我国天文大设备的现状与未来专题·评述

持续参与世界最大综合孔径望远镜
SKA 国际合作

彭勃^{①②③*}, 金乘进^{①②③}, 杜彪^{③④}, 秦波^①, 郑元鹏^{③④}, 卢雨^{③④},
梁赞明^{③④}, 徐海光^⑤, 赵公博^①, 田文武^①, 刘国玺^{③④}, 周建寨^{③④},
冯贞国^{③④}, 师民祥^{③④}, 张一凡^{③④}, 金超^{③④}, 闫丰^{③④}, 伍洋^{③④}, 刘鸿飞^{①②③},
安涛^{②⑥}, 顾俊骅^①, 牛传峰^{③④}, 耿京朝^{③④}, 朱岩^{①②③}, 朱凯^{①②③}, 于京龙^{①②③},
柴晓明^{①③}, 张立民^{①③}, 张翔^{①③}, 李婧楠^{③④}, 李硕^{③④}, 刘丽佳^{①③}

① 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

② 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008;

③ 射电天文技术联合实验室, 北京 100012;

④ 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 石家庄 050081;

⑤ 上海交通大学理学院物理系, 上海 200240;

⑥ 中国科学院上海天文台, 上海 200030

*联系人, E-mail: pb@nao.cas.cn

收稿日期: 2012-07-31; 接受日期: 2012-08-31; 网络出版日期: 2012-12-10

国家重点基础研究发展规划项目计划(编号: 2013CB837900, 2012CB821800)、国家自然科学基金国际合作与交流项目(编号: 11261140641)和中国科学院重点部署项目(编号: KJZD-EW-T01)资助

摘要 平方公里阵 SKA (Square Kilometre Array) 是计划建造的世界最大综合孔径射电望远镜, 致力于回答宇宙起源和基本力等问题. 自 1993 年概念提出, 全球已有 20 个国家 67 个科研机构的天文学家和工程师参与 SKA 预研究. 中国在 SKA 发起、选址、工程概念及技术研发等方面起到了重要推进作用. 目前 SKA 已进入建设准备阶段, 包括中国在内的许多国家正在进行先导天线、相位阵馈源等 SKA 关键技术试验研究. 中国持续参与 SKA 国际合作, 组建团队探索有限科学目标、致力于高精度轻型天线设计与工艺研究、宽频带大视场接收机技术研究, 将跨越式提升我国天文学和技术水平、我国工程和制造业水平, 实现国际重大科学工程的“中国创造”里程碑. 其可行性已通过多方分析和论证, SKA 是中国参与 21 世纪国际重大科学工程千载难逢的机遇.

关键词 射电天文, 综合孔径望远镜, 高性能轻型天线, 相位阵馈源, SKA

PACS: 95.55.Jz, 95.36.+x, 95.30.Sf, 95.75.-z, 95.75.Kk

doi: 10.1360/132012-662

引用格式: 彭勃, 金乘进, 杜彪, 等. 持续参与世界最大综合孔径望远镜 SKA 国际合作. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2012, 42: 1292–1307

Peng B, Jin C J, Du B, et al. China's participation in the SKA—the world's largest synthesis radio telescope (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2012, 42: 1292–1307, doi: 10.1360/132012-662

平方公里阵 SKA (Square Kilometre Array) 是国际上即将建造的最大综合孔径射电望远镜. 其接收面积达一平方公里, 频率覆盖 70 MHz–10 GHz (可升级至 25 GHz), 比目前最大厘米波综合孔径望远镜 JVLA (Jansky Very Large Array) 灵敏度提高 50 倍、搜寻速度提高 10000 倍. SKA 致力于回答人类认识宇宙的一些基本问题, 特别是关于第一代天体如何形成、星系演化、宇宙磁场、引力的本质、地外生命与地外文明、暗物质和暗能量等.

SKA 建造经费约 15 亿欧元(2007 年估价)^[1], 由多国政府及国家研究机构联合筹资, 分两个阶段建设^[2]: 第一阶段 SKA1 (2016-01–2019-12) 建设约 10% 的 SKA; 第二阶段 SKA2 (2018-01–2023-12) 建设其余 SKA. 目前 SKA 处于建设准备阶段(2012-01–2015-12).

中国持续参加 SKA 建设准备阶段的可行性已通过天文界和科技界两次大型专家会的咨询与论证. 未来 4 年, 需投入 100 万欧元 SKA 国际组织会费和 4400 万人民币 SKA 建设准备阶段关键技术和科学预研费. 科技部已协调财政部、国家自然科学基金委和中国科学院给予联合支持.

我们建议: 在 SKA 早期科学目标预研究、高性能轻型天线结构设计与工艺研究、宽频带大视场接收机技术研究等方面, 针对性开展射电天文前沿科学和高技术研究; 通过产学研结合, 持续参与 SKA 国际合作, 跨越式提升我国天文、技术、工程和制造业水平, 实现国际重大科学工程“中国创造”里程碑.

1 SKA 历史与现状

1993 年, 在日本京都第 24 届国际无线电科学联合会 IURS (International Union of Radio Science) 大会上, 包括中国在内 10 国天文学家联合倡议: 筹划建造下一代大射电望远镜 LT (Large Telescope, 1999 年易名 SKA), 其相当于 100 面 100 m 口径天线组成的射电望远镜阵列(迄今, 国际上只有 2 个 100 m 射电望远镜). 同时组建了大射电望远镜工作组 LTWG (Large Telescope Working Group), 包括澳大利亚、中国、加拿大、法国、德国、印度、俄罗斯、英国、美国和荷兰代表, 开始了 LT 科学目标和工程概念发展的国际合作与协调.

1994 年, 中国提出利用贵州众多喀斯特洼地群, 建设 LDSN (Large Diameter Small Number) 射电望远镜

阵列, 为 LT 中国概念 KARST (Kilometre square Area Radio Synthesis Telescope) 提供了独一无二的台址. 1997 年, 北京天文台提出 KARST 先导 FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope) 概念, 可独立于 SKA 开展世界第一大单天线射电天文观测与研究.

2000 年, 在曼彻斯特举行的 IAU (International Astronomical Union) 全会期间, 宣布成立 ISSC (International SKA Steering Committee), 在各国研究所(天文台)层面协调、推进 SKA 国际合作(图 1).

2011 年 11 月 23 日, 澳大利亚联邦科学与工业研究部、中国科学院国家天文台、意大利国家天体物理研究所、荷兰科学研究组织、新西兰经济发展部、南非国家研究基金会和英国科学与技术设施理事会等 7 国的代表, 在伦敦签署了组建 SKA 独立法人机构 SKAO (SKA Organisation) 的成员协议, 成为 SKAO 创建成员国. 同时, 组建了 SKA 国际组织董事会 BoD (SKA Board of Directors), 共同领导 SKA 步入建设准备阶段. 2012 年 3 月和 6 月, 加拿大、瑞典先后成为 SKAO 正式成员.

SKA 现处于建设准备阶段, 已完成各关键部件概念评审 CoDR (Concept Design Review); 完成建设准备阶段工作任务分解 WBS (Work Breakdown Structure) 和工作内容描述 SoW (Statements of Work), 正着手确定工作包 WP (Work Package), 以开展关键

图 1 2000 年曼彻斯特 IAU 大会新闻报纸, ISSC 正式成立及 SKA 技术方案排行榜

Figure 1 A news coverage of the establishment of the ISSC and a list of the SKA engineering concepts appeared on a newspaper during the IAU GA in Manchester in 2000.

技术攻关和样机研发; 将从澳大利亚/新西兰、南非/8 个非洲国家两个候选区优选 SKA 台址。

在 SKA 合作中孕育了众多“地方特色”成果, 如荷兰 LOFAR (LOW Frequency ARray)、中国 FAST、澳大利亚 ASKAP (Australia SKA Pathfinder) 和南非 MeerKAT 等, 它们的经费投入均在 1 亿美元以上。

2009 和 2012 年, 科技部先后启动了国家重点基础研究发展计划项目“宇宙第一缕曙光探测”和“射电波段的前沿天体物理课题及 FAST 早期科学研究”。前者可看作 SKA 先导项目, 其科学目标单一, 致力于宇宙再电离探测, 其观测天区固定在北极 $10^\circ \times 10^\circ$ 范围。某种意义上, “宇宙第一缕曙光探测”和参与 SKA 建设准备阶段关键技术研究存在“承上启下”的关系, 为我国持续参与 SKA 项目提供了经验和人才储备。后者围绕国家“十一五”重大科技基础设施——FAST 工程, 开展其早期科学问题和关键技术研究。FAST 是单天线望远镜, 天顶角约 40° 。SKA 是综合孔径望远镜, 天顶角约 80° , 灵敏度比 FAST 提高一个量级。拓展上述两个国家重点基础研究发展计划项目, 致力于我国 SKA 建设准备阶段科学目标与关键技术研究, 有助于形成中国 SKA 早期科学, 在相关仪器设备关键技术方面取得突破。

2 SKA 科学目标与技术路线

SKA 涉及天文、物理、无线电、信息、力学、机械、计算数学、系统科学、材料科学和土木工程等众多领域; 集成众多高科技成果, 如高性能低造价宽带天线制造、高品质接收机、海量数据传输存储与处理、新材料新工艺、绿色能源等, 其建造只有通过广泛的国际合作才能实现。

表 1 SKA 主要技术指标综合列表

Table 1 The main specifications of the SKA

技术方案	频率范围 (GHz)	基线 (km)	$A_e/T_{\text{sys}} (\text{m}^2\text{K}^{-1})$	SSFoM ($\text{m}^4\text{K}^{-2}\text{deg}^2$)	备注
Dish + SPF ¹⁾	0.3–10	3000	10,000	8.6×10^7 @ 1 GHz	$3300 \times 15 \text{ m}$ 抛物面天线 $\eta = 60\%$ $T_{\text{sys}} = 35 \text{ K}$
Dense AA ²⁾	0.4–1.4	200	10,000	10^{10} @ 1 GHz	$250 \times 56 \text{ m}$ 基站 $T_{\text{sys}} = 40 \text{ K}$
Sparse AA	0.07–0.45	200	To Be Determined	10^7 @ 0.3GHz	$250 \times 180 \text{ m}$ 阵列

1) SPF 是 Single Pixel Feed, 2) AA 是 Aperture Array

2.1 SKA 科学目标

SKA 的科学目标主要表现在两大方面:

(1) 起源(Origins)问题: 探讨宇宙学与星系演化: 特别是星系形成、暗能量基本性质; 开展宇宙黑暗时期探测: 第一代恒星是什么时候、如何形成的? 寻找孕育生命的摇篮: 生命存在条件是什么? 到何处寻觅地外生命?

(2) 宇宙间基本力(Fundamental Forces)问题: 开展广义相对论强引力场检验: 爱因斯坦是对的吗? 探索宇宙磁场起源和演化: 宇宙磁场来自哪里?

2.2 SKA 技术路线

20 世纪 90 年代中期, 国际上形成了 LDSN 和 LNSD (Large Number Small Diameter) 两大 SKA 技术路线。逐步完善了 SKA 技术方案和指标。SKA 主要技术指标见表 1, 包括:

频率覆盖: 70 MHz–10 GHz, 可升级至 25 GHz; 基线范围: 100 km (SKA 第一阶段建设) > 3000 km (SKA 第二阶段建设); 系统温度: $T_{\text{sys}} = 35 \text{ K}$ (天线 Dish), $T_{\text{sys}} = 40 \text{ K}$ (孔径阵列 AA, 相位阵) 天线口径: 15 m (抛物面); 天线效率: $\eta > 50\%$; 灵敏度 (A_e/T_{sys}): $10000 \text{ m}^2\text{K}^{-1}$ 。

3 SKA 关键技术试验

SKA 阵列在不同波段将采用不同接收技术。其天线数量巨大, 需要低成本建造、大批量生产和易维护; 成像观测需要高速、海量数据传输和处理, 需要达到极高动态范围等。这对数据传输和处理等技术提出了巨大挑战, 现有天线技术方案更无一能满足 SKA 需求。国际上正在开展顺应 SKA 需求的高性能天线预研, 主要包括: 主焦对称结构天线 Axis-Symmetric Dish (如中

国电子科技集团公司第五十四研究所(简称中国电科 54 所或 CETC 54)为 ASKAP 研制的天线)、偏置天线 Offset Gregorian Dish(如美国和加拿大 TDP (Technology Development Program)联合设计的 DVA (Dish Verification Antenna), 我国射电天文技术联合实验室 JLRAT (Joint Laboratory for Radio Astronomy Technology, NAOC & CETC54)的 DVAC (DVA China)等. 我国在接收机方面也开展了相应可行性研究.

3.1 SKA 关键技术

SKA 的关键技术主要包括:

(i) 天线(Dish): SKA 拟建造大约 3300 面 15 m 口径抛物面天线(图 2), 在 3000 km 范围形成旋臂结构, 其成像动态范围大于 1000000. 大批量高灵敏度的设计工艺给天线研制带来前所未有的挑战;

(ii) 孔径阵列(Aperture Array): SKA 拟研发低频和中频两种孔径阵列(图 3 和 4), 新型、高效、低成本和大视场孔径阵列技术将为 SKA 提供大视场和大观测天区;

(iii) 软件与计算(Software and Computing): 超级计算机在 SKA 数据处理中起着重要作用, SKA 产生的海量数据需要处理能力达到 10 亿亿次/秒的高性能超级计算机, 是 2010 年最高性能的超级计算机处理能力的 50 倍, 相当于 10 亿台个人电脑;

图 2 SKA 天线示意图

Figure 2 Illustration of the SKA dishes.

图 3 SKA 低频孔径阵列示意图

Figure 3 Illustration of the SKA low frequency aperture array.

图 4 SKA 中频孔径阵列示意图

Figure 4 Illustration of the SKA mid-frequency aperture array.

(iv) 信号传输与网络(Signal Transport and Networks): SKA 天线数据传输率达 160 Gbps, 是现有因特网传输率 10 倍; 而孔径阵列数据传输率达数个 Pbps, 比现有因特网传输率高 100 倍以上. SKA 将极大地推动信息科学技术领域的发展;

(v) 信号处理(Signal Processing): 望远镜接收射电信号时的数据预处理、波束形成、自检测以及算法设计均涉及信号处理. SKA 将在通用处理器技术、图形处理器 GPU (Graphic Processing Unit)、现场可编程门阵列 FPGA (Field Programmable Gate Array)、专用集成电路 ASIC (Application Specific Integrated Circuit) 等领域开展深入研究;

(vi) 规模化的可再生能源: SKA 基础设施具有相当大能源需求, 约 50–100 MW, 其大部分集中在偏远地区. SKA 研发规模化的可再生能源产生、分配、存储及节能技术, 可降低能源成本, 促进新型绿色能源技术的发展.

此外, SKA 是一个超级复杂系统, 包括上百万个组成部分. 各部分的设计者需要协同工作, 采用并展开系统工程方法至关重要. 这一过程将引导和控制项目所有阶段、所有层次的工作.

3.2 SKA 天线先导试验

SKA 关键技术实验研究体现在对其各种先驱者(Precursor)、探路者(Pathfinder)的设计与研制.

SKA 的先驱者是指在台址候选地建造的关键技术探索望远镜, 如澳大利亚的 ASKAP、南非 MeerKAT 及澳大利亚 MWA (Murchison Widefield Array) 等. ASKAP 由 36 面 12 m 前馈抛物面天线组成, 频率上限为 10 GHz. 反射面采用铝蜂窝夹层结构面板; 采用方位—俯仰—极化三轴式座架(图 5). MeerKAT 由 7 个 12 m 前馈抛物面天线(Karoo Array Telescope, KAT 7)作先导, 核心由 64 个 13.5 m 偏置格里高利天线组成; 反

射面采用玻璃钢材料, 整体成形; 采用方位—俯仰两轴式座架(图 6).

SKA 探路者是指 SKA 相关科学、技术和运行项目, 如 AO (Arecibo Observatory)、e-EVN (electronic European VLBI Network)、ATA (Allen Telescope Array)、EMBRAC (Electronic MultiBeam Radio Array ConcEpt)、EVLA、LOFAR 等天文装置. 中国电科 54 所与国家天文台开创性地提出了 SKA 中国验证天线 DVAC 方案. 2011 年 6 月 15 日, JLRAT 按期提交了 SKA 天线中国方案^[3-6]: DVAC-1(DVAC, #1)即偏置格里高利 15 m 天线概念描述文档, DVAC-2 即主焦天线概念描述文档, 以及各自相应支撑文档, 供专家评估. 2011 年 7 月 13–15 日, SKA 天线 CoDR 在加拿大举行, JLRAT 作了 DVAC 4 个报告(图 7).

DVAC-1 和 DVAC-2 天线概念设计的三维模型如图 8 和 9 所示. DVAC 概念设计方案主要特点如下: DVAC-1 采用高效率低旁瓣偏置格里高利天线, 期望高的动态范围; DVAC-2 采用三轴式前馈天线, 期望稳定的成像动态范围. DVAC 天线辐射性能的精确分析、天线设计和工艺实现方法还需进一步研究.

图 5 澳大利亚 ASKAP
Figure 5 The ASKAP antenna in Australia.

图 6 南非 KAT 7
Figure 6 The KAT7 in South Africa.

图 7 SKA 天线中国方案 DVAC 技术文档
Figure 7 Documents of DVAC (Dish Verification Antenna China).

图 8 DVAC-1 天线三维模型
Figure 8 3-D model of DVAC-1 (Offset Gregorian dish).

3.3 宽频带大视场接收机技术

射电天文望远镜所用宽带馈源频率一般覆盖 1 至 2 个倍频程, 如 EVLA, eMERLIN (electronic MultiElement Radio Linked Interferometer Network)和 ACTA (Australian Compact Telescope Array)研发的宽带馈源. 近期正在研发的宽带馈源, 如 Eleven Feed(图 10)^[7]和脉冲星观测使用的宽带加脊喇叭馈源, 基本做到了 10 个倍频程以上有相近照明波束, 但在反射损耗和接收机

图 9 DVAC-2 天线三维模型

Figure 9 3-D model of DVAC-2 (Prime focus).

图 10 瑞典 Chalmers 大学为美国国立射电天文台 GBT (Green Bank Telescope) 望远镜研制的 Eleven 馈源, 频率覆盖 150–1700 MHz

Figure 10 The Eleven Feed developed for GBT of NRAO by Chalmers University in Sweden, with a frequency range of 150–1700 MHz.

噪声等方面与传统接收机尚有差距, 其性能尚待优化。

大口径单天线望远镜视场的扩大通常采用多喇叭馈源阵列技术, 如澳大利亚 Parkes 的 13 波束和美国 Arecibo 的 7 波束喇叭馈源阵列。相位阵馈源 PAF (Phased Array Feed) 是新型大视场馈电技术, 正进入性能优化及实用阶段。

将 PAF 作为大口径天线的主焦馈源研究始于上世纪末。与传统单波束馈源相比, PAF 技术在单波束增益和多波束连续天空覆盖等方面表现更优^[8]。射电天文界正在进行相关理论和试验研究。如欧洲 Faraday 项目研究了高频多喇叭馈源和低频相位阵馈源, 以提高单口径射电望远镜使用效率。PAF 使用若干小尺度馈电单元

对焦面场采样, 通过后续波束合成来形成多个波束^[9]。与多喇叭馈源阵列相比, PAF 可实现连续天空覆盖, 并且可以通过波束合成网络将偏焦波束性能调整到与主焦波束相当的水平^[10,11]。

图 11 为对 FAST 望远镜焦面场的仿真结果, 偏焦方向有显著散焦现象。通过 PAF 技术对焦面场采样, 并利用后续波束合成网络, 基本上消除偏焦方向上的散焦效应, 使视场内各个波束增益基本相同。PAF 研究主要包括针对 SKA 的常温系统和针对大天线的制冷系统两种。代表性的常温 PAF 系统有: ASTRON (Netherlands Institute for Radio Astronomy) 为综合孔径望远镜 WSRT (Westerbork Synthesis Radio Telescope) 研发的 APERTIF (APERTure Tile In Focus) 接收机(图 12)^[12,13]; 澳大利亚 CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) 研发的、用于 ASKAP 的接收机, 使用平面阵子做馈电单元对焦面场采样; ASTRON 研发的、基于 Vivaldi 阵子单元的双偏振 PAF 馈源阵列接收机。采用上述常温 PAF 接收机, 望远镜系统温度在 L-波段约 50–60 K。

图 11 FAST 射电望远镜的焦面场仿真计算结果

Figure 11 A simulation result of the focal field distribution for FAST.

图 12 ASTRON 为综合孔径阵 WSRT 研发的 APERTIF 常温 PAF 接收机^[13]

Figure 12 The room temperature PAF receiver APERTIF developed for WSRT by ASTRON [13].

具有代表性的制冷 PAF 系统为美国国立射电天文台(National Radio Astronomy Observatory, NRAO)和杨百翰大学(Birmingham Youth University, BYU)合作研发的、用于 GBT 射电望远镜的接收机系统. 该系统分别由 BYU 大学研制的宽带阵子馈源阵列, 加州理工学院(Caltech)和 NRAO 研制的小型制冷放大器, NRAO 研制 19 单元制冷杜瓦. 该制冷 PAF 接收机的系统温度拟达到 22 K.

PAF 接收机在 SKA 天线上将发挥重要作用:

(i) 扩大视场提高巡天效率, 形成连续天空覆盖;

(ii) 改善单波束照明. 通过波束合成, 提高望远镜口径边缘照明权重, 提高望远镜远场增益, 同时压制地面漏损.

通过 PAF 技术研究, 提高阵列电磁仿真、测量、波束合成等知识积累和研究实力, 有助于 PAF 馈源技术自主研发. PAF 馈源涉及的焦面场采样、小型化低噪声放大器和数字波束合成等技术可在其他相关领域, 如非相干散射雷达、卫星跟踪等领域有广泛应用前景.

国内射电天文接收机研制尽管在个别领域已有国际领先成果, 但尚未形成规模, 多为定制或与国外研究单位合作研制. 国外射电天文台(大学)有丰富的接收机研制经验和较强研发实力. 与荷、英、澳、美和瑞典等射电天文强国合作, 针对 SKA 宽带馈源、制冷低噪声放大器和 PAF 等开展研究, 有利于吸收国外接收机研制的先进技术和经验, 培养国内相关领域的人才队伍和提高相应的研发水平. 努力提高接收机自主研发能力, 并将其应用到国内大型射电望远镜, 获得具有国际竞争力的综合性能.

4 持续参与 SKA 拟解决的科学技术问题

立足于中国持续参与 SKA 国际重大科学工程, 深入开展 SKA 建设准备阶段科学目标和关键技术研究, 拟解决的科学技术问题主要包括: SKA 早期科学目标的形成和预研究、高精度轻型天线设计与工艺技术研究、宽带大视场新型馈源技术研究等.

4.1 SKA 科学目标预研究

SKA 作为人类有史以来建造的最大综合孔径望远镜, 2020 年以后 30 年(甚至更久远), 将是国际天文界占统治地位的重大基础科学装置. 与 SKA 相关的科学研究将成为国际天文主导课题. 在此方面, 我国

基础相当薄弱, 应尽早布局, 以现有队伍为基础组建科学团队, 开展有限目标探索, 重点是:

(i) 对 SKA 科学目标进行充分预研究, 逐步形成、发展中国的 SKA 早期科学目标, 在 SKA 投入运行前做好科学储备.

(ii) 培育中国 SKA 科研力量, 立足国内天文台和大学, 联合培养博士生, 为今后投入 SKA 科学研究做好人才储备.

拟围绕以下课题开展 SKA 科学目标预研究.

4.1.1 基于 SKA 的暗能量研究

利用宇宙大尺度结构的观测, 研究暗能量的基本性质, 是国际 SKA 五大科学目标之一. 最近十多年来, 我国科学家在结合多种天文观测限定暗能量的性质, 以及对暗能量本质的理论探索方面, 积累了大量工作, 并取得了有国际影响力的成果(如 quintom 暗能量模型的提出). 中国的暗能量研究团队, 无论从天文方面还是从理论物理方面, 已具有相当规模. 因此, 聚焦 SKA 的暗能量研究, 是发挥我国天文界与物理界优势的选择.

1998 年, 两个独立实验团组利用对 Ia 型超新星的观测, 发现宇宙在加速膨胀. 该现象可以在爱因斯坦引力框架内引入具有负压的暗能量, 或在宇宙学尺度上修改爱因斯坦引力来解释. 暗能量模型可用暗能量状态方程参数 w 来分类, 如真空能模型预言 $w=-1$; quintessence 模型预言 $w>-1$; phantom 模型预言 $w<-1$; quintom 模型预言 w 可越过 -1 . 从实验数据中重组暗能量状态方程的演化, 对暗能量理论研究具有重要意义. 通常有以下两类方法重组 w .

第一, 参数化重组 假定 w 为宇宙尺度因子 a 的某种函数, 由观测数据来限制其中的参数. 使用较多的参数是 $w(a)=w_0+w_a(1-a)$, 其自由参数 w_0 和 w_a 分别对应暗能量状态方程今天的值和对宇宙尺度因子的导数. 如果实验发现非零的 w_a , 将是暗能量具有动力学性质的证据.

第二, 非参数化重组 非参数化方法不依赖于人为函数形式, 直接从数据中重组 w . 实现这种重组有主成分分析法、数据导数法、高斯过程法、关联函数法等, 其中关联函数法具有准确、快捷、适用范围广等优点, 已被应用于最新天文观测数据, 研究暗能量状态方程^[14].

检验爱因斯坦引力可通过测量有效牛顿常数和

引力滑移对理论预言值 1 的偏离实现^[15]. SKA 将在暗能量和修改引力等发挥独有优势.

(1) 利用 21 cm 重子声波震荡限制暗能量状态方程 大爆炸后, 宇宙温度极高以致原子无法合成, 整个宇宙是电子和原子核组成的等离子体. 随着宇宙膨胀, 温度降低. 大爆炸结束 50 万年后, 核子和电子合成中性气体, 光子不再被电子束缚而自由传播, 形成宇宙微波背景辐射(Cosmic Microwave Background, CMB). CMB 观测表明, 早期宇宙物质分布均匀, 宇宙中不同位置密度涨落只有千分之一. 这和今天宇宙物质分布有很大不同, 区别来自于引力作用.

在早期宇宙中, 引力被等离子体压力抗衡. 二力抗衡形成了震荡, 类似于声波在介质中的震荡, 使得高密度区域周围物质被球对称地向外推进. 这个推进的距离在今天大约是 5 亿光年. 重子声波震荡效应(Baryon Acoustic Oscillation, BAO)已被 Sloan 红移巡天观测到, 并被用于限制暗能量参数(图 13)^[16]. 相比于低红移大尺度结构巡天, 21 cm 巡天具有更大有效空间, 利用 21 cm 强度映射观测 BAO 有明显优势. 图 13 给出 BAO 21 cm 和 Sloan 巡天对暗能量参数限制预研究对比, 前者对暗能量限制更强.

(2) 利用 ISW 和星系尺度形变效应限制暗能量和修改引力参数 光子经过引力势井或势垒时会损失或者获得能量被称为 ISW (Integrated Sachs-Wolfe) 效应. 另外, 引力势还会改变光子传播方向, 使背景星系的观测图像被前景星系放大或缩小, 这是星系尺度形变效应(Cosmic Magnification). 由于暗能量和修改引力都直接影响引力势, ISW 和星系尺度形变效应是研究暗能量和引力有力工具.

利用近期 EMU (Evolutionary Map of the Universe) 和 WODAN (Westerbork Observations of the Deep

Apertif Northern sky survey)模拟数据可限制暗能量和引力模型参数(图 14)^[17], 最中间灰色阴影区域是模拟结果. 对比今天的观测数据(闭合虚线), 射电实验可明显提高观测限制. 利用 SKA 射电望远镜数据、CMB 和前景星系交叉关联, 可进一步提高 ISW 和星系尺度形变观测数据对暗能量和引力模型的限制.

4.1.2 宇宙再电离与“黑暗时期”探测

宇宙再电离及“黑暗时期”研究, 是 SKA, 及国际上的 LOFAR、MWA 等设备的中心课题. 我国用于再电离探测的“宇宙第一缕光”望远镜——21CMA, 是国际上第一个工作在 50–200 MHz 波段的 21 cm 专用射电干涉阵列, 使我国在宇宙“黑暗时期”的实验探测上有了了一席之地. 中国的 SKA 科学研究, 应结合我国现有设备及其相关的研究力量展开.

图 13 21 cm BAO 及大尺度红移巡天对暗能量参数 68% 和 95% 置信度的限制

Figure 13 Constraints on the dark energy parameters at 68% and 95% confidence level, from the 21 cm BAO and large scale redshift surveys.

图 14 EMU, WODAN 模拟数据对暗能量(左图)和引力模型(右图)参数的限制

Figure 14 Constraints on dark energy (left) and gravity models (right) from the EMU and WODAN simulated data.

大爆炸之后约 30 万年, 早期宇宙逐渐冷却. 处于游离状态的电子和原子核开始复合, 星系、恒星和行星都尚未形成, 大爆炸余晖——CMB 几乎是唯一的电磁辐射, 宇宙处于“黑暗时期”. 另一方面, 我们周围宇宙充满了各种天体辐射的电磁波, 且结构丰富(图 15). 宇宙是如何从几乎均匀演化到今天这样丰富多彩的世界? 宇宙是如何从黑暗走向光明? 对于这两个阶段之间的宇宙尚知之甚少.

根据 SDSS (Sloan Digital Sky Survey) 高红移类星体观测发现, 随着红移增加, $z \approx 6$ 时宇宙中性氢的比例显著增加. 对 WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) 数据分析发现, 红移下降到约 20 时, CMB 光子被自由电子散射所导致的光深开始变大. 宇宙再电离应发生在红移 6–20 之间. 对何种天体主导了宇宙再电离过程, 可能的候选天体包括第一代恒星或类星体, 需直接对宇宙再电离时期的探测.

光学波段对宇宙黑暗时期末期形成的原始星系探测困难重重. 中性氢作为宇宙黑暗时期和再电离时期分布最广泛重子物质, 可有效追踪宇宙中物质分布和宇宙再电离过程. 中性氢原子基态超精细结构能级跃迁时会吸收或发出波长为 21 cm 光子(图 16). 由于

图 15 宇宙演化简史(NASA/WMAP Science Team, Subaru Telescope/NAO)

Figure 15 A brief history of the universe (NASA/WMAP Science Team, Subaru Telescope/NAO).

图 16 氢原子基态超精细能级跃迁

Figure 16 The superfine energy levels of the hydrogen atom ground state.

宇宙膨胀造成的红移, 来自再电离时期的中性氢 21 cm 辐射波长被拉伸到米波段, 频率在 200 MHz 以下.

宇宙再电离时期, 中性氢 21 cm 辐射亮温度仅为几十 mK. 与 CMB 仅能观测单一红移宇宙不同, 对中性氢 21 cm 线多频观测, 可获得宇宙中物质三维分布信息, 同时也包含了宇宙再电离时间演化信息. 当第一代发光天体出现, 并开始加热周围气体时, 星系间介质(intergalactic medium, IGM)在 21 cm 频率上将首先出现吸收, 然后出现发射. 中性氢 21 cm 线辐射在天空平面涨落演化, 将揭示宇宙结构生长过程和加热机制. SKA 将提供结构形成和宇宙再电离过程细节. 此外, SKA 所具有的高灵敏度将得到高红移射电源高分辨率光谱. 在中性宇宙中, 这些光谱中将出现 21 cm 吸收线. 它们携带了宇宙演化早期物质分布与演化、原始星系周围电离区域生长过程信息. 是目前唯一能探测理论预言的小暗物质晕手段. 对 SKA 所能完成的宇宙再电离科学进行预研, 将确定在哪些领域我国最可能做出有重要科学意义成果.

4.1.3 利用 SKA 观测河外射电源

活动星系核在星系形成和演化过程中扮演着重要角色. 例如, 中央超大黑洞质量与星系质量之间存在密切联系. 活动星系核对主星系的反馈会触发或熄灭星系中恒星形成活动. 另一方面, 近邻宇宙深度射电巡天发现, 大量 mJy 及更弱星系的射电辐射以恒星形成主导, 星暴活动以每年数十个的速率产生超新星遗迹, 它们集体贡献了星系的射电辐射.

SKA 在探索高能天体(活动星系核)、恒星形成和能源演化等前沿领域具有独特优势, 包括:

(i) 宇宙早期非热辐射. SKA 具备探测宇宙再电离前后第一代星系核的能力, 确定第一代活动星系核形成时间, 回答“大质量原初黑洞是否在星系形成中发挥主导作用”, 区分星系中射电辐射是来自活动星系核还是来自星暴.

(ii) 早期宇宙射电源. 高红移($z > 6$)类星体代表

宇宙第一代活动星系核, 其辐射性质和黑洞吸积状态是研究宇宙早期演化和超大黑洞生长的重要因素. 关键是需要确定高红移射电源的结构和辐射谱性质.

(iii) 宇宙吸积历史. 星系并合是“点燃”黑洞、触发 AGN 活动性的重要机制. SKA 将观测深度和广度从当前直到红移 7 宇宙. 解决 AGN 活动性激发机制、寿命和轮回周期. 还可探测双黑洞、引力波天体.

(iv) 恒星形成历史. 观测统计表明, 恒星形成率在红移 2 附近达到峰值. 数值模拟显示, 恒星形成密度在红移 5–6 区间达到峰值. 红移高于 5 的星系是光学难以企及的, SKA 能探测到红移 7 附近的星暴星系, 加上其他(Herschel 红外, ALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array) 亚毫米波)信息, 可用恒星形成历史示踪宇宙能源演化.

对不同红移区间活动星系核和星暴星系样本的观测性质进行统计, 探究恒星形成和活动星系核的宇宙学演化效应. SKA 深度场观测模式能探测到微 Jy 量级的暗弱射电天体. 河外射电源星族的数值模拟显示, 在高灵敏度 SKA 图像中, 大量射电点源混合在一起无法分辨. 要分辨 SKA 深度巡天图像中的点源, 至少需要 1000 km 基线, 相当于在 1.4 GHz 频率达到 50 mas 角分辨率. 活动星系核显著特征是高亮温度. 正常星系或星暴星系射电辐射主要来自致密电离氢区自由-自由辐射, 或超新星遗迹的弥散同步加速辐射. 区分 AGN 和恒星活动的指标是亮温度. SKA 的 3000 公里基线, 可探测红移 7、亮温度超过 10^7 K 的活动星系核.

从多波段协同观测角度, 高灵敏度、高分辨率射电研究是十分必要的. 例如欧洲 GAIA 卫星(Global Astrometric Interferometer for Astrophysics)将于 2013 年发射, 在光学波段能达到几十微角秒天体测量精度, 与 SKA 联合, 将在天体证认、更精准射电参考架建立等发挥重要作用. 另一方面, LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopy Telescope) 巡天会有更多高红移星系被证认. ASKAP 将探测到大批低光度射电源. 国内外 VLBI (Very Long Baseline Interferometry) 带宽将提高 4 倍以上(图 17); 上海 65 m 和意大利 64 m 望远镜加入欧洲 VLBI 网, 将探测到更暗高红移射电类星体. 不同红移区间致密对称源可用作研究射电源宇宙学演化指示器.

4.1.4 利用 SKA 进行引力波探测

利用脉冲星探测引力波, 是国际 SKA 五大科学

图 17 在 1.6 GHz 欧洲 VLBI 网对 J1427+3312 ($z=6.12$) 观测图像, 双瓣间距 160 s 差距^[18]

Figure 17 An image of J1427+3312 ($z=6.12$) made by the European VLBI at 1.6 GHz. The separation between the two lobes is 160 pc [18].

目标之一. 我国于 2016 年建成的 500 m 口径射电望远镜 FAST, 将是发现并探测脉冲星的强有力天文设备, FAST 已将脉冲星与引力波探测列为其主要科学目标. 我国天文界在脉冲星研究方面已建立起了较坚实的基础, 结合我国大科学装置 FAST, 开展脉冲星与引力波探测的研究, 是立足中国射电天文实际情况的、有中国特色的研究方向.

国际上已有多个引力波天文台, 期待在不久的将来捕捉到引力波. Hulse 和 Taylor 对 PSR1913+16 脉冲双星多年高精度观测, 证实了引力辐射存在, 获得了 1993 年诺贝尔物理奖. 脉冲星成为天文学家检验引力与时空性质最有力工具. SKA 可成批发现大量脉冲星, 开启人类探索引力与时空本质.

脉冲星是天然的精确时钟. 当引力波经过脉冲星与地球之间时, 引力波改变了空间度规. 脉冲星的光脉冲到达地球的时间会发生变化. 对大量脉冲星进行长达数年的监测, 可寻找引力波信息. 用 SKA 脉冲星计时阵(Pulsar Timing Array, PTA)探测引力波,

其对应的引力波频率范围与地面引力波天文台 LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) 和空间引力波天文台 LISA (Laser Interferometer Space Antenna) 形成互补: SKA-PTA 对应更低频率($\sim$ nHz), 而 Advanced LIGO($\sim$ 100Hz)和 LISA ($\sim$ mHz)频率更高. SKA-PTA 探测灵敏度提高约 3 个数量级,有望探测到宇宙中引力波背景信号,如超大质量黑洞组成的双星系统及其并和过程产生的引力波,甚至宇宙弦产生的引力波(图 18).

4.1.5 其他重要科学问题的研究

作为 2020 年后主导国际射电天文几十年的大科学装置, SKA 涉及诸多科学领域. 在 SKA 正式投入使用之前的较长时间内, 在 SKA 相关科学研究中, 应持开放的态度, 及时关注其它可能的重要科学问题.

(i) 宇宙线起源的研究 宇宙线起源是天文和粒子物理领域一个重大研究课题. 从射电到高能伽玛射线的多波段观测表明, 超新星遗迹可能是银河系中神秘宇宙线加速之地. 高能粒子在遗迹激波中加速详细物理过程还不十分清楚, 激波加速效率, 能量和粒子注入机制, 电子、离子可被加速到多高能量, 加速区域大小, 磁场是否被某种不稳定性放大或只是被压缩等问题尚无定论. 超新星遗迹是否与它周

围星际物质相关, 特别是在天体拥挤的银河中心区域, 需更高灵敏度和更高分辨率的多波段观测予以认证.

宇宙线主要成份是强子, 其次级成份伽玛光子因其不带电特性在宇宙线研究中有重要地位. 伽玛射线的电中性特征, 使其传播方向不受星际磁场偏转影响, 直接给出宇宙线源方向和物理特性. 新一代甚高能 γ 射线望远镜已发现约 70 颗河内甚高能 γ 射线源(即 TeV 源), 约一半没发现射电对应体. 已证认天体中, 超新星遗迹占相当大比例. 没被证认的 TeV 源对应天体可能是射电弱超新星遗迹, 因目前望远镜灵敏度限制无法探测到. SKA 有可能对银河系宇宙线起源于超新星遗迹这个长期预测作出关键性贡献.

老遗迹中产生的高能伽玛辐射与被激波加速的强子有直接关联. 基于对粒子在超新星遗迹激波中加速物理机制和宇宙线起源研究中取得的新认识, 可提出利用 SKA 优先观测研究科学目标.

(ii) 利用 SKA 进行暗物质粒子基本性质的研究 近十多年天文观测表明, “标准的”冷暗物质模型可能存在重要缺陷. 暗物质有可能是另一种全新的候选者——温暗物质. 有迹象显示, 温暗物质与冷暗物质同样符合天文观测, 而温暗物质可能解决冷暗物质在小尺度分布上的困难.

世界上正在开展的以及计划中的暗物质探测实验, 基本上都是针对冷暗物质的, 包括中国正在开展的地下及空间暗物质探测计划. 从天文观测上区分冷暗物质/温暗物质模型, 是宇宙学与暗物质研究的重要课题. 在射电波段, SKA 将有可能通过对矮星系的中性氢观测, 去追踪大星系周围的子结构或卫星星系, “看到”这些在光学波段几乎是“黑暗”的卫星星系, 从而揭示暗物质粒子的性质, 并对物理学家的暗物质探测实验给出指导性意见

(iii) 天体化学及生命起源问题的研究 生命起源研究, 是 SKA 列出的五大科学目标之一. 中国天文学家在分子谱线方面的观测与研究已有很好的积累, 有可能在利用 SKA 进行生命起源的研究方面有所作为.

4.2 高精度轻型天线设计与工艺研究

SKA 所需天线数量之巨——15 m 口径天线约 3300 面; 分布之广——3000 km 范围形成旋臂结构; 性能之高——成像动态范围达 1000000; 建造之艰

图 18 利用 SKA 探测引力波的预期, 及与其他方法对比^[19]
Figure 18 The expected signal levels of the gravitational waves to be detected by the SKA-PTA. Other detections are also shown for comparison [19].

——平均每天安装 2 面天线; 维护之难——在千公里跨度荒漠中维持高可靠性. 迄今没有一家天线生产研发机构能研制满足 SKA 需求的天线, 其技术难点对工业界提出了极大挑战, 需开展大量基础研究, 包括: 研究 DVAC 天线理论、设计和工艺方法, 提出满足 SKA 要求的 15 m 口径偏置(或正馈)天线方案、优化 DVAC 设计和实验方案、研制 DVAC 天线样机; 与国际(澳大利亚或美国等)天线阵联网, 在 SKA 天线验证组阵实验中, 实现高效率轻型天线设计与工艺技术突破.

(i) 天线辐射特性与噪声温度精确计算方法 研究 DVAC 天线辐射特性的分析计算方法, 精确计算天线辐射方向图和噪声温度. 为设计出性能最优的 DVAC 天线奠定技术基础.

增益和噪声温度是天线性能两个关键指标. 天线方向图的计算关系到天线增益和噪声温度的准确性. 天线近旁瓣方向图计算有物理光学、几何光学法, 天线远旁瓣方向图计算主要是几何绕射法. 不仅要考虑初级馈源的漏失场, 还要考虑副反射面、副面支撑、主面边缘等影响. 建立天线全方向图和背景噪声温度模型, 是准确计算天线噪声温度(包括地面噪声、宇宙噪声及大气噪声)的前提.

(ii) 微波光学设计技术研究 研究 DVAC 天线赋形设计方法, 导出天线主副反射面赋形计算公式; 研究无遮挡口面场分布函数, 为实现高效率低旁瓣天线提供理论依据.

天线口面场分布函数决定了天线的辐射性能. 国内外学者对旋转对称双反射面天线口面场分布进行了研究, 例如广义位移泰勒分布函数和反 Γ 形分布函数等. 但对无副面遮挡双偏置天线口面场分布函数研究未见报道. 确定口面场分布函数后, 利用馈源辐射方向图、能量守恒和等光程条件, 推导天线主副反射面赋形计算公式, 可对双偏置天线进行赋型设计.

(iii) 天线结构保型设计技术研究 1967 年 Von Hoerner 提出保型设计概念, 允许结构在不同俯仰角度下受重力影响发生较大变形, 但变形应按一定方式产生, 即反射器表面仍然保持为一个抛物面. 该理论在德国 100 m 射电望远镜天线得到了应用. 20 世纪 80 年代, 更多大口径天线采用了这样的设计理念, 如德国 32 m 天线和西班牙 30 m 毫米波射电望远镜. 对 10–20 m 口径天线, 尤其是双偏置反射面天线尚未

有应用.

提高效率 and 指向精度指标始终是天线技术领域主要研究方向之一. 基于保型设计概念, 针对 15 m 偏置天线开展结构设计技术研究, 通过理论分析与仿真, 研究天线反射面精度和指向精度理论, 给出满足要求的设计方案, 不仅是 SKA 的需求, 也是解决天线技术领域关键问题的需求.

(iv) 轻型高精度面板成型工艺专题实验研究 天线反射面是保证天线电性能的关键部件之一. SKA 要求天线精度高、成本低、建设速度快. 传统天线反射面一般由铝合金面板拼装而成, 国外已研制出 15 m 口径玻璃钢整体反射面, 精度达 2 mm. 虽与 SKA 要求的 15 m 口径还有差距, 但与传统天线相比已表现出安装速度快、重量轻等优势. 国内尚未掌握这样大尺寸复合材料面板成型工艺, 需突破大尺度模胎设计与制造、轻质高刚度材料反射面制造、整体反射面成型工艺等关键技术.

4.3 宽频带大视场接收机技术研究

SKA 单元天线的馈源采用何种形式尚未完全确定. 传统喇叭馈源和制冷接收机在灵敏度方面表现优越, 但在频率覆盖和大视场方面远不如单波束宽带馈源 WBSPF (Wide Band Single Pixel Feed) 和相位阵 PAF 接收机. 建议研究 WBSPF 和 PAF 关键技术, 并进行部分样机研制, 为 SKA 单元天线馈源形式提供选择. 同时, 考虑将以上技术应用于自主研发的 SKA 验证天线 DVAC, 以及其他国内大型射电望远镜如 FAST、上海 65 m 望远镜等.

(i) 单波束宽带馈源研究 SKA 天线阵列覆盖 300 MHz–10 GHz 频带, 宽带高性能馈源接收机可减少接收机数目, 降低工程建设和将来运行维护难度. 建议开展单波束宽带馈源研究, 以覆盖 11 倍频程 Eleven Feed 馈源为主, 同时开展相应单波束宽带制冷接收机研究. 单波束宽带馈源主要技术难点和研究内容包括以下三点:

- (1) 馈源反射损耗和插入损耗降低;
- (2) 宽带巴伦技术或低噪声差分放大器研究;
- (3) 与 Eleven Feed 结合的制冷杜瓦研制.

(ii) PAF 馈源研究 使用小天线单元对反射面射电望远镜焦面附近电磁场采样, 通过后续波束合成网络对各单元接收到的信号做加权综合, 以期达到并超过传统馈源增益、灵敏度和实现连续天空覆盖等

优异的性能. PAF 主要技术难点和研究内容包括以下三点:

(1) 天线阵列电性能分析. 包括阵列单元电性能, 阵列单元互耦效应分析, 波束合成可行性等内容. 探索合成波束达到照明效率和工作带宽, 以形成紧密排列波束的可行性和各波束插损及噪声分析等.

(2) 小型化制冷放大器研究. PAF 馈源需要几十至上百个馈电单元, 每个馈电单元需配置独立制冷低噪声放大器, 以降低接收机噪声温度.

(3) 数据传输与数字波束合成. PAF 接收机需将各馈电单元接收的信号传至地面, 并进行波束合成运算, 需解决多路宽带数据传输和大计算量的数字波束合成问题.

5 持续参与 SKA 国际合作可行性

中国射电天文基础和相关技术储备相对较弱, 通过与射电天文大国合作, 学习、跟踪、引进, 在吸收的基础上掌握和再创新. 拟立足国内天文台和大学已有科研基础, 拓展国际研究团队合作, 开展科研人员互访、科学观测实验等; 逐步形成我国自主的 SKA 早期科学目标; 联合培养天文理论和技术研究博士, 在 ASKAP 等 SKA 先驱者上开展科学课题观测研究.

5.1 科学技术途径

鉴于: 中国是 SKA 首倡国之一, 在 SKA 概念、台址等方面曾经辉煌; SKA 中国天线技术储备和较高显示度, 我们建议, 中国持续参与 SKA 建设准备阶段科学目标和关键技术研究, 特别是:

(i) 组建 SKA 中国科学团组: 基于现有科研骨干, 与国际一流科学家共同发展、优化 SKA 科学目标, 利用 21 cm 重子声波震荡限制暗能量状态方程, 利用 ISW 和利用星系尺度形变效应限制暗能量和修改引力参数; 开展宇宙再电离时期的 SKA 探测研究, 以及高灵敏度、高分辨率 SKA 观测河外射电源研究; 研究利用 SKA 脉冲星计时阵列探测引力波可能性; 以及其他一些 SKA 相关的重要科学问题, 如宇宙线起源的研究、利用 SKA 限定暗物质粒子基本性质、天体化学和生命起源的研究等; 逐步形成、发展中国的 SKA 早期科学目标.

(ii) 参与 SKA 关键技术研发: SKA 天线设计目

前主要有 3 种方案, 即: 美国和加拿大主导的 DVA(偏置复合面板)、中国 DVAC(偏置铝及碳纤维面板)、中国和澳大利亚 ASKAP 拓展型. 结合在馈源、接收机技术已有基础, 参与宽带馈源和相位阵馈源技术研发. 通过理论分析和专题实验研究, 突破天线、宽带馈源、PAF 和宽带接收机各项关键技术, 优化概念设计、完成详细设计和实验方案等; 研制出高性价比 DVAC 验证样机, 为高性能天线和馈源接收机研制奠定技术基础.

5.2 可行性分析

自 SKA 提出, 中国一直参与 SKA 科学目标探讨、关键技术研发及相关路线图全球协调. 2009 年 6 月, 国家天文台与中国电科 54 所建立了战略伙伴关系; 2010 年 1 月成立 JLRAT. 其工作定位是: 瞄准国际前沿, 发展国内急需射电天文技术, 开展相关设备研发, 探索科学研究与工程技术有机结合新模式.

中国电科 54 所在天线设计和制造上有丰富经验, 特别是, 近年来承担完成了 ASKAP 全部 36 面天线的建造, 天线设计和工艺技术已有所突破, 积累了在荒漠台址进行望远镜建设经验; 国家天文台参与科学目标、台址选择、电波环境测试、数字信号处理和天线设计等工作. 同时, 国家天文台正在承担 FAST 的建设, 积累了大科学工程经验, 一支年轻射电天文技术队伍正在成长. 中国电科 54 所和国家天文台联合, 致力于中国持续参与 SKA 相关研发工作具有可行性. 二者联合已初见成效: 提出的 SKA 中国验证天线 DVAC 受到一致好评. 通过参与 SKA, 我国天线技术研究水平将达到国际先进水平, 同时有望将我国天线产品推向国际市场, 实现“走出去”战略.

2011 年 6 月 17 日, 国家天文台在北京组织召开了“持续参与 SKA 国际大科学工程合作可行性论证会”. 专家组一致认为: 中国持续参与 SKA 国际大科学工程, 满足国家科技和高新技术产业发展需求; SKA 为人类认知宇宙提供了重大机遇, 通过参与该项目, 我国可跻身国际射电天文科学前沿, 提升相关高技术自主创新能力, 获得国际大科学工程建设、管理经验和相关技术成果; 我国相关产业界已具有一定的技术储备和工程经验, 有能力参与该项目技术研发, 并将相关成果应用到国家重大需求领域.

2011 年 10 月 28 日, 科技部组织召开“中国参与国际天文大科学工程专家论证会”. 与会者一致认为:

参与重大天文科技工程国际合作, 有利于提升中国科技国际影响力、创新能力; 使我国科学家拥有国际顶尖科技装置建设、管理、运行和使用权益, 掌握其它渠道难以获得的战略高技术; 中国分阶段加入 SKA 建设的建议合理可行; 以正式成员身份加入 SKA 国际合作组织, 将保障中国拥有科研和研制任务优先认领权; 前期建设准备阶段的适当投入, 可为下一步参加 SKA 工程建设做好准备, 使中国天文界和相关工业界的利益最大化。

2012 年 1 月 14 日, 在中国科学院和中国电子科技集团公司层面正式组建了 SKA 中国项目推进委员会, 在天文和相关工业界层面组建了 SKA 中国项目经理部, 全面规划和推进中国 SKA 国际合作。2016 年将开始进行 SKA 第一阶段建设, 届时 FAST 和上海 65 m 望远镜已建造完成, 其射电天文技术研发队伍可转入 SKA 建造, 以增强中国参与 SKA 建设的技术力量。中国参加 SKA 建设准备阶段是前期参与的自然延续, 已通过天文界和科技界多次论证。

6 FAST 与 SKA 关系

参与 SKA 合作和研发, 促成了中国 FAST 和澳大利亚 ASKAP 等各国大科学工程的提出、立项和建设。ASKAP 与 FAST 致力于回答许多相近科学难题。ASKAP 是综合孔径阵列, 其单元天线属于大视场低灵敏度望远镜; FAST 是单孔径望远镜, 属于小视场高灵敏度望远镜。两者结合, 对天体形成大样本搜寻和暗弱目标重点观测的优势互补。

FAST 源自 SKA, 可独立于 SKA 开展世界第一大单天线观测研究, 其优势是对于延展源的观测能够得到真正的流量及结构, 不存在 missing flux 问题。它与世界第一大综合孔径 SKA 在建设时间上有先后, 在科学观测上形成互补。

6.1 FAST 不再是 SKA 的一部分

2000 年, 各国提出 SKA 工程概念方案, FAST 名列前茅。2004 年, 各国提出 SKA 台址候选申请, 中国亦在其中。2006 年, 从 4 个有效候选台址中进一步优选出 2 个可能台址—澳大利亚/新西兰, 南非及 8 个非洲国家。随后, 明确了大数量小口径 LNSD 单元组阵作为 SKA 工程概念优选方案。中国不再是 SKA 台址候选国, 与加拿大合作提出的少量大口径 LDSN 天线

组阵方案也不再是 SKA 工程实现概念。其主要原因是, 经过十多年发展(—2005 年), SKA 科学和技术目标在不断补充和完善, 导致其工作频率上限提高 3 倍以上, 阵列基线长度扩大 10 倍以上。FAST 组阵及中国台址条件(特别是基线长度及频率上限的演变)已难以满足当前 SKA 科学技术需求。

SKA 是综合孔径干涉阵列, FAST 是单口径望远镜。因其巨大的接收面积, FAST 有望与 SKA 在有限目标上开展联合观测, 如对暗弱目标的 VLBI 观测。但 FAST 难以与 SKA 以综合孔径方式结合。具体分析如下: (1) 共视天区有限。中国与目前两个台址候选国南非、澳大利亚分处南北两个半球, 共视天区有限, 难以完成 SKA 预定的巡天范围。(2) 视场差别大。和 SKA 高频阵列单天线视场(至少 1°)相比, FAST 视场(约 $3'$)小约 400 倍。

6.2 FAST 与 SKA 的合作

(i) FAST 的新发现可为 SKA 提供研究方向。FAST 有我国原创技术, 可实现宽频带高灵敏度巡天。将先于 SKA 项目 5–10 年建成, 在此间隙 FAST 将具有独一无二的优势。SKA1(10% 的 SKA)按计划于 2019 年建成, FAST 在灵敏度上仍具竞争力; SKA2(90% 的 SKA)计划于 2023 年建成, FAST 依然有自身特点, 即北天区覆盖、高灵敏度单天线观测, 在诸如瞬变天体、脉冲星和 VLBI 观测等研究方面仍将发挥重要作用。统计上, 大口径望远镜在发现新现象和新天体方面优于阵列望远镜。

(ii) FAST 为参加 SKA 提供科研、技术和人才储备。FAST 将开展中性氢、脉冲星等方面研究, 这也是未来 SKA 的重要科学目标。同时, FAST 和 SKA 有一些相同的共性关键技术, 如宽带单波束馈源, 海量数据传输、处理和存储等。FAST 将培养出新一代射电天文技术力量。2016 年是 FAST 建造完成之年, 也是 SKA 第一阶段建设实施之年, FAST 研发队伍可部分转入 SKA 建造。开展 FAST 科学目标、关键技术研究 and 工程建设, 为中国参加 SKA 提供科研、技术和人才储备。

7 持续参与 SKA 国际合作预期成果

持续参与 SKA 国际合作, 将使我国在射电天文科学研究、技术提升、人才队伍培养、大科学装置研

发、运行和维护等方面获得收益,有助于我国跻身国际射电天文前列,有助于跨越式提升相关高技术自主创新能力.如游离于 SKA 国际合作之外,凭一国之力与多国联合体抗衡,财力和前沿科技实力均无法自主建造 SKA,与国际天文先进水平差距势必增大.

通过持续参与 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,能推进我国在天文学前沿课题理论和方法上的创新.将 SKA 与我国自主创新的大型光谱巡天郭守敬望远镜、在建的单天线射电望远镜 FAST、空间高能望远镜 HXMT (Hard X-ray Modulation Telescope)、讨论中的未来南极太赫兹和红外光学望远镜和 2 m 空间光学望远镜等配套使用,满足其后续深入、细致观测需求,极大扩展它们互补观测能力,协同开展我国全波段天体物理前沿研究.

SKA 建设准备阶段关键技术预先研究的成功,将形成一批高新技术自主知识产权,推动我国天线设计、理论、天线制造工艺方法、宽带大视场馈源等高技术的发展,提升相关企业技术创新能力和参与国际高技术竞争能力,成就国际大科学工程“中国制造”和“中国创造”里程碑.这些关键技术还将在深空探测天线组阵、多波束卫星通信、卫星侦收和微波侦收,微波和卫星侦收天线组阵和低频无源雷达等领域发挥作用,在民用和军事领域中能得到广泛应用.

除科学产出和技术进步之外,持续参与 SKA 国

际合作在人才培养和产学研基地建设方面,能为国际型人才储备和科研设施建设打下良好基础.我国将与 SKA 参与国进行全方位多层次人员交流,研究生、博士后、教授和工程师等科研、工程人员可选择在中国工作或者访问 SKA 合作国家,如澳大利亚 CASS (CSIRO Astronomy and Space Science)、ASTRON、加拿大 Calgary 大学和 DRAO (Dominion Radio Astronomy Observatory)天文台、英国 JBCA (Jodrell Bank Centre for Astrophysics)、瑞典 Chalmers 大学、NRAO 和 BYU 等相关科研机构.

在科技部、国家自然科学基金委员会和中国科学院等部门统筹规划下,我国将持续参与 SKA 建设准备阶段的科学和关键技术研究.使用国内外先进设备,基于现有科研骨干,发展创新模型和理论,力争在一些重大科学和技术问题上取得突破.在科研和技术方向上迈入国际领先行列,为 SKA 建设以及由中国科学家领导的 SKA 早期科学做初步准备.

SKA 的综合性能将在本世纪领先至少三十年,为探索宇宙奥秘、回答人类共同关心的重大科学问题提供长期合作的平台,为我国几代天文学家持续成长、跻身国际研究前沿创造有利条件.SK A 建设准备阶段关键技术预先研究,将增加我国相关高技术领域就业机会,发展绿色制造业,全面提升我国相关产业的国际竞争力.

参考文献

- 1 Dewdney P, Hall P, Schilizzi R T, et al. The square kilometre array. IEEE, 2009, 97(8): 1482–1496
- 2 Schilizzi R T, Alexander P, Cordes J, et al. Project Execution Plan. 2011, <http://www.skatelescope.org/publications/>
- 3 Du B, Peng B, Zheng Y P, et al. DVAC-1 Concept Description: Offset Gregorian dish version E, 2011
- 4 Du B, Peng B, Zheng Y P, et al. DVAC-1 Antenna Design and Analysis, 2011
- 5 Du B, Peng B, Zheng Y P, et al. DVAC-2 Concept Description: Prime focus dish version C, 2011
- 6 Du B, Peng B, Zheng Y P, et al. DVAC-2 Antenna Design and Analysis, 2011
- 7 Yang J, Yin J G, Yogesh B, Karandikar, Per-Simon Kildal. The Eleven antenna feed for monopulse tracking and combining L-, C-, X- and Ku- satellite bands. In: 29th ESA Antenna Workshop on multiple beam and reconfigurable antennas, 18-20 April 2007
- 8 Ivashina M, Simons J, Bij de Vaate J. Efficiency analysis of focal plane arrays in deep dishes. Exp Astron, 2004, 17: 149–162
- 9 Jeffs B, Warnick K, Elmer M, et al. Calibration and optimal beamforming for a 19 element phased array feed. Calibration and Imaging Workshop. CALIM2008, Perth, Australia, Apr., 2008, <http://calim2008.atnf.csiro.au/twiki/pub/Main/WorkshopProgram/JeffsCalim.pdf>
- 10 Warnick K, Carter D, Webb T, et al. Design and characterization of an active impedance matched low-noise phased array feed. IEEE Trans Antennas Propag, 2011, 59: 1876–1885
- 11 Warnick K, Jeffs B, Landon J, et al. Phased array antenna design and characterization for next-generation radio telescopes. Antenna Technology, 2009. iWAT 2009, IEEE International Workshop on, Mar, 2009. 1–4. 10
- 12 Oosterloo T, van Cappellen W, Bakker L. First results with APERTIF. Calibration and Imaging Workshop, CALIM2008, Perth, Australia, Apr, 2008, <http://calim2008.atnf.csiro.au/twiki/pub/Main/WorkshopProgram/OosterlooCalim.pdf>
- 13 van Cappellen W A. APERTIF Phased Array Feed development for the Westerbork Synthesis Radio Telescope. International Workshop on Phased Array Antenna Systems for Radio Astronomy, Brigham Young University, Provo, UT USA May 3-5, 2010
- 14 Zhao G, Li H, Linder E, et al. Testing Einstein gravity with cosmic growth and expansion. Phys Rev D, 2012, 85: 123546

- 15 Zhao G, Pogossian L, Silvestri A, et al. Cosmological tests of general relativity with future tomographic surveys. *Phys Rev Lett*, 2009, 103, 1301–1304
- 16 Ansari R, Suresh P. Evolution of the density parameter in the anisotropic DGP cosmology. *Int J Mod Phys D*, 2011, 20: 2599–2611
- 17 Raccanelli A. Testing cosmological models with the integrated Sachs-Wolfe effect. *J Phys-Conf Ser*, 2011, 280: 012009
- 18 Frey S, Gurvits L, Paragi Z, et al. High-resolution double morphology of the most distant known radio quasar at $z=6.12$. *Astron Astrophys*, 2008, 484: L39–L42
- 19 Kramer M, Backer D C, Cordes J M, et al. Strong-field tests of gravity using pulsars and black holes. *New Astron Rev*, 2004, 48: 993–1002

China's participation in the SKA—the world's largest synthesis radio telescope

PENG Bo^{1,2,3*}, JIN ChengJin^{1,2,3}, DU Biao^{3,4}, QIN Bo¹, ZHENG YuanPeng^{3,4}, LU Yu^{3,4},
LIANG ZanMing^{3,4}, XU HaiGuang⁵, ZHAO GongBo¹, TIAN WenWu¹, LIU GuoXi^{3,4},
ZHOU JianZhai^{3,4}, FENG ZhenGuo^{3,4}, SHI MinXiang^{3,4}, ZHANG YiFan^{3,4}, JIN Chao^{3,4},
YAN Feng^{3,4}, WU Yang^{3,4}, LIU HongFei^{1,2,3}, AN Tao^{2,6}, GU JunHua¹,
Niu ChuanFeng^{3,4}, GENG JingChao^{3,4}, ZHU Yan^{1,2,3}, ZHU Kai^{1,2,3},
YU JingLong^{1,2,3}, CHAI XiaoMing^{1,3}, ZHANG LiMin^{1,3}, ZHANG Xiang^{1,3},
LI JingNan^{3,4}, LI Shuo^{3,4} & LIU LiJia^{1,3}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

² Key laboratory of Radio astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

³ Joint Laboratory for Radio Astronomy Technology, NAOC & CETC54, Beijing 100012, China;

⁴ The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China;

⁵ Department of Physics Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

⁶ Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

The SKA (Square Kilometer Array) will be the world's largest synthesis radio telescope, which will address many fundamental questions about our universe. Scientists and Engineers from 67 institutions in 20 countries have joined the pre-study of the SKA since 1993. China has been playing an important role, from various SKA concepts in the early years, to the current site selection as well as the technical development. The SKA has now entered the pre-construction phase, and many countries including China are involved into the key technology development, such as antenna prototyping and Phased Array Feed. With China's continuous participation into the SKA, including the establishment of a science team aiming at limited scientific objectives, technical studies and designs of high-precision light antennas and broadband wide-field receivers, the Chinese Astronomy and related technologies will be greatly promoted. The SKA will provide a great opportunity for China to play an active role in international mega-science projects.

radio astronomy, synthesis telescope, high performance light antenna, phase array feed, SKA

PACS: 95.55.Jz, 95.36.+x, 95.30.Sf, 95.75.-z, 95.75.Kk

doi: 10.1360/132012-662