

文章编号: 1672-8785(2025)11-0024-12

近中红外空间天文巡天

陈 程^{1,2} 臧 驰^{1,2} 邓燕春³ 张译心^{1,2} 葛 健^{1*}

(1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

2. 中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049;

3. 南开大学, 天津 300071)

摘 要: 近中红外波段蕴含了丰富的天体物理信息, 对研究低温恒星、星系演化以及太阳系小天体等具有重要意义。为克服地球大气吸收、散射和热噪声对地面红外观测的限制, 空间红外巡天任务已成为不可或缺的观测手段。自首个全天红外巡天任务——红外天文卫星(Infrared Astronomical Satellite, IRAS)以来, “光”(AKARI)卫星、广域红外巡天探测器(Wide-field Infrared Survey Explorer, WISE)等任务通过大视场观测积累了海量数据, 在褐矮星普查、活动星系核识别、小行星物理特性测量等领域取得了突破性进展。新发射的宇宙历史、再电离时代和冰探测器分光光度计(Spectro-Photometer for the History of the Universe, Epoch of Reionization and Ices Explorer, SPHEREx)望远镜将首次实现全天近红外光谱巡天, 有望在宇宙大尺度结构、银河系和星系形成历史、星际冰分布以及太阳系小天体和系外行星系统等研究方面提供新的洞察。本文系统回顾了近中红外空间巡天的发展历程, 重点分析了 WISE 与 SPHEREx 任务的科学目标、成就和技术特点, 并展望了该领域的未来发展方向。

关键词: 红外; 天文学; 空间望远镜; 巡天观测

中图分类号: P141.91 **文献标志码:** A

DOI: 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.11.004

收稿日期: 2025-11-20

基金项目(Foundation Items): 太空探源专项

作者简介(Biography): 陈程(2002-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为人工智能和天文大数据、白矮星周围红外超出探测和证认。

*通讯作者(Corresponding Author): 葛健(1966-), 男, 讲席教授, 主要从事系外行星与观测宇宙学、天文技术与仪器以及人工智能在天文大数据方面的应用研究。E-mail: jge@shao.ac.cn

Near- to Mid-Infrared Space Survey

CHEN Cheng^{1,2}, ZANG Chi^{1,2}, DENG Yan-chun³, ZHANG Yi-xin^{1,2}, GE Jian^{1*}

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. College of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The near- to mid-infrared wavelength range contains a wealth of astrophysical information and is crucial for studying cool stars, galaxy evolution, and small bodies in the Solar System. To overcome the limitations imposed by Earth's atmosphere, such as absorption, scattering, and thermal noise, space-based infrared survey missions have become indispensable. Since the first all-sky infrared survey mission, Infrared Astronomical Satellite (IRAS), subsequent missions such as AKARI and Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) have accumulated massive datasets through wide-field observations, leading to breakthroughs in areas including brown dwarf census studies, active galactic nucleus identification, and measurements of asteroid physical properties. The recently launched Spectro-Photometer for the History of the Universe, Epoch of Reionization and Ices Explorer (SPHEREx) will carry out the first all-sky near-infrared spectroscopic survey and is expected to provide new insights into the large-scale structure of the Universe, the formation history of the Milky Way and external galaxies, the distribution of interstellar ices, as well as Solar System small bodies and exoplanetary systems. This article provides a systematic review of the development of near- to mid-infrared space surveys, with a particular focus on the scientific goals, achievements, and technical characteristics of the WISE and SPHEREx missions, and offers an outlook on future advances in this field.

Key words: infrared; astronomy; space telescope; sky survey

0 引言

对于天文观测来说, 近中红外波段蕴含了丰富的信息。这一波段不仅有丰富的分子谱线, 而且低温恒星及星周尘埃辐射峰值、恒星形成区的尘埃以及一些高红移的星系和类星体发出的谱线都落在这一区间。也正因此, 在这一波段开展天文观测对研究低温恒星及星周尘埃的组成与成分、星系和早期宇宙的演化都有着重要的意义。

但由于地球大气红外辐射和大气吸收窗口的影响, 地面的红外观测存在着观测波段受限、信噪比难以提升等诸多问题^[1]。正因如此, 利用卫星在大气层外进行红外观测已经成为了当前的主流做法。

与点观测相比, 巡天任务能对整个天空的大量样本进行观测与分析, 同时了解整体趋势并发现其中稀少的样本。因此, 红外巡天任务已经成为当今天文观测中的一个非常重要的组成部分。

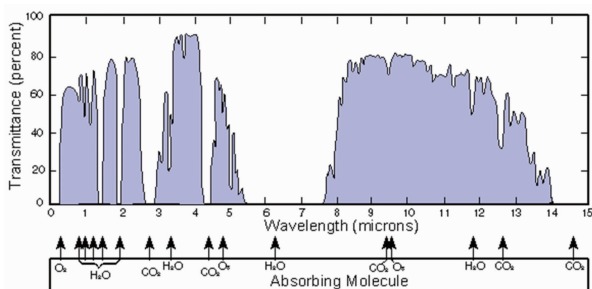
本文首先介绍红外空间巡天观测的发展历程以及当前的重要成果, 接着分别介绍两个重要的在近中红外波段工作的空间巡天项目——WISE 和 SPHEREx 及其主要研究领域, 最后总结当前空间红外巡天的成果和尚且存在的问题, 并讨论未来这一领域的发展方向。

1 红外空间观测的历史与背景

1.1 从地面到空间的演进

地面红外观测主要有两大根本性的物理限制: 一是大气中的水蒸气、二氧化碳等成分会强烈吸收绝大部分来自宇宙天体的红外辐射, 致使观测仅能在少数几个狭窄的“大气窗口”进行(图 1 所示为地球大气对红外光的吸收情况); 二是大气及望远镜自身的热辐射会产生强烈的热辐射背景噪声, 严重制约探测灵敏度。

早期利用气球、探空火箭和机载平台(如柯伊伯机载天文台(Kuiper Airborne Observatory, KAO)^[3])进行观测的探索验证了空间探测

图 1 大气对红外光的吸收情况^[2]Fig. 1 Atmospheric absorption of infrared light^[2]

(规避大气干扰)的潜力,但仍受限于短暂的观测时间和残余大气干扰。真正实现革命性突破的是 1983 年发射的 IRAS 卫星,它所搭载的液氮制冷望远镜有效规避了大气吸收与自身热噪声。在为期 10 个月的任务中,IRAS 在 12 μm 、25 μm 、60 μm 和 100 μm 四个独立的宽波段上完成了首次红外全天巡天,覆盖了 96% 的天区^[4]。IRAS 不仅发现了超过 35 万个红外源,更开创了对恒星周尘埃盘和亮红外星系(Luminous Infrared Galaxies, LIRGs)等全新物理现象的研究。这标志着红外空间天文学新纪元的到来,为后续任务的发展奠定了坚实基础^[5-7]。

1.2 重要里程碑任务

IRAS 开创了红外全天巡天的先河,此后的巡天任务沿着提升灵敏度、分辨率和波谱覆盖度的方向不断推进。地面的 2 微米全天巡天(Two Micron All-Sky Survey, 2MASS)任务(1997~2001)在近红外波段为 IRAS 发现的众多红外源提供了关键的位置和亮度基准,其建立的恒星参考框架至今仍是天文学研究的基石^[8]。在空间领域,日本于 2006 年发射的 AKARI 卫星作为 IRAS 的直接继承者,进一步提升了巡天的灵敏度与空间分辨率^[9]。而美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)于 2009 年发射的 WISE 望远镜则实现了数量级式的灵敏度飞跃,使其得以探测到宇宙中极冷极暗的天体,极大地拓展了我们对近邻宇宙冷暗天体的认知^[10]。

巡天任务产出的海量数据也催生了对其中

一些关键科学目标进行精细研究的需求。为此,一系列天文台级任务通过高精度的指向观测,构成了至关重要的补充。欧洲空间局(European Space Agency, ESA)于 1995 年发射的红外空间天文台(Infrared Space Observatory, ISO)首次将光栅光谱仪应用至红外空间探测,开启了对天体物理化学过程的精细研究^[11]; NASA 于 2003 年发射的斯皮策空间望远镜(Spitzer Space Telescope, SST)以其卓越的灵敏度深入解析了巡天发现的原行星盘和遥远星系^[12-14]; ESA 于 2009 年发射的赫歇尔空间天文台(Herschel Space Observatory, HSO)则凭借其高角分辨率,精细刻画了恒星形成区中的致密结构^[15-16]。这种“巡天普查”与“精测定性”相结合的研究模式,已成为红外天文学取得丰硕成果的关键范式。

1.3 当前成果概览

历次红外巡天任务产出的海量数据集,系统性地回答了天体物理学中的若干基本问题,并开辟了全新的研究领域。

在低质量天体物理领域,2MASS 巡天发现了数百颗 L 型和 T 型褐矮星,随后 WISE 更是发现了温度低至室温的 Y 型褐矮星。这些发现提供了褐矮星的大规模统计样本,并建立了光谱分类,最终在观测上贯通了从最低质量恒星到巨行星的质量序列^[17-20]。此外,这些巡天任务还完成了对太阳系近邻(约 20 pc 内)低质量天体的普查,发现了 Luhman 16AB (2013)等系统^[21]。

在星系演化领域,IRAS 首次发现了 LIRGs 和超亮红外星系(Ultra-Luminous Infrared Galaxies, ULIRGs)^[22];数十年后,WISE 发现了更为极端的热尘埃遮蔽星系(Hot Dust-Obscured Galaxies, Hot DOGs)并识别出数百万个的活动星系核(Active Galactic Nucleus, AGN)候选体^[23-24]。这些发现揭示了被尘埃遮蔽的“隐形宇宙”,并最终证实宇宙中约一半的星光能量都被尘埃吸收并以红外光形式再辐

射, 从根本上修正了我们对宇宙能量的认知^[25]。

在行星科学领域, IRAS 于 1984 年探测到织女星(Vega)周围的红外超信号, 后被确认为首个“碎片盘”, 为“行星诞生于尘埃盘”的理论提供了首个直接的观测证据^[26]。此外, 它还发现了我们太阳系内部由小行星碰撞产生的黄道尘埃带。后继的红外巡天任务(如 WISE)识别出数以万计的恒星周盘的候选体, 使得对行星盘的演化和寿命进行统计性研究成为可能, 从而将该领域从理论假说转变为一门有坚实观测基础的精确科学^[27-28]。

2 WISE——成果丰硕的红外空间巡天任务

2.1 任务概述

作为一项覆盖全天的近/中红外空间巡天任务, WISE 于 2009 年发射入轨(在太阳同步极地轨道上工作), 并于 2024 年 7 月 31 日完成最终数据采集。望远镜配备四个科学波段 W1~W4, 在当时实现了前所未有的中红外全天灵敏度。WISE 在四个红外波段(3.4 μm 、4.6 μm 、12 μm 和 22 μm)内勘测了整个天空, 直到 2010 年 9 月冷却望远镜的冷冻氦耗尽, 在运行过程中取得了许多重要的科学突破, 绘制了地球周围各个方向的宇宙地图。在 2011 年至 2013 年 12 月的休眠期后, 它被重新分配了一项名为近地天体广域红外巡天探测器(Near-Earth Object Wide-field Infrared Survey Explorer, NEOWISE)的新任务, 重启后持续以两个最短波长波段采集数据。凭借其长期观测能力与红外灵敏度, WISE 不仅提供了高均匀度的单历元全空覆盖, 也在部分天区形成了时间域基线, 为从太阳系到外银河的多主题研究奠定了数据基础^[29]。典型角分辨率在 W1、W2 波段为数角秒量级, W3、W4 波段则更粗一些, 点源灵敏度与位置精度随波段而异(见表 1)。

表 1 四个波段性能^[10]

Table 1 Performance of the four bands^[10]

波段	$\lambda_{\text{eff}}/\mu\text{m}$	FWHM/"	典型 5σ 点源深度
W1	3.4	~ 6	$< 0.08 \text{ mJy}$
W2	4.6	~ 6	$< 0.11 \text{ mJy}$
W3	12	$\sim 6-12$	$< 1 \text{ mJy}$
W4	22	~ 12	$< 6 \text{ mJy}$

2.2 主要研究领域及成果

2.2.1 褐矮星与近邻恒星

WISE 在 2010 年 1 月至 2011 年 2 月期间对天空进行多次红外观测, 每次为期六个月的巡天中在每个可工作的波段上进行 8.8 s 的曝光观测(观测间隔为 1.5 h)。这种观测方式从黄道面附近持续 12 h, 一直延伸到黄道极点地区。WISE 任务期间发现了许多重要的天体, 包括距离地球最近且温度最低的棕矮星^[21]。冷褐矮星在 3~5 μm 波段呈现显著甲烷吸收与连续谱形态变化, 使其在 W1~W2 颜色上异常偏红, 而在更长波段则相对微弱。基于 WISE/NEOWISE 的全天中红外巡天, 人们在 3.4 μm 和 4.6 μm 波段对天空进行了多轮重复观测, 并将多年数据联合建成 CatWISE 预览星表, 为约十亿个源给出了位置与自行测量, 比 AllWISE(一个基于 WISE 任务全部天文数据构建的红外源星表)更深、时间基线更长、自行精度更高。在此基础上, 利用红外颜色选源并结合高自行筛选与机器学习方法, 极大提高了对褐矮星的探测能力; 已经发现并确认了一批极冷褐矮星(包括若干 Y 型矮星候选), 同时系统发现了大量高自行、低光度的近邻恒星与亚恒星, 显著丰富了太阳邻域高自行恒星和亚恒星的样本^[30]。

2.2.2 红外星系与近邻星系

WISE 的中红外颜色能有效区分 AGN 与恒星形成主导的星系, 通过 R90 标准判断(当 $W2 < 13.86$ 星等时, $W1 - W2 > 0.65$; 对于更暗的天体, 阈值随 $W2$ 星等变暗而指数增加), 可以在全天范围内系统性地筛选 AGN 候选体。这显著弥补了光学选择方法对被遮蔽的活动星

系核的遗漏问题。相关研究(如 LASr 计划)利用 WISE 颜色结合多波段数据,构建出了迄今最完整的近邻宇宙 AGN 样本^[31]。

WISE 的 W3 和 W4 波段光度与总红外光度具有强相关性,可有效校准星系的恒星形成率。研究表明,W3 波段与星系的总红外光度(L_{IR})的关系尤为紧密, 1σ 散射仅 0.15 dex,使其成为近邻星系及大尺度巡天中可靠的恒星形成率(Star Formation Rate, SFR)示踪剂,且对金属丰度变化不敏感^[32]。

在此基础上,WISE 数据催生了大规模 AGN 目录(包括 R90 和 C75 目录等,含有数百万个候选体),优化了数据的可靠性和完备性,支持多样化的科学研究,比如识别高变源、发现类星体群以及探讨 AGN 与宿主星系的相互作用等^[33]。

2.2.3 小行星与太阳系天体

WISE 任务通过对全天中红外巡天为小行星及其他太阳系小天体研究带来了极大的突破。该任务首次在热红外波段实现了对近地天体和主带小行星的大规模、系统性普查,使得研究者能够在不依赖可见光反照率假设的情况下,直接估算小天体直径,并反推出几何反照率,大幅减小了仅由光度推算尺寸时的系统不确定性^[34]。

NEOWISE 再启动后持续多年监测,使得小天体物理参数库在时间上得以延伸,任务期间共探测超过 15.7 万颗小行星。基于这些数据,研究者们构建了目前规模最大的主带小行星、近地小行星、特洛伊族和共振族直径-反照率样本,为小行星族群的大小分布、组成成分异以及动力学演化研究提供了统计基础^[35]。同时也已基本完成对千米级近地天体的普查,在潜在威胁小行星尺寸与热性质的快速评估方面发挥了重要作用,成为行星防御和太阳系小天体总体研究中不可或缺的数据来源^[36]。

2.2.4 行星碎片盘与星际尘埃

恒星周围的尘埃是行星系统存在与演化的重要标志。对前主序星和主序星而言,这些尘

埃记录了行星形成及小天体碰撞等持续过程^[37];而在白矮星阶段观测到的尘埃,则揭示了残余行星系统在后主序演化中经历的破坏与再分布过程^[38]。对恒星周边尘埃造成的红外超出的诊断,本质上依赖于其光谱能量分布在中红外波段相对于纯光球模型的系统性偏离。

WISE 的 W3 与 W4 波段恰位于典型温暖尘埃(如温度约为 100~1000 K)热辐射的峰值区域,因此对于探测主序星周围的碎片盘、原行星系形成过程中产生的尘埃结构,以及白矮星周围由潮汐破碎行星物质形成的致密尘埃环均具备较高的探测灵敏度。

2.3 局限性与后续任务的补充作用

WISE 巡天数据的核心局限性源于其空间分辨率与灵敏度。其约 6" 的角分辨率在拥挤区域(如银河系盘面或致密星系场)易导致严重的源混淆,即多个天体在光束内无法分辨,造成测光不准或者产生虚假的红外超信号。此外,其最长波段 W4 的灵敏度相对有限,难以探测低光度或高红移宇宙中的冷尘埃辐射。对于延展源,WISE 的点源处理模型会将其分解为多个点源,影响总光度的准确测量^[39]。

后续空间与地面观测设施在多个维度上对这些局限提供了关键补充。SST 望远镜^[12]依托更高的角分辨率与更强的红外成像能力,在确认 WISE 弱源、排除源混叠、精确测定致密或拥挤环境中的通量方面发挥了重要作用。

詹姆斯·韦布空间望远镜(James Webb Space Telescope, JWST)^[40]则进一步将红外观测能力推进至 WISE 无法覆盖的参数空间,其突出的灵敏度和光谱分辨率不仅能够对 WISE 发现的极端或异常源进行精细的成像与光谱诊断,也能揭示 WISE 探测极限之外的新类天体。

与此同时,斯隆数字化巡天(Sloan Digital Sky Survey, SDSS)和时空遗珍巡天(Legacy Survey of Space and Time, LSST)等大型地面巡天任务,以及“盖亚”(Gaia)望远镜的高精度天体测量,为 WISE 源提供了统一的光学对

应体、距离尺度以及多波段测光,从而显著提升了源分类、物理量反演与统计研究的可靠性,为多波段联合分析构建了更加稳健的基础。

3 SPHEREx——新一代红外巡天任务

3.1 任务介绍

SPHEREx 是一个由 NASA 主导的空间望远镜项目,于 2025 年 3 月 18 日发射升空。它是当前首个在红外波段进行的光谱巡天项目。表 2 展示了 SPHEREx 各个波段的波长和对应的分辨率。这一分辨率使得 SPHEREx 得以分辨水和甲烷等关键谱线,能够较好地实现对星际冰存在性和丰度的探测^[41]。

表 2 SPHEREx 各个波段的波长和对应的分辨率^[42]

Table 2 Wavelengths and corresponding resolutions for each band of SPHEREx^[42]

波段	最短波长/ μm	最长波长/ μm	分辨率
B1	0.75	1.12	41
B2	1.10	1.65	41
B3	1.63	2.44	41
B4	2.40	3.85	35
B5	3.81	4.43	110
B6	4.41	5.01	130

与此同时, SPHEREx 也有着较高的探测灵敏度。预发射模拟表明,在 5σ 条件下,对于全天点源可以在 $0.75\sim 3.8\ \mu\text{m}$ 波段达到 18.5~19 等的极限星等(AB 星等),与“欧几里得”(Euclid)空间望远镜的灵敏度相当。在 $3.8\sim 5.0\ \mu\text{m}$ 波段的灵敏度稍差,极限星等在 16.6~18 等。而对于南北黄极处的深场,灵敏度可较单次观测高 10~20 倍^[43]。

在光学结构上, SPHEREx 搭载了两个焦平面组件(Focal Plane Assemblies, FPA),每个组件均由三个线性渐变滤光组(Linear Variable Filters, LVF)和其后的碲镉汞(HgCdTe)红外探测阵列组成,实现了对不同波长光流量的探测。在观测过程中,二向分色镜将入射光分为长波段和短波段两部分,使其同时进入两个焦平面组件;望远镜通过调整指向使得入射光

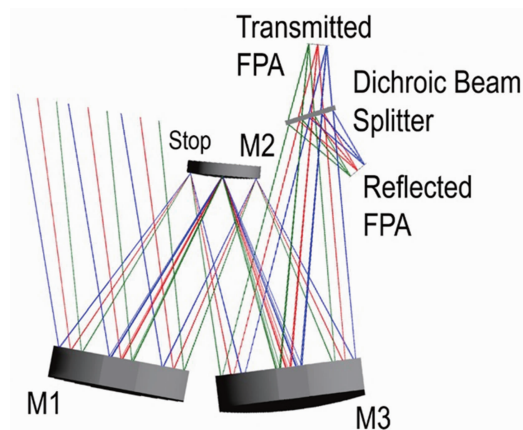


图 2 SPHEREx 望远镜的光路设计^[41]

Fig. 2 Optical path design of SPHEREx telescope^[41]

依次经过红外探测阵列,实现对红外光谱的测量。图 2 所示为 SPHEREx 望远镜的光路设计。

SPHEREx 的主要目标包括探索宇宙膨胀、大尺度结构、星系演化以及寻找宇宙中水和生物分子冰的存在。在预期两年的任务中, SPHEREx 将完成四次全天巡天,为宇宙学、星系演化、星际尘埃、恒星科学和小行星等领域研究提供重要数据支持^[42]。

3.2 主要研究领域及预期成果

3.2.1 宇宙学和暗物质研究

在宇宙学方面, SPHEREx 主要聚焦于宇宙的大尺度结构和再电离过程的研究。SPHEREx 可以利用模板拟合方法结合星系连续谱和发射线信息,从而对大约 1900 万个星系进行高精度红移测量。其精度可达到 $\sigma_z < 0.003(1+z)$ ^[44]。此外,现有研究已经表明, SPHEREx 可以在不获得单个星系光谱的情况下通过光谱强度分布(Spectral Energy Distribution, SED)拟合和强度映射(Intensity Mapping, IM)方法对红移在 1~4 之间的星系进行大尺度分布的测量^[45]。

通过对宇宙大尺度结构的观测,配合功率谱和双谱分析, SPHEREx 的多波段数据能够联合约束多个原初非高斯性(Primordial Non-Gaussianity, PNG)相关参数,并将其中局域性参数的不确定性降低一个数量级,获得迄今为

止最精确的宇宙原初非高斯性测量^[46-47]，从而约束宇宙暴胀时期的物理过程。

对宇宙再电离过程的研究也是 SPHEREx 的一个重要领域。SPHEREx 将通过 $0.75 \sim 5 \mu\text{m}$ 全天近红外光谱强度测绘探测数十亿个微弱星系的整体辐射信号，在更大的尺度上追踪早期宇宙的演化，为宇宙再电离时代(Epoch of Reionization, EoR; 红移 z 约为 $6 \sim 15$)提供全新的观测视角^[48]；同时作为红外背景与 21 cm 中性氢观测形成功率谱^[49]，共同约束其再电离的中性分数演化。

轴子类粒子(Axion-Like Particles, ALPs)是暗物质的有力候选者之一。SPHEREx 的大视场、近红外观测范围使其有能力探测到质量在 $0.5 \sim 3 \text{ eV}$ 范围内的 ALPs 衰变产生的光子，并对这种粒子的性质进行约束^[50-51]。

3.2.2 冰和星际尘埃探测

恒星与行星形成区的冰是行星中水和有机分子的重要来源，目前已有大约 200 个银河系中相对明亮的冰吸收源被 AKARI 等任务观测到^[52]。而 SPHEREx 凭借其红外巡天能力，预期将获得超过 70 万条冰吸收光谱，覆盖恒星和行星的所有演化阶段，解答恒星系统中冰演化过程的一系列问题^[53]。

SPHEREx 在对星系中尘埃的探测上也有其独特的优势。它可以对数十万个临近星系的多环芳烃(Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, PAH)的发射强度进行测量^[54]，指示这些星系中纳米级尘埃颗粒的分布情况和辐射特性。而对于更暗的星系，SPHEREx 也可以利用特征强度分布图对整个星系群体的综合 PAH 发射进行建模^[55]，从而帮助我们研究大尺度上恒星的形成过程和星系中尘埃的演化。

3.2.3 恒星和褐矮星

SPHEREx 预计将在任务中获得超过一亿条的恒星光谱。这使得它可以作为 Gaia 等任务的重要补充，帮助确定恒星质量等重要参数^[56]，构建银河系中恒星质量分布的图景。 $0.75 \sim 5.0 \mu\text{m}$ 的观测波段也使得 SPHEREx 在

研究低温恒星和褐矮星方面有着独特的优势。预期获得的数百条褐矮星光谱将显著扩展当前的样本，推进对褐矮星大气和银河系历史的研究^[57-58]。

尽管行星碎片盘大多温度较低，但目前的理论分析表明，SPHEREx 足以探测到恒星周围极端亮的碎片盘和剧烈的行星撞击事件^[57]，将为研究系外行星系统的演化提供珍贵的样本。同时，SPHEREx 产生的红外光谱也使得它可以利用贫金属星缺少 $2.3 \mu\text{m}$ 和 $4.6 \mu\text{m}$ 处分子吸收的特征^[59]，快速筛选出这些早期恒星的样本并排除星周盘或热尘埃的影响，对银河系的历史和化学组成进行限制^[57]。

3.2.4 小行星和彗星

对小行星和彗星的研究同样是 SPHEREx 的重要科学目标之一。它预计将获得约一万个小行星的高质量光谱，从而将现有样本扩展一个数量级^[60]。同时，SPHEREx 的光谱观测还将覆盖一系列诊断性特征，包括水冰、有机物、水合矿物等^[61]。这些特征将支持对小行星天体分类、表面组成和彗星活动性等方面的研究并帮助计算这些天体的轨道，为小行星防御提供协助^[62]。

目前，SPHEREx 已经对星际彗星 3I/ATLAS 进行了观测，发现其中存在较强的水冰吸收和二氧化碳富集特征^[63]。这被认为是经历了十亿年级别的宇宙线处理的结果^[64]。这些模拟和实际观测结果都说明了 SPHEREx 在小行星和彗星观测方面的强大能力，因此它具有广阔前景。

3.3 SPHEREx 与其他任务的互补

除了本身的优良性能之外，SPHEREx 提供的独特红外光谱和快速的数据释放使其可以非常有效地与其他任务进行协同观测^[42]，进一步提升结果的精度。

在观测模式上，SPHEREx 可以很好地与 JWST 等高精度点观测进行配合，在 SPHEREx 通过巡天找到高价值目标后，JWST 可以快速进行高精度、高分辨率的后随观测，快速确

定更精确的物理性质^[42]。

在工作波段上, SPHEREx 可以与不同波段的望远镜进行联合观测, 共同约束天体和宇宙演化过程中的各种参数, 比如与 Gaia 望远镜协同约束恒星质量^[56], 与平方公里阵列 (Square Kilometre Array, SKA) 望远镜协同约束中性氢分数演化^[49]等。

不同研究方法的结合也可以带来更好的物理约束。例如, 将 SPHEREx 的线强度映射和 CSST、LSST 的弱引力透镜调查进行交叉相关, 可以对类轴子粒子的质量和与光子的耦合常数进行更为精确的估计^[51,65]; 也可以把 SPHEREx 的红外超数据和系外地球 (Earth 2.0, ET) 巡天的各类恒星 (包括白矮星) 的光变数据结合研究恒星周围的伴星、碎片盘以及尘埃吸积等^[66-70]。

4 结束语

WISE 卫星以空前的灵敏度完成中红外全天空巡天, 提供高质量的 $3.4\sim 22\ \mu\text{m}$ 图像, 并在恒星、小天体和河外领域取得重要成果。该任务探测数十万小行星 (其中三千余颗获正式编号), 并发现多颗彗星和邻近棕矮星。其红外观测揭示年轻恒星盘、白矮星盘及若干星云, 同时高效识别 AGN 和 LIRGs; 长期时域数据还发现多类红外瞬变, 奠定其在红外天文学中的重要地位。

作为 WISE/NEOWISE 之后的重要后续任务, SPHEREx 将在 $0.75\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段开展首次真正意义上的全天空光谱巡天。在两年任务周期内, SPHEREx 将为全天空每个 $6.2''\times 6.2''$ 像素获取 $0.75\sim 5\ \mu\text{m}$ 的低分辨率光谱。其中 $0.75\sim 2.42\ \mu\text{m}$ 的分辨率为 $R\approx 41$, $2.42\sim 3.82\ \mu\text{m}$ 为 $R\approx 35$, $3.82\sim 4.42\ \mu\text{m}$ 为 $R\approx 110$, $4.42\sim 5.00\ \mu\text{m}$ 为 $R\approx 130$ 。其 5σ 灵敏度约为 $AB\approx 19\sim 19.5$, 并能以高信噪比测量 2MASS 中所有源的光谱, 同时对 WISE 大部分源实现光谱探测。

在科学目标方面, SPHEREx 将利用其独特的全天空近红外光谱数据, 实现三大核心科

学任务: (1) 通过大尺度结构的精确测量探索早期宇宙的暴涨物理; (2) 构建银河系中恒星形成、分子云与冰的全面普查; (3) 对星系、恒星与太阳系天体进行统一的光谱诊断, 为红外天文学提供前所未有的基础数据库。

尽管 WISE 和 SPHEREx 在全天空普查中具有重要地位, 但二者在观测能力上仍存在明显局限。WISE 仅在 $3.4\sim 22\ \mu\text{m}$ 的四个宽带上提供成像数据, 缺乏光谱信息, 且空间分辨率 ($6''\sim 12''$) 和灵敏度有限, 使其难以对复杂或致密环境进行精细刻画, 也无法提供对关键物理过程的深入诊断。SPHEREx 虽将实现 $0.75\sim 5\ \mu\text{m}$ 的首次全天空光谱巡天, 但其光谱分辨率较低 ($R\approx 35\sim 130$)、空间采样较粗 ($6.2''$) 且灵敏度有限 ($AB\approx 19\sim 19.5$), 不适用于高红移星系、精细谱线分析或深场研究。因此, 两者均属于“广而浅”的普查型任务。

与 WISE 和 SPHEREx 相比, 目前正在运行的大型空间天文项目 JWST 与 Euclid 在空间分辨率、灵敏度以及光谱诊断能力方面具有显著优势。JWST 凭借其高空间分辨率和覆盖近红外至中红外的深度光谱, 可精细解析致密天区、弱光源及尘埃主导的星际环境, 为行星系统、星系形成及早期宇宙提供远超浅层巡天任务的物理约束。Euclid 则通过其大视场可见光与近红外成像和光谱功能, 实现了对宇宙大尺度结构、弱透镜形变和星系统计性质的高精度测量, 显著提升了红移、星系形态和环境效应的刻画能力。

然而, 尽管 JWST 与 Euclid 能在深度观测和高分辨成像方面弥补 WISE 与 SPHEREx 的不足, 但它们并不能完全取代后者所提供的大面积、均一性的全天空普查能力。JWST 受限于狭小视场和观测时间安排, 不适合构建大样本统计或开展本地宇宙到高红移的系统普查; Euclid 虽覆盖面积广, 但波段范围有限且缺乏中红外能力, 也无法提供 SPHEREx 式的连续光谱信息。因此, 这两类任务互相补充, 任何单一任务都无法独自覆盖从大样本统计到高分

辨物理诊断的全部需求。

南希·格雷斯·罗曼空间望远镜(Nancy Grace Roman Space Telescope, Roman)与未来的宜居世界天文台(Habitable Worlds Observatory, HWO)也将在空间红外天文扮演关键角色。Roman 将以其大视场、高分辨率近红外成像以及高对比度星冕仪,为全天空范围内的系外行星候选体与行星系统提供更精确的统计普查和直接成像能力。它将补充 SPHEREx 的广域光谱数据,为行星系统的分布、年龄、金属丰度以及盘结构提供更高空间解析度的全域约束。此外,Roman 的深度广域成像与弱透镜能力也将在河外星系研究中发挥重要作用,可用于构建大规模星系普查、约束星系暗物质晕性质,并推动宇宙学参数测量达到新精度。

HWO 作为未来的旗舰天文台,其核心目标是实现类地宜居行星的直接成像与大气光谱表征。这将为全天空范围内的行星宜居性研究带来革命性突破。在河外领域,HWO 的高灵敏度连续光谱能力有望捕捉邻近星系的细致结构、星际介质状态以及恒星形成活动,从而极大地推动人们对星系演化物理过程的理解。

参考文献

- [1] LOMBARDI G, MASON E, LIDMAN C, et al. A study of NIR atmospheric properties at Paranal Observatory [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, **528**: A43.
- [2] Infrared window [Z/OL]. (2025-10-13) [2025-11-14]. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Infrared_window&oldid=1316529259.
- [3] THRONSON H A, ERICKSON E F. Airborne Astronomy Symposium [C/OL]//Airborne Astronomy Symposium. Moffett Field: NASA Ames Research Center, 1985. <https://ntrs.nasa.gov/downloads/19850009539>.
- [4] NEUGEBAUER G, HABING H J, VAN DUINEN R, et al. The Infrared Astronomical Satellite (IRAS) mission [J]. *The Astrophysical Journal*, 1984, **278**: L1.
- [5] LOW F J, YOUNG E, BEINTEMA D A, et al. Infrared cirrus - New components of the extended infrared emission [J]. *The Astrophysical Journal*, 1984, **278**: L19.
- [6] SOIFER B T, HOUCK J R, NEUGEBAUER G. The IRAS View of the Extragalactic Sky [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1987, **25**: 187-230.
- [7] BEICHMAN C A. The IRAS View of the Galaxy and the Solar System [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1987, **25**: 521-563.
- [8] SKRUTSKIE M F, CUTRI R M, STIENING R, et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) [J]. *The Astronomical Journal*, 2006, **131**(2): 1163-1183.
- [9] MURAKAMI H, BABA H, BARTHEL P, et al. The Infrared Astronomical Mission AKARI [J]. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2007, **59**(sp2): S369-S376.
- [10] WRIGHT E L, EISENHARDT P R M, MAINZER A K, et al. The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial on-orbit Performance [J]. *The Astronomical Journal*, 2010, **140**(6): 1868-1881.
- [11] KESSLER M F, STEINZ J A, ANDEREGG M, et al. The Infrared Space Observatory (ISO) mission [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 1996, **315**: L27-L31.
- [12] WERNER M W, ROELLIG T L, LOW F J, et al. The Spitzer Space Telescope Mission [J]. *The Astronomical Journal*, 2004, **154**(1): 1-9.
- [13] SILVERSTONE M D, MEYER M R, MAMAJEK E E, et al. Formation and Evolution of Planetary Systems (FEPS): Primordial Warm Dust Evolution from 3 to 30 Myr around Sun-like Stars [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **639**(2): 1138-1146.
- [14] SOIFER B T, HELOU G, WERNER M. The Spitzer View of the Extragalactic Universe [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2008, **46**: 201-240.
- [15] PILBRATT G L, RIEDINGER J R, PASSVOGEL T, et al. Herschel Space Observatory: An

- ESA facility for far-infrared and submillimeter astronomy [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2010, **518**: L1.
- [16] ANDRÉ P, FRANCESCO J D, WARD-THOMPSON D, et al. From Filamentary Networks to Dense Cores in Molecular Clouds: Toward a New Paradigm for Star Formation [J/OL]. *arXiv*: 1312.6232, 2013.
- [17] KIRKPATRICK J D, REID I N, LIEBERT J, et al. Dwarfs Cooler than "M": The Definition of Spectral Type "L" Using Discoveries from the 2-Micron All-Sky Survey (2MASS) [J]. *The Astronomical Journal*, 1999, **519**(2): 802–833.
- [18] CUSHING M C, KIRKPATRICK J D, GELINO C R, et al. The Discovery of Y Dwarfs using Data from the Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) [J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **743**(1): 50.
- [19] KIRKPATRICK J D. New Spectral Types L and T [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, **43**: 195–245.
- [20] BURGASSER A J, KIRKPATRICK J D, BROWN M E, et al. Discovery of Four Field Methane (T-Type) Dwarfs with 2MASS [J]. *The Astrophysical Journal*, 1999, **522**(1): L65–L68.
- [21] LUHMAN K L. Discovery of a Binary Brown Dwarf at 2 Parsecs from the Sun [J]. *The Astrophysical Journal*, 2013, **767**(1): L1.
- [22] SOIFER B T, SANDERS D B, MADORE B F, et al. The IRAS bright galaxy sample. II - The sample and luminosity function [J]. *The Astrophysical Journal*, 1987, **320**: 238.
- [23] EISENHARDT P R M, WU J, TSAI C W, et al. The First Hyper-Luminous Infrared Galaxy Discovered by WISE [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, **755**(2): 173.
- [24] STERN D, ASSEF R J, BENFORD D J, et al. Mid-infrared Selection of Active Galactic Nuclei with the Wide-field Infrared Survey Explorer. I. Characterizing WISE-Selected Active Galactic Nuclei in COSMOS [J]. *The Astrophysical Journal*, 2012, **753**(1): 30.
- [25] LAGACHE G, PUGET J L, DOLE H. Dusty Infrared Galaxies: Sources of the Cosmic Infrared Background [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2005, **43**: 727–768.
- [26] AUMANN H H, BEICHMAN C A, GILLET F C, et al. Discovery of a shell around Alpha Lyrae [J]. *The Astrophysical Journal*, 1984, **278**: L23.
- [27] TRILLING D E, BRYDEN G, BEICHMAN C A, et al. Debris Disks around Sun-like Stars [J]. *The Astrophysical Journal*, 2008, **674**(2): 1086–1105.
- [28] HUGHES A M, DUCHÊNE G, MATTHEWS B C. Debris Disks: Structure, Composition, and Variability [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2018, **56**(1): 541–591.
- [29] Paz M. A Submillisecond Fourier and Wavelet-based Model to Extract Variable Candidates from the NEOWISE Single-exposure Database [J]. *The Astronomical Journal*, 2024, **168**(6): 241.
- [30] Eisenhardt P R M, Marocco F, Fowler J W, et al. The CatWISE Preliminary Catalog: Motions from WISE and NEOWISE Data [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2020, **247**(2): 69.
- [31] Asmus D, Greenwell C L, Gandhi P, et al. Local AGN Survey (LASr): I. Galaxy sample, infrared colour selection and predictions for AGN within 100 Mpc [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **494**(2): 1784–1816.
- [32] Cluver M E, Jarrett T H, Dale D A, et al. Calibrating Star Formation in WISE Using Total Infrared Luminosity [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **850**(1): 68.
- [33] Assef R J, Stern D, Noirot G, et al. The WISE AGN Catalog [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2018, **234**(2): 23.
- [34] Masiero J R, Mainzer A K, Grav T, et al. Main Belt Asteroids with WISE/NEOWISE I: Preliminary Albedos and Diameters [J]. *The*

- Astrophysical Journal*, 2011, **741**(2): 68.
- [35] Masiero J R, Nugent C, Mainzer A K, et al. NEOWISE Reactivation Mission Year Three: Asteroid Diameters and Albedos [J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, **154**(4): 168.
- [36] Satpathy A, Mainzer A, Masiero J R, et al. NEOWISE Observations Of The Potentially Hazardous Asteroid [J/OL]. *arxiv*: 2204.05412, 2022.
- [37] Kennedy G M, Wyatt M C. Confusion limited surveys: using WISE to quantify the rarity of warm dust around Kepler stars [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, **426**(1): 91–107.
- [38] Debes J H, Hoard D W, Wachter S, et al. The WIRED Survey. II. Infrared excesses in the SDSS DR7 white dwarf catalog [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2011, **197**(2): 38.
- [39] Dennihy E, Farihi J, Fusillo N P G, et al. A Word to the WISE: Confusion is Unavoidable for WISE-selected Infrared Excesses [J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, **891**(1): 97.
- [40] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The James Webb Space Telescope [J]. *Space Science Reviews*, 2006, **123**(4): 485–606.
- [41] Korngut P, Bock J J, Akeson R, et al. SPHEREx: an all-sky NIR spectral survey [C]. *SPIE*, 2018, **10698**: 106981U.
- [42] Crill B P, Werner M, Akeson R, et al. SPHEREx: NASA's Near-Infrared Spectrophotometric All-Sky Survey [C]. *SPIE*, 2020, **11443**: 114430I.
- [43] Crill B P, Bach Y P, Bryan S A, et al. The SPHEREx Sky Simulator: Science Data Modeling for the First All-sky Near-infrared Spectral Survey [J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2025, **281**(1): 10.
- [44] Feder R M, Masters D C, Lee B, et al. The Universe SPHEREx Will See: Empirically Based Galaxy Simulations and Redshift Predictions [J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **972**(1): 68.
- [45] Fonseca J, Silva M B, Santos M G, et al. Cosmology with intensity mapping techniques using atomic and molecular lines [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2017, **464**(2): 1948–1965.
- [46] Heinrich C, Doré O, Krause E. Measuring f_{NL} with the SPHEREx multitracers redshift space bispectrum [J]. *Physical Review D*, 2024, **109**(12): 123511.
- [47] Shiveshwarkar C, Brinckmann T, Loverde M. Constraining multi-field inflation using the SPHEREx all-sky survey power spectra [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2024, **2024**(5): 94.
- [48] Ambrose A E, Visbal E, Kulkarni M, et al. Radiative transfer simulations of Ly α intensity mapping during cosmic reionization including sources from galaxies and the intergalactic medium [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2025, **2025**(8): 80.
- [49] Sun G, Lidz A, Chang T C, et al. LIMFAST. III. Timing Cosmic Reionization with the 21 cm and Near-infrared Backgrounds [J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **981**(1): 92.
- [50] Regis M, Taoso M, Terol Calvo J. Searching for axion-like particles with SPHEREx [J]. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2025, **2025**(5): 1–9.
- [51] Shirasaki M. Searching for eV-mass axionlike particles with cross correlations between line intensity and weak lensing maps [J]. *Physical Review D*, 2021, **103**(10): 103014.
- [52] Ashby M L N, Hora J L, Lakshmipathaiha K, et al. The SPHEREx Target List of Ice Sources (SPLICES) [J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **949**(2): 105.
- [53] Melnick G, Ashby M, Hora J, et al. SPHEREx Interstellar Ices Science Theme [J]. *Bulletin of the AAS*, 2024, **57**(2): 131.
- [54] Zhang E, Faisst A L, Crill B P, et al. The Potential of the SPHEREx Mission for Characterizing Polycyclic Aromatic Hydrocarbon 3.3 μ m Emission in Nearby Galaxies [J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **992**(1): 3.

- [55] Cheng Y T, Hensley B S, Lai T S Y. Feature Intensity Mapping: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Emission from All Galaxies Across Cosmic Time [J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **993**(1): 30.
- [56] Lee J H, Kim M, Kim T, et al. Resolved Stellar Mass Estimation of Nearby Late-type Galaxies for the SPHEREx Era: Dependence on Stellar Population Synthesis Models [J]. *The Astronomical Journal*, 2025, **169**(3): 185.
- [57] Doré O, Werner M W, Ashby M, et al. Science Impacts of the SPHEREx All-Sky Optical to Near-Infrared Spectral Survey: Report of a Community Workshop Examining Extragalactic, Galactic, Stellar and Planetary Science [J/OL]. *arxiv*: 1606.07039, 2025.
- [58] Aganze C. Ultracool Dwarfs as Tracers for Galactic Structure and Star Formation History: Prospects with Large-Scale Surveys [J]. *Bulletin of the AAS*, 2023, **55**(2): 450.
- [59] Schlafman K C, Casey A R. The Best and Brightest Metal-Poor Stars [J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, **797**(1): 13.
- [60] Ivezić Ž, Ivezić V, Moeyens J, et al. Simulated SPHEREx spectra of asteroids and their implications for asteroid size and reflectance estimation [J]. *Icarus*, 2022, **371**: 114696.
- [61] Geem J, Lisse C M, Bach Y P, et al. Calibration of SPHEREx Spectral Data for Small Solar System Objects [C]. Helsinki: EPSC-DPS Joint Meeting 2025, 2025.
- [62] Lisse C M, Bauer J, Kim Y, et al. Planetary Defense Use of the SPHEREx Solar System Object Catalog [J/OL]. *arXiv*: 2402.08705, 2024.
- [63] Lisse C M, Bach Y P, Bryan S, et al. SPHEREx Discovery of Strong Water Ice Absorption and an Extended Carbon Dioxide Coma in 3I/ATLAS [J]. *Research Notes of the AAS*, 2025, **9**(9): 242.
- [64] Maggioriolo R, Dhooghe F, Gronoff G, et al. Interstellar Comet 3I/ATLAS: Evidence for Galactic Cosmic Ray Processing [J/OL]. *arxiv*: 2510.26308, 2025.
- [65] Wu J, Xia J Q. Forecasts for decaying dark matter from cross-correlation between line intensity mapping and large scale structures surveys [J]. *The European Physical Journal C*, 2025, **85**(4): 390.
- [66] Ge J, Chen W, Chen Y, et al. Search for a Second Earth-the Earth 2.0 (ET) Space Mission [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 400.
- [67] Ge J, Zhang H, Zhang Y, et al. The Earth 2.0 space mission for detecting Earth-like planets around solar type stars [C]. *SPIE*, 2022, **13092**: 1309218.
- [68] Ge J, Zhang H, Zhang Y, et al. Progress in the Earth 2.0 (ET) space mission [C]. *SPIE*, 2024, **13092**: 1309218.
- [69] Ge J, Zhang H, Deng H, et al. The ET mission to search for earth 2.0s [J]. *The Innovation*, 2022, **3**(4): 100271.
- [70] Ge J, Zhang H, Zang W, et al. ET White Paper: To Find the First Earth 2.0 [J/OL]. *arxiv*: 2206.06693, 2022.