

空间红外天文观测的新进展

邓劲松^{1,2}

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049)

摘 要: 本文首先回顾了空间红外天文观测的必要性以及前期发展情况, 然后指出在近、中红外波段推动其进一步发展的两大科学主题是宇宙学研究和系外行星探测。接着介绍当前最重要的近、中红外空间天文任务——詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST), 例举了它的主要技术特点以及在这两大研究方向已取得的重要突破。以宇宙学参数巡天为主要科学目标的欧几里得(Euclid)空间望远镜和南希·格雷·罗曼空间望远镜(Nancy Grace Roman Space Telescope, RST)拥有超大视场的拼接式近红外焦面, 系外行星大气遥感红外大型巡天(Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey, ARIEL)望远镜则专用于获取系外行星的大气近、中红外光谱。另外还逐一论述了宇宙历史与再电离期分光光度计及冰探测器(Spectro-Photometer for the History of the Universe, Epoch of Reionization and Ices Explorer, SPHEREx), 系外行星气候红外望远镜(EXoplanet Climate Infrared Telescope, EXCITE), Pandora, JASMINE, GaiaNIR 以及 NEO Surveyor 等其它新近运行、研制中或有望立项的近、中红外空间天文任务(宜居世界天文台(Habitable Worlds Observatory, HWO)也将覆盖近红外波段)。最后指出, 尽管远红外技术发展较慢, 宇宙学与天体物理空间红外望远镜(Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics, SPICA)和 Origins 未能论证成功, 但天体物理远红外探测任务(PRobe far-Infrared Mission for Astrophysics, PRIMA)有望填补“远红外空白”。

关键词: 红外天文观测; 宇宙学; 系外行星探测; 天体物理

中图分类号: P141.91 **文献标志码:** A

DOI: 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.12.001

收稿日期: 2025-11-21

作者简介(Biography): 邓劲松(1972-), 男, 湖南邵阳人, 研究员, 主要从事超新星和伽马射线暴、空间天文探测、天体辐射转移等方面的研究。E-mail: jsdeng@nao.cas.cn

New Advances in Space Infrared Astronomical Observations

DENG Jin-song^{1,2}

(1. National Astronomical Observatories of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This article begins by reviewing the necessity and early development of space infrared astronomical observations. It highlights that the two major scientific themes driving further development in the near- and mid-infrared bands are cosmological research and exoplanet detection. The article then introduces the James Webb Space Telescope (JWST) — the most significant current near- and mid-infrared mission — outlining its key technical features and major breakthroughs achieved in these research areas. Furthermore, it discusses the Euclid space telescope and the Nancy Grace Roman Space Telescope (RST). These missions, whose primary scientific objectives are surveying cosmological parameters, feature mosaic near-infrared focal planes with extremely large fields of view. The Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey (ARIEL) mission is also highlighted for its specialized design to acquire near- and mid-infrared spectra of exoplanet atmospheres. Additionally, the article surveys other operating, developing, or planned missions, including SPHEREx, EXCITE, Pandora, JASMINE, GaiaNIR, NEO Surveyor, and the Habitable Worlds Observatory (HWO). Finally, the article notes that while far-infrared technology has progressed more slowly — with missions like SPICA and Origins not yet realized — the Probe Far-Infrared Mission for Astrophysics (PRIMA) holds the promise of filling the "far-infrared gap".

Key words: infrared astronomical observation; cosmology; exoplanet detection; astrophysics

0 引言

红外波段是当代天文学最重要的观测波段之一,但受到地球大气的严重影响,地基红外天文观测局限在短波长端的几个大气透过波长窗口(定义有 J、H、K、L、M、N、Q 等测光波段^[1-2]),而大部分红外波段的天文观测必须在空间开展。这里需要指出的是^[1],现代天文的红外起始波长被定义在 $1.1\ \mu\text{m}$ 左右(而不是对人眼而言的 $0.75\ \mu\text{m}$ 左右),因为这是光学波段天文观测所用主流电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)焦平面阵列的理论截止波长(Si 感光材料)。

红外天文观测又进一步被划分为近红外、中红外、远红外三大波段。一般约定俗成认为,中红外波段从 $5\ \mu\text{m}$ 开始,截止到 $25\sim 40\ \mu\text{m}$ 左右;远红外波段则一直延伸到约 $200\sim 350\ \mu\text{m}$,并由此直接过渡到亚毫米波。除了受到 H_2O 、 CO_2 等分子的红外强吸收(地球大气层在远红外波段完全不透明)之外,大气自身的热发射还构成地基天文观测的极强红外背

景:峰值落在中红外波段,发射强度(典型值)从波长 $2.2\ \mu\text{m}$ 到 $3\ \mu\text{m}$ 、再从 $3\ \mu\text{m}$ 到 $5\ \mu\text{m}$ 都要分别增加 3 个数量级。换算成星等的话,对于每平方角秒大小的天区,其大气热背景^[3]在 L 波段相当于 8 等、M 波段相当于 2 等、N 波段相当于 -2 等。因此, J、H、K 波段之外的其它大气红外窗口的地基天文观测在实践中也极其困难。

1983 年在轨工作的首个全天红外巡天任务——红外天文卫星 (InfraRed Astronomical Satellite, IRAS) 通过全天区巡天,生成包含约 35 万颗天体的中、远红外源表,堪称现代红外天文的一个里程碑。在它之后,又有全面开展测光、成像和光谱观测的红外空间天文台 (Infrared Space Observatory, ISO; 1995~1998 年)、斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope, SST; 2003~2020 年) 和赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory, HSO; 2009~2013 年) 三大空间红外天文台,以及以全天区巡天为主的光亮号卫星 (Akari; 2009~2013 年) 和广域红外巡天探测器 (Wide-field Infrared

Survey Explorer, WISE; 2009~2024 年)。

WISE 仅工作在近、中红外波段, 而 HSO 工作在远红外和亚毫米波段; 其它则在任务前期覆盖了近、中、远红外波段, 但当平台携带的制冷剂耗尽后, SST、Akari 和 WISE 都只剩下近红外观测能力(WISE 还更名为主要从事近地小天体搜索的近地天体广域红外巡天探测器(Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer, NEOWISE))。以上这些空间红外天文任务的构思和研制都要追溯到更久远的年代, 其技术特点和科学成果在本文中不作赘述。此外, 哈勃空间望远镜(Hubble Space Telescope, HST; 1990 年至今)虽然主体工作在室温, 仍具备高灵敏度的近红外观测能力(波长小于 $2\text{ }\mu\text{m}$); 而 2010 年投入观测、望远镜口径为 2.4 m 的平流层(机载)红外天文台(Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy, SOFIA)因运行成本高于 2022 年永久停飞。

1 发展现状

随着天文学的发展, 新近和即将到来的空间红外天文任务尤其重视两大科学主题——宇宙学研究和系外行星探测。红外波段的宇宙学研究又可分为两大类: 一类是观测宇宙极早期的各类天体, 包括尝试发现第一代星系(甚至第一代恒星)等; 另一类是用大时空体积内的特定天体样本限制大爆炸宇宙的整体物理参数。对于前者, 2022 年正式开展观测运行的 JWST 被天文学界寄予厚望^[4-5]; 后者的代表包括欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 2023 年发射入轨的 Euclid 空间望远镜和美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)研制接近尾声的 RST 望远镜。

需要探测的宇宙极早期天体对应着非常大的宇宙学红移值 z 。预言第一代星系可能会在 $z\approx 10\sim 20$ 范围内被发现, 之前 HST 联合 SST 已证实探测到 $z\approx 11$ 的星系 GN-z11。而红移 z 处天体的辐射传播到今天, 会累积受到不同中

间红移值处的星系际中性氢气体的 $\text{Ly}\alpha$ 吸收(静止波长为 $1024\text{ }\text{\AA}$), 导致波长小于 $(1+z)\times 1024\text{ }\text{\AA}$ 的成分完全损失, 所以必须在红外波段实现探测。

在宇宙学参数研究方面, 目前最受关注的是推动宇宙加速膨胀(荣获 2011 年诺贝尔物理学奖的发现)的暗能量本质问题。而随着物质能量密度因宇宙膨胀而降低, 暗能量的作用大约是从 $z=2$ 左右开始显现, 逐渐演化到今天的主导性地位——以星系计数样本为例, 要用氢的 $\text{H}\alpha$ 谱线(静止波长为 $6563\text{ }\text{\AA}$)来测量星系的红移值, $z=0.7$ 对应 $1.1\text{ }\mu\text{m}$, $z=2$ 对应 $2\text{ }\mu\text{m}$, 也就是说需要开展近红外光谱观测^[6]。

太阳系外行星研究的重点之一是对大气成分进行光谱分析, 寻找人们感兴趣的分子, 特别是可能构成宜居性大气或者与生命活动可能相关的各种分子组合^[7]。这些分子的特征振转谱带主要是在中红外波段, 也有一些在近红外波段(比如 HST 探测到的 $1.4\text{ }\mu\text{m}$ 气态 H_2O 特征)。考虑到寄主恒星的亮光掩盖, 目前大多数情况下无法直接探测到系外行星自身的光谱, 主要是利用凌星(以及次食)现象前后的恒星-行星系统整体光谱的微弱变化, 将系外行星的信号扣减出来。即使是由 H_2 主导的热木星大气这种有利于探测的情形, 系外行星与恒星的光谱强度比也仅在 10^{-4} 左右。这样获得的光谱信噪比十分有限, 因此直接确认单独的分子谱特征并不可靠, 实践中得用大量参数化大气模型对整条光谱进行拟合求解, 其中足够大的波长覆盖范围非常重要。

为提高信噪比, 需要叠加多次凌星的数据, 并使用更大、更灵敏的望远镜, 以增加光子数目。也有极少数系外行星能从寄主恒星周边经由成像解析出来(如采用星冕仪技术), 特别是远轨的、处于新生期(较热)的类木巨行星, 由此可实现直接成像光谱观测。由于行星的温度远比寄主恒星低, 二者在红外波段的亮度反差较小, 最有利于直接成像观测。

2 JWST 任务

当前最重要的空间红外天文设施无疑是 JWST^[8]。它主要工作在近、中红外波段,望远镜采用三反消像散系统和主动光学技术,拼接式主镜口径约为 6.5 m,探测性能相较于 HST 和 SST 在同波段有数量级的提升。JWST 运行在环绕日地第二拉格朗日点的弱稳定性轨道上,位于日地连线方向往外距离地球约 1.5×10^6 km 处。这里因远离地球干扰正成为开展空间天文观测的理想场所。巨大的多层遮阳板将太阳辐射隔离掉,望远镜主体被动辐冷到 ≤ 50 K 的工作温度。

JWST 的望远镜焦面由 4 台大型仪器分享,分别是近红外相机(Near-Infrared Camera, NIRCam)、近红外光谱仪(Near-Infrared Spectrograph, NIRSpec)、近红外成像与无缝光谱仪(Near-Infrared Imager and Slitless Spectrograph, NIRISS; 兼用作精密导星仪)和中红外仪器(Mid-Infrared Instrument, MIRI)。其中前三台工作在 $0.6 \sim 5 \mu\text{m}$ 波段,后者覆盖 $5 \sim 28 \mu\text{m}$ 波段。JWST 共有 17 种科学仪器模式,包括直接成像、狭缝光谱、无缝光谱、星冕仪等等。采用的新技术中,有能选取上百个目标同步进行光谱观测的微开关阵列芯片,还有将小视场天区切割成数十部分后实现成像光谱的集成视场单元。近红外焦平面探测器选用的是 $2\text{k} \times 2\text{k}$ 的 HgCdTe 芯片,中红外波段选用 $1\text{k} \times 1\text{k}$ 的 Si:As 阻杂带传感器。MIRI 还采用三级脉管制冷机并结合液氮 J-T 效应^[9],将焦平面探测器的工作温度降到 7 K 之下。

JWST 的观测研究涉及现代天文学的各个领域,主要科学目标被官方概括为“早期宇宙”“时间长河里的星系”“恒星的生死轮回”“行星另世界”四大方面。JWST 目前已经确认观测到红移高达 14 的宇宙极早期星系^[10],也发现有第一代恒星的可能存在迹象^[11-12]。JWST 在极早期宇宙中探测到大量光度偏高的星系^[13],暗示着可能存在非常快的星系成长速度。这对宇宙学模型和星系形成理论构成一

定挑战。但 JWST 也在 $z \gtrsim 5$ 范围内新探测到一大类称为“小红点”的星系^[14]。这归因于中央存在被尘埃和气体包裹的小质量活动星系核,后者可能对极早期星系偏高的光度有显著贡献。利用红外波段的尘埃穿透性,JWST 还能扣减尘埃消光对造父变星作为距离标准烛光的影响,以此提高哈勃常数的测量精度^[15]。

系外行星方面,JWST 在 WASP-39 b 的凌星光谱中首次实现系外行星大气中 CO_2 的确证探测^[16],对 55 Cancri e 的观测首次获得岩态行星中大气存在的可靠证据^[17],但也基本排除了重点观测对象中几颗类地行星的大气存在可能性^[18]。需要指出的是,对于在可能是海洋行星的 K2-18 b 大气中报告的疑似二甲硫醚探测^[19],其信号的可靠性受到天文界的普遍质疑。此外,JWST 在分子云边缘处的光谱中探测到多种冰态分子^[20],除 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 、 CH_4 之外,还有甲醇、羧基硫以及可能的乙醛、丙酮、乙醇等;也在新生小质量恒星的原行星盘上探测到乙烯、乙烷、氰基乙炔等有机分子^[21]。与此同时,JWST 还在太阳系内取得了不少重要观测结果,比如发现星际窜入天体 3I/ATLAS 彗发中的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 比值异常之高^[22]。

3 红外巡天任务

Euclid 的可见光相机(Visible Camera, VIS)、近红外光谱仪与光度计(Near Infrared Spectrometer and Photometer, NISP)和 RST 的宽视场仪器(Wide Field Instrument, WFI),都以联合光学和近红外波段开展宇宙学参数巡天为主要科学目标^[23-24]。二者的望远镜口径分别达到 1.2 m 和 2.4 m,采用了三反消像散系统。它们的观测视场远比 HST 和 JWST 大,NISP 接近 0.6 deg^2 ,WFI 接近 0.3 deg^2 ;分别通过 36 片 $2\text{k} \times 2\text{k}$ 和 18 片 $4\text{k} \times 4\text{k}$ 的 HgCdTe 芯片拼接覆盖焦面,同时具有高空间分辨率(NISP 约为 0.3 角秒/像元,WFI 约为 0.1 角秒/像元);红端截止波长在 $2 \mu\text{m}$ 附近;采用被动辐冷实现 90 K 左右的焦面工作温度^[25]。

Euclid 已于 2023 年发射至日地第二拉格朗日点轨道, 目前正在对中高银纬约 15000 deg^2 的天区开展星系巡天, 以期利用微引力透镜现象和星系计数(如重子声学振荡现象)研究宇宙学参数。RST 预期于 2027 年发射至类似轨道, 其星系宇宙学巡天的天区面积约为 2000 deg^2 。它将开展高红移 Ia 型超新星宇宙学巡天、微引力透镜法系外行星巡天以及预征集的常规天体物理巡天课题。此外, RST 还有一台仅工作在光学波段的以新技术验证为主的星冕仪。

目前, Euclid 已经发布了一批早期释放观测课题^[26]以及约 63 deg^2 深场巡天^[27]的科学结果, 涵盖了不限于星系及宇宙学的多个天文研究方向。考虑到红外观测的重要性, 同样将开展宇宙学参数巡天的中国空间站巡天空间望远镜(China Space Station Survey Telescope, CS-ST), 也为光学-近紫外主焦面辅助配备了中国科学院上海技术物理研究所研制的近红外芯片^[28]。

除了 RST 之外, NASA 还有一台小型空间红外望远镜——SPHEREx 正在开展独具特色、为期至少两年、面向宇宙学参数的星系计数巡天。它于 2025 年发射至太阳同步轨道。望远镜口径为 20 cm, 是全铝制的三反消像散系统; 用多层遮光板被动辐冷到 80 K 以下; 视场大小为 $3.5 \text{ deg} \times 11 \text{ deg}$; 采用线性可变滤光片将 $0.75 \sim 5 \mu\text{m}$ 波长范围分成 96 个窄波段, 从而创新性地实现首次全天区光谱成像巡天; 焦面 HgCdTe 探测器对应的空间分辨率约为 6 角秒/像元^[29]。SPHEREx 巡天还有两大科学目标, 分别是星际空间的各种冰态分子(与生命分子潜在相关)和预言由第一代恒星或星系集体贡献的宇宙红外背景涨落。

4 系外行星探测任务

JWST 难以保证系统性观测系外行星凌星光谱所需的大量时间, 因此有必要建造针对系外行星光谱的专用空间红外任务。这方面的代表是 ESA 的 ARIEL 望远镜^[30]。它计划于

2029 年发射至日地第二拉格朗日点轨道, 载有口径为 $1.1 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 的全铝制离轴卡塞格林望远镜。ARIEL 可同步获取约 $1.2 \sim 2 \mu\text{m}$ (光谱分辨本领 $R = \lambda/\Delta\lambda > 10$)、 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ ($R > 100$) 和 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ ($R > 30$) 波段的凌星(或次食)光谱, 目标是约 1000 颗系外行星。望远镜本体被动辐射到低于 70 K (承继 Planck 探测器的多层 V 形槽辐射板)的工作温度, 焦面探测器用制冷机进一步降温。

此外, NASA 试飞了一台口径为 50 cm 的球载近红外望远镜——EXCITE^[31], 用于对热木星类型获取耗时的轨道相位时序光谱; NASA 计划 2026 年发射的 Pandora 小卫星载有口径为 44 cm 的卡塞格林望远镜, 将在近红外波段获取一批系外行星的凌星时序光谱, 并通过光学波段的同步测光来监测寄主恒星的活动性, 研究后者对凌星光谱的污染^[32]。

NASA 下一代旗舰型的紫外/光学/近红外空间天文台称为宜居世界天文台(Habitable Worlds Observatory, HWO), 目前处于概念定义阶段。基于美国科学院 2020 天文学与天体物理学十年调查报告的建议^[33], HWO 最主要的科学目标是用星冕仪直接成像探测约 25 颗具有潜在宜居性的类地系外行星, 并通过光谱揭示大气成分。它也将研究广泛的天体物理课题, 特别是星系在全宇宙史的演化、宇宙中元素和分子丰度的演化等。提议的发射时间是 21 世纪 40 年代初。为提高 HWO 的系外行星观测性能, 他们正在研发新一代超低噪声的近红外芯片, 比如 HgCdTe 雪崩光电二极管阵列^[34]。

HgCdTe 雪崩光电二极管阵列也有望实现 ESA 的 GaiaNIR 空间天测提案^[35]所需的时延积分技术, 使其能在近红外波段获取全天区高精度的天体位置和视差信息, 弥补 Gaia 探测器在光学波段所受的尘埃消光限制。而日本计划 2028 年发射的“茉莉号”(JASMINE)望远镜^[36]则采用 InGaAs 芯片, 通过多次短曝光成像实现银河系中央核区的近红外天测, 同时用

凌星法搜索宜居带的类地系外行星。此外, NASA 还将于 2027 年在日地第一拉格朗日点部署近地小天体探测用的 NEO Surveyor 任务^[37], 其 50 cm 口径的望远镜在 4~5.2 μm 和 6~10 μm 两个波段成像(被动辐冷), 数据应与前任 NEOWISE 一样能用于其它天文学方向。

5 远红外空间天文观测

与近、中红外波段不同, 远红外空间天文在近期的发展比较缓慢。就空间分辨率和探测灵敏度而言, 出现了难以匹配 JWST 和地面亚毫米波望远镜阵的“远红外空白”。这种局面的形成, 既有科学原因, 也有技术原因。在科学方面, 尽管如此前 Herschel 大量观测成果所展示的那样, 远红外波段能用于很多天文学前沿课题(如行星系统起源、恒星形成等), 但在宇宙学研究和系外行星探测这两大最引入瞩目的热点领域, 重要性无法得到充分体现。在技术方面, 由于商业和国防需求相对薄弱, 远红外焦面探测器的性能相较于近、中红外芯片严重滞后。比如, Herschel 的微测辐射热计阵列的最大规模也仅为 64×32 像元, 观测效率远不如近、中红外百万级像元的大规模面阵, 灵敏度也有待提高到背景极限。此外, 远红外天文观测对制冷的严苛要求, 可能会造成技术难度和研制运行成本的大幅增加。

尤其令人遗憾的是, 日本联合 ESA 在对 SPICA 望远镜^[38]开展多年论证后, 于 2020 年放弃这项中、远红外空间望远镜提案。SPICA 望远镜 2~3 m 级的口径不如 Herschel 的 3.5 m, 关键改进是结合被动辐冷和机械制冷将工作温度降到 8 K 之下, 远低于 Herschel 的约 80 K 主镜温度, 所以在 10~100 μm 波长范围内有比 Spitzer 和 Herschel 高两个数量级的探测灵敏度指标, 同时也能避免焦面仪器采用消耗性制冷剂导致的短寿命问题。NASA 则论证过 6 m 级口径的中、远红外空间望远镜 Origins (机械制冷到 4.5 K)^[39], 但未能得到 2020 天文学与天体物理学十年调查报告的最终认可^[33]。

有机会成为下一代远红外空间天文台的是 PRIMA 任务^[40]。NASA 计划 2026 年从该提案和 X 射线天文台提案中二选一, 并将其定于 2032 年发射。PRIMA 是一台口径为 1.8 m 的全铝制望远镜, 通过被动辐冷结合 JWST 项目的闲余制冷机降温到 4.5 K; 工作波长范围为 24~235 μm , 终端仪器为光谱仪 FIESS ($R > 85$ 光栅光谱和 $R > 2000$ 傅里叶光谱)和成像仪 PRIMAGER (测光、偏振和 $R \approx 10$ 超光谱成像), 工作在日地第二拉格朗日点轨道。驱动 PRIMA 工程设计的科学目标由 PI 研制团队选定, 分别是行星及其大气的起源、星系和中央超大质量黑洞的协同演化、宇宙时间尺度上尘埃和金属(天文特指氢氦之外的元素)的增丰, 将占用 25% 的总观测时间。PRIMA 全部焦面红外探测器的像元总数超过 1.2 万, 采用超低噪声、高灵敏度的超导动态电感探测器(Kinetic Inductance Detector, KID)^[41], 以充分利用望远镜深制冷提供的低热背景优势。该任务对点源的探测灵敏度将比 Herschel 高 10 倍, 更能将远红外波段空域-谱域的测绘效率提高几千到几万倍。

对单光子敏感且具有超低读出噪声的的超导型器件, 是下一代天文用中、远红外面阵探测器的研发热点。以曾围绕 SPICA 和 Origins 作研发改进的超导相变边缘传感器(Transition Edge Sensor, TES)为例, 作为拥有超高灵敏度的微测辐射热计, 面阵规模正在从万像素级向十万万像素级努力^[42]。但 TES 实现多路复用读出需要集成主动性的超导量子干涉器件(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID), 这是它未被 PRIMA 采用的重要原因^[40]。

6 结束语

性能强大的 JWST 掀开了空间红外天文的全新篇章, 由于顺利入轨节省的大量燃料可用于日常的轨道保持, 工作寿命有望达到 10 年以上。再随着运行中 Euclid 和 SPHEREx 巡天数据的陆续公布、研制中 RST 和 ARIEL(很可

能加上 PRIMA) 的发射、以及其它中小型项目的补充, 未来十几年有望成为空间红外天文的黄金时代。与此同时, 中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院国家天文台等国内单位也在研发可用于高灵敏度天文观测的常规以及超导型的低噪声红外面阵探测器, 力求突破这个技术瓶颈, 为我国填补空间红外天文领域的空白奠定基础。

参考文献

- [1] Glass I S. *Handbook of Infrared Astronomy* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [2] Bessell M S. Standard Photometric Systems [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, **43**(1): 293–336.
- [3] 皮埃尔·莱纳, 丹尼尔·鲁昂, 弗朗索瓦·勒布伦, 等著. 伍可, 孙维新, 胡景耀译. *观测天体物理学* [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2015.
- [4] 邓劲松. 詹姆斯·韦布空间望远镜——窥探宇宙之深奥隐秘 [J]. *现代物理知识*, 2022, **34**(2): 24–31.
- [5] 邓劲松. 詹姆斯·韦布空间望远镜的早期科学成果 [J]. *现代物理知识*, 2024, **36**(2): 40–48.
- [6] Wang Y, Percival W, Cimatti A, et al. Designing a Space-based Galaxy Redshift Survey to Probe Dark Energy [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, **409**(2): 737–749.
- [7] Madhusudhan N. Exoplanetary Atmospheres: Key Insights, Challenges, and Prospects [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2019, **57**(1): 617–663.
- [8] Gardner J P, Mather J C, Abbott R, et al. The James Webb Space Telescope Mission [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2023, **135**(1048): 1–24.
- [9] Ross R G. Conceptual Design and Development History of the MIRI Cryocooler System on JWST [C]. Bethlehem: 22nd International Cryocooler Conference, 2022.
- [10] Carniani S, Hainline K, D'Eugenio, et al. Spectroscopic Confirmation of Two Luminous Galaxies at a Redshift of 14 [J]. *Nature*, 2024, **633**(8029): 318–322.
- [11] Maiolino R, Übler H, Perna M, et al. JWST-JADES. Possible Population III Signatures at $z=10.6$ in the Halo of GN-z11 [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **687**(7): 1–14.
- [12] Visbal E, Hazlett R, Bryan G L. LAP1-B is the First Observed System Consistent with Theoretical Predictions for Population III Stars [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, **993**(1): 1–6.
- [13] Labbé I, Van Dokkum P, Nelson E, et al. A Population of Red Candidate Massive Galaxies ~ 600 Myr after the Big Bang [J]. *Nature*, 2023, **616**(7956): 266–269.
- [14] Matthee J, Naidu R P, Brammer G, et al. Little Red Dots: An Abundant Population of Faint Active Galactic Nuclei at $z\sim 5$ Revealed by the EIGER and FRESCO JWST Surveys [J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **963**(2): 1–28.
- [15] Riess A G, Scolnic D, Anand G S, et al. JWST Validates HST Distance Measurements: Selection of Supernova Subsample Explains Differences in JWST Estimates of Local H_0 [J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **977**(1): 1–18.
- [16] The JWST Transiting Exoplanet Community ERS Team. Identification of Carbon Dioxide in an Exoplanet Atmosphere [J]. *Nature*, 2023, **614**(7949): 649–652.
- [17] Hu R, Bello-Arufe A, Zhang M, et al. Identification of Carbon Dioxide in an Exoplanet Atmosphere [J]. *Nature*, 2024, **630**(8017): 609–612.
- [18] Piaulet-Ghorayeb C, Benneke B, Turbet M, et al. Strict Limits on Potential Secondary Atmospheres on the Temperate Rocky Exo-Earth TRAPPIST-1 d [J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **989**(2): 1–26.
- [19] Madhusudhan N, Sarkar S, Constantinou S, et al. Carbon-bearing Molecules in a Possible Hycean Atmosphere [J]. *The Astrophysical*

- Journal Letters*, 2023, **956**(1): 1–16.
- [20] McClure M K, Rocha W R M, Pontoppidan K M, et al. An Ice Age JWST Inventory of Dense Molecular Cloud Ices [J]. *Nature Astronomy*, 2023, **7**(4): 431–443.
- [21] Arabhavi A M, Kamp I, Henning Th, et al. Abundant Hydrocarbons in the Disk around a Very-low-mass Star [J]. *Science*, 2024, **384** (6700): 1086–1090.
- [22] Cordiner M A, Roth N X, Kelley M S P, et al. JWST Detection of a Carbon Dioxide Dominated Gas Coma Surrounding Interstellar Object 3I/ATLAS [J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2025, **991**(2): 1–10.
- [23] Mellier Y, Abdurro'uf, Acevedo Barroso J A, et al. Euclid: I. Overview of the Euclid Mission [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **697**(5): 1–94.
- [24] Schlieder J E, Barclay T, Barnes A, et al. Survey Science with the Nancy Grace Roman Space Telescope Wide Field Instrument [C]. *SPIE*, 2024, **13092**: 130920S.
- [25] Jahnke K, Gillard W, Schirmer M, et al. Euclid: III. The NISP Instrument [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **697**(5): A3.
- [26] Cuillandrel J-C, Bertin E, Bolzonella M, et al. Euclid: Early Release Observations – Programme Overview and Pipeline for Compact and Diffuse-emission Photometry [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2025, **697**(5): A6.
- [27] Aussel H, Tereno I, Schirmer M, et al. Euclid Quick Data Release (Q1) – Data Release Overview [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2026, **698**: in press.
- [28] CSST Collaboration. Introduction to the Chinese Space Station Survey Telescope (CSST) [J]. *SCIENCE CHINA Physics, Mechanics & Astronomy*, 2025, **69**: in press.
- [29] Alibay F, Sindiy O V, Trisha Jansma P A, et al. SPHEREx Preliminary Mission Overview [C]. Big Sky; 2023 IEEE Aerospace Conference, 2023.
- [30] Puig L, Pilbratt G, Heske A, et al. The Phase A Study of the ESA M4 Mission Candidate AR-IEL [J]. *Experimental Astronomy*, 2018, **46** (1): 211–239.
- [31] Nagler P C, Bernard L, Bocchieri A, et al. The EXoplanet Climate Infrared Telescope (EXCITE) [C]. *SPIE*, 2022, **12184**: 121840V.
- [32] Quintana E V, Dotson J L, Colón K D, et al. The Pandora SmallSat: Multiwavelength Characterization of Exoplanets and Their Host Stars [C]. *SPIE*, 2024, **13092**: 1309214.
- [33] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s, Consensus Study Report [R]. Washington: The National Academies Press, 2023.
- [34] Claveau C-A, Bottom M, Jacobson S, et al. Progress towards a Megapixel Linear-Mode Avalanche Photodiode Array for Ultra-low Background Shortwave Infrared Astronomy [C]. *SPIE*, 2024, **13103**: 131030D.
- [35] Hobbs D, Brown A, Høg E, et al. All-sky Visible and Near Infrared Space Astrometry [J]. *Experimental Astronomy*, 2021, **51**(3): 783–843.
- [36] Kawata D, Kawahara H, Gouda N, et al. JASMINE: Near-infrared Astrometry and Time-series Photometry Science [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2024, **76** (3): 386–425.
- [37] Mainzer A K, Masiero J R, Abell P A, et al. The Near-Earth Object Surveyor Mission [J]. *The Planetary Science Journal*, 2023, **4**(12): 1–19.
- [38] Roelfsema P R, Shibai H, Armus L, et al. SPICA – A Large Cryogenic Infrared Space Telescope: Unveiling the Obscured Universe [J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2018, **35**(8): 1–17.
- [39] Leisawitz D, Amatuucci E, Allen L. et al. Origins Space Telescope: Baseline Mission Concept [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2021, **7**(1): 1–23.

- [40] Glenn J, Meixner M, Bradford C M, et al. PRIMA Mission Concept [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2025, **11**(3): 1–25.
- [41] Foote L, Albert C, Baselmans J, et al. High-Sensitivity Kinetic Inductance Detector Arrays for the PProbe Far-Infrared Mission for Astrophysics [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2024, **214**(3–4): 219–229.
- [42] Staguhn J, Sharp E, Brown A, et al. Design of Large Low Noise Transition Edge Sensor Arrays for Future FIR Space Missions [J]. *Journal of Low Temperature Physics*, 2024, **215**(3–4): 193–200.