

FAST 研制历程

彭勃

(中国科学院国家天文台 100101)

FAST源自我国天文学家参与大射电望远镜LT(Large Telescope)暨平方公里阵SKA(Square Kilometre Array)国际合作。基于多学科交叉、大胆创新,老中青FAST合作团队风雨兼程20余年,成功研制了500米口径球面射电望远镜FAST,天眼出东方(图1)。



图1 天眼出东方:美丽的科学风景(图片来源: NAOC)

1. 大射电望远镜国际合作

20世纪90年代初,荷兰、英国与前苏联几位天文学家几乎同时提出建造新一代大射电望远镜(LT)的设想。拟在地球上无线电环境被彻底毁坏之前,用LT回溯宇宙原初。如果失去这个机会,人们只能到月球背面去建同样的大射电望远镜。

第一篇LT论文的作者彼得·威尔金森(Peter Wilkinson)指出:宇宙的百科全书是用微弱的21厘米氢谱线写成的,要阅读它需要非常灵敏的望远镜。LT接收面积相当于100个100米直径单天线,或14个阿雷西博型300米单天线(Wilkinson, 1991)。当时,世界上只有一台1972年建成的德国埃费尔斯贝格100米抛物面望远镜,只有一台1963

年建成的美国阿雷西博305米球面望远镜。

1993年5月,理查德·斯特罗姆(Richard Strom)在北京拜访中国射电天文奠基人王绶琯时,通报了酝酿中的LT计划。王绶琯先生明确中国应积极参与,提议由南仁东牵头LT中国推进。8月日本京都国际无线电科联第24届大会上,澳大利亚、加拿大、中国、德国、法国、印度、荷兰、俄罗斯、英国和美国天文学家联合倡议:建造接收面积达一平方公里的大射电望远镜LT(1999年易名SKA),组建了工作组LTWG,吴盛殷作为中方代表参加。2000年国际天文学联合会大会上,包括中国在内11国签订SKA合作协议,当地报纸(图2(a))列出其可能技术路线,中国KARST(Kilometer-square Area Radio Synthesis Telescope)方案名列榜首。

2. 从平方公里阵SKA到中国天眼FAST

1994年北京天文台组建大射电望远镜项目组(简称LT课题组),启动选址,争取将LT建在中国。在青海、新疆、四川、内蒙古、广西和湖南等平坦地貌,以及云南、广西等岩溶地貌选址基础上,考虑澳大利亚地广人稀、天文厚实等优势,我们放弃平坦地貌,联合中科院遥感所等推进利用喀斯特洼地、建造阿雷西博型望远镜阵列KARST。

1995年7月,LT课题组在北京密云主办大射电望远镜方案研讨会,邀请微波、电子、天线及相关企事业单位专家,针对轻型索拖动馈源构想、大型天线支撑结构等集思广益。10月,北京天文台联合贵州省科委在贵阳花溪承办LT工作组第三次国际会议(图3)。西安电子科技大学(简称西电)段宝岩



Options for the stations of the SKA, from the top:
A set of large (>300m) spherical reflectors;
A large (>200m) reflector with the receiver supported by an antenna;
An array of small (<10m) parabolic dishes;
A fixed element (electronically phased) array.
An array of spherical (>10m) refracting lenses.

Astronomers Sign International Agreement to Plan Square Kilometre Array

Leading astronomers from Europe, North America, Asia and Australia will today sign an agreement jointly to plan a huge new radio telescope, the Square Kilometre Array (SKA), which will come into operation in the middle of the next decade. The General Assembly is an ideal opportunity to inaugurate the next stage of development of this truly global project.

The signing ceremony will take place on 15 October in the Jodrell Bank Lecture Theatre in the Scheerer Building at the end of the first session on Future Observational Multi-Wavelength Capabilities in Astrophysics organized by the Working Group on Future Large Scale Facilities (WGFLSF) and IAU Division XI Space and High Energy Astrophysics. The last part of the programme is a round-table discussion about the process of international co-operation and coordination.

Radio astronomers regard the SKA as a paradigm for the organization of future global astronomy projects. The SKA was the first radio astronomy project to have been 'born global' following the guidelines for successful international collaboration discussed at the 1994 IAU General Assembly in The Hague. The current concept has grown out of discussions over the past six years within the IAU Large Telescope Working Group and the OECD Global Science Forum. An International SKA Steering Committee (ISSC) has now been constituted to promote and to oversee the planning of the project. The signing of a formal Memorandum of Understanding will establish the ISSC for a period of five years. The signatories will be:

- Prof. Ron Ekers: Australian SKA consortium
- Dr. Don Morton: Herzberg Institute of Astrophysics, Canada
- Prof. Ai Guang: National Astronomical Observatory, PR China
- Prof. Rajaram Nityananda: National Centre for Radioastronomy, TIFR, India
- Prof. Harvey Butcher: European SKA Consortium

Dr Jill Tarter: United States SKA Consortium

At present 24 leading institutions in ten countries have agreed to pool their research and development efforts, with each individual institution concentrating on only a part of the overall design. Their shared aim is to reach agreement on the fundamental design of the SKA by 2005 and to begin construction in 2010.

In order to achieve its ambitious astronomical goals, the design of the SKA will integrate computing hardware and software on a massive scale in a revolutionary break from current radio telescope designs. The SKA is a challenging project, and as Ron Ekers of the Australia Telescope National Facility says:

"Designing, let alone building, such an enormous technologically advanced instrument is beyond the scope of individual nations, or even small groups of nations. The SKA is therefore being planned from the outset as a truly-global telescope project."

The SKA will be a uniquely sensitive instrument. Its collecting area will be 50 to 100 times larger than today's biggest radio imaging telescopes, the VLA and the GMRT, and 200 times larger than the pioneering Lovell Telescope at Manchester University's Jodrell Bank Observatory (which can be visited during the General Assembly).

The idea of the SKA sprang from radio astronomers' desire to detect the faint 21-cm emission from atomic hydrogen in structures formed soon after the Big Bang, and in the galaxies which developed from these structures. As ISSC member Peter Wilkinson (University of Manchester) says:

"One square kilometre is not just a convenient round number—it arises naturally from a desire to image the hydrogen gas in distant galaxies with 0.1 arcsecond resolution."

Radio astronomy has been crucial in discovering phenomena such as



Members of the SKA ISSC at last week's SKA Technical Workshop held at Jodrell Bank Observatory.

quasars, pulsars, gravitational lenses, superluminal motion and the cosmic microwave background. It has led to three of the five Nobel prizes awarded for work in astrophysics, including all those awarded for observational work. Major advances in knowledge can be expected from a new radio telescope with the sensitivity of the SKA.

Radio telescopes have a big advantage over those operating at most other wavelengths, because they can see through cosmic dust. This dust often prevents optical telescopes seeing into star-forming regions and the centres of galaxies. The latest sub-millimetre results from SCUBA on the James Clerk Maxwell Telescope show that dust can even obscure entire galaxies at visible wavelengths. Radio telescopes have another advantage in that they can be combined in arrays to produce images with the highest resolution in all branches of astronomy. On completion the SKA will, therefore, be the world's premier instrument for astronomical imaging.

The SKA's superb resolving power—which could extend to one milliarcsecond—and exceptional image quality will also provide crucial new information on the formation and early history of stars, galaxies and quasars unaffected by obscuring dust. Its enormously high sensitivity will mean that, for the first time, objects in the early Universe can be studied in detail in the radio range. The SKA is thus the perfect scientific complement to the large optical (e.g. CELT, ELT, OWL), infrared (NGST) and millimetre wave (ALMA) telescopes currently being planned.

A 6-page explanatory brochure about the SKA, written by the ISSC, has been widely distributed during the General Assembly. The full current science case for the SKA, and an electronic version of the brochure can be obtained from the SKA Web site at <http://www.zas.ac.uk/ska/>

Peter N. Wilkinson
University of Manchester
Jodrell Bank Observatory

(a)

(b)

图2 英国2000年报纸:中、加、美、荷、澳五种SKA方案(a),代表们在76米望远镜前合影(b)



图3 1995年10月,大射电望远镜工作组第三次暨球面射电望远镜学术会议在贵阳花溪宾馆召开

等提交阿雷西博改进型馈源无平台支撑概念,被评价为“大胆的创新”。11月,由LT课题组发起,贵州省科委、中科院遥感所、西电、北大等15家单位组建LT中国推进委员会,时任北京天文台副台长南仁东任主任。

1996年8月,我们在美国巴尔的摩IAU S179会议上介绍了利用喀斯特洼地作台址、建造轻型索拖动馈源阿雷西博类型望远镜阵列方案KARST。12月在北京召开LT中国推进委员会第二届学术年会,议题涉及洼地选址及数据库建立(中科院遥感

所)、固定球面望远镜性能若干思考(北京天文台)、馈源的计算机驱动和控制(西电)、混合馈源研究及模型实验建议(原航天工业总公司23所)、多线馈系统及其无色散传播(原电子工业部14所)、相控阵馈源应用可能性(西电)等。同时提出可独立于LT的KARST先导单元设想。

1997年初,王绶琯写给南仁东和我的信中提到:“天顶角能实现多大?天顶角问题太重要了。一线成功机会都应认真挖掘”。我们专题讨论了单天线天顶角、口径和跟踪时间关系,提出单元口径520米,照明口径300米,最大无损天顶角 30° 等技术指标。6月,综合洼地台址、馈源轻型支撑及固定球反射面等,形成了先导单元方案FAST(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope)——500米口径球面射电望远镜。

3. 四院士推荐

1997年夏,王绶琯、叶叔华、陈建生三院士考察贵州候选台址(图4),北京天文台邱育海提出巨型球反射面主动变形设想。针对变形涉及上千点实时控制问题,王绶琯先生咨询了杨嘉墀院士。而陈建生对大装置性能唯一性的“考问”,促使FAST科学凝练更具特色。

效仿国家863计划启动经验,我们起草了推荐FAST项目的院士联名信,承载着王绶琯、陈芳允、杨嘉墀和陈建生四院士对FAST项目的严谨与担

当。1998年2月,中科院时任院长路甬祥在四院士推荐信上批示,明确FAST可作为国家大科学工程候选项目。3月,英国皇家天文学会月会上,集成主动反射面、光机电一体化无平台索驱动馈源、喀斯特洼地台址“三大创新”的FAST完整概念在国际“现身说法”。参观二战后最大单天线76米洛弗尔望远镜时,我们与其总设计师伯纳德·洛弗尔(Bernard Lovell)爵士等交流FAST核心科学、先进馈源接收机中英合作。4月7~9日LT中国推进委员会第三届暨FAST项目委员会第一届学术年会官宣FAST完整概念,将LT推进委员会重组为FAST项目委员会(图5)。

不久,FAST被遴选为知识创新工程首批重大项目,有了第一笔大钱400万元。FAST关键技术由“纸上谈兵”步入试验,各课题单位、学术带头人和研究方向主要有:北京天文台南仁东、彭勃和邱育海承担FAST总体;中科院遥感应用所聂跃平、朱博勤承担台址评估;西电段宝岩、清华大学任革学承担馈源支撑;同济大学李国强、南京天文仪器研制中心屈元根承担主动反射面;北京理工大学丁洪生承担馈源支撑二次稳定平台;中科院数学与系统所韩京清承担控制策略;解放军信息工程大学郑勇承担工程测量;清华李国定等承担电性能分析。

1999年中科院改革天文台系统,创建了七大实验室。南仁东为大射电望远镜(FAST)实验室主任,领导FAST项目从完整概念到关键技术试验,



图4 1997年5月31日,左起:吴盛殷、彭勃、陈建生、王绶琯、叶叔华和聂跃平在贵州选址交流

FAST 项目机构设置			
项目委员会		专家咨询小组	
首席科学家:	南仁东	专家咨询组成员:	王绶琯, 叶叔华, 艾国祥,
主任:	彭勃	(以姓氏笔画为序)	苏定强, 吴盛殷 (联络人),
副主任:	邱育海		陈芳允, 陈建生, 杨嘉墀
成员:	马驹, 平劲松, 余玉材, 李国定,		
(以姓氏笔画为序)	陈宝升, 郑兴武, 郑怡嘉, 茅於軾,		
	屈元根, 段宝岩, 聂跃平, 徐秉业,		
	童铠, 熊继袞, 颜毅华		
秘书:	朱丽春 (国内), 徐祥 (国际)		
课题组	组长	参加单位	经费(万)
1. 科学目标组	马驹, 郑兴武	北京天文台, 南京大学天文系, 北京大学, 北京师范大学, 空间 503 所	
2. 主动主反射面	邱育海	北京天文台, 南京天文中心, 原电子部 39 所, 20 所, 西安电子科技大学	
3. 馈源	待定	航天工业总公司 23 所, 西安电子科技大学, 原电子部 39 所, 20 所, 14 所	
4. 馈源支撑	段宝岩	西安电子科技大学, 清华大学	
5. 航天器测控及通讯	童铠	中国空间技术研究院 503 所, 北京天文台	
6. 接收机技术	平劲松	北京天文台, 北京大学	
7. 选址	聂跃平	中科院遥感应用研究所, 贵州省科委	
地址: 北京市朝阳区大屯路甲 20 号 邮编: 100012 电话: (010) 64888715 传真: (010) 64888731			

图5 FAST项目委员会机构设置(原透明胶片)

以密云 FAST 整体模型 MyFAST(Miyun FAST Demonstrator)建成、FAST 国家立项而“修成正果”。

4. 立项“额外”国际评估

2006年3月,中科院聘请美国国立射电天文台长鲁国镛、上海天文台名誉台长叶叔华为联合主席,共17位国内外专家组成FAST立项咨询与评估委员会,在北京友谊宾馆对FAST科学目标、技术指标、总体方案、可行性、项目管理及人员配置、投资和工程进度、望远镜建成后运行计划等全面评估。

考虑FAST项目诸多创新和技术挑战,科学目标多在5吉赫兹以下,评估委员会专家建议把频率上限X波段(同阿雷西博望远镜)作升级目标,指出:FAST科学优先级在700~5000兆赫兹。以观测脉冲星验证广义相对论、探测引力波和研究极端条件下核物质,发现奇异类型天体等为优先领域。称赞设立“电波环境安静区”,鼓励对电波环境进行不间断监测和有效控制,同时抑制望远镜自身干扰。还建议要充分考虑数据获取与储存、数据传输和处理、数据存档和虚拟天文台等。评估意见简版提交到

中科院,作为FAST立项建议书附件报国家发改委;详版对完善细节给出中肯意见,优化和指导FAST可行性研究、建设和运行。借鉴大科学工程LAMOST经验,大射电望远镜实验室把FAST工程验收指标降为3吉赫兹,聚焦脉冲星和中性氢两大科学。

2012年夏,针对FAST索网反射面关键技术“争议”暨“索疲劳”问题,中科院组织“额外”评估,组长是斯特罗姆,为反射面创新提供了国际咨询和专业担当。

5. 小天眼 MyFAST

2005年,大射电望远镜实验室启动建造密云FAST整体模型MyFAST,包括均布在50米直径圆上4个12米钢塔(2007年在40米直径新建6座塔)、30米直径反射面圈梁、预应力球形索网、纸盒锡箔纸馈源、简易接收机、综合布线与测量系统等,由清华、哈工大和解放军信息工程大学等合作研制(图6),这是FAST索网主动反射面的试验模型,更是集三大创新、机构完整的射电望远镜。

2006年9月6日,MyFAST成功观测了银河系



图6 密云FAST整体模型MyFAST

中性氢,在荷兰射电天文台每日一图公告世界。作为贵州FAST先导,密云FAST整体模型堪称北京“小天眼”,为FAST工程可行性提供了重要支撑,为在黔南州平塘县开工、为主动反射面和馈源支撑系统建设,以及FAST运行提供了宝贵实践,使科技管理层和多学科专家对射电望远镜、频率保护及未来FAST“模样”等有了近距离接触。

6. 工程建设

2011年3月25日,FAST项目开工报告获批,以台址勘察与开挖工程为先导,开始了长达5年半的施工。建设了九大系统(或部门):台址勘察与开挖、主动反射面、馈源支撑、测量与控制、接收机与终端、观测基地系统,科学部、电磁兼容组和工程办公室。聘请管理公司、监理公司对工程全面监管,上千名工人为FAST工程实施付出了辛劳。我们用图片及影像记录了FAST施工现场每一天,开大科学工程全程拍摄之先河。

6.1 台址与观测基地

FAST台址与观测基地坐落在贵州省黔南州平塘县克度镇,由台址勘察与开挖、观测基地两个基建系统组织实施。2011年3月至2012年12月底,

实施了场地勘界、植被清理、详细勘探、支撑塔柱地基地球物理详勘、大窝凼洼地底部落水通道勘察与保护、洼地土石方开挖、台址边坡稳定性防护、工程面地形测绘、锚杆钻探施工与加固等工程,奠定了巨型反射面、馈源支撑塔的建设基础。

2015年10月至2016年7月进行观测基地(图7)施工。主要完成了综合楼、厂房、变电所、净化站、污水处理站、取水站、测量专用基准站设备房、其他零星建筑,进场道路、场内道路及广场工程,以及室外给排水工程、排水隧道、室外电力工程、室外电信引入以及望远镜其他配套工程等。

6.2 主动反射面

FAST主动反射面系统(图8)主体结构采用索网支撑方式,网格为尺度约11米的三角形空间网架,通过下拉索和促动器实现主动变形。主要实施了地锚、反射面支撑圈梁基础,反射面索网主索段、下拉索段及索网节点制造和安装,促动器、背架、面板的制造和安装等。

反射面圈梁采用管桁架结构,宽11米、高5.5米,由50根等距分布的格构柱支撑,制造和安装工程从2013年4月至12月。2014年7月至2015年2月,将6670根钢索编织成500米口径球冠面主索

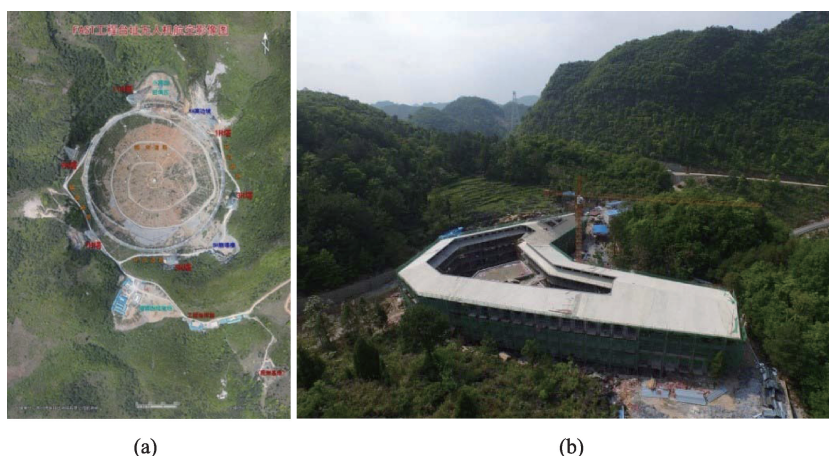


图7 FAST观测基地:台址开挖及场区道路(a)、FAST综合楼工程(b)



图8 FAST主动反射面系统:圈梁(a)、地锚、促动器(b)建设实景

网。反射面单元吊装工程从2015年8月2日开始,历时11个月,包括4300个三角形、150个边缘异型铝合金面板单元和骨架。

6.3 馈源支撑

FAST馈源支撑(图9)工程主要包括:百米高的钢结构支撑塔、索驱动机构、馈源舱及其停靠(或入港)平台和动态监测软硬件等。

2014年3月至11月,制造的6座百米高塔均匀安装在距反射面中心600米的环路上。2014年10月至2015年5月,馈源支撑塔相应的6根并联柔性钢索,与馈源舱、卷索机构组成了柔索牵引并联机器人。2015年11月21日,FAST馈源支撑系统首次升舱成功。

6.4 测量与控制

FAST测量与控制系统包括望远镜总控、反射面控制及安全评估、馈源支撑整体控制、索驱动控

制、馈源舱控制系统,舱停靠平台监测单元,反射面测量、反射面健康监测、馈源支撑测量、馈源支撑健康监测系统。建立高精度大地基准控制网和时间基准,实施高精度地形图测绘以及大型构件制造、安装过程中的检测和定位测量。

从2013年5月至2014年10月,FAST测量基准网(图10)的24个测量基墩施工,配置了激光全站仪、全球导航卫星系统GNSS、全球卫星定位系统GPS-RTK设备等。馈源支撑系统通过网络通信控制一次索支撑平台位姿;主反射面测量目标是单元面板面形测量、中性球面整网节点静态测量,以及动态变形时整网节点实时测量。从2014年4月至2015年8月,进行台址现场布线设计与施工,实现了主动反射面整网控制。

6.5 接收机与终端

FAST馈源与接收机系统主要包括:馈源、低噪

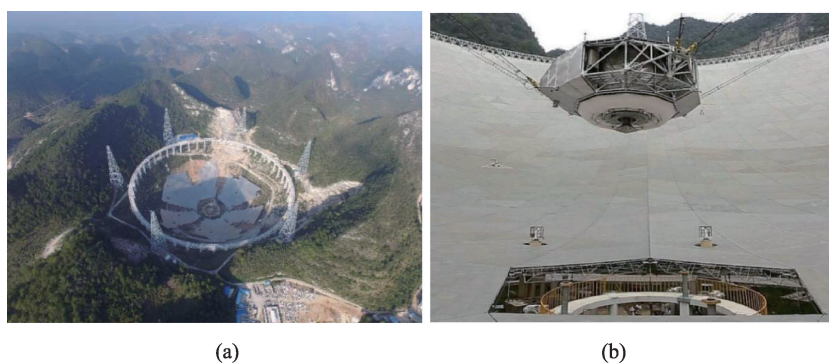


图9 FAST馈源支撑系统:馈源塔(a)和馈源舱索驱动体系(b)



图10 夜幕下,测量基墩及分布在反射面上的靶标

声接收机、制冷机、中频数据传输、数据处理终端、氢钟和信号分配设备,以接收反射面焦点处汇聚的电磁波。初步设计时的9套接收机被优化为7套,与加州理工学院联合设计、在中国制造了270~1620兆赫兹超宽带接收机(图11);澳大利亚主导研制了1050~1450兆赫兹19波束接收机;其余是自主研制。

接收机的工作参数,如制冷温度、杜瓦真空度、制冷机氦气压力等,通过光纤传到地面观测室,可实时监视。同时可远程监测接收机状态、诊断系统故障。

6.6 电磁环境保护

FAST具有超高灵敏度,极易受到外部有源业务如移动通信、雷达、广播电台、导航业务等干扰,影响数据质量和科学产出。

1998年LT课题组起草了无线电频率保护文件,开始对贵州潜在候选台址区的保护。2006年11月22日,《贵州省无线电管理办法》以省政府令公



图11 FAST配置的超宽带馈源

布。2010年,大射电望远镜实验室成立电磁兼容工作组。2013年10月1日起实施《贵州省500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区保护办法》,将电磁波宁静区划分成三个不同保护要求区域,即半径5千米的核心区、半径10千米的中央协调区以及半径30千米的边远协调区。2016年9月25日,《黔南布依族苗族自治州500米口径球面射电望远镜电磁波宁静区环境保护条例》地方性法规颁布。2017年8月FAST上空航线完成“改道”。2018年组建电磁环境保护中心。

结束语

FAST工程团队(图12)攻坚克难,打磨出30个足球场大“锅”, Make the impossible possible and real。FAST凝聚着无数科技人员的智慧和心血、全国尤

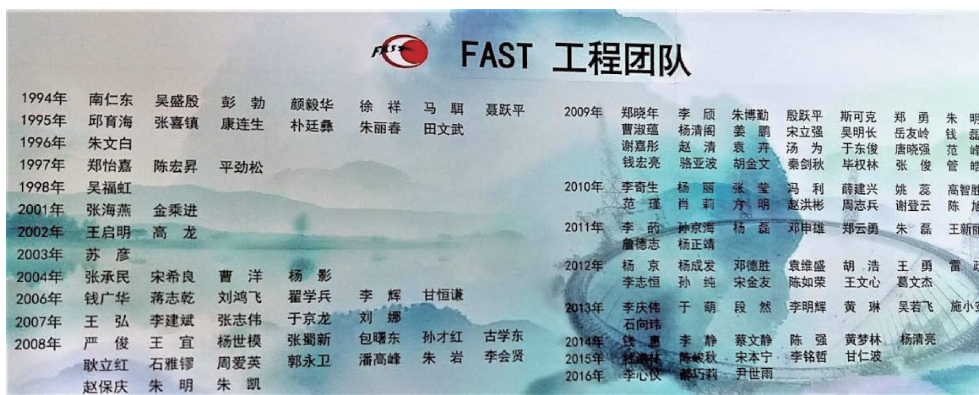


图12 贵州省黔南州平塘县FAST台址综合楼大厅的工程团队墙报

其是贵州人民的付出和支持,以及国际友人的关心和帮助。特别是FAST代表团10多次赴波多黎各,学习阿雷西博望远镜建造、运行和管理经验。20多年引进到的人才屈指可数,主要依靠自己培养的人才、借力合作单位资源,以及招聘中“捡”的人才,完成了FAST关键技术攻关和设备研制的科技长征。立项建议书批复的建设费为6.27亿元人民币,实际决算接近12亿元。

2016年9月25日,国家发改委、科技部、国家自然科学基金委、中科院和贵州省有关领导和FAST合作者代表齐聚贵州,举行了简朴而隆重的FAST“生日庆典”。习近平主席发来贺信,寄语中国天眼团队早出成果、多出成果,出好成果,出大成果。我们还在天文小镇星辰天缘大酒店,以大(射电)望远镜为题,举办首届国际射电天文论坛RAF(Radio Astronomy Forum),开启国际学术交流中心。

2017年8月,处于调试期的FAST使得中国人首次发现脉冲星。2019年4月18日,FAST执行国内用户风险共担开放观测;22日完成工艺验收。5月FAST首批科学成果在《中国科学》以专刊发表,24日完成工程设备验收、27日档案验收、30日建安和财务专业验收。11月,中科院和贵州省组织FAST电磁波宁静区电波环境评估。2020年1月,FAST工程通过国家验收,转入科学运行。4月30日,FAST向国内开放自由观测申请。2021年3月

31日,FAST向全球开放观测申请。

FAST源自大科学国际合作计划,受益于科研院校和企业广泛合作,推动了众多高科技领域创新。贵州省科委在FAST预研究至立项13年间、贵州省发改委在立项至工程竣工10年间,先后作为中科院与贵州省FAST地方协调组办公室,担当贵州“第一接触”。建成后的FAST拥有良好的无线电环境,取得了一系列新发现、好成果。FAST不仅当了大射电望远镜世界老大,还形成了独特的科学风景(图1),成就了大科学工程与地方发展命运共同体!

参考文献

- ① Wilkinson P., The Hydrogen Array, 1991, IAUC 131, ASP Conference Series, v19, 428
- ② Peng B., Nan R., Kilometer-Square Area Radio Synthesis Telescope KARST Project, IAUS. 179, Kluwer Academic Publishers, 1998: 93
- ③ Nan R., Peng B., A Chinese concept for the 1 km² radio telescope, Acta Astronautica, 2000, 46 (12), 667
- ④ 吴盛殷,南仁东,彭勃等,FAST计划的现状和期望,中国电子学会第七届学术年会论文集,2001,7
- ⑤ 彭勃,《天眼工程》,2021,上海科技教育出版社

注:本文还参考了FAST预研究总结报告,FAST项目建议书、可行性研究报告、初步设计报告等内部资料。本文图片来源:FAST工程团队,谨此说明并致谢。