

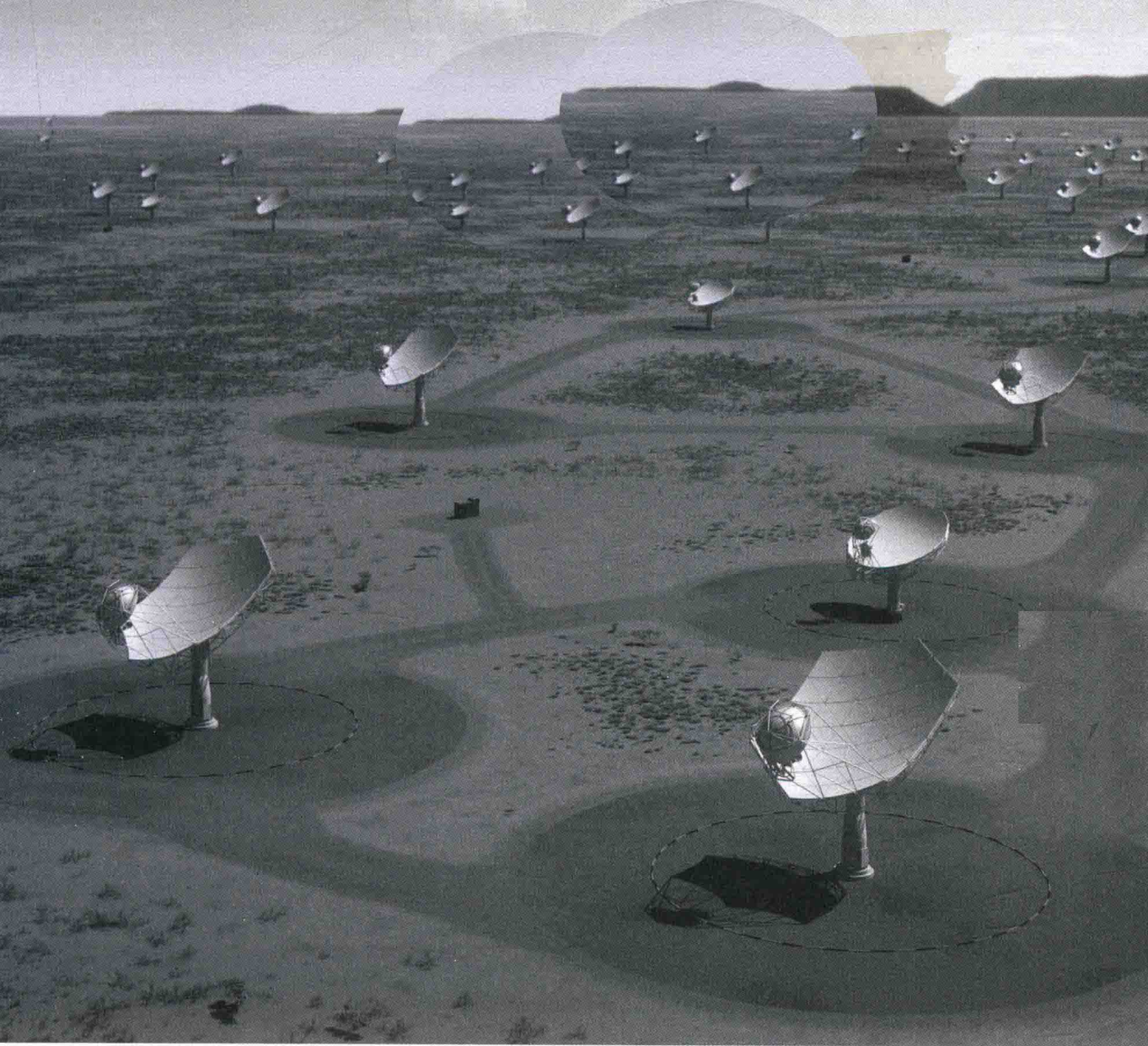


中国平方公里阵 科学目标

秦波 彭勃 /主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



中国平方公里阵 科学目标

秦波 彭勃 /主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

中国平方公里阵科学目标 / 秦波, 彭勃主编. —北京: 北京大学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-301-28520-6

I. ①中… II. ①秦… ②彭… III. ①射电天文学—研究 IV. ①P16

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 170043 号

- 书 名 中国平方公里阵科学目标
ZHONGGUO PINGFANG GONGLI ZHEN KEXUE MUBIAO
- 著作责任者 秦波 彭勃 主编
- 责任编辑 刘啸
- 标准书号 ISBN 978-7-301-28520-6
- 出版发行 北京大学出版社
- 地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
- 网 址 <http://www.pup.cn>
- 电子信箱 zpup@pup.cn
- 新浪微博 @北京大学出版社
- 电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62754271
- 印刷者 北京大学印刷厂
- 经 销 者 新华书店
- 787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 9.5 印张 173 千字
- 2017 年 8 月第 1 版 2017 年 8 月第 1 次印刷
- 定 价 75.00 元



未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@puppkuedu.cn

图书如有印装质量问题, 请与出版部联系, 电话: 010-62756370

撰写者 (按姓氏拼音排序):

艾 美 安 涛 陈如荣 陈 文 陈学雷 程晓朋 崔晓红 富 坚
顾俊骅 韩金林 来小禹 李柯伽 李林程 李晓峰 刘 彬 刘 阔
刘丽佳 罗 睿 毛晓春 彭 勃 钱 磊 秦 波 Richard G. Strom
邵立晶 苏洪全 田文武 仝 号 王 杰 王婧颖 王均智 王灵芝
王晓峰 王 鑫 王有刚 吴 丹 武向平 肖 莉 徐海光 徐仁新
徐 焯 徐怡冬 闫 震 杨小龙 余文飞 禹升华 岳友岭 张承民
张 惠 张文达 张迎康 张仲莉 赵公博 赵 薇 郑 倩 朱 辉
朱 杰 朱 明 朱炜玮 朱正浩

统稿:

程岭梅 (中国科学院国家天文台)

前 言

国际大科学工程——平方公里阵列射电望远镜 (Square Kilometre Array, SKA) 是由全球超过十个国家计划合资建造的、世界最大综合孔径射电望远镜阵。它比目前最大射电望远镜阵 (JVLA) 灵敏度提高约 50 倍, 巡天速度提高约 10 000 倍。其科学研究目标包括宇宙黑暗时期探测, 星系演化、宇宙学与暗能量研究, 孕育生命的摇篮, 利用脉冲星和黑洞进行引力的强场检验, 宇宙磁场的起源和演化等诸多方面, 将为人类认识宇宙提供重大机遇。根据国际 SKA 组织确定的时间表, 2012—2018 年是 SKA 的建设准备阶段, SKA 第一阶段 (SKA1) 将跨越 2018—2024 年, 将建设约 10% 的 SKA。2020 年 SKA1 部分单元将产生最早的科学成果。SKA 全部建成和投入使用预计在 2030 年前后。

我国是 SKA 首倡国之一, 全程参与了 SKA 二十年发展历程。2012 年 9 月, 国务院批准中国以政府名义参与 SKA 建设准备阶段。中国是国际 SKA 组织的正式成员国。2015 年 6 月, 中国参与 SKA1 建设的建议通过了中国科学院学部的咨询评议。

在科技部、国家自然科学基金委和中国科学院的联合项目支持下, 国内射电天文界对 SKA 科学目标开展了广泛、深入的研讨, 逐步发展并确立了我国 SKA 科学研究的“2+1”战略布局, 即两个优先突破方向 (中性氢和脉冲星) 加其他优势领域。撰写者通过全国范围内广泛征集课题建议, 形成了这版《中国平方公里阵科学目标》。本书第一、二章是 SKA 国际、国内情况概述, 后面三章依照“2+1”框架进行组织。这是一个从无到有的过程, 随着相关研究的不断深入以及国际 SKA 科学目标的不断更新, “中国 SKA 科学目标”将不断更新和完善。在此衷心感谢全国天文界的支持, 同时, 对于不完备或不妥之处, 欢迎提出宝贵意见。

本书的形成及出版过程, 得到科技部 973 计划、国家自然科学基金委、中国科学院的联合资助, 本书相关图、表得到国际 SKA 组织的授权, 在此表示由衷感谢!



目 录

第一章	平方公里阵概述	1
1.1	项目总体情况	1
1.2	SKA1 及其科学目标	6
第二章	我国参加 SKA 情况概述	8
2.1	总体情况	8
2.2	中国的科学准备	9
第三章	中性氢相关研究	15
3.1	21 厘米辐射观测与宇宙学研究	15
3.2	利用 SKA 研究中性氢分布的拓扑结构	20
3.3	利用 21 厘米森林探测宇宙早期非线性结构与热历史	24
3.4	宇宙再电离时期探测	29
3.5	中性氢巡天	34
3.6	利用 SKA 研究暗物质粒子的基本性质	39
3.7	基于 SKA 的暗能量和引力研究	44
第四章	脉冲星相关研究	52
4.1	脉冲星与致密物态	52
4.2	用脉冲双星系统做引力理论的精确检验	57
4.3	脉冲星测时阵列探测引力波	62
4.4	脉冲星计时探测双黑洞并合的引力波信号	67
4.5	利用 SKA 探测银河系和邻近星系际空间的磁场	72
第五章	其他优势领域	77
5.1	SKA 高精度天体测量	77
5.2	利用射电复合线观测被尘埃深埋的活动星系核	83
5.3	利用 SKA 观测研究高红移射电类星体	86

5.4 利用 SKA 进行各种尺度黑洞 X 射线暂现源研究	91
5.5 用 SKA 进行 X 射线双星暂现源和超亮 X 射线源的研究	96
5.6 快速射电暴	100
5.7 巨射电星系示踪温热星系际介质	106
5.8 低频射电天空中的星系团	114
5.9 SKA 时代对超新星遗迹作为宇宙线起源的研究	119
5.10 在 SKA 时代对超新星的射电观测和研究	124
5.11 利用 SKA 研究行星际闪烁	129
5.12 利用 SKA 研究星际介质中的电离气体	134
附录：中国学者在 2015 版国际《SKA 科学白皮书》中的贡献	140

第一章 平方公里阵概述

1.1 项目总体情况

国际大科学工程——平方公里阵 (Square Kilometre Array, SKA) 是由全球超过十个国家计划建造的、世界最大的综合孔径射电望远镜阵, 以实现平方公里量级接收面积, 相当于 140 个足球场大小. SKA 将建在澳大利亚、南非及非洲南部八个国家的无线电宁静区域, 分布在 3000 km 范围, 频率覆盖 50 MHz~20 GHz.

目前, SKA 处于建设准备阶段 (2012—2018) 的后期, 由 SKA 独立法人机构 SKAO (SKA Organisation) 领导, 包括英国、澳大利亚、南非、中国、荷兰、意大利、新西兰、加拿大、瑞典和印度十个正式成员国. 预期未来会有更多的成员加入. SKA 建造费目前估计约需 80 亿欧元, 由多国政府及国家研究机构联合筹资, 将分两个阶段建设: 第一阶段 (SKA1) 建设大约 10% 的 SKA, 计划 2018 年底启动. 第二阶段 (SKA2) 建设其余部分的 SKA, 项目预计在 2030 年左右全部建成.

SKA 技术路线与主要指标

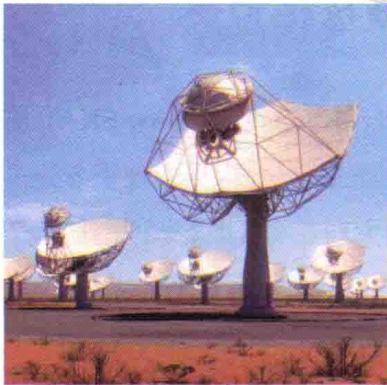
SKA 由三种类型的天线阵列组成 (见图 1):

(1) 反射面天线阵. 约 2500 面 15 m 口径反射面天线 (dish) 构成综合孔径阵列, 天线覆盖频率 300 MHz~20 GHz. 每个天线将配备 5 个单波束馈源 SPF (single pixel feeds), 还在进行宽带单波束馈源 WBSPF (wide band single pixel feeds) 和相位阵馈源 PAF (phased array feeds) 等前沿技术预研.

(2) 低频孔径阵. 在 50~350 MHz 频率范围, 130 万个对数周期天线单元组成约 5000 个直径约 35 m 的稀疏低频孔径阵列 LFAA (low-frequency aperture array), 每个子阵由 256 个天线组成.

(3) 中频孔径阵. 在 400 MHz~1.45 GHz 频率范围, 由 250 个直径约 60 m 子阵组成致密中频孔径阵列 MFAA (mid-frequency aperture array), 形成超大视场的观测能力. 考虑性价比及可实现性, 频率覆盖的初步目标为 300~1000 MHz.

SKA 第一阶段, 即 SKA1, 将建设反射面天线阵和低频孔径阵列. 相位阵馈源 PAF、宽带单波束馈源 WBSPF 和中频孔径阵列 MFAA 现属于 SKA 先进仪器项目 AIP (Advanced Instrumentation Programme), SKA1 阶段对这些关键技术进行攻关, 旨在获得与传统技术相匹敌的性能, 为降低 SKA 整体造价, 提升运行和维护的可靠性等提供优化方案. 这些技术将应用于 SKA2. SKA 主要指标如表 1 所示.



(a) 反射面天线阵



(b) 低频孔径阵列



(c) 中频孔径阵列

图 1 SKA 阵列示意图. (图片来源: SKA 官网 <https://www.skatelescope.org/>)

基于上述性能指标, SKA 具有四大技术特点, 处于国际领先:

(1) 超大接收面积. SKA 接收面积约一平方公里, 比目前最灵敏的射电望远镜阵 JVLA (Jansky Very Large Array) 和 LOFAR 高 50 倍, 将极大提升望远镜探测能力. 射电望远镜灵敏度随时间发展曲线如图 2 所示, SKA 的灵敏度是现有及在建射电望远镜难以企及的.

表 1 SKA 主要技术指标综合列表

技术方案	频率范围 /GHz	基线 /km	A_e/T_{sys} /($m^2 \cdot K^{-1}$)	SSFoM /($m^4 \cdot K^{-2} \cdot deg^2$)	备注
Dish+SPF	0.35~20	3000	10 000	$8.6 \times 10^7 @$ 1 GHz	2500×15m 反射面天线 $\eta = 60\%$ $T_{sys} = 16 \sim 20$ K
MFAA	0.4~1.45	180 (TBD)	10 000 (400~800 MHz)	10^{10} @1 GHz	250×60 m 子阵 $T_{sys} = 50 \sim 60$ K
LFAA	0.05~0.35	200	10 000	$10^7 @$ 0.3 GHz	5000×35 m 子阵 (约 130 万个对数 周期天线单元)

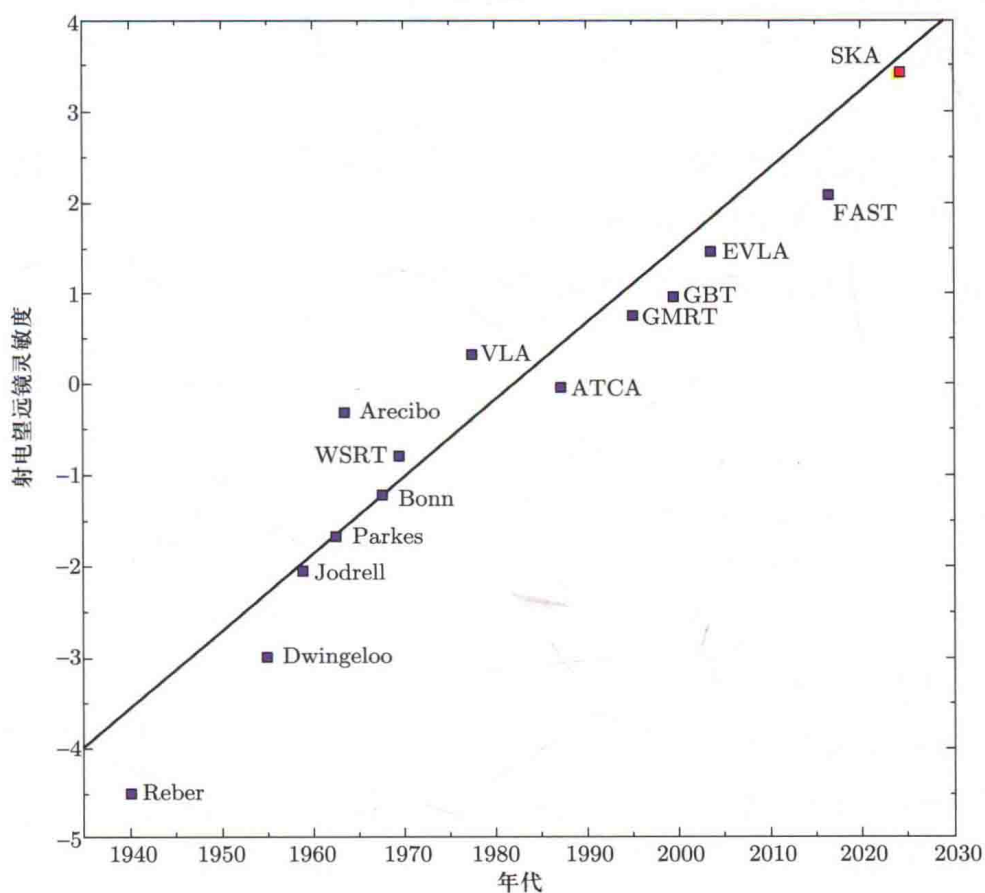


图 2 射电望远镜灵敏度随时间发展曲线.

(2) 超大视场. SKA 具有极大的观测视场, 在 21 厘米波段视场达几十平方度, 能对 1 000 000 个星系和瞬变现象成像, 其快速搜寻能力将达到 JVLA 的 10 000 倍以上.

(3) 超宽频率范围. SKA 低频孔径阵覆盖了 50~350 MHz 频段, 反射面天线阵频段

为 350 MHz ~ 20 GHz, 具备在多频段同时进行检测和成像的能力.

(4) 超高分辨率. 百公里低频基线和千公里高频基线阵列分布, 使 SKA 具有对致密天体的精细结构进行成像的能力, 拥有毫角秒分辨天体能力.

SKA 的核心科学目标

SKA 将致力于回答宇宙最基本的重大科学问题, 特别是关于第一代天体如何形成、星系形成与演化、暗能量性质、宇宙磁场、引力本质、生命分子与地外文明等. 经过 20 多年来的探讨和积淀, SKA 在起源和宇宙间基本力两大方面形成了五大科学目标, 进而分为 16 个方向, 具体如下.

(1) 起源方面.

目标一: 宇宙黑暗时期探测, 包括

- ① 中性氢探测,
- ② 第一代重元素的探测,
- ③ 第一代超大质量黑洞的研究.

目标二: 星系演化、宇宙学与暗能量研究, 包括

- ④ 暗能量,
- ⑤ 星系演化,
- ⑥ 宇宙大尺度结构.

目标三: 孕育生命的摇篮, 包括

- ⑦ 原行星盘成像,
- ⑧ 原始生命分子,
- ⑨ 搜寻地外生命.

(2) 宇宙间基本力方面.

目标四: 用脉冲星和黑洞进行引力强场检验, 包括

- ⑩ 利用脉冲星进行引力波探测,
- ⑪ 黑洞旋转的测量,
- ⑫ 引力理论研究.

目标五: 宇宙磁场的起源和演化, 包括

- ⑬ 银河系磁场,
- ⑭ 超新星遗迹及星系团中的磁场,

- ⑮ 星系际空间磁场,
- ⑯ 宇宙尺度的磁场演化.

SKA 建设准备阶段重要事件

SKA 现处于建设准备阶段后期,十个工作包国际联盟正全面开展关键技术攻关和样机研发.建设准备阶段国际重要事件包括:

(1) 2011 年 10 月,决定采用双台址,即澳大利亚、南非/非洲八国共同作为 SKA 台址.11 月组建英国公司 SKAO.

(2) 2014 年 7 月,国际天文界论证遴选了 SKA 建设第一阶段 SKA1 的 13 个优先科学目标.

(3) 2015 年 3 月,SKA 国际组织完成了 SKA1 基线重订,基本确定了 SKA1 建设方案.

(4) 2015 年 4 月,英国与意大利竞争国际 SKA 组织永久总部,英国最终胜出.

(5) 2015 年 7 月,SKA 新版科学白皮书发布,包含 130 个章节,由 31 个国家的 1200 多位作者共同完成长达 2000 页的科学项目建议.

(6) 2018 年 4 月,SKA 探路者 MeerKAT 的 64 面 13.5 m 反射面天线阵建设竣工.

(7) 2018 年底,启动 SKA1 建设.

1.2 SKA1 及其科学目标

SKA1 基线重订

2015年3月, SKA第17次董事会批准了SKA1的建设方案, 完成了SKA1基线重订. SKA1包含位于南非的约200面反射面天线阵SKA1_mid和位于澳大利亚的约13万个对数周期天线低频孔径阵列SKA1_low, 建造费用6.5亿欧元. 作为可独立运行的装置, SKA1建成后将成为最大天文科学装置之一.

SKA1基线重订的具体设计方案如下:

(1) 在南非建造原基线设计70% (133面) 的SKA1反射面天线, 最长基线减为150 km (甚至可以减至120 km). 按照优先级, 将依次建造频段2, 频段5和频段1的接收机, 频率覆盖350 MHz ~ 13.8 GHz, 具备原基线设计50%的脉冲星搜寻能力. 南非SKA探路者MeerKAT (64面反射面天线) 将整合进入SKA1反射面阵, 形成197个反射面天线阵SKA1_mid.

(2) 在澳大利亚建造原基线设计50%的低频孔径阵列 (约13万个对数周期天线), 最长基线65 km, 频率覆盖50~350 MHz. 利用低频孔径阵开展脉冲星搜寻, 形成SKA1_low. 澳大利亚巡天阵(SKA1_survey)推迟建造, 即澳大利亚SKA探路者ASKAP (36面反射面天线) 暂不纳入SKA1, 可作为下一代相位阵馈源测试发展平台.

(3) 从SKA1建设经费中调拨2000万欧元开展SKA先进仪器项目AIP, 支持相位阵馈源、中频孔径阵列和宽带单波束馈源的研发.

SKA1建设经费的约58%用在南非, 42%用在澳洲. SKA1_mid接收面积达33 000 m², SKA1_low接收面积约0.4 km². 原始数据输出分别为2TB/s和157TB/s.

经过基线重订的SKA1的性能

SKA1_mid在1.4 GHz频段的具体性能指标为: 灵敏度达1330 m²/K, 分辨率为0.28 arcsec, 巡天速度为 $8.3 \times 10^5 \text{ deg}^2 \cdot \text{m}^4/\text{K}^2$. SKA1_mid与目前国际同类型最大射电望远镜阵JVLA相比, 其灵敏度是JVLA的8倍, 分辨率是JVLA的4倍, 巡天速度是JVLA的170倍.

SKA1_low在140 MHz频段的具体性能指标是: 灵敏度为520 m²/K, 分辨率为6.7 arcsec, 巡天速度为 $1.9 \times 10^6 \text{ deg}^2 \cdot \text{m}^4/\text{K}^2$. SKA1_low与目前国际同类型最大低频阵LOFAR相比, 灵敏度是LOFAR的6.1倍, 分辨率是LOFAR的1.3倍, 巡天速度是

LOFAR 的 28 倍.

SKA1 的优先科学目标

2014 年 7 月 8 日, SKA 董事会批准了 SKA1 科学目标优先级选择程序. 由 SKA 的科学评审委员会 SRP (Science Review Panel) 和科学与技术咨询委员会 SEAC (Science Engineering Advisory Committee) 根据详细的评分标准和流程对科学目标进行了评估, 得到了 SKA1 阶段 13 个优先的科学目标, 具体如表 1 所示. 优先级排名居前的科学目标包括: 利用中性氢 21 厘米辐射进行宇宙再电离成像及功率谱测量, 和利用脉冲星高精度计时、脉冲星星族和毫秒脉冲星进行引力检验及引力波探测. SKA 国际组织 SKAO 组建了 13 个科学工作组, 正在全面开展科学目标的预研.

表 1 SKA1 优先科学目标

科学工作组	科学目标	SKA1阵列
宇宙再电离	早期宇宙星系际介质物理 I. 成像	SKA1_low
脉冲星	高精度计时 —— 引力检验和引力波探测	SKA1_low, SKA1_mid
脉冲星	脉冲星星族和毫秒脉冲星 —— 引力检验和引力波探测	SKA1_low, SKA1_mid
宇宙再电离	早期宇宙星系际介质物理 II. 功率谱	SKA1_low
中性氢	红移 0.8 的 10^{10} 太阳质量星系可分辨中性氢运动学和形态学	SKA1_mid
宇宙磁场	可分辨的全天星际和星系际磁场特征	SKA1_mid
瞬变现象	在红移 2 解决重子丢失问题和决定暗能量状态方程	SKA1_mid
宇宙学	限制初期非高斯性和超视距尺度引力检验	SKA1_mid
中性氢	近邻宇宙星际介质高空间分辨率研究	SKA1_mid
地外生命	100 pc 距离类地行星形成区里微小尘粒生长成图	SKA1_mid
连续谱	测量宇宙的恒星形成历史 I+II. 非热+热过程	SKA1_mid
中性氢	银河系星际介质的多分辨成图研究	SKA1_mid
宇宙学	角相关函数 —— 探测非高斯性和物质偶极	SKA1_mid

表格来源: SKA 官网: <http://astronomers.skatelescope.org/documents/> 及 Robert Braun.

参考文献

- 彭勃, 柴晓明, 秦波, 等, 2017. SKA 建设准备阶段关键问题研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017. 02, doi:10.1360/SSPMA2017-00014.
国际 SKA 组织网站 www.skatelescope.org.

第二章 我国参加 SKA 情况概述

2.1 总体情况

我国是 SKA 的首倡国及国际 SKA 组织的创始成员国. 1993 年, 在京都第 24 届国际无线电科学联合会 (URSI) 大会上, 包括中国在内的十国天文学家联合发起倡议, 筹划建造下一代大射电望远镜 LT (large telescope). 1994 年, 中国提出利用贵州南部众多喀斯特洼地群建设 LDSN (large diameter small number) 的射电望远镜阵列, 为发展 LT 中国概念 KARST (kilometre square area radio synthesis telescope) 提供了独一无二的望远镜台址. 1997 年, 综合多年 LT/SKA 科学目标讨论和技术方案探索, 中国提出了 KARST 的先导单元 FAST 概念: FAST 可独立于 SKA, 作为世界最大的单天线射电望远镜独立开展天文观测. 2004 年, 中国成为 SKA 的四个候选台址之一, 与其他三个候选台址 (阿根廷/巴西、澳大利亚/新西兰、南非及非洲八国) 一起, 开始接受 SKA 台址的无线电环境等综合评估. 2011 年, 包括中国在内的七个国家, 共同创建了国际 SKA 组织.

2012 年 9 月, 国务院批准中国参加 SKA 建设准备阶段, 并授权科技部代表中国参加 SKA. 同年 12 月, 科技部、基金委、中科院先后启动科研项目, 支持 SKA 相关科学准备和技术研发, 以完成建设准备阶段承诺的实物贡献. 同时, 相关单位也投入大量科技资源, 为中国参与 SKA1 建设和应用开展了准备工作. 2015 年 6 月, 受科技部委托中国科学院学部对中国参与 SKA 开展了综合咨询评议. 2016 年 8 月, 国务院将 SKA 列入“十三五”规划.

2.2 中国的科学准备

科学目标战略研究

在科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院的共同支持下,国内射电天文界启动了 SKA 建设准备阶段关键科学问题的预研究,经过多轮广泛深入的讨论,并结合我国射电天文大科学装置的具体现状,提出并确立了我国 SKA 科学研究的“2+1”战略。“2”指两大优先突破方向,即中性氢和脉冲星,“1”指其他潜在的研究方向。

中性氢 21 厘米辐射是揭示宇宙黑暗时代(宇宙微波背景辐射到第一代恒星形成之前的宇宙)和宇宙黎明的唯一手段。通过不同红移处的中性氢 21 厘米辐射观测,可揭示不同时期宇宙中的氢原子分布,从而描绘出第一代恒星(第一缕曙光)和星系形成及气体再电离的复杂过程,精确测量宇宙大尺度结构,为解决宇宙起源等重大问题提供重要信息和线索。我国自主建成的低频射电望远镜阵列 21CMA,采用的对数周期天线与 SKA1 低频阵列最终的天线方案相同,相当于十分之一的 SKA1 低频阵列。自 2006 年 21CMA 运行以来,研究人员掌握了低频孔径阵列基本数据处理的方法,解决了诸多依赖长期经验积累的细节问题,并在低频射电天空的前景去除和成像观测等技术领域取得重要进展。

利用脉冲星进行引力检验及引力波探测可对爱因斯坦广义相对论进行直接验证,为人类认识宇宙提供新窗口。理论估计 SKA1 将发现 2 万颗脉冲星,比目前已知数量提高一个数量级。相比于目前普遍使用的百米级望远镜,SKA1 的测时精度可以提高 4~6 倍,达到几十纳秒水平,在此基础上引力波直接探测非常有希望。

另一方面,中性氢和脉冲星两个方向也是 FAST 的核心科学目标。FAST 已于 2016 年底建成,早于 SKA1 七年投入观测,其超越现有观测设备的接收面积和探测灵敏度,可为我国在中性氢和脉冲星研究方面奠定基础。

中国天文参与 SKA 的国际竞争力分析

SKA 作为未来全球性能卓越的射电天文装置,将带来大量科学突破,而这些科学突破必将在各国优秀科学家之间的竞争,尤其是对望远镜时间的竞争中产生。根据国际 SKA 组织规则,未来 SKA 望远镜的使用,将在望远镜时间与投资比例挂钩原则的同时,引入科学优先原则,即 SKA 各成员国之间存在竞争。因此,如何最大限度地争取望远镜时间,是确保我国未来 SKA 科学回报的关键,而这其中最根本的,是提升我国科学家