

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2016.03.05

红外空间天文发展

李佳席^{1,2}, 邓劲松³, 许春^{4,5}, 王仲翔^{2,5}

(1. 上海大学, 上海 200444; 2. 中国科学院 上海天文台 星系宇宙学研究中心, 上海 200030; 3. 中国科学院 国家天文台 空间天文与技术重点实验室, 北京 100012; 4. 中国科学院 上海技术物理研究所, 上海 200083; 5. 上海天文台—上海技术物理研究所红外天文技术联合研究中心, 上海 200083)

摘要: 红外天文是天文学的一个重要组成部分。自从红外辐射被发现以来, 科学家一直在努力用红外技术探索浩渺遥远的宇宙, 并取得一系列卓越的成果。回顾了红外天文发展的历程, 综合介绍了美国、欧空局成员国、日本等国典型的红外天文望远镜及其重要成果, 以及不久即将发射的红外天文空间望远镜。最后总结了红外天文发展的特点和趋势, 并且对我国红外天文的发展路径做出了分析讨论。

关键词: 红外天文; 红外望远镜; 观测; 灵敏度

中图分类号: P171.7 **文献标识码:** A

1 红外天文观测简介

1.1 红外天文观测特点

红外天文观测是当今实测天文学的重要分支之一, 其主要是在红外波段通过观测研究宇宙中各类天体源^[2, 3]。天文学上, 红外波段的范围在 $1.0\sim 1\,000\ \mu\text{m}$ ^[1, 2], 主要分为三个区域: 近红外区($1.0\sim 5\ \mu\text{m}$)、中红外区($5\sim 25\ \mu\text{m}$)和远红外区($25\sim 1\,000\ \mu\text{m}$)。根据维恩位移定律: $T\lambda_{\text{peak}}=2\,998\ \mu\text{m}\cdot\text{K}$, T 为温度, λ 为波长, 温度在 $3\,000\ \text{K}$ 以下的天体, 其辐射峰值在红外波段。近、中、远红外分别对应的黑体温度约为: $3\,000\sim 600\ \text{K}$ 、 $600\sim 100\ \text{K}$ 、 $100\ \text{K}$ 以下。因此, 宇宙中各类冷天体都是空间红外观测的对象。褐矮星温度低至 $2\,000\sim 500\ \text{K}$, 系外行星和行星盘的辐射峰值落在中红外, 星周尘埃和弥漫星际尘埃温度多在几百、几十 K , 晚型恒星中的碳星、恒星形成区和大规模恒星形成的星暴星系等都要求在整个红外波段有观测, 大量重要分子的转动—振动谱带及电子跃迁谱线处于 $2\ \mu\text{m}$ 到几十微米, 早期或极早期的宇宙天体, 其辐射主体被红移到红外甚至中远红外波段, 等等^[9, 10]。

收稿日期: 2016-04-06; 修回日期: 2016-06-13

资助项目: 中国科学院国家天文台专项

通讯作者: 王仲翔, wangzx@shao.ac.cn

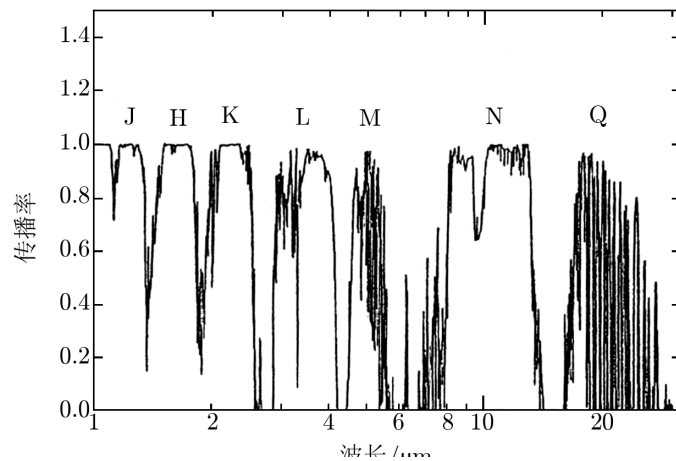


图1 地面大气窗口

地球被一层厚厚的大气层所包围,大气层中要包含水蒸气、二氧化碳、氧气、臭氧等,这些物质对来自外太空红外波段的天体辐射有着强烈的散射和吸收作用^[11, 12]。这很大程度上限制了我们在地面上进行红外天文观测,因此只有几个透明的大气窗口可供地面观测。这些窗口在红外测光系统划分为 J (1.2 μm)、H (1.6 μm)、K (2.2 μm)、L (3.6 μm)、M (5.0 μm)、N (10.6 μm)、Q (21 μm)^[3, 5, 67],如图1所示。目前,地面红外望远镜也主要在这些波段范围内进行观测。地面红外天文观测的背景噪声来源主要是望远镜系统自身的热辐射及地面大气辐射。而地面大气温度为 300 K 左右^[11],在 10 μm 左右辐射最强,背景辐射可以达到 10^{10} /(秒·像元),且背景随时随地都在变化,因此地面红外观测要求不得不在源和背景之间做快速的切换^[1]。为了减弱大气吸收对观测的影响(最主要是水蒸气),地面红外望远镜尽量选择在干燥的高海拔地区如夏威夷的莫纳克亚山和智利的阿塔卡玛沙漠^[13],这使得地面红外望远镜台址选择范围极大地缩小。

空间红外天文观测由于避开了大气辐射的影响,极大地降低背景强度,使其达到只有地面背景的 $1/10^{12}$ 。在空间真空环境中,整个望远镜使用制冷剂将其降温,而不会出现结冰的情况。另外,和光学波段一样,排除了大气扰动的影响,空间红外望远镜能够实现更高空间分辨率的观测。空间红外天文观测还可以自由选择波段,包括地面观测完全不可能实现的远红外观测。因此,为了获得高精度、高品质、更全面的天体红外观测数据,应进行空间红外观测。

1.2 红外天文发展历史

自从 1800 年英国的 William Herschel 爵士发现红外辐射以来^[14],天体的红外研究进展一直缓慢进行着,主要是受到了红外辐射理论和技术等多种客观因素的限制。进入 20 世纪 20 年代,一批天文学家利用全新的测辐射计和热电堆等仪器研究各类天体的红外辐射,而且随着高灵敏度红外探测器的发明和制造,更多天体的红外辐射被观测研究^[7]。红外天文学也随之被重视起来。国际上主要以美国、欧空局成员国以及日本为主,开始长期持续发展红外

天文。地面上, 1968 年, 美国威尔逊天文台使用液氮制冷的硫化铅探测器在 $2.2 \mu\text{m}$ 波段开始巡天, 巡天覆盖了 75% 的天区, 找到了 20 000 个红外源, 它们包括恒星形成区、星系及银河系中心等^[16]。与此同时, 也是高空气球的黄金时代, 美国、法国、意大利、英国^[17]、日本等国都有出色的工作^[8]。美国的机载望远镜 (Kuiper Airborne Observatory, KAO) 也是成果斐然^[18], 重要工作包括木星的内部能源、木星大气中的水蒸气、天王星的光环观测研究等。

空间望远镜的发展则更加引人注目。由美国和荷兰、英国共同研制, 于 1983 年发射的第一台红外空间望远镜“红外天文卫星 (Infrared Astronomical Satellite, IRAS)”, 开启了空间观测的时代^[9, 19]。IRAS 通过液氮制冷, 很好地降低了噪声^[22]。IRAS 在 4 个波段 (12、25、60 和 $100 \mu\text{m}$) 扫描了 96% 的天区, 发现了 35 万个红外源, 第一次揭示了银河系核的特征^[16, 21]。1989 年 11 月美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 发射了“宇宙背景探测器 (Cosmic Background Explorer, COBE)”, 用于探究宇宙背景辐射的红外和微波特征, 使得“宇宙大爆炸理论”得到了进一步的证实^[23, 24]。日本主导及美国参与完成的“空间红外望远镜 (Infrared Telescope In Space, IRTS)”, 于 1995 年 3 月 18 日由 H II 型火箭发射升空, 这是一个口径为 15 cm 的红外望远镜, 其寿命为 28 d, 但取得了一批成果。主要研究的对象是黄道光、星际介质、红外背景等^[25, 26]。同年, 欧洲航空局 (European Space Agency, ESA) 于 11 月 16 日发射了“红外空间天文台 (Infrared Space Observatory, ISO)”^[29]。ISO 在 $3\sim 200 \mu\text{m}$ 波段做了测光、摄谱、偏振等观测。其高灵敏度和高分辨率的性能为科学家们提供了从宇宙背景、星系、暗物质、星系介质、恒星形成区到太阳系、行星、彗星等方面的丰富数据及新发现, 使人们对宇宙的认识提高到一个新的水平^[12]。

21 世纪以来, 红外空间天文更是进入高速发展的时期。美国、日本和欧洲分别发射了“斯皮策空间望远镜 (Spitzer Space Telescope, Spitzer)”^[31]、“光亮号” (AKARI)^[33]、“赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory, Herschel)”^[32]。Spitzer 口径为 85 cm, 在波长范围 $3\sim 180 \mu\text{m}$ 具有较高灵敏度、分辨率及摄谱能力。Herschel 口径为 3.5 m, 是至今口径最大的空间望远镜, 工作在远红外区域。Spitzer 和 Herschel 能够对各类红外天文源做出前所未有的观测研究, 带来了大量的红外观测数据, 成果数不胜数。AKARI 口径为 68 cm, 主要工作中、远红外区域, 对全天进行了特定灵敏度的成像巡天观测。另外, 美国于 2009 年 12 月 14 日发射升空了“广域红外巡天探测器” (Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)^[34]。WISE (40 cm 口径) 在中红外区域具备很高的全天探测能力, 总共进行了 270 000 次观测, 探测到 5.6 亿多个红外天体源。

目前, 国际上又已经开始了第三代红外空间望远镜的研制, 分别是“詹姆斯·韦布太空望远镜 (James Webb Space Telescope, JWST)”^[35]和“宇宙学与天体物理空间红外望远镜 (Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics, SPICA)”^[36]。JWST (6.5 m 口径) 工作在近、中红外波段, 主要用于观测研究宇宙大爆炸后第一代星系的形成以及太阳系外行星系统的形成。SPICA (3.5 m 口径) 将采用新型机械制冷技术使整个望远镜系统温度降低到 6 K; 因此, SPICA 在远红外波段可以达到前所未有的观测能力。

天文望远镜系统主要分为巡天和综合天文台两类, 红外空间项目也不例外。下面在第 2 章我们分别综合回顾了这两类红外望远镜的主要项目及技术特点, 同时也提到它们所取得的

重要研究成果, 从中看出这些红外项目对促进红外天文研究发展的重要作用。在第 3 章中我们同样简述了正在研制中的 JWST 和 SPICA 的特性和研究目标。从这些回顾和简述中我们总结出国际红外空间项目发展的特点, 这些特点总结在第 4 章。最后我们结合国内情况, 讨论了在现今和将来我国红外空间观测发展可以借鉴之处。

2 红外空间望远镜及其重要成果回顾

2.1 空间红外巡天项目

类似于其他波段的望远镜, 因为巡天能帮助求解各类源的大致分布和构成, 红外空间天文起步于巡天。1983 年 IRAS 拉开了红外空间观测的序幕。各空间红外巡天项目及其主要指标见表 1。

表 1 空间红外巡天项目及主要指标

名称	运行时间	口径 /cm	角分辨率 /(')	制冷方式	巡天 区域	工作波段 / μm	运行轨道	巡天 次数
IRAS	1983.1—1983.11	57	0.5~2	液氦	全天	12、25、 60、100	900 km 太 阳同步轨道	4
COBE	1989.11—1993.12	19	40	液氦	全天	1~300	900 km 太 阳同步轨道	1
IRTS	1995.3—1995.4	15	0.5、0.67、 7.5	超流氦	7% 全天	1~1 000	高度 400 km	
WISE	2009.12—2011.2 2013.9 至今	40	0.03	固氢 + 辐射制冷	全天	3.4、4.6、 12、22	太阳同步 轨道	8 次 以上

IRAS 是世界上第一颗专门用于红外观测的空间天文卫星, 在太空中运行了 10 个月, 因有限的制冷剂 (73 kg 液氦) 的耗尽而终止。在其短短的寿命周期中, 对超过 96% 的天空区域进行了 4 次巡天, 获得了远超前于地面红外望远镜的天文成果^[9, 18]。探测到 350 000 颗天体源, 为 NASA 之前收集到红外源数目的两倍, 其中包含 250 000 个被证认的红外源, 主要有 75 000 个星暴星系, 在太阳系内发现了 6 个彗星。首次揭示出银河系的中心及发现了织女星周围的星周尘埃盘, 以及大量星周遗迹盘、原行星盘等, 满足了当时对大样本各类天体做中等灵敏度的多波段巡天的科学需求^[19-22]。

COBE 于 1989 年 11 月发射到 900 km 的晨昏太阳同步轨道, 三轴稳定并绕太阳距角 94° 的轴以 75 s 周期自转。卫星轨道的选择使得地球总在卫星下方, 太阳总处于卫星一侧, 因而避免了地球和太阳对焦平面仪器的干扰。COBE 主要搭载了三个仪器: 远红外绝对分光光度计 (Far-InfraRed Absolute Spectrophotometer, FIRAS), 弥漫红外背景试验 (Diffuse InfraRed Background Experiment, DIRBE) 和差分微波辐射计 (Differential Microwave Radiometer, DMR)。1990 年 6 月 COBE 完成全天巡天, 9 月底因制冷剂耗

尽, FIRAS 和 DIRBE 中远红外停止观测, FIRAS 以低灵敏度继续工作了 3 年。DIRBE 研究了太阳系尘埃分布和银河系红外辐射的模型, 获得了近 12 000 个点源的各 200 次红外全波段测光, 在 140 μm 和 240 μm 探测到宇宙红外背景辐射。FIRAS 开展了首次远红外谱线全天巡天, 获得了 157.7 μm 、205.3 μm 的全天流量图和银河系尘埃分布的光谱成像^[23, 24, 68]。

IRTS 于 1995 年 3 月发射到高度 490 km、倾角为 28.5° 的轨道。卫星绕稍偏太阳指向的轴每轨自转一周, 使得望远镜扫描太阳垂直方向的大圆并绕开地球。最终完成对两条带状共 2 700 平方度天区的扫描, 一条是过银心的低银纬带, 一条穿过银道面到达高银纬。IRTS 有四个焦面仪器: 近红外光谱仪 (Near-Infrared Spectrometer, NIRS), 中红外光谱仪 (Mid-Infrared Spectrometer, MIRS), 远红外谱线制图仪 (Far-Infrared Line Mapper, FILM) 和远红外光度计 (Far-Infrared Photometer, FIRP)。IRTS 释放了含 14 000 多近红外光谱点源和 500 多中红外光谱点源的星表, 研究了晚期恒星、星际介质、银道面、黄道光等的红外谱, 如 PAH 分子带, 获得了 63 μm 、158 μm 流量图等^[25, 26]。

WISE 巡天的四个波段的中心波段分别为 3.4、4.6、12 和 22 μm , 四个波段将同一视场成像在各自的 1 024×1 024 面阵上, 分辨率在 3.4、4.6、12 μm 波段约为 6", 在 22 μm 约为 12"。WISE 指向稳定度小于 1.5"。WISE 最主要的科学任务是搜寻褐矮星和探究极亮红外星系, 此外还有搜寻太阳系内小行星和探测彗星和黄道带、星际尘埃、年轻恒星、星周盘等等。在巡天工作中, WISE 总共得到了 270 000 次曝光, 对超过 99% 天区覆盖达到 8 次及以上的曝光, 其 5 σ 的灵敏度分别可以达到 0.068、0.098、0.86、5.4 mJy。WISE 共探测到约 15 万颗以上的小行星、500 多颗近地天体, 其中新发现 3.3 万余颗主带小行星、230 颗近地天体、25 颗彗星。WISE 发表的早期科学结果证实了几颗新发现的冷褐矮星及超冷褐矮星^[16, 34, 57, 58]。

2.2 空间红外天文台项目

巡天项目的主要目标在于全面了解各类源的分布和构成情况, 详细研究还需要具有多种观测能力的综合性天文台 (见表 2)。因此 IRAS 巡天刚开始, 国际上就提议了天文台项目 ISO, 以对 IRAS 源做定点观测。天文台项目对单个源的观测时间充裕, 普遍具备光谱能力, 比同时期巡天项目更灵敏, 获得的物理信息也更为丰富。ISO 搭载 4 个焦平面仪器: 红外相机 (Infrared Camera, ISOCAM)、成像光度偏振计 (Photo-polarimeter, ISOPHOTO)、短波光谱仪 (Short Wave Spectrometer, SWS) 和长波光谱仪 (Long Wave Spectrometer, LWS)。ISO 保持着高灵敏度 (约 1 000 倍于 IRAS) 和高分辨率 ($\lambda/\Delta\lambda$ 约为 1 000) 在 2.5~240 μm 波段工作了 30 个月^[27-30]。由于其大椭圆轨道很好地消除了地球对制冷的限制及观测指向精度的影响, 制冷剂寿命比预期延长了 10 个月, 指向精度是预期的 10 倍, 指向稳定度是预期的 5 倍。ISO 总观测时间约为 1×10^4 h, 其中的 10% 观测太阳系, 23% 观测星系介质, 29% 观测恒星及星周盘, 27% 观测河外天体, 11% 观测宇宙学天体。全部仪器共有 23 种主观测模式。ISO 每次观测指定一台主焦平面, 其余仪器为辅助仪器并行工作。利用两次指向间的转动时间, 还完成了 ISOPHOT 对约 15% 天区的 170 μm 波段巡天, ISOLWS 也有同样的机遇巡天模式。ISO 的科学成果主要包括各波段的宇宙极深探测、近邻星系的精细成像、恒星形成区的详细研究^[41]、主序星尘埃盘的详细研究、宇宙中水气^[38]的普遍存在、星际中碳氢化合物的详细研究^[44]、星周及系外晶体硅^[39]和氢气^[40]的首次证实等。

表 2 空间红外天文台项目及主要指标

名称	运行时间	口径/cm	制冷方式	运行轨道	搭载仪器 (工作波段/ μm)
ISO	1995.11— 1998.4	60	液氮	大椭圆轨道	ISOCAM(2.5~17)、 LWS(45~197)、 SWS(2.4~45)、 ISOPHOTO(2.4~240)
Spitzer	2003.8 至今	85	液氮 + 被动制冷	尾随地球日 心轨道	IRAC(3.6、4.5、5.8、8)、 IRS(5.3~40)、MIPS(24、 70、160、55~95)
AKARI	2006.2— 2011.11	68.5	超流氦 +2 级斯特 林制冷 + 辐射制冷	太阳同步轨道	FIS(50~200)、 IRC(1.7~26.5)
Herschel	2009.5— 2013.4	350	超流氦 + 被动制冷	地-日系统第二 拉格朗日点	PACS(55~210)、 SPIRE(194~672)、 HIFI(157~212、240~625)

Spitzer^[47] 是美国 NASA 的四大空间天文台项目之一, 其焦平面主要搭载了 3 台仪器: 红外阵列相机 (Infrared Array Camera, IRAC), 红外摄谱仪 (Infrared Spectrograph, IRS), 多波段成像光度计 (Multiband Imaging Photometer for Spitzer, MIPS)。直至 2009 年 5 月液氮耗尽, Spitzer 的主运行方才终止, 但 IRAC 的前两波段一直还在热环境下继续观测。Spitzer 指向稳定度约为 $0.03''/600\text{ s}$, 与 ISO (约 $0.5''/30\text{ s}$) 相比, 大幅度提高。IRAC 可以同时两个相邻的视场做 3.6 和 5.8 μm , 或 4.5 和 8.0 μm 宽波段的衍射极限成像, 使用 4 个 512×512 面阵探测器。IRS 包括 5.2~14.5 μm 和 14~38 μm 两个低分辨率光谱仪 ($\lambda/\Delta\lambda$ 约为 60~125)、9.9~19.6 μm 和 18.7~37.2 μm 两个光谱分辨率为 600 的光谱仪, 使用 128×128 面阵探测器。MIPS 提供 24、70、160 μm 宽波段的衍射极限成像和 55~95 μm 的低分辨率光谱。探测灵敏度和像素数分别数十倍和数百倍地优于 ISO, 在其四大科学目标 (寻找褐矮星与系外行星、探索行星是怎样形成的、研究陌生的河外星系、观测遥远星系, 揭示早期宇宙图景) 内取得了巨大的成功。Spitzer 实现了系外行星的首次直接观测, 发现了褐矮星的星周盘, 对邻近星系做了精细成像和光谱观测, 直接探测到尘埃遮蔽的恒星形成, 对极亮红外星系做了详尽的光谱研究, 成功将宇宙红外背景解析成分立源, 研究了各类天体的红外光谱特征如硅酸盐、PAH 特征等。Spitzer 还开展了一些深度巡天, 获取了数目巨大的星表^[48-51]。

AKARI 在 2006 年 2 月发射, 运行在约 700 km 的晨昏太阳同步轨道, 其早期观测以中、远红外巡天为主, 也开展了近、中红外定点观测。在全天模式下, AKARI 以 $3.6'/\text{s}$ 扫描垂直太阳方向的大圆, 相邻两轨错开约半个视场, 半年可完成一遍全天扫描。AKARI 包含两个焦平面仪器: 远红外巡天器 (Far-Infrared Surveyor, FIS) 和红外相机 (Infrared Camera, IRC)。参与巡天的有 FIS 和 IRC 的 2 个宽波段 (9 μm 、18 μm)。AKARI 初版的全天亮源表有约 144 万个中、远红外点源。利用 IRC 的定点观测, 对北黄极约 6 平方度、大麦哲伦云约 10 平方度等做了近、中红外的深度河外巡天。超流氦的制冷剂耗尽后, 利用 IRC 的低分辨率光谱

系统研究了天体的 $3.3 \mu\text{mPAH}$ 特征^[33]。

赫歇尔空间天文台 (Herschel Space Observatory) 主要搭载了 3 台高精度的仪器: 成像光谱与测光仪 (Spectral and Photometric Imaging Receiver, SPIRE)、光电阵列和光谱仪 (Photodetecting Array Camera and Spectrometer, PACS)、远红外外差接收机 (Heterodyne Instrument for the Far Infrared, HIFI), 使用约 2 000 L 超流氦给仪器提供 1.6~20 K 之间 4 级制冷温度。因为赫歇尔空间天文台的望远镜具有超大口径, 所以其工作在远红外和亚毫米光谱区域。SPIRE 作用于亚毫米波段, 250、350、500 μm 三个测光波段同时观测 $4' \times 8'$ 视场, 光谱分辨率约为 20~1 300。PACS 有数种观测模式, 工作于 55~210 μm 区域, 视场 $47'' \times 47''$, 光谱分辨率约为 1 000~4 000。HIFI 借用射电的外差混频技术提供 157~212 μm 和 240~625 μm 波段的超高谱分辨率, $\lambda/\Delta\lambda$ 约为 10^6 。赫歇尔的研究领域包括早期宇宙的星系形成和星系的演化, 恒星形成和它与星际介质的交互作用, 包括行星、彗星和卫星等太阳系内天体表面和大气层的化学成分, 以及整体宇宙的化学成分。赫歇尔填补了中、远红外的观测空白, 可以观测到宇宙中更加“寒冷”、“模糊”的对象。赫歇尔天文台一共做了超过 35 000 次科研观测, 其中包括大天区上的光谱巡天^[32, 54-56]。

3 国际近期主要的红外天文项目

3.1 詹姆斯·韦布空间望远镜 (JWST)

詹姆斯·韦布空间望远镜是 NASA、ESA 及加拿大联合研发, 以 NASA 第二任局长詹姆斯·韦布命名^[61], 耗资约 80 亿美元, 预计于 2018 年 10 月发射的一颗空间天文卫星。为达到 6.5 m 的大口径, 反射镜主镜由 18 面铍制六边形子镜在发射后展开拼接而成。轨道是距离地球 $1.5 \times 10^6 \text{ km}$ 地-日系统的第二拉格朗日点。工作波段为 0.6~28.5 μm 。主要搭载的仪器有: 近红外相机 (Near Infrared Camera, NIRCam)、近红外摄谱仪 (Near Infrared Spectrograph, NIRSpec)、中红外仪器 (Mid-Infrared Instrument, MIRI)、可调滤光片成像仪 (Tunable Filter Imager, TFI)。仪器性能如表 3 所示。

表 3 JWST 仪器性能参数

仪器名称	主要功能	波长范围/ μm	光谱分辨率 ($\lambda/\Delta\lambda$)	视场
NIRCam	近红外相机	0.6~5	410、100	$2.2' \times 4.4'$
NIRSpec	多目标观测	0.6~5	100、1 000	$3.1' \times 3.4'$
	狭缝光谱	1~5	100、1 000	$200 \times 3\ 500 \text{ mas}$
	集成视场光谱	1~5	3 000	$3'' \times 3''$
MIRI	成像	5~27	4~6	$1.4' \times 1.9'$
	低分辨率光谱	5~11	100	$5'' \times 0.6''$
	集成视场光谱	5.8~28	3 000	$3.6'' \times 3.6''$ 到 $7'' \times 7''$
TFI	可调滤光片成像	1.6~2.4、3.2~4.9	100	$2.2' \times 2.2'$

JWST 被看作哈勃空间望远镜的继任者, 由于其红外波段探测能力, 同时也是 Spitzer 的继任者。JWST 的能力远远超过这两个空间望远镜, 可以探测到更远更年老的恒星和星系。其红外波段观测能够更好地穿透尘埃和大气。JWST 的红外探测能力针对宇宙早期的天体进行观测, 能够探测到宇宙大爆炸后几亿年第一个星系的形成机制、恒星诞生处的分子云等^[35, 62, 63]。

3.2 宇宙学与天体物理空间红外望远镜 (SPICA)

SPICA 是日本与 ESA 联合研制的红外天文望远镜, 计划于 2025 年发射到距离地球 1.5×10^6 km 地-日系统的第二拉格朗日点, 总重量小于 700 kg。结合被动制冷、二级机械制冷和闭环 ^3He 焦耳-汤姆孙 (JT) 制冷^[64], 将碳化硅或硅/碳化硅复合材料制口径为 3.5 m 望远镜冷却到 5 K 以下, 以获得远好于 Herschel 的探测灵敏度。工作波段为 $5 \sim 200 \mu\text{m}$ 的中远红外区域; 光学系统采用了 R-C 光学系统, 焦距 $f = 18$ m, 视场角 $FOV = 20'$ 。SPICA 主要搭载了中红外相机和光谱仪 (Mid-IR Camera and Spectrometer, MCS)、中红外星冕仪 (SPIC Coronagraph Instrument, SCI)、远红外仪器 (SPICA Far-IR Instrument, SAFARI) 及焦平面相机 (Focal-Plane Camera for Guider/Science, FPC)。表 4 为各部分参数。中红外相机和中红外光谱仪主要工作在 $5 \sim 26 \mu\text{m}$ 和 $20 \sim 38 \mu\text{m}$, 分别使用 1000×1000 的 Si:As 和 1000×1000 Si:Bi 面阵。中红外星冕仪 SCI 开展系外行星的星冕法直接成像和无缝光谱观测, 用二进制形状掩膜实现约 10^{-6} 的高对比度。SAFARI 是快速傅里叶变换成像光谱仪, 覆盖 $30 \sim 210 \mu\text{m}$ 的 3 个波段, 探测器可能是 64×64 、 38×38 、 20×20 的超导转变边缘 (TES) 测辐射热计面阵, 视场约为 $2' \times 2'$; 结合闭环 ^3He 制冷和绝热去磁制冷将探测器冷却到 $0.05 \sim 0.07$ K, 1 小时 5σ 测光灵敏度达到低于 $50 \mu\text{Jy}$, 比 Herschel 好约 60 倍。美国提议搭载红外/亚毫米波光谱仪 (Background-Limited Infrared Submillimeter Spectrograph, BLISS), 主要工作在 $38 \sim 430 \mu\text{m}$, $\lambda/\Delta\lambda$ 约为 700, 使用 4 200 个制冷到 0.05 K 的测辐射热计。SPICA 将主要用于宇宙学的研究, 包含星系的形成和演化、恒星和行星系统的形成和演化, 以及物质的演化等^[36]。

表 4 SPICA 仪器性能参数

仪器名称	主要功能	波长范围 / μm	视场	光谱分辨率 ($\lambda/\Delta\lambda$)	探测器
MCS	中红外相机	2~38	$100'' \sim 400''$	100	1000×1000 Si:As 和 1000×1000 Si:Sb
	中红外光谱仪	2~38		3 000、6 000、 30 000	1000×1000 Si:As 和 1000×1000 Si:Sb
SCI	中红外星冕仪	3.5~27	$1' \times 1'$	20、200	1000×1000 Si:As 和 1000×1000 InSb
SAFARI	远红外光谱仪	30~210	$2' \times 2'$	<10、100、 10 000、20 000	64×64 、 38×38 和 20×20 TES 面阵
FPC	焦平面制导相机	0.8	$5' \times 5'$	5	1000×1000 InSb
	近红外相机和光谱仪	0.7~5	$5' \times 5'$	5~20	1000×1000 InSb

4 红外空间天文观测的发展趋势

红外空间望远镜经过 40 多年的发展, 其促进了空间技术的进步和望远镜设计的不断完善, 并且对相关红外天文研究具有巨大推动作用。对于这些项目, 我们总结出如下五个特点, 这些特点对于发展我国红外天文具有重要的借鉴意义。

4.1 探测性能跃升、望远镜口径稳步增大

高性能红外面阵探测器是近年来推动空间红外天文探测器性能跃升的重要因素, 在近、中红外尤为明显。探测器像元数目的增加, 意味着望远镜在同一时间可以观测更多空间面积或提高空间分辨率; 另一方面, 由于像元对应的空间面积经常会缩小, 进入像元的黄道背景噪声相应减小, 从而提高探测灵敏度。ISO 首先在近、中红外引入面阵探测器, 像元数 32×32 ; 而到了 WISE, 探测器面阵像元数已发展到 $1\,024 \times 1\,024$ 。巡天项目与天文台项目的灵敏度也在数量级上得到了跃升。IRAS 巡天点源灵敏度在 $0.1 \sim 10$ Jy 左右, 随着巡天方式从连续扫描到步进-凝视的转变, WISE 巡天的灵敏度达到了约 $0.1 \sim 10$ mJy。天文台项目中, 以 600 s 测光的灵敏度为比较, ISO 近、中红外面阵相机 ISOCAM 达到数百 μ Jy, ISOPHOTO 各波段约从数十到上百 mJy。Spitzer 则在近、中、远红外分别提高到约 2μ Jy、 $20 \sim 100 \mu$ Jy、 $10 \sim 30$ mJy。研制中的 JWST、SPICA 则又达到了一个新的高度。

红外空间任务的望远镜口径也在逐步增大。在其他条件相同的情况下, 理论上, 望远镜的探测能力与其主镜直径的平方成正比。例如 Herschel、SPICA、JWST 的口径分别达到了 3.5 m 和 6.5 m。考虑到运载的约束及技术难度, JWST 和未来空间红外天文望远镜将采用包括镜面精密可展开技术等在内的先进技术来实现其主镜口径朝着大口径、超大口径的方向发展。

4.2 巡天与天文台项目并进、大型与中小型项目共存

空间红外天文起步于巡天, 巡天能够发现大量的红外源, 而天文台项目具有高灵敏度和摄谱能力, 获得的物理信息全面丰富。巡天和天文台项目交互进行, 互为补充。如 Spitzer、Herschel 同一时期的 WISE、AKARI。Spitzer 还开展了银道面深度巡天, AKARI 更是兼具巡天和定点观测两种模式。总体而言, 空间天文台项目的望远镜口径较大, 仪器复杂多样, 基本上是大型项目, 而巡天项目所需望远镜口径较小, 观测目标明确, 所以观测模式单一。在大口径盛行的同时, 小口径、窄波段、宽区域、高精度的 WISE 也取得了极大的成功。

4.3 复合制冷将取代消耗性制冷剂

在空间红外天文任务中, 探测器和光学系统的制冷一直是必须攻克的难题。科学家之前长期采用的制冷方式是液态氦或者固态氢。但是数量巨大的制冷剂消耗了大量的平台空间和资金成本, 其使用寿命也是一个技术难题, 一旦制冷剂使用完毕, 任务即结束, 例如 Herschel 只运行了 3 年时间。

随着技术的发展和认识的深入, 空间红外天文开始采用各种复合制冷方式, 起初是在传统方式中结合辐射或机械等方式来对望远镜预制冷或者对探测器深制冷; 而现在正在往彻底

抛开消耗性制冷剂方向发展,如 Spitzer、Akari、WISE、Herschel 都是利用周围冷环境的被动辐射来预制冷望远镜或外壳,大大减少了消耗性制冷剂的携带量, Akari 还使用了二级斯特林机械制冷。研制中的 JWST、SPICA 等都不再携带消耗性制冷剂,望远镜和近红外探测器基本依靠辐射制冷。特别是 SPICA,通过采用复合制冷方式将整个望远镜冷却到 5 K 以下,因此此望远镜虽然与 Herschel 口径相同,探测灵敏度却要高很多。

4.4 环日地 L2 轨道成为主流选择

空间红外天文相对地基观测的一大优势是可以屏蔽掉地球大气层的干扰,但是仍需要应对来自于太阳和地球的热辐射。早期的红外天文卫星 IRAS 采用的是太阳同步轨道,以方便遮挡太阳辐射,但是地球的存在仍制约着制冷能力和观测指向选择,因此 ISO 和 Spitzer 分别采用大椭圆轨道和尾随地球的日心轨道。

距离地球约 1.5×10^6 km 的日地 L2 点才是开展红外天文研究的理想场所,在其轨道运行时,同地球、太阳的相对位置基本不变(见图 2),能完全避开地球、月球的热辐射和杂散光污染,也很方便遮挡太阳辐射、获得稳定的超低温环境,因此通过被动制冷的方式,其光学系统就可以很容易地制冷到 30~50 K 的温度,不需要额外的主动制冷系统为其提供制冷量。未来选择 L2 轨道运行,也将是空间天文观测领域的一个重要发展趋势。

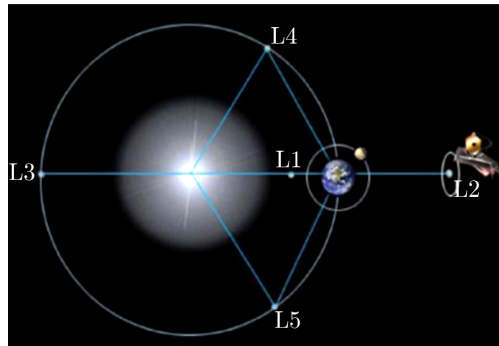


图 2 JWST 的 L2 轨道示意图^[65]

4.5 系统的整体探测能力越来越强

多数已运行的空间红外天文项目的研究目标宽泛,有以红外巡天为主,有红外天文台项目,不同空间红外望远镜的科学任务不同,在总体指标设计上的侧重点也不一样,任务设计主要从波段和探测器深度上着眼,希望观测到更多的天文现象。在假定输入条件(如工作波长范围、积分时间、探测星体距离等)都相同的情况下,可以通过望远镜系统所能探测的最小“射电流量密度”来表征整个系统的探测能力。“射电流量密度”的单位为 Jy, $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$,望远镜系统所能探测最小射电流量密度表征的是望远镜系统在一定的积分时间内,以一定的带宽(对应一定的工作谱段)对点源目标进行探测所能获得有效探测的最小能量值。图 3 为各望远镜在相同条件下的探测灵敏度发展趋势,可见整体能力不断增强。

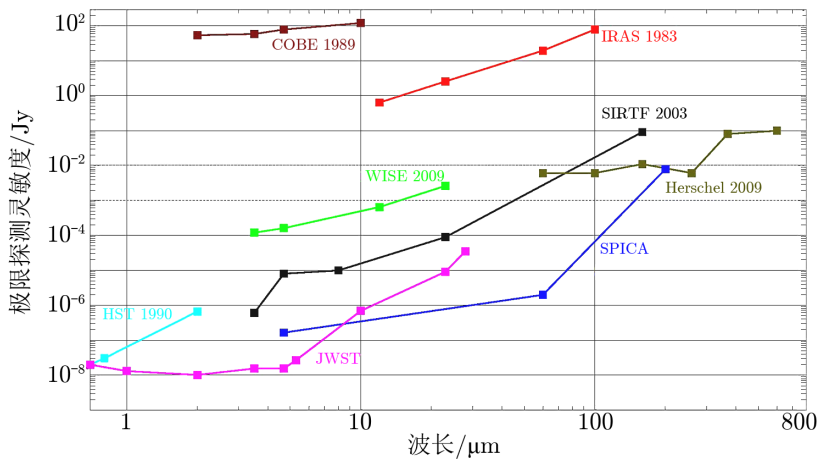


图 3 至今红外空间望远镜的主要工作能段和极限探测灵敏度^[65]

5 我国红外天文观测的发展与展望

由于综合国力的落后和科学技术的限制, 我国的天文研究特别是红外天文方面远落后于同时期的欧洲, 以及美国、日本等国家。但我国的一些有识之士从未放弃过红外天文的研究, 1978年11月, 国内天文、红外技术界人士召开了红外天文碰头会, 掀起了中国红外天文观测的序幕^[10]。1981年, 我国第一台实用化的1~3 μm近红外天文光度测试仪在云南天文台成功地完成试观测^[70], 走出了我国红外天文学研究的第一步。1982年, 上海天文台首次进行了我国高空气球红外观测实验^[69], 开展了对太阳和银河系中心的远红外观测研究, 但只是使用了单元探测器的最初始实验。1985年, 国家天文台建成一台1.26 m的近红外地面望远镜^[71], 配有近红外光度仪和低分辨率光谱仪, 供国内外天文学家使用。在恒星形成区和演化晚期恒星研究方面取得了一些有意义的成果。

造成我国红外天文发展严重落后的主要因素是国内高精红外探测器技术的落后和美国对中国红外探测器的进口限制。近几年, 出于天文界的共识, 相关研究人员开始提出并利用能掌握的国内、国际红外探测器, 做力所能及的基础天文工作和技术发展, 以维持这一领域的持续性。同时, 也正在积极和国内探测器研制单位合作, 尽力推动天文类高精度探测器的研制。

全面分析总结国际空间红外天文的发展, 可以看出探测能力广而深相结合这一特点, 因此, 无论是大型巡天或是综合天文台类项目, 留给我们能独立发展的参数空间和相关重要科学研究目标已不多, 这更提醒我们发展我国红外天文的紧迫性。而纵观红外天文的发展, 还可以看出日本的发展过程尤其值得我国借鉴。从早期只运行了28天、从事光谱巡天的小口径试验性IRTS, 到中等口径、主要在特定波段巡天的AKARI, 再到将在中远红外具有前所未有的探测能力的SPICA。可以说整个发展路线清晰, 在和美国、欧洲的竞争中尽可能具有自己的特点, 而持续支持保证了从红外天文基础研究到相关红外和空间技术不断进步, 一直处

于国际一流水平。因此, 鉴于我国各方面技术基础薄弱这一状况, 急需有如日本 IRTS 这样试验性项目的支持, 以发展和实现技术突破为主要目的, 辅以独特的科学研究目标, 从而促进我国红外观测天文的发展。

参考文献:

- [1] 谭徽松. 实测天文物理. 北京: 国防工业出版社, 2013: 150
- [2] <http://www.ipac.caltech.edu/outreach/Edu/importance.html>, 2016
- [3] Glass I S. Handbook of infrared astronomy. UK: Cambridge university press, 1999: 25
- [4] 向守平. 天体物理学概论. 合肥: 中国科学技术出版社, 2008: 18
- [5] http://www.coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/ir_tutorial/irwindows.html, 2016
- [6] Low F J, Rieke G H, Gehrz R D, et al. ARAA, 2007, 45: 43
- [7] Johnson H L. ARAA, 1996, 4: 193
- [8] Rieke G H. Experimental Astronomy, 2009, 25(1): 125
- [9] Neugebauer G, Habing H J, Aumann H H, et al. AJ, 1984, 278: L1
- [10] 陈培生. 云南天文台台刊, 1987, 2: 108
- [11] Liou K N. An Introduction to Atmospheric Radiation(2nd Edition). USA: Academic Press, 2002: 65
- [12] 钱忠钰. 天文学进展, 1991, 3: 238
- [13] 陈丹. 太空探索, 2009, 1: 62
- [14] http://www.coolcosmos.ipac.caltech.edu/cosmic_classroom/classroom_activities/herschel_bio.html, 2016
- [15] 陈培生. 红外技术, 1989, 11: 1
- [16] 王雪冰. 博士论文. 上海: 上海天文台, 2015: 30
- [17] Jennings R E. QJRAS, 1986, 27: 454
- [18] Dolci W. Milestones in airborne astronomy, US: AIAA, 1997: 5609
- [19] 辛滇雄. 激光与红外, 1983: 85
- [20] 杭恒荣. 天文学进展, 1983, 01: 112
- [21] Jennings R E Ir. AJ, 1984, 16: 210
- [22] 张月, 周峰, 阮宁娟, 等. 航天返回与遥感, 2013, 34: 5
- [23] Boggess N W, Mather J C, Weiss R, et al. ApJ, 1992, 397: 420
- [24] Mather J C, Cheng E S, Eplee R E, et al. ApJ, 1994, 354: 37
- [25] Murakami H, Bock J, Freund M M, et al. ApJ, 1994, 42: 354
- [26] Murakami H, Freund M M, Ganga K, et al. PASJ, 1996, 48: 41
- [27] 吕南姚, 徐聪. 科学, 1995, 47: 2
- [28] 李开封. 天文爱好者, 2009, 8: 50
- [29] Kessler M F, Steinz J A, Anderegg M E, et al. A&A, 1996, 315: 27
- [30] 于大为, 张志伟. 航天返回与遥感, 1995, 16: 37
- [31] Werner M W, Roelling T T, Low F J, et al. APJS, 2004, 154: 1
- [32] Pilbratt G L, Riedinger J R, Passvogel T, et al. A&A, 2010, 518: 1
- [33] Murakami H, Baba H, Barthel P, et al. PASJ, 2007, 59: 369
- [34] Wright E E, Eisenhardt P R M, Mainzer A K, et al. AJ, 2010, 140: 1868
- [35] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. Springer, 2006, 123: 485
- [36] Swinyard B, et al. Experimental Astronomy, 2009, 23(1): 193
- [37] http://www.ipac.caltech.edu/outreach/Edu/iras_discoveries.html, 2016
- [38] Cernicharo J, Crovisier J. Space Science Reviews, 2005, 119: 29
- [39] Molster F, Kemper C. Space Science Reviews, 2005, 119: 3
- [40] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Habart.pdf>, 2016

- [41] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Nisini.pdf>, 2016
- [42] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Blommaert.pdf>, 2016
- [43] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Abergel.pdf>, 2016
- [44] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Peeters.pdf>, 2016
- [45] <http://iso.esac.esa.int/science/SSR/Fouchet.pdf>, 2016
- [46] http://iso.esac.esa.int/manuals/HANDBOOK/gen_hb/gen_hb.pdf, 2016
- [47] http://www.nasa.gov/audience/foreducators/postsecondary/features/F_Lyman_Spitzer.html, 2016
- [48] 张荣辉, 赵秋艳. 航天返回与遥感, 2003, 24: 43
- [49] 顾聚兴. 红外, 2006, 27: 36
- [50] 刘毅. 硕士论文. 重庆: 重庆大学, 2014: 17
- [51] 文小庆. 硕士论文. 天津: 天津师范大学, 2006: 18
- [52] <http://www.spitzer.caltech.edu/mission/38-Science>, 2016
- [53] Gehrz R D, Roelling T L, Werner M W, et al. AIP, 2007, 78: 011302
- [54] Politsch A, Waelkens C, Geis N, et al. A&A, 2010, L2: 518
- [55] 黄亚芳. 天文爱好者, 2013, 50: 53
- [56] 李开封. 天文爱好者, 2009, 7: 34
- [57] Mainzer A K, Eisendardt P, Wright E L, et al. SPIE, 2005, 262: 273
- [58] http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/news/wise20091214.html, 2016
- [59] http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/news/wise20110414.html, 2011
- [60] 黄晨, 王建军, 高昕, 等. 激光与红外, 2013, 43: 3
- [61] <http://jwst.nasa.gov/whois.html>, 2016
- [62] http://www.nasa.gov/externalflash/webb_hubble/, 2016
- [63] <http://www.jwst.nasa.gov/firstlight.html>, 2016
- [64] 许令顺, 张华标, 武义峰. 低温工程, 2013, 3: 52
- [65] 龙亮, 吴立民, 金建高, 等. 见: 第二十六届全国空间探测学术研讨会会议论文集. 北京: 中国空间科学学会, 2013: 43
- [66] Clegg P E. Physica Scripta, 1980, 21: 678
- [67] https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared_window, 2016
- [68] 陈培生. 红外与激光技术, 1992, 1: 16
- [69] http://www.shao.ac.cn/tq/zgxy/201207/t20120726_3621838.html, 2012
- [70] 陈培生. 天文学报, 1982, 23: 1
- [71] 贾正明. 天文文献情报, 1989, 4: 41

Development of the Infrared Space Astronomical Observatory

LI Jia-xi^{1,2}, DENG Jing-song³, XU Chun^{4,5}, WANG Zhong-xiang^{2,5}

(1. Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Research Center for Galaxy and Cosmology, Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Shanghai Institute Of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083 China; 5. Joint Technology Center for Infrared Astronomy of SHAO and SITP, Shanghai 200030, China)

Abstract: Infrared astronomy plays an important role in our understanding of the universe and has thus been a key branch in modern astronomy. In order to avoid the strong thermal

background from the ground and to cool telescopes to the proper low working temperatures, observations from space at infrared wavelengths are generally required. Since 1980's, large international space telescope projects have been developed for infrared studies of the universe. Here we review the major infrared space telescopes and their most significant results. We also provide a brief introduction to the large space telescopes under development, namely the James-Webb Space Telescope (JWST) and Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics (SPICA). From the review and introduction, we discuss and summarize the technology developments and unique observing capabilities contained in these projects. On the basis of the international projects discussed, we propose a possible roadmap for the development of infrared space projects in China.

Key words: infrared astronomy; infrared telescope; observation; sensitivity