纪中的发展例

发现	宇宙微波背景 辐射 CMBR	脉冲星 Plusar	类星体 Quasar	星际有机分子 Interstellar OM.
60 年代发现例	时间/文献 1965 年/[1]	1968 年/[12]	1963 年/[13-16]	1969 年/[26]
机构/位置	Bell Lab./地面	Cambridge/地面	Caltec/地面	NRAO UVa/地面
探测设备	6 m 号角反射天线, 红宝石行波脉泽放大器, 液氮标定源	447 m 干涉天线阵, 无线接收机(带宽 1 MHz 左右)	双 27 m 射电干涉天线, 5 m 光学望远镜, 照相摄谱仪	43 m 主反射射电天线, 致冷参放, 400 通道相关接收器
探测波段	4080 Mc/s	81.5 MHz	RF, NUV-VIS	4830 MHz
主要结果	噪声温度偏高 $3.5 \pm 1$ K, 各向同性非极化, 与季节无关	高稳定( $\delta < 10^{-7}$ )周期 (1.377 s) 射电脉冲, 脉宽 0.3 s 左右	极遥远高亮物体, 大红移光谱, 行星状星云等	银河系中心区甲醛吸收谱等
天文关联	宇宙微波背景 辐射**	脉冲星*	类星体	星际有机分子
项目	宇宙背景 探测器 COBE	阿雷希博天文台 Arecibo Observe.	哈勃空间 望远镜 HST	红外空间 天文台 ISO
20 世纪发展例	时间/文献 1989 年发射/[33-40] 1993 年退役	1975 年/[30] 1963-2020	1990 年发射/[43-44] 仍在服役	1995 年发射/[41-42] 1998 年退役
机构/位置	NASA/近地轨道	NAIC/地面	NASA/近地轨道	ESA/椭圆轨道
探测设备	DMR 31/53/90 GHz 140 K 混频前放, DIRBE 1.25~240 $\mu\text{m}$ InSb, IBC (Si:Ga, Ge:Ga), FIRAS 0.1 ~10 mm, 1.5 K Bo- lometer, 650 L 超流 液氮	305 m 球面反射射电 天线, 低温接收机 (噪声温度 18 K), 馈源舱高 168 m, 并 配备射频发射机可 发射信号或构成雷 达	2.4 m 反射主镜, 多 组探测器 (UV-VIS: Si-CCD; NIR: 1k $\times$ 1k H1GR MCT-FPA) 构成诸多成像和摄谱 仪器, 多次在轨升级 维护及替换仪器	60 cm 主镜, 相机 (2.5~17 $\mu\text{m}$ , 32 $\times$ 32, InSb/IBC)、短波 (2.4~45 $\mu\text{m}$ , InSb/ IBC)和长波(45~197 $\mu\text{m}$ , IBC)光谱仪、偏 振仪(2.5~240 $\mu\text{m}$ , IBC)
探测波段	MMW-NIR	430 MHz	UV-VIS-NIR	NIR-FIR
主要结果	在不同波段上测得相 符 CBR 空间分布	毫秒脉冲双星, 系 外行星(1991)等	类星体, 系外行星 等, 约 2 万篇论文	太阳系及猎户星云 水汽、尘埃等
天文关联	CBR 各向 异性****	引力辐射, 中子星质量等***	原始星系, 黑洞等	恒星形成等

注: 诺贝尔物理学奖 (\* 1974 年, \*\* 1978 年, \*\*\* 1993 年, \*\*\*\* 2006 年)。

IBC 器件也是由其发射时携带的超流液氮制冷, 工作时间约为半年, 其他器件的工作时间约为 3 年。由于发射时 COBE 已在 CBR 方面完成了很多工作, ISO 的任务更侧重于研究恒星形成等方面, 如观测太阳系及猎户星云中的水汽、尘埃等等。日本 1995 年也发射了类似的空间红外望远镜 (IRTS), 携带液氮制冷, 进行了约一个月的天文观测<sup>[42]</sup>。

20 世纪空间天文观测中最著名的无疑是 NASA 于 1990 年发射并工作至今的哈勃空间望远镜 (HST), 其主要功能是在可见光和近

红外波段对各种星体等进行高清成像及摄谱, 至今仍常有靛照公布<sup>[43-44]</sup>。HST 是由发现号航天飞机发射的, 工作于高度约为 570 km 的近地轨道, 采用直径为 2.4 m 的反射主镜。由于轨道较低, 发射后还多次由航天飞机载人对其进行仪器替换、维护及升级等, 使其延年益寿。HST 在可见光波段使用 Si-CCD 器件, 在近红外波段使用 1k  $\times$  1k 规模的碲镉汞焦平面器件 (H1GR MCI-FPA), 这是其能进行近红外高清成像的关键。这种器件在其他航天项目中也得到了不少应用, 典型如碳

排放监测卫星(OCO)等, 可谓物尽其用。三十年来, HST 在原始星系、黑洞、系外行星等天文研究方面发挥了重要作用。据统计, 已发表的相关学术论文约达 2 万篇。NASA 发射的天文观测设备常以美国天文学家及 NASA 科学家和官员的名字命名, 而 ESA 则以欧洲著名科学家和先贤的名字命名。

经 20 世纪的发展, 已发射的用于宇宙探索的航天器早已过百, 直接与天文观测相关的也有数十, 人类终于冲出了地球。打破了地球和大气层的基本限制后, 天文观测终于深入了宽广的红外包括 THz 波段, 实现了太周探测。有了明确的需求, 相关的器件技术也就应运而生并发展起来。表 1 简要汇总了前述 20 世纪发展的一些典型实例。60 年代的四大天文发现也列在其中, 便于进行纵向和横向的比较。在器件方面, 微波波段以混频接收为主; 可见光(包括近紫外和近红外短波端)波段有成熟的 Si-CCD 器件可以选用; 近红外(包括中红外短波端)InSb 和 MCT 器件也已较成熟; 中红外长波端至远红外近端杂质电导 IBC 器件可发挥作用; 在更长的波长上直至与毫米波衔接(包括所谓 THz 波段)则需仰仗 Bolometer 热探测器。对于天文观测, IBC 和 Bolometer 类器件通常需要在 2 K 甚至更低的深制冷温度下工作, 采用发射时携带超流液氮的制冷方式, 在工作时间上受到一定限制。考虑到对于大多天文观测目标其等效温度也相应较低, 这样就需要探测器的工作温度乃至观测仪器的“外壳”温度相应降低, 配套的读出电路乃至后续放大处理电路等也常需在极低的温度下能够正常工作。这都是天文观测的自然要求, 也是其难点所在。

#### 4 21 世纪的发展: 走向极致

进入 21 世纪, 鉴于天文观测的本质特点, 其总体趋势将是走向极致。也就是说, 在 20 世纪航天技术和探测仪器及器件发展的基础上, 从深度和广度两方面进行扩展, 同时解决

存在的技术问题, 用性能和功能趋于极致的仪器和器件使观测水平也不断走向极致。以下列举几个典型实例加以说明。NASA 于 2003 年发射了斯皮策空间望远镜(SST)<sup>[45]</sup>。它运行在近地日心轨道, 并加遮光罩使观测仪器避免太阳直射以减小其影响和降低整体温度, 可说是一个整体进行辐射制冷的望远镜。SST 采用的 0.85 m 口径金属铍制反射主镜已冷却到 5.5 K, 携带了相机(256×256)、摄谱仪和光度计等, 继续在中远红外(含 THz)波段上进行类星体和螺旋星云等的观测, 并与 HST 进行多波段协同观测等。SST 首次观测到系外行星, 并测出了宇宙膨胀速度。其深制冷的器件仍采用发射时携带的 360 L 超流液氮制冷。但由于降低了整体温度、减小了消耗, SST 深制冷仪器的工作时间达到了 5 年半, 其后温度较高的两个波段(3.6 μm 和 4.5 μm)一直工作到 2020 年。

与此同时, 地面上的各种射电天文观测也仍在继续进行, 主要通过增加射电天线口径、采用天线阵进行孔径合成以及改进接收机等提高观测水平。中国在此方面也开展了有效的工作, 并取得了良好的观测结果。例如, 2012 年启用的上海佘山天马射电望远镜(TRT)采用了 65 m 主反射天线以及覆盖 1~50 GHz 频段的 8 波段低温接收机, 观测到了长碳链分子、羟基/甲醇脉泽和毫秒脉冲星等, 在星际分子和脉冲星等研究方面发挥了作用, 同时还用于航天测控等<sup>[46]</sup>。2016 年运行的 500 m 口径球面射电望远镜(FAST, 也称天眼射电望远镜)建于贵州一大山岙上, 是目前最大口径的射电望远镜。FAST 具有主动变形反射面, 馈源舱高 140 m, 移动范围为 206 m, 采用覆盖 70~3000 MHz 频段的低温接收机, 噪声温度约为 20 K。该望远镜已观测到毫秒脉冲星、短周期脉冲双星等多种类型的上千颗脉冲星, 以及弥散氢原子气体、射电暴和纳赫兹引力波等, 成果不断, 可望在人类将地球上的射电天文观测环境破坏殆尽之前继续发挥重要作用<sup>[47]</sup>。

对于空间天文观测, 避开太阳的影响是首

要的。但近地轨道上的一些限制主要是地球辐射和通讯电磁干扰,而且月球的作用也是需要考虑的。这使得人们向往更高的轨道,日地连线上地球外侧约 150 万公里处的日地第二拉格朗日点 L2 正是人们所青睐的。一方面, L2 是地日连线上的引力亚稳点(或称鞍点),定位于此处的航天器在轨道维持和稳定方面会较方便,燃料消耗小,易于长时间驻留;另一方面,此处轨道足够高,避免了地球和月球的干扰,热环境也会更稳定。实际在此处进行观测的航天器是围绕 L2 点旋转的,使之能避开地球的阴影区让太阳能帆板能够接收阳光。这样,运行于 L2 轨道上的天文观测设备需采用向“上面或侧面”的观测方式,并在“向下”方向上采用遮阳伞(即太阳地球遮挡结构)将日地对观测的影响降到最低。同时,遮阳伞还显著减小了太阳的辐射升温作用。这样设备整体也可由辐射制冷作用保持在较低的温度,显著改善了可用观测时间。当然,如此高的轨道高度使得人们几乎无法像哈勃或依附于空间站的望远镜那样对其进行维护升级,因此要求有更高的稳定性和可靠性设计。

进入 21 世纪以来,人们已先后不断地向 L2 发射了多种用于天文观测的探测器。例如, NASA 在 2001 年发射了威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)<sup>[48]</sup>,继续了 COBE 的工作,在更高的 L2 轨道上进行宇宙微波背景更精细的各向异性全天球扫描探测成像。WMAP 采用 1.4 m×1.6 m 微波反射天线,覆盖了 22~90 GHz 的微波波段进行差分探测。这时已使用了 InP 基 HEMT 放大器件,采用无源制冷方式冷却至约 80 K,两年完成了 4 次全天球扫描,其对宇宙背景温度的探测分辨率为 0.2 mK,达到了比 COBE 更好的效果。WMAP 在 L2 轨道上运行了近十年,2010 年退役后受控脱离,腾出宝贵的日地 L2 轨道资源。其后,2009 年 ESA 用一枚阿丽亚娜 5 型火箭向 L2 轨道同时发射了两个探测装置,即普朗克巡天者(Plank Skywalker)和赫歇尔空间天文台(Her-

schel SAO)<sup>[49-50]</sup>。两者的载荷及其功能各有侧重也有重叠,与 WMAP 和 SST 有颇多相似之处。Plank 仍以 CMB 探测为主,采用 1.5 m 反射主天线以及低频(27~77 GHz) HEMT 接收机 LFI 和 高频(84~1000 GHz) Bolometer 接收机 HFI,通过携带的超流液氦制冷至 0.1 K,也获得了宽视野 CMB 分布,并进行暗物质、暗能量和宇宙年龄研究;Herschel 以光谱探测和成像为主,采用温度为 2 K 的 3.5 m 反射主镜,其超导混频探测器、IBC 阵列和 Bolometer 分别覆盖 83~1000 GHz、26~77 μm 和 55~672 μm 范围,通过携带的超流液氦制冷至 0.1 K,在星际气体和超高速分子喷流、暗物质和暗能量研究以及宽视野 CMB 成像等方面发挥了作用。这两个探测装置均工作了 3 年左右,在超流液氦耗尽后于 2013 年退役,并受控脱离 L2 轨道。2011 年,中国嫦娥二号也曾由环月轨道出发到达 L2 点,并稳定运行约 10 个月,然后又飞入深空进行小行星探测等。

NASA 于 2021 年发射的詹姆斯·韦伯空间望远镜(JWST)无疑是当今 L2 轨道上的明星<sup>[51]</sup>。JWST 的主要功能仍是红外高清成像及摄谱,原计划 2007 年发射,其间历经十余次延期改进,投资追加至上百亿美元。至 2021 年底成功发射,前后经历了四分之一世纪,终成正果。JWST 的主要设备是近红外相机(NIRCam)、中红外相机(MIRI)和近红外摄谱仪(NIRSpec)等。近红外波段的探测器件在 HST 的基础上升级到 2k×2k 规模(即 H2GR MCT-FPA),分 0.6~2.5 μm 和 0.6~5 μm 两种,共使用了 15 个,辐射致冷至 40 K 以下,其单个器件的光敏面尺幅达到了 36×36 mm<sup>2</sup>。中红外波段的探测器件为 2 个 1k×1k 的 Si:As IBC 器件,使用氦循环制冷机致冷至 6 K。JWST 不进行远红外探测,避免了携带超流液氦的消耗寿命问题。这些设备都仰仗 JWST 发射后展开的“直径”为 6.5 m、曲率半径约为 3 m 的凹面光学主反射镜工作。该主反射镜由 18 面对边距离为 1.3 m 的正六边形凹面镀金

表 2 21 世纪发展例

项目	威尔金森微波各向异性探测器 WMAP	天马射电望远镜 TRT	斯皮策空间望远镜 SST	赫歇尔空间天文台 Herschel
时间/文献	2001 年发射/[48] 2010 年退役	2008 年立项/[46] 2012 年启用	2003 年发射/[45] 2020 年退役	2009 年发射/[50] 2013 年退役
机构/位置	NASA/L2	中国/地面	NASA/日心轨道	ESA/L2
21 世纪发展例 探测设备	1.4 m×1.6 m 反射天线, InP HEMT 差分放大微波辐射计, 无源制冷至 80 K, 探测温差 $\delta T$ 约为 0.2 mK	65 m 主反射天线, 8 波段低温接收机, 另参与 VLBI 测量以及承担航天测控任务	0.85 m 主镜(5.5 K), 3~8 $\mu\text{m}$ 相机, 5~40 $\mu\text{m}$ 摄谱仪, 28~160 $\mu\text{m}$ 光度计, 360 L $^3\text{He}$ 制冷	3.5 m 反射主镜(2 K), SIS 混频器, IBC 阵列, Bolometer, $^3\text{He}$ 制冷至 0.1 K
探测波段	22~90 GHz	1~50 GHz	3~160 $\mu\text{m}$	0.083~1 THz, 26~77 $\mu\text{m}$ , 55~672 $\mu\text{m}$
主要结果	宽视野 CMB 分布、暗物质暗能量/宇宙年龄等	长碳链分子, 羟基/甲醇脉泽, 毫秒脉冲星等	最小类星体、螺旋星云照片, 1st 系外行星, 宇宙膨胀速度 74 km/s	宽视野 CMB 分布、暗物质暗能量等/星际气体、超高速分子喷流等
天文关联	CMB 各向异性、暗物质、暗能量等	星际分子, 脉冲星等	类星体、系外行星、宇宙膨胀	星际物质、CMB 各向异性等
项目	普朗克巡天 Planck	天眼射电望远镜 FAST	韦伯空间望远镜 JWST	欧几里德航天器 Euclid
时间/文献	2009 年发射/[49] 2013 年退役	2011 年动工/[47] 2016 年运行	2021 年发射/[51-52] 2022 年运行	2023 年发射/[53] 飞行中
机构/位置	ESA/L2	中国/地面	NASA/L2	ESA/L2
21 世纪发展例 探测设备	1.5 m 反射主天线, 低频(27~77 GHz) HEMT 接收机 LFI, 高频(84~1000 GHz) Bolometer 接收机 HFI, $^3\text{He}$ 制冷至 0.1 K	500 m 主反射天线, 馈源舱高 140 m, 移动范围 206 m, 多通道低温接收机(噪声温度 20 K)	6.5 m 反射主镜(42 K), 辐射制冷 NIR 相机及摄谱仪(<40 K)(15 个 2k MCT-FPA), MIR 相机(6 K), 氦循环制冷	1.2 m 反射主镜, 可见光相机 VISIC(36 个 4k CCD), 近红外光谱仪和光度计 NISP(16 个 2k×2k MCT-FPA)
探测波段	MMW-FIR 0.3 mm~1 cm	RF-MW 70~3000 MHz	NIR 0.6~2.5 $\mu\text{m}$ / 0.6~5 $\mu\text{m}$ , MIR 5~28 $\mu\text{m}$	0.36~1.1 $\mu\text{m}$ 0.6~5 $\mu\text{m}$
主要结果	宽视野 CMBR 分布、约 $10^{-6}$ K 温度精度, 数千天体数据, 暗物质暗能量等	毫秒脉冲星、弥散氢原子气体, 纳赫兹引力波, 短周期脉冲双星等	遥远星系高分辨照片, 星际分子光谱( $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2/\text{CH}_4\cdots$ )等	预期: 与 JWST 类似
天文关联	CMB 各向异性、初始宇宙, 星际物质	脉冲星, 星际分子, 射电暴, 引力波等	星系、星体详情, 宇宙起源等	暗物质/暗能量

反射镜拼接而成，主镜也呈六边形状，直径已达 HST 的 2 倍以上，受光面积超过 5 倍，因此性能上有显著提高。为减轻重量，这些子镜都是由铍金属制成的，厚度约为 5 cm。为减重挖空成蛋架型结构，实际镜片厚度约为 1 mm。每面子镜既可受控进行较大范围的调整，又可作纳米尺度的微小位移，以便校准光路。金属铍是元素周期表中的第 4 号元素，比重很小，又有很高的刚性和足够的强度，且可耐极低温不易形变。即使如此，JWST 的总重量也达 6.2 吨，但仅约是使用单块玻璃结构镀金反射镜的哈勃望远镜的一半。JWST 运行后不断取得令人印象深刻的结果，其高灵敏度和高分辨率极大地扩展了人类的视野<sup>[52]</sup>。

2023 年，ESA 也向 L2 发射了与 JWST 类似的欧几里德(Euclid)航天器。目前 Euclid 仍在飞行途中，配置和功能与 JWST 颇为相似。其反射主镜口径为 1.2 m，采用了与 JWST 相同的 16 个 2k×2k 规模 H2GR MCT-FPA 探测器；与 JWST 相比，它还加入了可见光相机(VISC)，计划主要开展暗物质暗能量研究。表 2 中简要汇总了前述 21 世纪前期发展的一些典型实例。其后 NASA 还计划于 2027 年发射罗曼空间望远镜(RST)。RST 的主镜口径为 2.4 m，升级使用规模达 4k×4k 的 18 个 MCT-FPA 探测器，计划与 Euclid 在日地 L2 轨道上组队运行。

中国也已在空间开展了天文观测。例如，2017 年发射了硬 X 射线调制望远镜(HXMT)“慧眼”<sup>[54]</sup>，将天文观测向高能 X 射线方向延伸，并进行大视场的 X 射线巡天探测，开展黑洞、中子星等高能天体的短时标光变和宽波段能谱研究，同时也具有高灵敏度的伽马射线暴全天监视功能，已取得一批成果。其高能区用 NaI/CsI 闪烁晶体结合光电倍增管(PMT)探测，中能区用 Si-PIN 探测器，低能区用一种特殊的 CCD 器件也即扫式电荷器件(Swept Charge Device, SCD)，实现了宽波

段(1~250 keV)覆盖。高能端比 NASA 1999 年由哥伦比亚号航天飞机发射的钱德拉 X 射线天文台(CXO)<sup>[55]</sup>有显著提高。中国空间站工程巡天望远镜(CSST)也计划于 2024 年发射<sup>[56]</sup>，其主要特点是既可与天宫空间站对接，方便在轨安装维护升级，又可与其分开，共轨远离独立运行以避免干扰等。采用口径为 2 m 的主镜，将主要进行基于 Si 大规模面阵器件的可见光波段(含近紫外和近红外短波段)天文巡天观测。巡天模块安置了 30 个器件，总像素达到 25 亿，具有大视场和高像质特点；此外还加入了基于深低温超导 SIS 隧道混频器的 THz 高灵敏探测模块，采用氦循环制冷机冷却到 10 K 以下，具有 0.41~0.51 THz 的探测频率范围，可望在星际物质探测方面发挥作用。表 2 中列出了前述 21 世纪一些发展的实例以资比较。

## 5 结束语

近代天文观测从 60 年代的四大发现到后来的冲出地球和走向极致，体现了人类无尽的探索欲望。在从射频到紫外乃至 X 射线的宽广频谱范围内，人们已采用多种技术来满足苛刻的天文观测要求，包括从无线和红外两个方面向太赫兹间隙逼近直至将其完全填充。新的技术不断取代旧的技术，例如早期用于微波接收的脉泽和参量放大等已被 InP 基 HEMT 器件等取代；然而，旧的甚至“古老”的技术也还在继续使用并不断迭代，在性能和规模上不断走向极致，例如红外波段的 InSb 和 MCT 器件，以及从红外延伸到 THz 波段的 IBC 和 Bolometer 器件等；此外也时有新型器件加入，如超导混频器以及可具有极宽响应波长范围和极高灵敏度的超导相变光电探测器等。IBC、Bolometer 和超导相变器件本身都可具有高性能或者说高量子效率，但都需要极低的工作温度，有些需要 2 K 以下甚至更低，而天文观测本身也不得不使仪器乃至航天器本体也保持在足够低的对应温度，因此采用这样的器件是匹配的；然而，电子学器件及其系统为避免载流



子冻结则不能有过低的工作温度; 系统中电子和光电二类器件需要综合考虑兼顾。目前, 地面上单个射电望远镜的主反射天线口径已达 500 m (FAST), 空间红外望远镜的主反射镜口径已达 6.5 m (JWST), 功能也越来越趋于专门化。天文观测一甲子的发展丰富多彩可圈可点, 也需要各抱地势勾心斗角, 回顾过往了解一些“常识”并进行纵向和横向的比较, 将有利于开展新的探索。

### 参考文献

- [1] Penzias A A, Wilson R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s [J]. *The Astrophysical Journal*, 1965, **142**(1): 419–420.
- [2] Dicke R H, Peebles P J E, Roll P G, et al. Cosmic black-body radiation [J]. *The Astrophysical Journal*, 1965, **142**(1): 414–419.
- [3] Tabor W J, Sabilia J T. Masers for the Telstar satellite communications [J]. *Bell System Technical Journal*, 1963, **42**: 1863–1886.
- [4] Penzias A A. Helium-cooled reference noise source in a 4-kMc waveguide [J]. *Rev Sci Instrum*, 1965, **36**(1): 68–70.
- [5] Roll P G, Wilkinson D T. Cosmic background radiation at 3.2 cm—support for cosmic black-body radiation [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **16**(10): 405–407.
- [6] Howell T F, Shakeshaft J R. Measurement of the minimum cosmic background radiation at 20.7 cm wavelength [J]. *Nature*, 1966, **210**: 1318–1319.
- [7] Penzias A A, Wilson R W. A measurement of the background temperature at 1415 MHz [J]. *Astronomical Journal*, 1967, **72**: 315.
- [8] Welch W J, Keachie S, Thornton D D, et al. Measurement of the cosmic microwave background temperature at 1.5-cm wavelength [J]. *Physical Review Letters*, 1967, **18**(24): 1068–1070.
- [9] Field G B, Hitchcock J L. Cosmic black-body radiation at  $\lambda=2.6$  mm [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **16**(18): 817–818.
- [10] Thaddeus P, Clauser J F. Cosmic microwave radiation at  $\lambda=2.63$  mm from observation of interstellar CN [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **16**(18): 819–822.
- [11] Wilson R W. The cosmic microwave background radiation [J]. *Science*, 1979, **205**: 866–874.
- [12] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapid pulsating radio source [J]. *Nature*, 1968, **217**: 709–713.
- [13] Greenstein J L, Matthews T A. Red-shift of the unusual radio source: 3C 48 [J]. *Nature*, 1963, **197**: 1041–1042.
- [14] Schmidt M. 3C 273: A star-like object with large red-shift [J]. *Nature*, 1963, **197**: 1040.
- [15] Hazard C, Mackey M B, Shimmins A J. Investigation of the radio source 3C 273 by the method of lunar occultations [J]. *Nature*, 1963, **197**: 1037–1039.
- [16] Oke J B. Absolute energy distribution in the optical spectrum of 3C 273 [J]. *Nature*, 1963, **197**: 1040–1041.
- [17] Matthews T A, Sandage A R. Optical identification of 3C 48, 3C 196 and 3C 286 with stellar objects [J]. *The Astrophysical Journal*, 1963, **138**: 30–56.
- [18] Greenstein J L, Schmidt M. The quasi-stellar radio source 3C 48 and 3C 273 [J]. *The Astrophysical Journal*, 1964, **140**(1): 1–35.
- [19] Kafka P. How to count Quasars [J]. *Nature*, 1967, **213**: 346–350.
- [20] Swings P, Rosenfeld L. Considerations regarding interstellar molecules [J]. *The Astrophysical Journal*, 1937, **86**: 483–486.
- [21] McKellar A. Evidence for the molecular origin of some hitherto unidentified interstellar lines [J]. *PASP*, 1940, **52**: 187–192.

- [22] Douglas A E, Herzberg G.  $\text{CH}^+$  in interstellar space and in the laboratory [J]. *The Astrophysical Journal*, 1941, **94**: 381D.
- [23] Cheung A C, Rank D M, Townes C H. Detection of the  $\text{NH}_3$  molecules in the interstellar medium by their microwave emission [J]. *Physical Review Letters*, 1968, **21**(25): 1701–1705.
- [24] Cheung A C, Rank D M, Townes C H, et al. Further microwave emission lines and clouds of ammonia in our Galaxy [J]. *Nature*, 1969, **221**: 917–919.
- [25] Cheung A C, Rank D M, Townes C H. Detection of water in interstellar region by its microwave radiation [J]. *Nature*, 1969, **221**: 626–628.
- [26] Snyder L E, David Buhl D, Zuckerman B, et al. Microwave detection of interstellar formaldehyde [J]. *Physical Review Letters*, 1969, **22**(13): 679–681.
- [27] Gordon I E, Rothman L S, Hargreaves R J, et al. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2022, **277**: 107949.
- [28] 张永刚, 顾溢, 马英杰. 半导体光谱测试方法与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [29] 龚海梅, 李雪, 张永刚. 钢镱砷光电探测器及其焦平面阵列 [M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [30] Hulse R A, Taylor J H. A high-sensitivity pulsar survey [J]. *The Astrophysical Journal*, 1974, **191**: 59–61.
- [31] Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system [J]. *The Astrophysical Journal*, 1975, **195**: 51–53.
- [32] Damour T. 1974: the discovery of the first binary pulsar [J]. *Class Quantum Grav*, 2015, **32**: 124009.
- [33] Smoot G F, Bennett C L, Weber R, et al. COBE differential microwave radiometers: instrument design and implementation [J]. *The Astrophysical Journal*, 1990, **360**: 685–695.
- [34] Smoot G F, Bennett C L, Kought A, et al. Structure in the COBE differential microwave radiometers first-year maps [J]. *The Astrophysical Journal*, 1992, **396**: 1–5.
- [35] Banday A J, Górski K M, Bennett C L, et al. Noncosmological signal contributions to the COBE DMR 4 year sky maps [J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, **468**: 85–89.
- [36] Hauser M G, Arendt R G, Kelsall T, et al. The COBE diffuse infrared background experiment search for the cosmic infrared background I. Limits and detection [J]. *The Astrophysical Journal*, 1998, **508**: 25–43.
- [37] Mather J C, Cheng E S, Cottingham D A, et al. Measurement of the cosmic microwave background spectrum by the COBE FIRAS instrument [J]. *The Astrophysical Journal*, 1994, **420**: 439–444.
- [38] Wright E L, Mather J C, Bennett C L, et al. Preliminary spectral observations of the galaxy with a  $7^\circ$  beam by the cosmic background explorer (COBE) [J]. *The Astrophysical Journal*, 1991, **381**: 200–209.
- [39] Fixsen D J, Cheng E S, Gales J M, et al. The cosmic microwave background spectrum from the full COBE FIRAS data set [J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, **473**: 576–587.
- [40] Mather J C, Fixsen D J, Shafe R A, et al. Calibration design for the COBE far infrared absolute spectrophotometer (FIRAS) [J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, **512**: 511–520.
- [41] Kessler M F. The infrared space observatory (ISO) mission [J]. *Adv Space Res*, 2002, **30**(9): 1957–1965.
- [42] Murakami H, Freund M F, Gangak K, et al. The IRTS (Infrared Telescope in Space) mission [J]. *Publ Astron Soc Japan*, 1996, **48**: 41–46.

- [43] Williams R. Hubble telescope 30 years in orbit: personal reflections [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, **20**(4): 44.
- [44] NASA. Hubble Space Telescope [EB/OL]. [www.nasa.gov/mission\\_pages/hubble/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/hubble/main/index.html), 2023.
- [45] NASA. Spitzer Space Telescope [EB/OL]. [www.nasa.gov/mission\\_pages/spitzer/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/main/index.html), 2023.
- [46] 中国科学院上海天文台. 上海天马望远镜 [EB/OL]. <http://65m.shao.cas.cn>, 2023.
- [47] 中国科学院. 500 米口径球面射电望远镜工程 [EB/OL]. [www.cas.cn/zt/kjzt/fast](http://www.cas.cn/zt/kjzt/fast), 2023.
- [48] NASA. WMAP Mission [EB/OL]. <https://wmap.gsfc.nasa.gov/mission>, 2023.
- [49] ESA. Planck Mission [EB/OL]. <https://sci.esa.int/web/planck>, 2023.
- [50] ESA. Herschel Mission [EB/OL]. <https://sci.esa.int/web/herschel>, 2023.
- [51] NASA. James Webb Space Telescope [EB/OL]. [www.nasa.gov/mission\\_pages/webb/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/webb/main/index.html), 2023.
- [52] NASA. 韦伯近照 [EB/OL]. <https://blog.sciencenet.cn/home.php?mod=space&uid=68158&do=blog&id=1357608>, 2023.
- [53] ESA. Euclid Mission [EB/OL]. <https://sci.esa.int/web/euclid>, 2023.
- [54] 中国科学院. 硬 X 射线调制望远镜 [EB/OL]. <http://hxmtweb.ihep.ac.cn>, 2023.
- [55] NASA. Chandra X-ray Observatory [EB/OL]. [www.nasa.gov/mission\\_pages/chandra/main/index.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/chandra/main/index.html), 2023.
- [56] 中国科学院国家天文台. 中国巡天空间望远镜 [EB/OL]. <http://nao.cas.cn/csst>, 2023.