

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.03.09

国家重点研发计划“SKA 前期数据处理系统建设和相关科学预研”简介

洪晓瑜¹, 武向平², 安 涛¹, 叶叔华¹, 毛羽丰³, 黄 滢²,
伍筱聪¹, 吕唯佳¹, 李 亭¹, 李惠华¹, 吴 芳¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 国家天文台, 北京 100101; 3. 中国科学院前沿科学与教育局, 北京 100864)

摘要: 在继承平方公里阵列 (Square Kilometre Array, SKA) 望远镜的中国低频探路者——“宇宙第一缕曙光”探测项目 21CMA 在十年间所积累的经验 and 广泛国际合作的基础上, 计划小规模改造现有设备, 迅速掌握数字多波束合成、高动态大视场成像、前景去除等 SKA 低频成像的关键核心技术。同时, 与 SKA 低频阵 (SKA-low) 先导设备 MWA (Murchison Widefield Array) 开展深层次合作, 预选未来用于 SKA1-low 宇宙再电离深度成像的观测候选区域, 为最终利用 SKA 第一阶段 (SKA1) 低频阵列, 对选定观测候选区域进行深度定点观测做好充分准备, 最终实现 SKA1 既定的首要科学目标。该项目还将建设中国 SKA 区域中心数据处理原型样机, 并以 21CMA 和 MWA 实测数据为基础, 完成低频射电干涉成像的数据处理流程, 为建设中国 SKA 区域数据中心打下基础。

关键词: 平方公里阵列; 数字多波束合成; 高动态大视场成像; 低频成像

中图分类号: G311 **文献标识码:** C

1 背景

经过国际射电天文学界多年论证, 国际大科学工程——平方公里阵列 (Square Kilometre Array, SKA) 射电望远镜^[1]即将进入建设阶段。SKA 凭借其宏伟的科学目标和庞大的建造规模, 成为目前国际天文界计划建造的世界最大综合孔径射电望远镜。SKA 将由全球十几个国家出资共同建造, 台址位于澳大利亚、南非及南部非洲 8 个国家的无线电宁静区域。2011 年, 由包括中国在内的 7 个国家作为创始成员国, 成立了 SKA 独立法人机构 SKAO (SKA Organization)。目前, SKAO 有 11 个成员国, 包括澳大利亚、加拿大、中国、印度、意大

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-08-23

资助项目: 科技部国家重点研发计划大科学装置专项 (2018YFA0404600); 中国科学院国际合作局国际大科学计划培育专项 (114231KYSB20170003)

通讯作者: 安涛, antao@shao.ac.cn

利、新西兰、南非、西班牙、瑞典、荷兰和英国。此外,德国和法国暂为观察员国。2012年9月,中国国务院批准并授权由科技部牵头,统筹协调联合中国相关部门参与SKA建设准备阶段的相关工作,并参与谈判。

作为革命性的大科学设备,SKA有望实现重大科学突破,使人类更好地理解所生活的宇宙。同时,参与SKA的建设也是中国天文学科的难得发展机遇。经过二十余年的预研究,国际天文界已就SKA的重要性、必要性和先进性达成广泛共识。作为SKA的首倡国之一,中国在SKA的发起、工程概念提出、国际合作及高性能天线设计等诸多方面作出了贡献。国际科学界确定了SKA1的科学方向以及高优先级科学目标。中国在此框架下,结合中国实际,选定了“利用中性氢探测宇宙黎明和再电离、通过脉冲星观测探测引力波,以及精确检验广义相对论及其他优势领域”为优先方向的“2+1”科学目标^[2]。这些目标在科学上具有重大突破意义,同时极具竞争性和挑战性。

随着相关研究不断深入,SKA的科学目标也在不断调整和凝练,但SKA始终致力于回答有关宇宙的一些最基本问题,如宇宙的第一缕曙光、宇宙的结构形成、宇宙中的生命起源等。对这些问题的研究必将开辟人类认识宇宙的新纪元。

2 本项目的研究内容和科学意义

近期,上海天文台申报的“SKA前期数据处理系统建设和相关科学预研”项目以其战略性、基础性、前瞻性等特点,获得了国家重点研发计划的支持。国家重点研发计划项目由中央财政资金设立,面向世界科技前沿,瞄准国家目标,聚焦国家重大需求,优化配置科技资源,着力解决当前及未来科技发展所面临的瓶颈和突出问题。同时,关注重大共性关键技术和产品研发,以及重大国际科技合作等,加强跨部门、跨行业、跨区域研发布局和协同创新,为国民经济和社会发展的主要领域提供持续性的支撑。

该科学团队在继承中国SKA低频探路者——“宇宙第一缕曙光”探测项目21CMA在十年间所积累的经验和广泛国际合作的基础上,计划小规模改造现有设备,从而迅速掌握数字多波束合成、高动态大视场成像、前景去除等SKA低频成像的关键核心技术。同时,与SKA低频阵(SKALow)所在的台址国澳大利亚的SKA先导设备MWA(Murchison Widefield Array)开展深层次合作,预选未来SKA1-low宇宙再电离深度成像的观测候选区域,尽快在激烈的国际竞争中占据宇宙再电离成像观测的有利地位,为最终利用SKA1-low对选定观测天区进行长达1000h的深度定点观测做好充分准备,致力于最终实现SKA1既定的首要科学目标,即宇宙再电离成像。

项目始终围绕未来使用SKA1-low进行宇宙再电离深度成像观测为预期目标展开,并为之在科学和技术上做充分准备。项目主要依托中国的21CMA和澳大利亚的MWA这两个低频设备,它们的视场和频率都与未来SKA1-low实施的宇宙再电离成像观测要求一致。目前,这两个设备都处于常规运行状态,可以有效保障项目实施所需要的深度干涉成像数据的获取。而基于实际观测数据开展的大视场和高动态干涉成像,以及前景去除研究,将奠定未来使用SKA1-low取得重大发现的基础。

SKA 能否取得里程碑式的重大科研成果, 还取决于 SKA 科学数据处理能力和科学分析研究水平, 而承担 SKA 最终的科学处理、面对科学家用户、直接产生科学成果等工作将由 SKA 区域中心完成。中国 SKA 科学团队将建设自己的 SKA 区域数据中心, 并使之逐步过渡到 SKA 亚太科学和数据中心 (SKA1 后期), 以及未来的国际 SKA 科学和数据中心 (SKA2 阶段), 让中国科学家不出国门即可便捷使用 SKA 数据, 以产出科学成果。此外, 还将吸引 SKA 国际伙伴和其他成员来中国, 围绕 SKA 进行科学研究和交流。该项目将在 SKA 建成之前, 利用探路者设备 21CMA 和 MWA 实测数据, 深入研究多波束数字合成、高动态大视场成像及数据处理的集成流水线等 SKA 科学数据处理的关键核心技术, 为 SKA 的宇宙再电离直接成像观测做好准备, 并研制中国 SKA 数据中心的原型机。同时, 通过项目实施, 逐步掌握 SKA 科学数据处理的关键核心技术, 培育和完善的中国 SKA 科学团队。未来, 中国 SKA 数据中心有望成为国际首批完成的区域数据中心之一, 数据处理原型样机也将为国际同类数据密集型科研装备提供模板和借鉴, 并最终在 SKA 关键技术的集成验证、关键科学项目的数据处理等方面作出中国的贡献。

3 课题的设置以及相互关系和研究目标

课题 1: 宇宙再电离研究

本课题将瞄准 SKA1-low 的首要科学目标, 利用 21CMA 和 MWA, 研究和预选宇宙再电离的深度成像观测候选天区, 为最终确定 SKA1-low 将观测的 5 个天区做准备。本课题以科学目标为牵引, 带动其他课题的研究。

课题 2: 高动态大视场成像研究

本课题将立足 21CMA, 并与 MWA 合作, 对现有设备实施有限的技术升级改造, 以期尽快掌握 SKA-low 的多波束合成技术和高动态大视场成像技术, 以实现我们既定的宇宙黎明/再电离探测, 以及脉冲星搜寻/精确检验引力理论 (包括引力波探测) 这两大方向为牵引的中国 SKA 宏伟科学目标。

课题 3: 中国 SKA 数据中心原型机研制

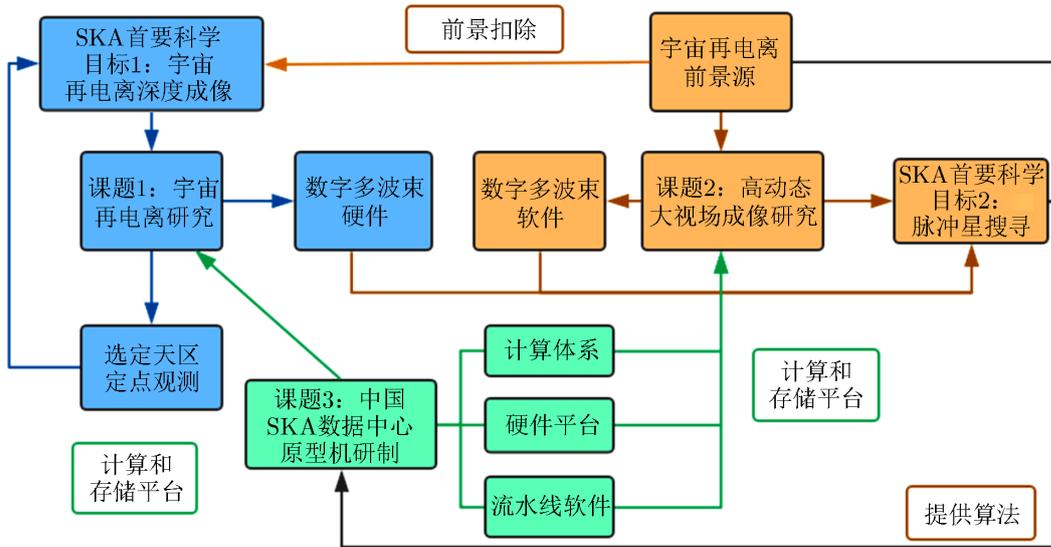
以宇宙再电离成像和脉冲星搜寻为主要科学目标, 结合项目组多年来参与国际 SKA 科学数据处理工作包的研究经验, 以及研制实验样机的经验, 完成中国 SKA 数据中心的总体方案设计和原型机建设, 为建设大规模数据中心奠定基础。

以上三个课题之间, 以及课题的子任务之间均有密切的内在联系, 如图 1 和图 2 所示。

课题 1 与课题 2 在研究内容上密切相关。课题 1 是直接针对宇宙再电离这一具体科学目标开展研究; 课题 2 则偏向于技术和算法, 所研究的算法和发展的技术将可以直接应用于课题 1 的宇宙再电离的深度成像。此外, 课题 2 还将独立发展数字多波束合成技术, 为低频脉冲星的搜寻打下基础。课题 1 和课题 2 为课题 3 提供理论指导和算法支持, 所开发的算法和软件模块将直接集成到课题 3 的原型机; 课题 3 服务于课题 1 和课题 2 的科学目标, 为其科学研究提供计算和存储资源。



图1 课题与项目的关系



注: 蓝色部分为课题1 研究内容; 橙色部分为课题2 研究内容; 绿色部分为课题3 的相关内容。

图2 课题与SKA 科学目标间的关系

4 本项目对科学研究和国家经济的贡献

本项目建立在十年建设和运行 21CMA 经验的基础之上, 建立在作为 MWA 正式成员的国际合作基础之上, 建立在完成《中国 SKA 科学白皮书》^[2]和《中国参加 SKA 综合论证报告》^[3]大背景的基础之上, 也是建立在长期合作而自然形成的科学团队基础之上。中国参与 SKA 大科学工程的决心和过去十年中国射电天文学在低频射电领域的积累, 为本项目的实施提供了最大的保障和动力。本项目的实施将会进一步夯实中国参与 SKA1 并取得科学回报的基础, 让中国科学家利用 SKA1 尽早做出重大原创性成果。

中国 SKA 区域中心将成为中国, 乃至整个亚洲首个能够适用于 SKA 科学数据处理的数据中心。持续前期参与 SKA 这一国际重大基础科学装置的研制及其科学目标的探究, 不仅

为中国天文学家取得重要科学成果提供契机，而且也为中国参与国际大科学工程提供支撑，推进中国在天文学前沿课题理论和方法上的创新^[4]。

参考文献:

- [1] Schilizzi R T. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5489: 62
- [2] 武向平. 中国 SKA 科学白皮书. 北京: 科学出版社, 2018
- [3] 武向平. 中国参加 SKA (第一阶段) 综合论证报告 (初稿). 上海: SKA 中国办公室, 2018
- [4] 叶叔华, 武向平. 我国低频射电天文学学科发展战略咨询研究报告, 中国科学院学部咨询报告. 北京: 中国科学院, 2018

The Introduction of National Key Research and Development Program “The Early Science Data Process System and Pre-Research of SKA Project”

HONG Xiao-yu¹, WU Xiang-ping², AN Tao¹, YE Shu-hua¹, MAO Yu-feng³,
HUANG Yan², WU Xiao-cong¹, LV Wei-jia¹, LI Ting¹, LI Hui-hua¹, WU Fang¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*; 3. *Bureau of Frontier Sciences and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China*)

Abstract: On the basis of more than 10 years of operational experience of 21CMA, the SKA low-frequency pathfinder built in northwest of China dedicate for Epoch of Reionization (EoR) exploration, and extensive international cooperation on SKA project, the present program plans to make small-scale reformation of the existing 21CMA equipment in order to quickly grasp digital multi-beam forming, high-dynamic-range wide-field imaging, and EoR foreground removal techniques. In-depth cooperation with SKA-low precursor, the Murchison Widefield Array (MWA) is highly desirable in science and related technique. One of the major on-going tasks is preliminarily selecting the sky zones for deep imaging and for future EoR observation. This will eventually used as the targeted sky zones of the SKA phase one (SKA1) low frequency array in the Cosmic dawn and EoR research, with ultimate goal of achieving the SKA key science objectives. A prototype of China SKA Regional Center data processor will be designed and constructed. The low-frequency synthesis imaging pipeline will be developed. All these pioneer work will pave the road toward the China SKA Regional Center.

Key words: SKA; digital beam forming; high-dynamic-range wide-field imaging; low-frequency synthesis imaging