从“初光”开始: FAST早期科学及前景展望

李荫^{1,2*}, 王培¹, 张永坤^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: dili@nao.cas.cn

国家大科学装置500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)在2016年9月19日获得“初光”(first-light). FAST从20世纪90年代中期概念提出, 2011年3月开工, 2019年征集风险共担的开放项目, 到2020年成功通过国家验收、开展重大优先及开放项目的观测, 正式进入常规运行. 这20多年的长征, FAST团队一再面对高速发展的射电天文技术和科学前沿带来的挑战. 本文简单总结围绕FAST初光和早期科学开展的一系列创新尝试, 特别是高性价比的调试用超宽带接收机、自主研发的灵活变频谱线终端CRANE(China Reconfigurable ANalog-digital backEnd)、临时集装箱数据中心、跟进快速射电暴等. 通过FAST早期科学的尝试, 我们提出并发展了世界首创的多科学目标同时观测模式, 并在此基础上设计了CRAFTS(Comensal Radio Astronomy FAST Survey)巡天, 使FAST的巡天效率提高了数倍. CRAFTS催生了FAST首批成果, 包括首批新脉冲星、首批新快速射电暴、首篇关于FAST新脉冲星系统测时的论文等. 随着射电天文技术的总体前沿向大型阵列发展, FAST需要发挥和发展其大口径单天线的独特优势, 特别是其升级换代的可行性及灵活性. 人类的宇宙观完全由天文发现和可观测的物理参数空间所塑造. 如南仁东先生所言, “FAST是中国射电天文学科从领先到超越的一次尝试”. 这一刚刚开始尝试有潜力改变人类的宇宙观.

1 FAST的前身——阿雷西博望远镜

Harwit^[1]在其总结20世纪天文学发展的专著*In Search of the True Universe*中指出, “天文学家常常忽视了整个天文学科对于国家战略方向, 特别是军事技术渗透的依赖.” 事实上, 20世纪, 尤其是第二次世界大战以后, 技术的跨领域应用推动了人类宇宙观的重塑. 1951年, 哈佛大学(Harvard University)Ewen和Purcell^[2]利用自己搭建的简陋而富有创意的系统, 首次探测到宇宙物质的主要成分——原子氢的射电信号. 受益于第二次世界大战期间美国的巨大技术投入, Ewen博士个人的自由探索项目仅花费了500美元, 建立了首次探测到宇宙原子氢的射电望远镜(图1). Ewen的表象简陋的望远镜, 使用了原创的世界一流的电子学, 例如首创的直到现在都很常

李荫 中国科学院国家天文台研究员. 观测天文学家, 命名了氢气窄线自吸收(HI narrow self-absorption, H-INSAs)方法, 发现了星际氧气分子, 组织发现了FAST首个新脉冲星、首个新快速射电暴等. 曾获美国宇航局杰出团队奖(成员)、中国科学院杰出成就奖(主要完成人之一). 现任突破基金会聆听计划咨询委员、FAST首席

科学家. 主要研究方向包括星际介质、时域天文学、望远镜技术等.

用的频率切换技术(frequency switch). 银河系内, 特别是银心方向, 没有干净的中性氢参照点, 频率切换技术的创新对于银河系中性氢的发现是决定性的. 自Ewen的研究发表后, 各大学开始设立射电天文博士学位点, 多个国家开始进行大型射电望远镜建设, 射电天文学科因此得以繁荣, 直至今日.

1958年, 康奈尔大学(Cornell University)工程师W. Gordon提出了建设大型射电天线、探测电离层等离子体雷达回波的方案(<http://www.arenco-observatory.org>). Gordon的初步计算过大地估计了脉冲展宽, 过低地估计了回波功率峰值, 导致需要一个数百米的天线, 成数量级地高于当时射电天文天线的均值. 事实上, Gordon的计算很快得到了Bowles的纠正. Gordon在国际无线电科学会议(Union Radio-Scientifique International, URSI)上正式提出阿雷西博(Arecibo)望远镜概念时, 已经提出了可以利用小的多天线完成既定目标, 但是资助单位更看重项目的前瞻性, 忽略了小天线方案. 国家的战略需求和Gordon的“黄金”错误促成了一个特别适合探测微弱信号的300 m传奇(阿雷西博的几何口径为300 m, 一次照明约210 m. FAST的几何口径为500 m, 一次照明约300 m. 与灵敏度直接相关的有效天线面积比为2:1(FAST/Arecibo)).

阿雷西博(笔者称作Arecibo 1.0)初始的主反射面是网状的. 由早期图片(图2)可以清晰地透过镜面看到台址的道路和地貌. 阿雷西博的科学突破由雷达探测开始, 特别是首次测

图1 Ewen博士和他的中性氢望远镜探测系统。图片来自Ewen博士及NRAO网站(<https://www.nrao.edu>)
Figure 1 Dr. Ewen and his HI telescope. The photo was provided by Dr. Ewen on the NRAO website (<https://www.nrao.edu>)

量了水星的自转^[3], 并开创性地对太阳系行星进行了高精度雷达成像。20世纪60年代的四大天文发现, 即类星体、宇宙微波背景辐射、脉冲星和星际分子的最主要示踪剂一氧化碳, 都与射电观测相关。射电天文学进入了高速发展的黄金年代。

1973年, 利用还在升级安装反射面板过程中的阿雷西博望远镜(Arecibo 2.0), Hulse和Taylor执行了美国自然科学基金资助的一个普通项目(资助额\$33600), 很快找到了第一例双

中子星^[4]。这一发现和随后的计时监测验证了引力波辐射的存在, 并且在0.4%的精度上符合广义相对论的四极矩预言, 获得了1993年的诺贝尔物理学奖。阿雷西博望远镜成为研究脉冲星以及其他瞬变源的独特利器。1982年, Backer等人^[5]利用观测站雷达系统的高速采样功能, 首次发现了毫秒脉冲星。2015年, 阿雷西博发现了第一例重复快速射电暴^[6], 使得对这一神秘未知现象的定位成为可能。

面板升级使得L-band的天线效率大幅提高, 但是依然受限于馈源的窄带宽。20世纪90年代中期, 笔者进入康奈尔大学国家等离子层及天文中心(National Astronomy and Ionosphere Center, NAIC), 适逢阿雷西博再次升级——安装重达300 t的格里高利馈源仓(Arecibo 3.0)。仓中装备特殊设计的二级和三级镜, 实现了对来自球面主镜电磁场的点聚焦。新的光路结合21世纪初开始装备的焦平面多波束接收机阵, 在宇宙气体探测方面催生了突破, 包括河外有机分子^[7]、极冷中性氢^[8]、最大的气体星系样本等。升级后的阿雷西博也实现了最高频率接近10 GHz的谱线观测, 产生了至今依然独特的成果。

2 FAST的提出和早期建设调试

20世纪90年代中期, 南仁东博士和邱育海博士前往阿雷西博望远镜考察。他们与彭勃博士等国家天文台同事向中国科学院提出了建设新一代大型单天线的建议, 起初作为平方公里阵(Square Kilometre Array, SKA)的一个概念, 后来成为一个独立的项目, 在“十一五”成为正式立项的国家重大科技基础设施建设项目——500 m口径球面射电望远镜工程。FAST利用贵州天然喀斯特洼地作为望远镜台址, 利用主动反射面和精确可动馈源仓实现大天区面积、高精度的天文观测。该工程由中国科学院和贵州省人民政府联合共建, 于2011年3月25日开工建设, 2016年9月25日竣工, 2020年1月12号通过国家验收。FAST很早就被黔南人称为“天眼”。时任国务院副总理刘延东在FAST竣工典礼上宣读了习近平总书记的贺信, 正式命名FAST为“中国天眼”。FAST是具有中国自主

图2 1963年11月刚刚竣工的阿雷西博望远镜(a)和笔者走向格里高利馈源仓(b)。摄于2002年
Figure 2 The finished Arecibo telescope in November 1963 (a), and the author walked towards Gregorian feed cabin (b). The photo was taken in 2002

知识产权、世界最大、最灵敏的单口径射电望远镜。

与配备了格里高利馈源仓的阿雷西博(Arecibo 3.0)相比, FAST的设计把超大天线实现点聚焦跟踪的复杂挑战从悬空的2级镜和3级镜转到了主动反射面。这一概念的实现使得FAST的主焦光路异常简洁。如图3所示, 30 t重的馈源仓以及6根驱动索所占立体角极小。与Arecibo 3.0相比, 这样干净的主波束使得更为精确的测量成为可能, 例如谱线的塞曼效应。

遵循国家大科学装置建设的惯例, 人民币11.5亿元的FAST建设经费中没有对FAST数据存储、处理、科学分析的任何支持。通俗地说, FAST工程款中用于购置科学数据存储和数据分析的总额是0。基于国家大科学装置做科学本来也不是FAST工程团队的核心任务, 也不易得到同行评价体系的认可。但是, 在大众认知中并不会区分调试期(临时运行费)和运行期(正式运行费)。习近平总书记在2016年竣工贺信中的“早出成果、多出成果、出好成果、出大成果”既是期许, 也成为紧迫的要求。

2012年, 加州理工学院(California Institute of Technology)Weinreb团队开发的四脊超宽带接收机系统基本成熟。经与南仁东博士讨论, 我们提出在原定工程规划之外引进一个相对粗略的超宽带系统^[9], 争取以高性价比率先满足调试期间的需求。接收机系统由金乘进等负责具体合作、馈源制备和部分的电子学系统。这套常温系统达成了6:1的高低频比, 覆盖了270~1620 MHz这一关键频段。配合超宽带接收机, 分别开发了基于ROACH2的脉冲星终端和拥有多项自主知识产权的CRANE^[10]谱线终端。CRANE比一般传统的数字后端增加了模拟电路部分, 实现了灵活的通用性。CRANE的硬件包括用来调整中间频率和信号强度的模拟信号前端路板、FAST3212 采样板、FDB(fast digital backend)板(基于FPGA(filed programmable gate array)的信号处理)、高性能计算机(基于GPU(graphic processing unit)的信号处理)。

图3 升舱过程中的FAST馈源仓。笔者摄于2018年8月
Figure 3 FAST receiver cabin in the process of being lifted. The photo was taken by the author in August 2018

2015年, FAST与中科曙光公司达成协议, 采用先供货后付款的赊账方式建设了现场的基本数据处理能力。由于综合楼还在施工, 采用了集装箱计算中心方案(图4)。贵州降水量大, 现场的山区天气是局域现象, 晴雨转换快。集装箱配置了工业空调, 达成内部计算机房的环境要求, 箱体则实现基本的电磁屏蔽。早期的测试中, 信号极不稳定, 部分归因于工业空调启动所增加的负载, 使得接收机放大器的电流强度变化过大。在限制空调启动条件后, 问题得到缓解。

这套FAST任务书以外的系统没有内置的噪声注入, 两路偏振信号无法准确定标。系统温度约70 K, 远高于后来正式制冷的FAST 19波束接收机。虽然粗糙, 但超宽带和集装箱计算中心的及时进场保证了初期调试的开展, 完成了FAST早期科学的首批发现(例如新脉冲星^[11]、中性氢吸收线^[12]等), 催生了FAST第一批科学论文。

3 FAST早期科学

Nan等人^[13]总结的五大科学目标, 贯穿了FAST立项建议书、任务书和早期科学准备: (1) 巡视宇宙中性氢, 研究宇宙大尺度物理学, 探索宇宙起源和演化; (2) 观测脉冲星, 研究极端状态下的物质结构与物理规律; (3) 主导国际低频甚长基线干涉测量网, 获得天体超精细结构; (4) 探测星际分子, 研究恒星、行星和生命起源; (5) 搜索可能的星际通信信号。FAST科学团队在国家“973”计划项目“射电波段的前沿天体物理课题及FAST早期科学研究”和国家重点研发计划项目“基于FAST漂移扫描巡天的脉冲星、中性氢星系和银河系结构研究”的支持下, 联合国内主要的天文研究机构, 进行了系统的预先研究和科学准备(图5)。其中, 国家“973”计划项目以科学准备为主, 项目执行期间资助学生80名、博士后14人, 通过公开竞争获得世界几乎所有主流开放射电望远镜的时间, 包括Arecibo, ALMA, JVLA, Parkes, JCMT, IRAM, GBT, Effelsberg等, 催生了国内第一篇有第一版权的ALMA论文。这些努力帮助培养了射电数据处理方面的人才, 其中很多人目前活跃在FAST相关领域。

2017年7月, FAST调试取得重要进展, 实现了较为稳定、准确的主动反射面变形和系统指向。在随后的漂移扫描过程中, 开始探测到可能的脉冲星。FAST确定指向的参数远多于传统的天线, 由总控和馈源支撑系统记录的数据综合生成。控制系统和接收机终端系统有各自的时间标签。FAST科学数据文件的文件头没有明确的指向信息。彼时, 电磁环境, 尤其是现场自身产生的干扰一直在变化中, 脉冲星的认证存在挑战。2017年8月, 在与澳大利亚Parkes的观测对比中, 我们意识到漂移扫描的持续时间较长, 在J2000的历元下赤纬有显著的变化, 随即调整了观测设置。2017年9月11日, F. Camilo博士捐献了其Parkes观测计划中的部分时间, 帮助认证FAST脉冲星候选体。当天, Parkes电磁干扰严重, 但是经过反复修正, 依然能够清晰地重复FAST的结果, 确认了FAST发现

图 4 CRANE 系统构架
Figure 4 Framework of CRANE system

的第一颗新脉冲星 PSR J1859-01^[11](图6)。

随着望远镜设计性能的达成, FAST 科学团队先后组织了 55 个早期科学项目, 归档于“FAST 早期科学计划书”, 在配合调试的前提下进行了广泛的尝试。成立 FAST 科学委员会以后, FAST 早期科学计划书归并为 8 大类, 即 (1) 脉冲星科学: 针对较亮脉冲星开展跟踪观测, 研究单脉冲、偏振、星际闪烁等脉冲星辐射机制、中子星物理及星际介质相关科学; (2) 脉冲星测时: 开展高精度脉冲星到达时间测量, 并着重密近、掩食双星等特殊系统; (3) 脉冲星搜寻; (4) 河内中性氢: 大天区成图及对于中性氢窄线自吸收的塞曼效应、与 γ 射线超新星遗迹成协的 HI 高速云等目标的深度研究; (5) 河内分子谱线观测; (6) 河外中性氢定点观测; (7) 射电复合线及河外吸收线搜寻; (8) 其他探索性观测, 特别是临近恒星射电暴发及系外行星。这些尝试后来大部分转化成公开项目申请或者融入科学委员会批准的优先重大项目内容, 并开始系统产生科学论文, 例如文献[14]。

4 单天线和综合孔径阵

随着 ALMA 的全面成功和平方公里阵的规划与建设, 射电天文的主要技术前沿无疑在大型、新型的综合孔径阵列望远镜。阿雷西博望远镜从提出到建成出光仅 5 年, 其间还经过了设计方案的重大调整, 利用仅 980 万美元的总预算, 在

1963 年底实现了世界射电天线灵敏度的数量级飞跃。这种建设速度是前无古人, 至今没有来者的。一方面, 阿雷西博是少数科学家独立探索的项目, 由 Gordon 博士以及康奈尔大学的 5 名工程师和管理人员(<https://ecommons.cornell.edu/handle/1813/33229>), 在波多黎各领导了整个工程的实施, 避免了大型工程常见的多方委员会的反复讨论和争端。另一方面, 阿雷西博也是大国竞争的产物, 由于符合冷战的战略而迅速得到国家支持。FAST 从提出到进入运行经历了二十几年, 是当前世界大科学工程的常态, 必须不断面对高速发展的技术和科学前沿的挑战。

综合孔径阵列在天文观测性能上拥有对于单天线的全面优势, 包括分辨率、稳定性、干扰排除、灵活性等, 其概念的实现也因此获得 1974 年诺贝尔物理学奖。那么, FAST 的核心优势在哪里呢? 根据辐射计公式估算, 具有一定噪声温度 (T_{sys}) 的射电望远镜探测一定强度的射电源所需观测时间 (t) 与有效接收面积 (A_e) 关系如下:

$$\begin{aligned} \text{点源: } t &\propto (T_{\text{sys}})^2 / (A_e)^2, \\ \text{展源: } t &\propto (T_{\text{sys}})^2 (D_{\text{base}})^4 / (A_e)^2. \end{aligned} \quad (1)$$

对于综合孔径阵, D_{base} 代表基线长度; 对于单天线, D_{base} 代表天线口径。因此, 对于充满波束的展源, 探测所需观测时

图5 FAST早期科学观测的部分设备和结果。(a) 2015年, 数据处理集装箱进场; (b) 2017年, 与馈源仓升空的超宽带接收机; (c) 2016年, FAST初光数据: PSR J1921+2153; (d) 2016年9月19日, FAST初光时刻的合影

Figure 5 Instruments for and results from the FAST early science operation. (a) FAST's first data processing cluster in two containers, 2015; (b) the ultra wideband receiver launched with the feed cabin, 2017; (c) the FAST's first light data of PSR J1921+2153, 2016; (d) group photo taken right after achieving first light, September 19, 2016

图6 FAST首颗新脉冲星: 低频脉冲轮廓和Parkes认证. Parkes数据由F. Camilo提供

Figure 6 The first pulsar discovered by FAST: Low frequency pulse profile and Parkes confirmation. Parkes data were provided by F. Camilo

间与单天线或干涉阵的总有效接收口径无关, 只与系统温度有关. 宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background, CMB)就是这种辐射计概念探测展源的成功例证. 在Penzias和Wilson^[15]开创性的发现工作中, CMB表现为一个噪声项. 对于展源或者射电源平缓变化的部分, 由于流量丢失, 干涉

阵的探测花费时间随基线的4次方增加. FAST的总体造价11.5亿元人民币, 约合2.5万元人民币/ m^2 (此处计算的是有效口径 A_e). 世界最大的全可动单天线GBT造价9500万美元, SKA1造价约为6.5亿欧元. 按照2010年的汇率计算, GBT和SKA1的单位有效面积造价都是FAST的4倍, 当然这两台设

备都已经或者将要实现复杂得多的功能。因此, FAST的核心优势是以高性价比实现了其波段内最大的有效接收面积, 使得深度大天区覆盖成为可能。

值得注意的是, 这种概念的优势是有局限和时效性的。在L波段, 银河系布满同步辐射, 构成了足以混淆弱源的前景/背景场。利用混淆效应的经验公式:

$$\left(\frac{\sigma_c}{\text{mJy beam}^{-1}}\right) \approx 0.2 \left(\frac{\nu}{\text{GHz}}\right)^{-0.7} \left(\frac{\theta}{\text{arcmin}}\right)^2, \quad (2)$$

FAST的 5σ 混淆极限是 $\sigma_c=7$ mJy/beam, 而FAST热噪声在1 s以内就可以达到这个水平。也就是说, FAST探测缺乏特征(时域/频域/偏振)的弱源, 完全被混淆所限制。

工程技术和设计概念的不断更新也是FAST面临的挑战。越小的天线, 单位有效面积造价越便宜。例如目前市场普遍可得的5 m级小天线, 不计入伺服系统、馈源、放大器、终端、时间系统等, 仅计算天线造价为¥0.6万/m², 为FAST系统的1/4。一个具有 n 单元的综合孔径阵, 其伺服、放大器、时钟系统等造价按照 n 线性增长, 而波束合成所需的相干计算按照 n^2 增长。当关键元器件及技术产生飞跃, 例如无需天线独立时钟的同步技术使得 n 的需求变成 ~ 1 , 又例如常温放大器使得制冷机的需求从 n 变成0, 将使建设接近FAST性价比的综合孔径阵变为可能, 并且其具有综合孔径更为全面的功能。小天线的视场更大, 对天区的覆盖取决于波束合成的处理能力。

目前, FAST使用的19波束(FAST-Lband-Array of Nineteen beams, FLAN)^[16]覆盖了跨度约为21角分的六边形由于两个波束之间有一个波束宽度的空白, 因此需要4次指向才能完整覆盖19波束视场, 16次指向才能达成超奈奎斯特采样。如果使用相位阵馈源(phased array feed, PAF), 可以利用PAF对于波前的完整覆盖, 修正焦平面曲率, 进一步扩大视场。由于观测时间随系统温度的平方增长, PAF的系统温度需要做到目前FLAN的两倍以内(<40 K)才会显著提升巡天速度。FAST配备制冷的PAF将是一个重要的进步。

5 FAST新前沿

经过公开征集和遴选, FAST科学委员会批准了5项优先重大项目: (1) FAST漂移扫描多科学目标同时巡天; (2) 快速射电暴搜寻和多波段观测; (3) 银道面脉冲星巡天; (4) M31中性氢成像与脉冲星搜寻; (5) 脉冲星测时, 中国脉冲星测时阵列及脉冲星物理和演化。2020年, 在FAST科学委员会制定的政策指导下, FAST时间分配委员会结合国际、独立、多方的通讯评审和会评, 从169项公开征集的观测提案中遴选了近100项开放项目, 正在FAST系统开展观测。FAST的优先重大项目和开放项目覆盖了FAST的五大主要科学目标, 也涉及多个新兴前沿^[17]。2020年, FAST进行了第一次开放项目征集, 共征集到169项有效申请。时间的申请竞争比例接近5, 跟ALMA一个水平。2021年, FAST将逐步开始国际开放, 预期

竞争会进一步加剧。

在分米波段, 世界上大型的单天线望远镜都进行过脉冲星和中性氢巡天。这些巡天奠定了人类对于银河系动力学结构、星际介质状态、气体星系、中子星样本的基本认识。在FAST以前, 从来没有实现过脉冲星和中性氢的同时巡天, 主要的技术挑战是两大类科学对于定标和观测模式的矛盾要求。我们在2015年提出高时频噪声注入概念, 于2018年实现了多科学目标同时观测模式的验证。基于这项世界首创的技术, 我们设计了FAST漂移扫描多科学目标同时巡天(Comensal Radio Astronomy FAST Survey, CRAFTS)^[16]。CRAFTS将19波束接收机旋转并保持到特定的角度, 固定FAST的面形和指向, 保持FAST 100%的增益, 利用地球的自转扫过天空, 并同时记录河内中性氢、河外中性氢、脉冲星及暂现源数据流。经过扫描带拼接之后, CRAFTS实现了对所覆盖天区的超奈奎斯特采样。河内、河外中性氢的通道数和带宽覆盖不同, 是分立的数据流。由于中性氢和脉冲星巡天都需要大天区覆盖, 耗时较多。CRAFTS同时巡天的效率是传统模式的3倍以上。

阿雷西博把人类对于中性氢星系的探测数量从千的数量级提高到万。与阿雷西博相比, FAST最终的气体星系探测数量将会再提高一个数量级。阿雷西博河内中性氢成像巡天的角分辨率比上一代Leiden/Argentine/Bonn(LAB)巡天的36角分提高了一个数量级, 但是没有绝对流量定标。相对于阿雷西博, FAST在角分辨率上略有进步, 而光路更为干净, 杂散光和驻波的影响有明显改善, 成像质量明显提高。阿雷西博在脉冲星方面有数个革命性的发现, 但是搜索巡天的效果远远低于预期, 比Parkes差了接近一个数量级。这反映出脉冲星搜索的效果不完全由灵敏度决定。FAST发现脉冲星的数量将远远超过阿雷西博, 是否能够与Parkes和一系列新设备一较短长值得拭目以待。

快速射电暴(fast radio burst, FRB)在2007年首次发现, 直到2013年才得到认证, 成为射电天文的热门新领域。2017年1月, 快速射电暴FRB121102被首次定位并确定其宿主星系为约红移0.2的矮星系^[18]。这一成果揭示了快速射电暴的宇宙学起源, 被美国天文学会称作“自LIGO引力波探测以来, 天文学最重大的发现”。作为新兴天文领域的FRB发展与伽马射线暴(gamma ray burst, GRB)领域类似, 都在初期经历了理论模型多于观测事例的阶段, 反映了观测限制的缺乏。通过搜索Web of Science关键词可以发现, 至今为止FRB领域科学产出的增长速度在时间上为GRB领域早期的2倍, 总量约为其2.5倍, 目前的发展是指数增长(图7)。如果根据GRB的发展进程简单外推, 则FRB将在2028年左右进入线性增长的平台期, 对应于GRB领域的~2006年。平台期的产生是由于当前技术允许的可获取观测参数被完整覆盖以及遇到基本物理原理方面的挑战。

我们从2015年开始探讨FAST如何跟进快速射电暴领

图7 GRB和FRB相关论文发表情况
Figure 7 Publications on the subject of GRB and FRB

域^[19]。通过与时任突破聆听(Breakthrough Listen Initiative)计划首席科学家Werthimer的讨论,我们确定了实时捕捉和粗略定位的方向。由于FAST的相对较小视场和FLAN对于焦面场的稀疏覆盖,FAST在发现和定位快速射电暴上不具备优势,新发现的效率大约为每1000 h一个^[18]。深度检测重复暴和特殊源是充分发挥FAST灵敏度的最直接的方式。2020年,银河系磁星J1935+2154产生了FRB200428事件^[20,21]。随后,FAST开展高精度的监测,最严格地限制了磁星暴发的射电流量^[22],帮助揭示了快速射电暴的起源。基于FAST的论文^[22]入选了2020年度*Nature*杂志十大发现和*Science*杂志十大突破,为相关方向的关键论文之一。

在早期科学和公开项目中,还有数个项目探索系外行星相关的射电暴发。太阳系的大行星都有射电暴发,一般认为是回旋脉泽辐射,其频率和强度都与行星磁场相关。目前还没有实现系外行星在射电波段的直接探测。我们也在尝试探

测被认为源自类似机制但是更为强烈的褐矮星射电暴发,以验证相关的探测技术,研究其机制。地球的磁场是人类和地球多数生命生存的必要条件。系外行星的射电观测^[23]是最有可能直接限制其磁场的手段,是FAST寻求突破的重要新前沿方向。结合邻近行星探测的地外文明搜索^[24]也在逐步开展。

6 总结与展望

阿雷西博望远镜在其57年的生命中经过多次升级改造,可以大致分为只有网状天线和馈源的Arecibo 1.0、装备了面板的Arecibo 2.0,以及配备了格里高利馈源仓实现宽带点聚焦的Arecibo 3.0。每一次改进都带来了革命性的成果,从多方面改变了人类的宇宙观。阿雷西博在2020年12月1日坍塌。FAST是目前世界上唯一的300 m级天线,其瞬时灵敏度超过其他天线一个数量级以上。FAST拥有约10%的SKA接收面积,与SKA1可比,将领先世界约10年。随着预期中的SKA1全面展开,其综合性能将超过FAST,但是FAST将依然有其独特的发现空间。

围绕五大既定科学目标和包括快速射电暴及系外行星的射电探测在内的新兴前沿,FAST已经开始系统的科学产出及开始取得重大突破。阿雷西博望远镜的历史和FAST建设、早期科学准备以及调试的经验一再表明了持续创新、跟进前沿的必要。由于只需替换一套接收机系统以及用户构成相对简单,持续更新的能力将是大型单天线的根本优势之一。制冷的相位阵馈源是FAST技术升级的主要方向。

FAST的终极目标是改变人类的宇宙观。位于贵州省黔南州金科村的“中国天眼”FAST正如南仁东先生所言,是“中国天文从追赶超越”的一次尝试。这一尝试刚刚开始。

致谢 感谢国家自然科学基金(11988101, 11725313, U2031117)资助。感谢中国科学院国家天文台段然博士提供接收机终端的信息。

推荐阅读文献

- 1 Harwit M. In Search of the True Universe. New York: Cambridge University Press, 2015
- 2 Ewen H I, Purcell E M. Observation of a line in the galactic radio spectrum: Radiation from galactic hydrogen at 1,420 Mc./sec. *Nature*, 1951, 168: 356
- 3 Pettengill G H, Dyce R B. A radar determination of the rotation of the planet Mercury. *Nature*, 1965, 206: 1240
- 4 Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys J*, 1975, 195: L51-L53
- 5 Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. A millisecond pulsar. *Nature*, 1982, 300: 615-618
- 6 Spitler L G, Scholz P, Hessels J W T, et al. A repeating fast radio burst. *Nature*, 2016, 531: 202-205
- 7 Salter C J, Ghosh T, Catinella B, et al. The Arecibo Arp 220 spectral census-I. Discovery of the pre-biotic molecule methanimine and new cm-wavelength transitions of other molecules. *Astron J*, 2008, 136: 389-399
- 8 Li D, Goldsmith P F. HI narrow self-absorption in dark clouds. *Astrophys J*, 2003, 585: 823-839
- 9 Li D, Nan R, Pan Z. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope Project and its early science opportunities. IAU Symposium, 2013, 291: 325-330
- 10 Zhang X X, Duan R, Yu X Y, et al. The design of China Reconfigurable ANalog-digital backEnd for FAST. *Res Astron Astrophys*, 2020, 20: 073
- 11 Qian L, Pan Z C, Li D, et al. The first pulsar discovered by FAST. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 959508

- 12 Tang N Y, Zuo P, Li D, et al. Pilot HI survey of Planck galactic cold clumps with FAST. [Res Astron Astrophys](#), 2020, 20: 077
- 13 Nan R, Li D, Jin C, et al. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) project. [Int J Mod Phys D](#), 2011, 20: 989–1024
- 14 Zheng Z, Li D, Sadler E M, et al. A pilot search for extragalactic OH absorption with FAST. [Mon Not Roy Astron Soc](#), 2020, 499: 3085–3093
- 15 Penzias A A, Wilson R W. A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. [Astrophys J](#), 1965, 142: 419–421
- 16 Li D, Wang P, Qian L, et al. FAST in space: Considerations for a multibeam, multipurpose survey using China's 500-m Aperture Spherical radio Telescope (FAST). [IEEE Microwave](#), 2018, 19: 112–119
- 17 Li D, Dickey J M, Liu S. Preface: Planning the scientific applications of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope. [Res Astron Astrophys](#), 2019, 19: 016
- 18 Chatterjee S, Law C J, Wharton R S, et al. A direct localization of a fast radio burst and its host. [Nature](#), 2017, 541: 58–61
- 19 Li L B, Huang Y F, Zhang Z B, et al. Intensity distribution function and statistical properties of fast radio bursts. [Res Astron Astrophys](#), 2017, 17: 6
- 20 Andersen B C, Bandura K M, Bhardwaj M, et al. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar. [Nature](#), 2020, 587: 54–58
- 21 Bochenek C D, Ravi V, Belov K V, et al. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar. [Nature](#), 2020, 587: 59–62
- 22 Lin L, Zhang C F, Wang P, et al. No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar. [Nature](#), 2020, 587: 63–65
- 23 Zarka P, Li D, Grießmeier J M, et al. Detecting exoplanets with FAST? [Res Astron Astrophys](#), 2019, 19: 023
- 24 Li D, Gajjar V, Wang P, et al. Opportunities to search for extraterrestrial intelligence with the FAST. [Res Astron Astrophys](#), 2020, 20: 078

Summary for “从“初光”开始: FAST早期科学及前景展望”

Shining on from the first light: The early sciences of FAST

Di Li^{1,2*}, Pei Wang¹ & Yongkun Zhang^{1,2}¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China* Corresponding author, E-mail: dili@nao.cas.cn

The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) is a Chinese mega-science project, the first light of which was achieved on September 19th, 2016. The mid-1990s witnessed the birth of the FAST concept, March of 2011 the commencement of construction, 2019 the shared-risk open programs, and 2020 the final project review, first batch of major surveys and the starting of normal operation. Throughout the more than two decades' "long march", there has never been a lack of constant struggle and challenges, brought about by the fast-moving frontiers of radio technology and radio astronomy. This is a brief summary of our innovations in response, including a low-cost ultra-wideband commissioning receiver, a highly configurable digital spectrometer, a container-based data center, a fast radio burst (FRB) backend, etc.

During the early science phase, we developed the world's first commensal observing mode in this band, capable of recording pulsar, Galactic HI, extra-galactic HI, and transient data streams, simultaneously. The thus based Commensal Radio Astronomy FAST Survey (CRAFTS) was approved as one of the five major surveys by the science committee and has produced the first batch of FAST's science results, including new pulsars, new FRBs, the first paper on systematic timing of FAST new pulsars, etc. Before CRAFTS, there is no major survey that accomplished simultaneously searching for pulsars and imaging HI. CRAFTS helps improve the survey efficiency of FAST by more than three folds. In addition to surveys, FAST has started more than 100 PI-led programs, selected by open competitions through the "shared-risk" and the first open call for proposals. Many proposals focused on new frontiers, such as FRBs and exoplanets. FAST joined the campaign to monitor the only Galactic FRB source J1935+2154 and provided the most stringent constraint on its radio flux, which is crucial to understand the origin of FRBs. This result along with the discovery papers has been cited as one of the major scientific achievements world-wide in 2020.

The cost per unit effective collecting area of FAST is only 1/4 that of the Greenbank Telescope (GBT) or the Square Kilometer Array-phase 1 (SKA1). The success of FAST demonstrates that a giant filled-aperture antenna can still be the most cost-effective route toward the best absolute sensitivity. In light of the main stream of radio astronomy development toward powerful arrays, however, FAST will have to continue exploiting its upgradability, which is another major advantage of a giant single dish over interferometers. For an interferometer of n element, any major upgrade will incur cost of $\sim n$ sets of electronics and of $\sim n^2$ computational costs. For FAST, a cooled PAF is its clear land-mark goal, which will help utilize its relatively flat and spacious focal plane to achieve even better survey efficiency and quality.

Human's worldview and cosmos-view have been entirely shaped by what we can observe. The ultimate goal of FAST is to deepen mankind's understanding of nature through worldview-altering discoveries. On December 1st, 2020 local time, the great Arecibo telescope, after occupying the world's apex of radio sensitivity for more than half a century, collapsed. The FAST was inspired by the audacity of Arecibo and encouraged by its achievements. As envisioned by Dr. Nan, Rendong, "FAST represents the collective ambition of Chinese astronomers to leap from chasing to leading." It starts now.

FAST, radio astronomy, Arecibo, breakthrough, world-viewdoi: [10.1360/TB-2020-1629](https://doi.org/10.1360/TB-2020-1629)