

中国天文科学大型装置的研制与应用(三)

——500 米口径球面射电望远镜(FAST)*

中国科学院国家天文台 中国科学院基础科学局

(北京 100012)

(北京 100864)

关键词 重大科技基础设施, 500 米口径球面射电望远镜

1 科学背景

射电天文学利用射电望远镜在无线电波段“观察”天体。传统射电望远镜的基本结构有 3 个主要部分——反射面、接收机和指向装置。来自太空天体的无线电信号极其微弱,70 年来所有射电望远镜收集的能量还翻不动一页书。阅读宇宙边缘的信息需要大口径望远镜,由于自重和风载引起的形变,传统全可动望远镜的最大口径只能做到 100 米。

由中国天文界提出建造的世界最大的单口径射电望远镜——500 米口径球面射电天文望远镜(FAST—Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope)采用了全新的设计思路

球冠反射面在射电电源方向形成 300 米口径瞬时抛物面,使望远镜接收机能与传统抛物面天线一样处在焦点上;③采用轻型索拖动机构和并联机器人,实现接收机的高精度定位。

FAST 突破了射电望远镜的百米极限,开创了建造巨型射电望远镜的新模式。它拥有 30 个足球场大的接收面积,将是国际上最大的单口径望远镜。与号称“地面最大的机器”的德国波恩 100 米望远镜相比,灵敏度提高约 10 倍;与排在阿波罗登月之前、被评为人类 20 世纪 10 大工程之首的美国 Arecibo 300 米望远镜相比,其综合性能提高约 10 倍。作为世界最大的单口径望远镜,

FAST 的主要技术参数

并拥有 3 项自主创新: ①利用贵州天然的喀斯特洼坑作为台址; ②洼坑内铺设数千块单元组成 500 米球冠状主动反射面,	球反射面	半径 $R \approx 300\text{ m}$, 口径 $D \approx 500\text{ m}$, 球冠张角 $\theta \approx 110^\circ - 120^\circ$
	有效照明口径	$D_{\text{eff}} = 300\text{ m}$
	焦比	0.467
	天空覆盖	天顶角 40° , 可跟踪时间 4—6 h
	工作频率	70MHz—3GHz
	灵敏度(L 波段)	天线有效面积与系统噪声温度之比, $A/T \sim 2000\text{ m}^2/\text{K}$
		系统噪声温度 $T \sim 20\text{ K}$
	多波束(L 波段)	19 个
	换源时间	<10 min
	跟踪精度	8"

* 本文由国家天文台 FAST 工程办公室主任张蜀新研究员(E-mail:zsx@bao.ac.cn),基础科学局彭子龙共同组织撰写
修改稿收到日期: 2009 年 10 月 20 日

FAST 将在未来 20—30 年保持世界一流设备的地位。

2 FAST 工程历程

1993 年国际无线电联大会上,包括中国在内的 10 国天文学家提出建造巨型望远镜的计划,渴望在电波环境彻底毁坏前,回溯原初宇宙,解答天文学中的众多难题。在这一科学源动力驱使下,通过不断探索,中国天文学家提出了在贵州喀斯特洼地中建造 500 米口径球面射电天文望远镜的建议和工程方案。自 1994 年以来以中科院国家天文台为核心,联合国内 20 余所大学和研究室的百余名科研人员,对贵州台址、主动反射面、光机电一体化馈源支撑系统、高精度的测量与控制、接收机等 5 项关键技术开展了长达 14 年的合作研究。FAST 立项前,项目组及其合作团队对建设 FAST 望远镜在技术方案上开展了多项工作:

1994 年开始,现场考察、分析了 400 个洼地,制作了 90 个候选洼地的高分辨率(5 米/像素)数字地形模型(DTM)图象,并最终选择贵州省平塘县的大窝凼洼地作为 FAST 台址;

1999 年,“大射电望远镜 FAST 预研究”作为中科院知识创新工程首批重大项目立项,得到中科院及科技部支持;

2002 年,中科院立项“FAST 关键技术优化”重要方向项目;

2005 年,国家自然科学基金委启动了交叉学科重点项目“巨型射电天文望远镜 (FAST) 总体设计与关键技术研究”;

2005 年 9 月,中科院组织召开了国家科技重大基础设施“FAST 建议书专家评审会”,项目顺利通过评审;

2005 年 11 月 4 日,FAST 项目通过中科院院长办公会审议,正式启动立项申请工作;

2006 年 3 月 29 日,根据中科院 2005

年 11 月 4 日院长办公会决议,基础科学局主持召开了“FAST 项目国际评估与咨询会”。与会专家高度评价了 FAST 的科学意义和技术创新性,肯定了 FAST 关键技术的可行性,并建议尽快立项建设:“精良装备的 FAST 将为新的科学发现和突破天体物理学前沿热点问题提供独一无二的手段.....。评审委员会全体一致认为:令人激动的 FAST 项目无疑是可行的,并且建议尽快推动其进入下一步——详细设计和建设”;

2006 年 11 月,受国家发改委的委托,中国国际工程咨询公司(中咨公司)对国家重大科技基础设施 FAST 的项目建议书进行了专家评估;

2007 年 7 月 10 日,国家发改委原则同意将 FAST 项目列入国家高技术产业发展项目计划,要求抓紧开展可行性研究工作,在条件具备后上报可行性研究报告;

2008 年 3 月 18 日,受国家发改委的委托,中咨公司对国家重大科技基础设施 FAST 的可研报告进行了专家评估;

2008 年 10 月,国家发改委批复了 FAST 工程的可行性研究报告;

2008 年 12 月,FAST 工程初步设计和概算通过中科院和贵州省人民政府组织的专家评审,举行了 FAST 工程奠基典礼;

2009 年 2 月,中科院和贵州省人民政府批复了 FAST 工程的初步设计和概算。

预计 FAST 工程项目将于 2009 年底开工建设,工期约 5 年半。

3 主要科学目标

具有我国自主知识产权的 FAST,是世界上正在建造及计划建造的口径最大、最具威力的单天线射电望远镜,其综合设计体现了我国自主创新能力,其建设将推动众多高科技领域的发展,提高原始创新能力、集成创新能力和引进消化吸收再创新能力。它的建设与运行将促进西部经济的繁荣和社会



中国科学院

进步,符合国家区域发展的总体战略。

FAST 以接收面积为突破方向。望远镜的灵敏度(即探测暗弱天体的能力)与其口径(D)的二次方(D^2)成正比,而其可探测宇宙空间的体积(即大约可探测的天体数目)与其口径的三次方(D^3)成正比。它投入使用后,可观测的天体数目将大幅度增加,可为科学家提供更多更好的观测统计样本,可更可靠地检验现代物理学、天文学的理论和模型;它将搜寻到更多的奇异天体,其中蕴涵着大量新发现的机会。FAST 的观测涵盖广泛的天文学内容,从宇宙初始混沌、暗物质分布与大尺度结构、星系与银河系的演化、恒星类天体乃至太阳、行星与邻近空间事件等的研究,都具有非凡的竞争力。FAST 拟回答的科学问题不仅是天文的,也是面对人类与自然的。除以下的研究方向,它的科学产出也许今天我们还难以预测。

(1)巡视宇宙中的中性氢,研究宇宙大尺度物理学,探索宇宙起源和演化。氢是宇宙间最简单、最丰富的元素,它与宇宙大爆炸几乎同龄。“宇宙的百科全书是用微弱的 21cm 氢谱线写成的,要阅读它需要非常灵敏的望远镜。”其观测研究将回答星系及星系团演化与成因、暗物质空间分布及宇宙低频扰动等天文学热点问题。同时,对中性氢分布的详细观测,还有可能揭示本星系群和附近物质的纤维状分布,为我们深入了解暗物质的分布和性质提供更多的线索。

(2)观测脉冲星,研究极端状态下的物质结构与物理规律。脉冲星和脉冲双星的研究由于证实了中子星及间接证明引力辐射的存在,分别获 1974 年和 1993 年诺贝尔物理学奖。目前已发现脉冲星 1 850 余颗,毫秒脉冲星 200 余颗。脉冲星是极端物理条件下的实验室,是“星际介质的探针”。

理论估计银河系中应有脉冲星 6 万颗,

已发现的大约占 3%。目前新品种的脉冲星的数目还不多,而且它们往往是在现有设备的探测极限附近发现的。FAST 具有高的灵敏度和大的天区覆盖,使用多波束馈源和 1 小时积分时间,将能用 1 年巡视时间发现数千颗新的脉冲星,有利于发现更多暗弱脉冲星、毫秒脉冲星、脉冲双星、双脉冲星系统、脉冲星行星系统、河外强脉冲星、非球状星团毫秒脉冲星等罕见品种。FAST 的非积分高灵敏度特别适用于脉冲星偏振、单个脉冲等的研究,对星际介质做更精确的探测,揭示脉冲星辐射的成因。如果幸运,FAST 也许会观测到目前尚未发现而可能存在的新品种,如奇异星和黑洞双星等。

(3)主导国际甚长基线干涉测量网,并获得天体超精细结构。射电天文学对望远镜分辨率的追求,最终发展成今天的甚长基线干涉测量 VLBI。加入 VLBI 的两面天线可以隔洲跨洋,其角分辨率 $\theta=\lambda/B$,基线 B 可以有地球直径那么长,如果将天线送至太空将更长。现代全球 VLBI 网的分辨率已突破毫角秒,比其他所有的天文波段的分辨率至少高 3 个数量级。

国际 VLBI 网有欧洲网 EVN、美国网 VLBA 和亚太网 APT 等。主要单元天线口径为 20m—40m,最大为 100m。如果 FAST 加入,由于它巨大的接收面积和地处所有联网边缘的地域优势,可将灵敏度提高 10 倍,可成图的目标数增加 1 000 倍,将成为国际 VLBI 网俱乐部的“网主”。由 FAST、地面 100m 天线和空间 10m 左右天线构成的 VLBI 系统,其灵敏度将比现有设备提高 0.5—1 个数量级。有可能以优于 0.1 个日地距离分辨能力,获得少数热谱源精细图像,从而研究恒星类天体的形成与演化。甚至直接为近邻双星系统和太阳系外行星成像。

(4)探测星际分子,研究恒星形成与演

化、星系核心黑洞以及探索太空生命起源。20 世纪 60 年代初,由于毫米波天文学的发展,在星际介质中观测到不同转动能级跃迁产生的分子谱线,这些分子中包括了蛋白质的基本化学元素 C、H、N 和 O 等。由此,射电天文学认为,前生命期复杂分子的发生可能不需要从零开始,分子天文学的奠基人 Townes 也因此荣获 1964 年诺贝尔物理学奖。迄今,已证认星际分子 140 余种,其中有 8 种脉泽分子,包括 50 多条非热脉泽谱线。在银河系已发现几千个脉泽源,在河外星系中发现了 106 个 OH 超脉泽源和 20 多个 H₂O 超脉泽源。

星际分子广泛存在于多种天文环境。约有 20% 的分子谱线处于厘米、分米波段。FAST 工作带宽内包含羟基(OH)、唯一的一条低频甲醇(CH₃OH)和甲醛(HCHO)等 17 种重要分子谱线。利用其高灵敏度,可对超强红外星系、高红移星系、活动星系和类星体进行 OH、HCHO、CH₃OH 分子超脉泽的广泛搜寻。FAST 的性能将可观测到更多 OH 超脉泽源,进一步研究超脉泽和星系类型的关系、超脉泽与核活动的关系、超脉泽和星系核相对论性外流的关系。在多波束模式下,用 FAST 做 OH 超脉泽的巡天工作,将增进我们对其光度函数的理解,为我们提供有关其起源的信息。CH₃OH 脉泽是河内最亮的射电点源,强出邻近 OH 脉泽近 1 个数量级,它的研究正成为示踪恒星及行星形成和研究吸积盘的重要工具。此外还可能发现高红移巨脉泽星系,研究宇宙早期演化。

(5)搜索星际通讯信号,搜寻地外文明(Search for Extra-Terrestrial Intelligence, SETI)。人类从未停止过对是否存在地外文明这一问题的孜孜探求,而近年来取得的地球极限生命环境、存在地外水和太阳系外行星系统 3 项科学进展,又使 SETI 升温。

与地外文明通讯的唯一可行的方法是

寻找来自地外的“人工”信号。主流 SETI 科学家认为人类应将搜索集中在 1—3GHz 的无线电频率范围,尤其是 21cm 的中性氢线(HI)与 18cm 羟基线(OH)之间。H 与 OH 结合成水(H₂O),因而这一狭窄频带又称为“水洞”。水对地球生命是最基本的,地外的“水族”可能也会自然地通过水洞寻找同类。在诸多观测课题中,“凤凰计划”是最著名 SETI 巡视,它始于 1994 年,正使用目前世界上最大的天线——Arecibo 望远镜对来自邻近的大约 1 000 颗类太阳星周围的无线电信号进行系统的搜索和证认。FAST 具有更强的搜索能力和更远的搜索距离,期望会给我们带来更大的发现机遇。

(6)其他应用领域。例如,①FAST 将把我国深空测控及通讯能力由地球同步轨道延伸至太阳系外缘行星,能使目前我们的深空通讯数据下行速率提高 100—1 000 倍,强有力地支持我国未来载人航天、探月和深空探测计划,能应对深空飞行器在快速工程变轨和着陆时的测控需求。②FAST 的经纬度使它处在全球深空网 DSN 中的有利位置,将在全球 24 小时日不落合作中发挥重要作用。③观测电离层对卫星和射电源信号的闪烁,研究电离层不均匀的时空结构,为我国军民用通讯和卫星定位服务。观测行星际闪烁 IPS 和法拉第旋光现象,跟踪探测日冕物质抛射事件,了解太阳风的行星际传播,服务太空天气预报。④毫秒脉冲星自转频率具有很高的长期稳定度,被誉为自然界中最稳定的时钟。目前已有约 10 个脉冲星计时阵(PTA, Pulsar Timing Array)先后投入工作,开始用 PTA 建立独立于原子时的脉冲星时间标准。FAST 能将所使用的脉冲星数目增加至 100 颗,实现新时间标准的突破,其精度有可能应用于未来深空飞行器的自主导航。

(相关图片请见彩插二、封三)



中国科学院