

先进亚毫米波望远镜前沿科学与关键技术

李婧

中国科学院紫金山天文台, 南京 210023

E-mail: lijing@pmo.ac.cn

亚毫米波段作为天文观测的一个重要窗口, 蕴涵着诸多前沿的重大科学问题, 如: 宇宙再电离及高红移星系普查、宇宙生命起源、黑洞等。在国际亚毫米波天文如火如荼开展的阿塔卡马大型毫米波/亚毫米波阵列(Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA)时代, 在基于事件视界望远镜(Event Horizon Telescope, EHT)和下一代事件视界望远镜(next generation Event Horizon Telescope, ngEHT)所形成的国际合作越来越紧密之际, 我国亚毫米波天文领域的中坚科研力量, 研判国际竞争新格局, 分析急迫需要和长远需求, 初步形成我国亚毫米波天文发展的设想谋划; 并以此为指导, 发挥我国地域优势、技术优势、人才优势, 以前沿科学问题为牵引, 稳步推进亚毫米波天文设施建设; 力争形成以国际先进的观测设施为支撑, 先端仪器设备研制与重大科学问题研究并驾齐驱的发展格局。

1 亚毫米波天文发展现状与趋势

天文学作为一门以观测为主要研究手段的科学, 其学科发展的核心竞争力密切依赖于先进的观测设施与科学仪器。而天文观测对设备和方法的极端要求, 又使其成为众多技术发展的助推剂。因此, 先进观测设施的提前布局与建设, 不仅能促使重大科学问题的发现与解决, 还有望引领交叉学科或产业的快速发展。

自20世纪60年代的四大天文发现以来, 射电天文给历史悠久的天文学注入了新的活力。亚毫米波位于高频射电的部分, 相较于以米波和厘米波为代表的低频射电, 它具有更短的波长, 处于电子学向光子学过渡的区域。加之地球大气层对亚毫米波天文信号的强烈吸收, 使亚毫米波地面观测设施的建设面临更大挑战, 包括: 更严苛的站址条件, 更高加工精度的天线, 更灵敏的探测终端等。然而, 挑战也意味着先机, 亚毫米波作为一个可以“穿透尘埃、回望过去”的天文谱段, 蕴藏着黑洞影像、星系起源与演化、宇宙生命起源以及恒星和行星形成等诸多重大科学问题。

发达国家已经建设了一系列亚毫米波天文望远镜, 并产



李婧 中国科学院紫金山天文台台务委员, 南极天文和射电天文研究部主任, 毫米波和亚毫米波技术实验室首席科学家。现任中国空间站巡天望远镜太赫兹谱仪副主任设计师, 紫金山天文台“十四五”主攻方向领军人才, 中国天文学会理事。曾获中国青年女科学家奖、腾讯“科学探索奖”等。主要从事亚毫米波/太赫兹超导探测器的物理特性、芯片技术、系统集成和天文应用研究。

出了举世瞩目的科学成果。较为典型的代表有早期亚毫米波星系的发现, 到后来原行星盘的精细结构, 直至黑洞成像等。在以ALMA为代表的大型阵列继续引领高分辨率观测相关科学的当下, 现有亚毫米波单镜能力已凸显局限, 无法满足快速发展的天文观测需求。面对这样的现状, 天文学家意识到兼具高灵敏度和大视场, 拥有快速巡天优势的大型单口径亚毫米波望远镜建设已成为未来发展的必然趋势。于是, 欧美国家正在以天文学和物理学的前沿科学问题为牵引, 布局打造以大型亚毫米波望远镜(the Large Submillimeter Telescope, LST)和阿塔卡马大口径亚毫米望远镜(Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope, AtLAST)为代表的下一代大型亚毫米波单口径观测设施。

而在国内, 相比于光学观测设施的建设, 射电天文的设备发展起步较晚。但从20世纪末期开始, 也已经陆续建成了以南山26米、德令哈13.7米、天马65米等为代表的一批射电天文望远镜。特别是, 中国天眼(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)的建成更是将我国低频射电天文观测能力一举推进到国际领先的地位。然而遗憾的是, 目前我国的射电天文望远镜的工作频段主要集中在以米波和厘米波为主的低频射电谱段, 频率最高的13.7米毫米波望

引用格式: 李婧. 先进亚毫米波望远镜前沿科学与关键技术. 科学通报, 2025, 70: 785–788

Li J. Key technologies and cutting-edge sciences in advanced submillimeter telescopes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 785–788, doi: [10.1360/TB-2024-1105](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1105)

远镜也仅仅工作在3毫米波段. 由上海师范大学负责从夏威夷移址智利的LCT (Leton Chajnantor Telescope)亚毫米波望远镜, 也在移址搬迁、安装调试过程中. 可以说, 我国可常规运行的亚毫米波天文观测设施当前为空白.

2 前沿科学与关键技术

虽然我们尚未具有成熟的亚毫米波天文观测设备, 但自从20世纪90年代中国科学院射电天文重点实验室(Key Laboratory for Radio Astronomy, KLRA)建成以来, 依托KLRA的亚毫米波天文技术储备、台址勘察及人才队伍建设等方面的工作却从未停止过. 同时, 我国也一直积极参与国际大项目的合作, 例如: 当前最大的地面天文观测装置ALMA和最早的亚毫米波望远镜阵列(Sub-Millimeter Array, SMA), 其早期建设阶段都有我国(紫金山天文台)在超导接收机等方面的实质性技术贡献和人员参与贡献. 在上述工作基础上, 过去几年我国亚毫米波天文队伍也多次论证梳理了亚毫米波段, 特别是针对未来我国可能的亚毫米波天文望远镜建设过程中, 将要面向的前沿科学问题和面临的关键技术挑战.

总体上, 作为国际一流/领先的亚毫米波天文观测装置, 特别是未来可能建设的大口径单天线亚毫米波望远镜, 具有极为重要的科学价值. 它将覆盖宇宙学、大尺度结构、星系团、星系、分子云、恒星、行星、黑洞等多个天文学的重要领域. 在亚毫米波段, 值得我们期待的先进科学目标至少有十几个, 比如: 黑洞影像, 在目前已经拍到的两张黑洞照片基础上, 获取更高分辨率的图像甚至动态影像; 宇宙的第一缕曙光, 发现早期宇宙中大质量、高恒星形成星系, 测定其红移和空间分布, 获得统计信息, 验证宇宙演化模型; 亚毫米波巡天; 星系团与宇宙学, 尤其是利用星系团研究宇宙膨胀; 宇宙恒星形成率密度和重子物质比例演化的精确测定; 星系演化过程中的诸多问题, 特别是高红移极端星系的形成与死亡; 近邻宇宙中的星际介质与恒星形成; 星系周介质与星系的重子物质循环; 分子云和星际磁场; 原行星盘、残余盘、系外行星和生命起源; 亚毫米波时域天文; 等等.

亚毫米波望远镜的建设和学科的发展, 除了重大科学目标的牵引, 还离不开关键技术的积累和台址条件的资源. 亚毫米波天文观测对台址条件的要求极为苛刻, 需要高海拔、低水汽、远离人类生活区等极端条件. 放眼全球, 亚毫米波优良台址也仅有智利高原、南北极高地和我国青藏高原等为数不多的选择. 所以, 我国独有的青藏高原亚毫米波稀缺优良台址资源, 充分具备战略价值, 尤其是青藏高原地理位置将为全球亚毫米波甚长基线干涉(very-long-baseline interferometry, VLBI)提供独特站点, 实现重要干涉基线范围的覆盖. 此外, 亚毫米波天文观测的实现, 还需要依赖具有极高灵敏度的探测手段, 目前的国际主流科学仪器均为基于低温超导的探测技术. 国际亚毫米波/太赫兹天文望远镜上主要的探测仪器包括相干探测和非相干探测两大类, 其中相干探测技

术有超导隧道结(superconductor-insulator-superconductor, SIS)混频技术、超导热电子(hot-electron bolometer, HEB)混频技术, 非相干探测技术有超导动态电感探测技术(kinetic inductance detector, KID)、超导相变边缘探测技术(transition-edge sensor, TES). 我国拥有自主且国际前沿的上述4种太赫兹探测关键核心技术, 紫金山天文台技术团队从仿真设计、到芯片制备、再到特性表征与系统集成, 全部自主可控, 所具备的超导探测核“芯”技术与研究团队具有雄厚的实力, 这些都将作为支撑强大设施的尖端利器.

3 机遇与发展

综上所述, 当前是我国发展亚毫米波天文的重要窗口期和战略机遇期, 主要来自三个方面. (1) 迫切需求: 我国亚毫米波科学观测目前主要依赖国外望远镜, 常规运行的亚毫米波天文观测设施为零, 该领域的科学成果产出一定程度上受制于人, 若不加快布局建设, 未来也将持续性缺乏竞争力; (2) 地域优势: 全球卫星数据分析显示, 我国西部高原大范围存在类比于智利阿塔卡马的全球最佳亚毫米波台址; (3) 技术自主: 从台址勘察、到天线设计与加工、再到主流探测终端的研制, 关键核心技术全部自主可控, 具备全自主建设的核心竞争力, 同时还具有从科学到技术的完整、可持续发展的优秀人才队伍. 鉴于此, 经前期研讨、论证, 拟对我国亚毫米波天文的未来发展作如下设想和初步规划.

首先, 在我国青藏高原选择并完善专业的亚毫米波天文设施建设候选台址长周期勘察数据与分析, 以及配套支撑建设; 并在此基础上, 建设一台15米口径的亚毫米波天文望远镜, 搭载单像元或多波束超导混频接收机、多色偏振相机和国际前沿的宽带层析成像谱仪等先进探测终端, 工作频段覆盖85~500 GHz多个频率窗口, 视台址条件可考虑增加660 GHz观测窗口. 该望远镜一旦完成建设, 将以同时具备15米口径的天线、高达500 GHz甚至660 GHz的工作频段及国际领先的探测终端等指标, 成为国际一流的亚毫米波单口径地面观测设备. 此项工作由中国科学院紫金山天文台牵头, 已经启动; 目前候选台址确定为位于青海省海西州德令哈市的雪山牧场A点, 海拔4820 m, “雪山牧场15米亚毫米波望远镜(Xueshanmuchang 15-m Submillimeter Telescope, XSMT)项目”也已于2022年2月由中国科学院紫金山天文台自主部署立项, 进展顺利.

其次, 在15米望远镜的建设基础上, 尽早部署未来50米级大型亚毫米波单天线望远镜, 配备多波束超导体差接收机、大规模多色偏振阵列相机和宽带成像谱仪等探测终端, 工作频段覆盖85~500 GHz(上限视台址可调). 该设施的观测能力将比目前国际最好的亚毫米望远镜提高至少10倍, 成为国际最大、最先进的亚毫米单天线望远镜. 同时, 推动中国南极昆仑站亚毫米波/太赫兹望远镜建设, 特别是高频段、高分辨率干涉设备与观测. 在地域上, 雪山牧场、南极内陆、智利LCT望远镜台址与国际其他亚毫米波望远镜形成甚长基

线干涉, 并与未来几年将要发射的中国空间站巡天望远镜太赫兹谱仪构成空地一体化亚毫米波/太赫兹探测新格局。

总的来看, 面向2035科技强国的新目标、新任务, 我国亚毫米波天文领域需要聚焦前沿科学问题, 利用西部和南极独特的稀缺台址资源, 充分发挥我国在亚毫米波探测器技术方面的技术优势, 团结全国亚毫米波天文领域的科研队伍,

提前布局, 预先攻关, 逐步推进我国亚毫米波天文观测设施的建设。设施建设的科学目标将聚焦21世纪重大科学问题, 同时在技术方面则有望冲破壁垒, 实现关键核心技术的变革性突破。这不仅能提升我国天文学在国际天文领域的竞争力, 相关技术还将推动未来通信、生物医学、大气科学等多个领域的发展, 对我国科技进步和经济发展具有重要意义。

致谢 本文所涉及的亚毫米波天文领域现状分析与未来规划, 在工作进展中得到天文界、相关领域和部门诸多专家、学者的指导与支持, 一并感谢。包括: XSMT专家组和工作组所有同仁前期工作的付出; 中国科学院紫金山天文台青海观测站同事的积极配合; 合作单位中国电子科技集团公司第五十四研究所、中国工程物理研究院电子工程研究所、上海师范大学、中国极地研究中心、中国科学院理化技术研究所和长春光学精密机械与物理研究所等的友好合作; 北京大学、香港中文大学、格陵兰望远镜(Greenland Telescope, GLT)等亚毫米波科学团队的深度交流与研讨; 以及来自国家自然科学基金委员会、科技部、中国科学院、青海省科技厅、青海省海西州人民政府、江苏省科技厅和上海市等有关部门的支持。特别感谢国家杰出青年科学基金(11925304)、国家重点研发计划(2023YFA1608200)和腾讯“科学探索奖”的大力支持。

推荐阅读文献

- 1 Shi S C, Li J, Zhang W, et al. Ultra High Sensitivity Terahertz Superconducting Detector (in Chinese). Shanghai: East China University of Science and Technology Press, 2021 [史生才, 李婧, 张文, 等. 超高灵敏度太赫兹超导探测器. 上海: 华东理工大学出版社, 2021]
- 2 Shi S, Li J. Superconducting tunnel junctions for black-hole imaging by Event Horizon Telescope and for radio astronomy (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2019, 64: 2067–2069 [史生才, 李婧. 超导隧道结在事件视界望远镜黑洞成像及射电天文中的应用. 科学通报, 2019, 66: 2067–2069]
- 3 National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Pathways to Discovery in Astronomy and Astrophysics for the 2020s. Washington DC: National Academies Press, 2021
- 4 A Strategic Plan for European Astronomy: The Astronet Science Vision & Infrastructure Roadmap 2022–2035. 2023, https://www.astronet-eu.org/?page_id=521
- 5 Pattle K, Barry P S, Blain A W, et al. The UK Submillimetre and Millimetre Astronomy Roadmap 2024. 2024, arxiv: [2408.12975](https://arxiv.org/abs/2408.12975)
- 6 Gurvits L I, Paragi Z, Casasola V, et al. THEZA: TeraHertz exploration and zooming-in for astrophysics. *Exp Astron*, 2021, 51: 559–594
- 7 Carpenter J, Iono D, Testi L, et al. The ALMA development roadmap. 2019, arxiv: [1902.02856](https://arxiv.org/abs/1902.02856)
- 8 Shi S C, Li J, Zhang W, et al. Terahertz high-sensitivity superconducting detectors. *Acta Phys Sin*, 2015, 64: 228501

Summary for “先进亚毫米波望远镜前沿科学与关键技术”

Key technologies and cutting-edge sciences in advanced submillimeter telescopes

Jing Li

Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023, China

E-mail: lijing@pmo.ac.cn

The submillimeter band plays a pivotal role in astronomy as an essential observational window, facilitating access to unique cosmic phenomena that are fundamental to our understanding of the universe. It enables the exploration of profound scientific inquiries of our time, encompassing the study of cosmic reionization, surveys of high-redshift galaxies, investigations into the origin of life, and black hole research. This field is currently experiencing rapid development driven by prominent international projects such as the Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), which stands as a global leader in high-resolution submillimeter observations. Collaborations like the Event Horizon Telescope (EHT) and the forthcoming next generation Event Horizon Telescope (ngEHT) further contribute to these advancements. These remarkable progressions underscore the vital role played by international cooperation in submillimeter astronomy and have motivated Chinese scientists to assess their competitive landscape, evaluate scientific requirements, and strategize for China's advancement in this domain. China's core research teams in submillimeter astronomy not only evaluate immediate and long-term research needs but also develop strategies ensuring active participation within this field. This strategy involves leveraging China's geographical advantages, technological capabilities, and growing pool of scientific talent. Emphasis is placed on developing advanced observational facilities and instruments that meet international standards with particular focus on unique observation sites located on China's Tibetan plateau and Antarctica regions. These regions offer rare pristine observation conditions that could prove crucial for China's emerging submillimeter projects while complementing existing international facilities. Internationally, countries with advanced submillimeter facilities, such as those in the U.S. and Europe, have made groundbreaking discoveries. For instance, ALMA has played a crucial role in observing high-redshift galaxies, early stages of star formation, and even imaging black hole event horizons. These achievements have prompted Europe and the United States to develop plans for the next generation of submillimeter telescopes, including projects like the Large Submillimeter Telescope (LST) and the Atacama Large Aperture Submillimeter Telescope (AtLAST). These upcoming facilities aim to overcome the limitations of current equipment by offering enhanced sensitivity, wider fields of view, and faster survey capabilities. China's infrastructure for submillimeter astronomy currently lags behind its optical and radio astronomy fields where world-leading projects like the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) have propelled Chinese research to international prominence. China's existing radio astronomy infrastructure primarily focuses on lower-frequency observations within meter and centimeter wavelength ranges. The highest-frequency capability is represented by China's 13.7-meter millimeter-wave telescope in Delingha operating within the 3 mm band. However, China has taken steps towards addressing this gap in submillimeter technology by relocating the LCT (Leton Chajnantor Telescope) submillimeter telescope from Hawaii to a site in Chile—An encouraging advancement towards building submillimeter capability. As China's research teams look ahead to the science and technology goals outlined for 2035, submillimeter astronomy has been identified as a pivotal area of focus. The emphasis lies on cutting-edge research that capitalizes on unique domestic resources and advances detector technologies to facilitate observations in the submillimeter range. National endeavors in submillimeter astronomy aim to support crucial scientific objectives and achieve transformative technological breakthroughs. These advancements will not only enhance China's competitiveness in the international astronomy field but also drive progress across various domains, including telecommunications, atmospheric science, biomedical science, and national security.

submillimeter, astronomy, telescope, science, technology

doi: [10.1360/TB-2024-1105](https://doi.org/10.1360/TB-2024-1105)