

# FAST 脉冲星发现新视野

## 1 脉冲星的特性与科学意义

脉冲星是旋转的中子星,其质量约为一个太阳而半径只有 10 km,它是大质量恒星生命终结并经历超新星爆发的产物,此星体在 1967 年首先被英国天文学家乔瑟琳·贝尔发现<sup>[1]</sup>,堪称 20 世纪四大天文学发现之一。脉冲星旋转速度极快,目前探测到最快脉冲星周期为 1.396 ms(相当于 1 秒内自转高达 716 圈)。根据统计,旋转周期少于 20 ms 的脉冲星超过 300 颗,占总数(约 2700 颗<sup>[2]</sup>)的 1/9。由于脉冲星拥有大质量和小半径,其表面存在较强的引力场,为广义相对论和引力波的检验提供了天然实验室。脉冲星的超强磁场约为地磁场的万亿倍,这为研究等离子体物理、磁层高能粒子加速机制、高能辐射、射电辐射过程提供了一个理想场所;脉冲星内部高度致密,物质主要由中子组成,这为核物理研究提供了良好场所。脉冲星还具有精确的守时性,亦即其周期变化非常有规律,每千万年减慢不到 1 s,堪称宇宙最精准的钟表,此性质可以用来实现宇宙星际导航。

## 2 FAST 的成果与成功原因

2017 年 10 月 10 日,中国科学院国家天文台宣布 FAST 发现新的脉冲星,这是令天文学界振奋的消息,标志着中国建造的具有自主知识产权的射电望远镜成功实施运行,使得中国射电天文步入一个崭新的阶段,并使中国在全球科技制高点占据重要的席位,同时,开启了中国射电天文在操作自主设备进行新脉冲星发现的新时代,也预示着人类探索宇宙的新纪元正在到来。未来,FAST 将有希望发现更多守时精准的毫秒脉冲星,这对脉冲星计时阵探测引力波做出非常重要的贡献。

脉冲星信号较弱,射电望远镜巡天已经发现了大量脉冲星,而 FAST 的发现空间还在摸索之中。FAST 在调试阶段,目前使用国家天文台与加州理工大学联合研制的超宽带接收机,覆盖 270~1600 MHz 这一高低频比达到 6:1 的电磁波段。目前在世界百米级的大型望远镜中,只有 FAST 在这一频段拥有超宽带接收机。FAST 团队白天以调试为主,利用夜晚工程人员休息时间,将望远镜指向一个确定的纬度,使其能够漂移扫描经过银道面。目前在 300~500 MHz 的低频波段搜索尤为成功,发现了相当数量的周期偏慢、脉冲较窄、信噪比很高的候选体。FAST 的灵敏度和独特的频率覆盖有潜力进行系统地发现脉冲星星族的重要成分。

2017 年 10 月,FAST 经过一年的试验运行调试,已实现对星体的指向、跟踪、漂移扫描等多种观测模式,目前已经探测到数十个脉冲星候选体,其中 6 颗新发现的脉冲星(图 1)已通过国际著名射电望远镜(诸如,澳大利亚 64 m 口径 Parkes 望远镜)的再次观测认证。FAST 公布的其中两颗新的脉冲星编号分别为 PSRJ1859-0131 和 PSRJ1931-01,它们的自转周期分别为 1.83 s 和 0.59 s,距离地球分别约 1.6 万光年和 4100 光年,分别是 FAST 于 2017 年 8 月 22 日和 25 日在南天区银道面通过漂移扫描时发现的。

FAST 能够在短时间内,快速获得脉冲星信号并分析认证新

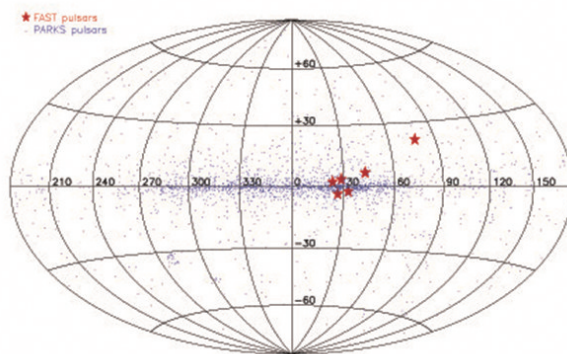


图 1 FAST 发现的 6 颗脉冲星在天球上的分布

的脉冲星,这在世界同类设备中也是名列前茅的。这一成就的取得归功于如下几方面:1) FAST 工程建设全面严格管理。FAST 工程建设完全按照预计时间顺利完成,这在大科学装置建设历史上是不多见的,这与超级工程严格管理、各个项目精准实施以及建设与管理团队严格履行岗位职责等密不可分。2) 科学团队与建设团队密切配合。FAST 工程建设期间,FAST 科学团队与建设团队一起配合,实施了无缝连接,建设与构想并行推进,创造了中国大科学工程的完美对接接力。3) 一系列对偶工作优化 FAST 操作。脉冲星接收机的硬件和软件开发、后台与前台、脉冲星样本分析与巡天策略,这一系列对偶工作在有条不紊的协调下实现优化操作。4) 具有远见卓识的项目首席科学家至关重要。FAST 团队在项目首席科学家——南仁东(图 2)的指挥下,齐心协力、上下一心、日夜苦干,为中国大科学装置早日赶上并超过世界先进水平,共同创造了新的篇章。5) 善于借鉴国内外观测经验。FAST 脉冲星团队借鉴国内外观测经验,一直摸索前进,不断创新进取,使得世界最大射电望远镜充分发挥其效能。6) 党和国家领导的密切关注。FAST 建成后,党和国家领导人密切关注 FAST 科学目标的实施,总书记习近平亲自向 FAST 发来贺电并鼓励 FAST 团队:“早出成果,多出成果,出好成果,出大成果”。这激励着 FAST 团队日夜奋战,加班加点,特别是总工程师南仁东同志运筹帷幄、废寝忘食、夜以继日、日夜操劳、鞠躬尽瘁,最后为 FAST 事业献出宝贵的生命。



图 2 “FAST 创始人”南仁东(1945—2017)

### 3 FAST与阿雷西博望远镜的对比

FAST是国际上最灵敏的射电天文望远镜,其灵敏度(单位时间、单位面积接收到的来自一个波束立体角内的辐射能量)用最小观测流量密度表示为<sup>[3-4]</sup>

$$S_{\min} = \frac{2kT_{\text{sys}}}{A(\tau \cdot \Delta f)^{1/2}}$$

其中 $k$ 为波尔兹曼常数, $T_{\text{sys}}$ 是望远镜天线的系统温度, $A$ 是接收面积, $\tau$ 是观测时间或积分时间,为接收机带宽。由此可知,如果提高望远镜灵敏度,需要降低系统的噪声和扩展接收机的频带宽度、增大天线的接收面积和加长观测时间。

对比于美国阿雷西博305 m射电望远镜(图3),FAST装备超宽带、多波束,在其他条件一定时,必然拥有超高灵敏度。另外,FAST的天顶角( $40^\circ$ )目前可以达到 $26^\circ$ ,这大于阿雷西博望远镜( $20^\circ$ ),再加上FAST附近的无线电噪声环境(RFI)远好于阿雷西博,这些条件使FAST具有世界一流的射电观测性能,其综合性能约为阿雷西博的3~5倍。高灵敏度的FAST能捕获到其他望远镜不曾探测到的更加微弱的射电信号。宇宙中分布着大量的脉冲星,理论估计仅银河系中就有6~8万颗可观测的脉冲星<sup>[3-4]</sup>,但由于其信号微弱,加之易被电磁干扰淹没,脉冲星探测率不足5%。目前,FAST具有最强深空观测的潜力,这为快速发现脉冲星提供了得天独厚的条件。



图3 FAST与美国阿雷西博射电望远镜对比示意

FAST高灵敏度使得在非常短的积分时间内就发现第1颗新脉冲星J1859-0131(又名FP1-FAST Pulsar#1)(图4),仅用了52.4 s,而用来证实FAST发现的澳大利亚64 m口径望远镜Parkes却用了足足2100 s,且信噪比较FAST弱3倍。根据仿

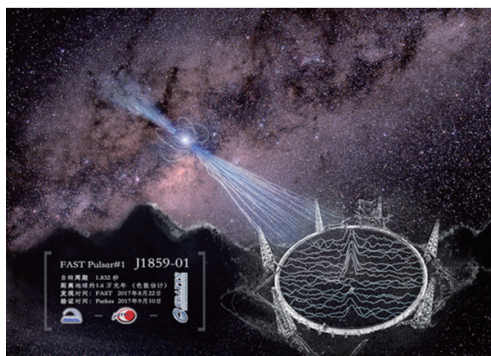


图4 FAST发现的第一颗脉冲星J1859-0131示意

真结果,FAST使用多波束馈源时在1 h积分时间内,观测1年将有可能发现4000颗左右的新脉冲星<sup>[5,6]</sup>。

### 4 FAST深空观测的潜力

FAST望远镜具有极大的效能去探测4000多颗新的脉冲星,并实施脉冲星的精确测量。未来10年,观测到的脉冲星或可进入万颗时代。FAST可以试图发现新型天体,诸如脉冲星与恒星级黑洞同处于一个双星系统<sup>[7]</sup>。虽然现在天文学家已经观测到14对双中子星,还没有发现脉冲星-黑洞系统的迹象,然而FAST高灵敏度有望在未来若干年内探测到这类奇特双星。据估计,脉冲星-黑洞系统的探测率低于双中子星系统的1/10,随着世界各地大射电望远镜的投入使用以及脉冲星搜寻技术的优化,探测到脉冲星-黑洞系统的机会正在增加。另外,FAST加入国际引力波探测行列联合进行脉冲星引力波探测,进行银河系的毫秒脉冲星阵列的监测研究,观测和分析它们在宇宙原初引力波作用下产生的微小扰动,这是国际科学界期待已久的低频引力波直接探测方式之一。FAST投入使用后,我们可以期待这一引力波探测的结论。

全球脉冲星的观测已积累了一大批宝贵资料,同时也存在不少现象和问题尚待解决。随着FAST的建设和其他观测手段的进一步优化与发展,人类必将逐步揭示脉冲星所带来的一系列新问题。毫秒脉冲星是双星系统吸积加速的结果,其研究对于解释双星系统演化具有重要意义。根据理论计算,如果能探测到亚毫秒脉冲星,其物态很有可能是夸克星,这将是核力起主导作用的一类新天体,为核物理研究打开新的大门。河外脉冲星,亦即银河系以外其他星系脉冲星的探测也将作为FAST未来观测的重点。随着FAST射电望远镜灵敏度的提高,探测其他星系的巨脉冲信号,超亮脉冲星也成为可能,这会对星际介质和星系际介质研究提供绝佳样本。另外,对于一些年老的脉冲星,其辐射强度较低,星体自旋周期大于10 s,不容易被探测到。FAST的高灵敏度使探测年老脉冲星成为可能,这对于研究脉冲星晚期演化特性至关重要。

正如南仁东的期待,我们可以自豪地运转着“中国制造”的大科学装置,仰望星空并开创中国人发现宇宙奥秘的新时代。

### 参考文献

- [1] Hewish A, Bell S J, Pilkington J, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source[J]. Nature, 1968, 217(5130): 709-713.
- [2] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. The Australia telescope national facility pulsar catalogue[J]. Astronomical Journal, 129(4), 2005: 1993-2006.
- [3] Lyne A, Graham-Smith F. Pulsar Astronomy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, 50-62.
- [4] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of pulsar Astronomy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012, 32-53.
- [5] 南仁东, 张海燕, 张莹, 等. FAST工程建设进展[J]. 天文学报, 2016(6): 623-630.
- [6] 南仁东. 500 m球反射面射电望远镜FAST[J]. 中国科学G辑: 物理学、力学、天文学, 2005(5): 3-20.
- [7] 张承民, 王双强, 尚伦华, 等. 脉冲星发现50年[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 52-57.

文/张承民,王培,杨佚沿

作者简介:张承民,中国科学院国家天文台,研究员;王培,中国科学院大学,助理研究员;杨佚沿,北京师范大学天文系,博士生。

(责任编辑 王丽娜)