

FAST——脉冲星观测研究的利器

闫振^{1,2}, 沈志强^{1,2}

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030
2. 中国科学院射电天文重点实验室, 南京 210008

摘要 2016年9月25日落成的中国自行设计建造的500 m口径球面射电望远镜(FAST)是目前全世界最大口径的射电望远镜。在调试期间已成功发现了脉冲星,实现了国内设备发现脉冲星的零突破。脉冲星是宇宙中的一类奇妙天体,是验证强引力场、强磁场和高密度等极端物理环境下物理规律的“天然实验室”。作为脉冲星研究的利器,预计FAST大规模巡天能够大幅提高已知的脉冲星数目。FAST还将在低频引力波探测、脉冲星物理、星际和星系际介质探测、脉冲星时间尺度建立及脉冲星导航等领域取得突破性进展。在上述研究中,国内天文设备取长补短、相互补充,有望实现中国脉冲星观测研究跨越式发展。

关键词 射电望远镜;脉冲星;引力波;星际介质;星系际介质

2017年10月10日,中国科学院国家天文台在世界最大单口径射电望远镜——500 m口径球面射电望远镜(FAST)首批成果新闻发布会上宣布成功发现并认证了2颗脉冲星^[1],这是中国科学家利用国内自主建设的设备首次发现脉冲星,振奋人心,意义重大。

脉冲星因产生具有严格周期性的脉冲信号而得名,诞生于大质量恒星耗尽其燃料后的超新星爆发。大量观测分析表明,脉冲星典型质量为1.44倍太阳质量,但其半径却只有10 km左右,具有非常强的引力场,密度甚至高于原子核,可达 10^{14} g/cm^3 。一块橡皮体积大小的脉冲星物质与地球上所有人的总质量相当。脉冲星磁场也异常强,有的脉冲星磁场可高达几百亿T。目前,地面实验室所能获得的最强磁场记录是美国洛斯阿拉莫斯国家实验室创造的100 T,仅为脉冲星磁场强度的亿分之一。由此可见,作为宇宙中一类非常奇妙的天体,脉冲星是验证强引力场、强磁场、高密度等极端物理环境下物理规律的“天然实验室”。

脉冲星的周期性脉冲在星际空间传播过程中与星际介质相互作用表现出色散现象。同时,脉冲星的星际闪烁、法拉第旋转等现象亦非常明显。这些观测现象是探测空间电子分布、磁场分布等星际及星系际介质分布的探针^[2-3]。脉冲星也是探测宇宙空间中引力波的重要工具^[4]。

自1967年第一颗脉冲星被发现以来^[5],脉冲星研究一直

是科学研究的前沿和热点,而且长盛不衰,被列为20世纪60年代四大天文发现之一。到目前为止,脉冲星的相关研究已两获诺贝尔物理学奖:一次是脉冲星的发现(1974年获奖),另一次是发现脉冲星双星系统并通过对其脉冲到达时间监测验证爱因斯坦引力辐射预言(1993年获奖)^[6]。尽管对脉冲星进行了将近半个世纪的研究,也取得了不少进展和成果,例如通过脉冲星到达时间观测试验了广义相对论预言的引力辐射的存在,发现了第一个太阳系外行星等。但是,对脉冲星物理的认识还处在刚起步阶段,还是一个完全开放的领域,还有各种问题有待进一步解决,如脉冲星的形成过程、物理本质、辐射机制等。

1 FAST——脉冲星观测研究利器

由于绝大多数脉冲星只在射电波段具有辐射,射电观测无疑是脉冲星研究的重要手段。脉冲星信号极其微弱,对目前已测得流量的1761颗脉冲星的统计发现其1.4 GHz流量分布在0.01~1100 mJy(注:1 mJy= $10^{-29} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$),中位数仅为0.40 mJy。只有利用大口径望远镜才能成功探测到如此微弱的信号。目前,世界上大多数射电望远镜都把脉冲星观测研究作为一项重要课题,例如美国阿雷西博305 m、美国绿岸100 m、德国埃费尔斯贝格100 m、英国洛弗尔76 m以及澳大利

收稿日期:2017-11-22;修回日期:2017-11-27

基金项目:国家自然科学基金项目(11403073,U1631122,11633007);中国科学院B类战略性先导科技专项(XDB23010200)

作者简介:闫振,副研究员,研究方向为射电天文,电子信箱:yanzhen@shao.ac.cn

利亚帕克斯 64 m 等大口径望远镜。除了阿雷西博外,其他望远镜均采用全天可动的轮轨式结构。考虑到望远镜重量、钢材应力等因素,采用该结构的望远镜理论口径极限约在 150 m。

中国 FAST 射电望远镜定位为工作在低频的一台超大型射电望远镜,其工作频率覆盖范围为 70 MHz~3 GHz。为突破射电望远镜的百米口径工程极限同时大幅度降低工程造价,无论在设计理念还是工程概念上,FAST 都进行了大胆创新。它利用贵州天然喀斯特洼坑作为台址,由 4450 块可调节反射面板构成 500 m 口径球冠主动反射面,其指向跟踪及定位则采用轻型索拖动机构和并联机器人实现(图 1^{[7])}。与美国阿雷西博 305 m 望远镜相比,FAST 将多覆盖 2~3 倍的天区,灵敏度也提高 2.25 倍左右^[8-9]。综合考虑 FAST 望远镜的工作频段、观测灵敏度及脉冲星辐射特性,可以得出 FAST 将成为脉冲星观测研究利器这一毫无争议的结论。



图 1 利用喀斯特地貌在群山之中建成的 FAST 射电望远镜
Fig. 1 The photo of the FAST built in the Karst depression

FAST 观测研究脉冲星的威力在发现新脉冲星这一事件中得到了展示。图 2 是 FAST 首批发现的两颗脉冲星 J1859-0131(编号 FP1)和 J1931-01(编号 FP2)的归一化平均脉冲轮廓和单脉冲^[1]。图 2(a)为 FP1 平均脉冲轮廓,红色和黑色实线分别表示 FAST 在 520 MHz 约 52.4 s 漂移扫描和帕克斯望远镜 L 波段约 2100 s 积分结果。图 2(b)为 FP1 单脉冲轮廓。图 2(c)为 FAST 采用跟踪观测 5 min 获得的另一颗新脉冲星

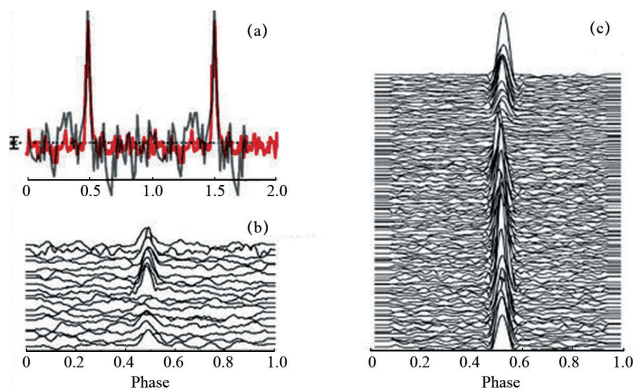


图 2 FAST 新发现 2 颗脉冲星的脉冲信号展示图
Fig. 2 Pulse signals of the two pulsars discovered by FAST

FP2 的单脉冲轮廓。这两颗脉冲星的周期分别为 1.83 s 和 0.59 s,分别距离地球 1.6 万光年和 4100 光年^[1]。对比图 2(a)积分轮廓,尽管 FAST 的积分时间仅为帕克斯的 1/40,但其观测信噪比却高出 3 倍左右。考虑到脉冲星平均谱指数约为 -1.4,尽管观测波段不同,FAST 观测威力仍可见一斑。FAST 可清晰地探测到脉冲星 FP1 的每个脉冲轮廓,但是通过图 2(a)积分轮廓信噪比推断帕克斯在 L 波段显然无法探测到该脉冲星每个脉冲细节信息。

2 FAST 脉冲星观测研究展望

1) 脉冲星搜寻

脉冲星搜寻即搜索发现新的脉冲星,这是其他一切脉冲星研究的基础。根据预测银河系内潜在脉冲星数目约为 150000 颗。考虑到脉冲星辐射扫过地球的概率,可被探测的潜在脉冲星数目为 (30000 ± 1100) 颗^[10]。但是,目前仅有 2700 颗左右的脉冲星被发现,还不到总数的 10%。澳大利亚帕克斯射电望远镜在脉冲星搜寻领域取得巨大成功,原因是该望远镜在技术方面取得一系列突破,特别是配备了 13 波束 L 波段接收机后,在 1997—2008 年发现了 983 颗脉冲星,占当时已知脉冲星总数的一半以上^[11]。随着后续工作的开展,帕克斯望远镜发现脉冲星数量占已知脉冲星总数一半的记录依旧保持。

FAST 将配备 19 波束多波束接收机系统,比帕克斯望远镜多波束系统还多 6 个波束。和使用单波束接收机的 FAST 观测相比,其巡天效率将提高 19 倍。FAST 既支持漂移扫描观测模式,又支持定点跟踪观测模式。漂移扫描观测模式利用地球自转对感兴趣天区进行系统性快速扫描,可以保证在有限的时间内对尽可能大的天区搜索发现脉冲星和快速射电暴等。由于 FAST 具有非常高的灵敏度,尽管该观测模式积分时间非常短,但仍旧能够保持较高的脉冲星探测率。先期的 FAST 脉冲星巡天将采用漂移扫描模式。此外,FAST 将有目的地针对特定区域采用定点跟踪这一深度“曝光”模式,进行更高灵敏度的脉冲星搜寻。根据 FAST 的灵敏度及脉冲星样本进行蒙特卡洛模拟,预计 FAST 可发现的 4000 颗脉冲星,接近目前已知脉冲星总数的 2 倍^[12-13]。尽管是模拟结果,但可以肯定 FAST 巡天将大幅提高已知脉冲星数目。

2) 基本物理问题研究

FAST 脉冲星巡天应该不仅增加已知脉冲星的数目,而且还有望发现一系列具有独特性质的脉冲星,例如脉冲星-黑洞双星系统、亚毫秒周期脉冲星、大质量双星系统等。通过对脉冲星-黑洞系统到达时间的监测,将可以精确测量黑洞质量及其自转。这对黑洞无毛理论的验证具有重要意义^[14]。目前对于脉冲星本质上是中子星还是夸克星存在理论上的争议,亚毫秒周期脉冲星以及大质量双星系统的发现将帮助澄清该争议^[15]。除此之外,大样本脉冲星的观测对脉冲星辐射机制、内部结构、星系以及宇宙学研究等都具有重要意义。

3) 引力波探测

100年前,爱因斯坦发表了著名的广义相对论并预言了引力波的存在。当引力波传播时,时空将在垂直于传播方向挤压和拉伸。但这种变化极其微小,很难探测到。经过多年努力,美国的激光干涉仪引力波天文台(LIGO)在2015年9月14日首次成功直接探测到引力波(编号GW150914)。数据分析表明,该引力波源是距离地球十几亿光年之外的两个质量分别为29倍和36倍太阳质量的恒星量级黑洞合并事件。该项研究工作成功打开了人类认识宇宙的新窗口,使得天文学研究进入多信使时代。2017年,该研究工作被授予了诺贝尔物理学奖。

以LIGO为代表的地基激光干涉仪探测器对于高频(约为十至几千Hz)引力波比较敏感,这些高频引力波主要源自恒星量级的致密天体合并。星系量级的黑洞合并事件主要产生甚低频(1~100 nHz)引力波,由空间中多颗毫秒脉冲星组成的脉冲星计时阵是探测该类引力波的有效工具。毫秒脉冲星自转特性非常稳定,其脉冲抵达地球的时刻可以精确测量。引力波引起的时空涟漪会引起脉冲星到达时间的扰动。由广泛分布于天空中多颗毫秒脉冲星组成的计时阵,可有效剔除各种干扰信号,有望成功测量上述时空涟漪。世界上有多个引力波探测阵,主要基于帕克斯、阿雷西博、绿岸、埃费尔斯贝格等大型射电望远镜。这些阵列既相互竞争又相互合作。目前尚未能利用上述脉冲星计时阵成功探测到引力波事例主要受限于如下两个因素,一是脉冲星观测灵敏度仍不够高,二是高速自转特性稳定的脉冲星数目仍非常有限。FAST的参与则有望突破上述限制,不仅可大幅提高观测灵敏度,而且可以发现更多自转更加稳定的脉冲星^[6]。

4) 星际以及星系际介质探测

脉冲星的脉冲信号在穿越星际(或者星系际)介质的过程中,会受到星际(或者星系际)介质的影响,产生色散、散射、闪烁、法拉第旋转等现象。通过对这些现象的分析,可以反演星际(或星系际)介质的分布情况。目前已知的脉冲星都在银河系及其卫星星系大、小麦哲伦云内,利用有关观测数据建立的银河系电子密度模型还比较粗糙^[17-18]。相对而言,我们对星系际介质更是知之甚少。FAST脉冲星巡天有望大幅提高脉冲星数目,甚至在近邻星系发现脉冲星以及快速射电暴等系外脉冲星类天体。对上述天体的观测研究,将有助于深入了解星际以及星系际介质,进一步建立并完善有关模型。

5) 脉冲星时间尺度及导航

利用FAST对脉冲星观测研究不仅具有重要的科学意义,还将有非常重要的应用价值。目前地面实验室最精确的时钟为原子钟。协调世界时就是联合使用分布在全世界的200多台原子钟而产生的。但是,原子钟的长期稳定性不太理想。长期观测研究表明,毫秒脉冲星到达时间可保持长期稳定,以PSR J1603-7202为例,它的周期在100万年才增加

0.0000005 s。将来,有望利用多颗周期稳定毫秒脉冲星建立“脉冲星时”,与实验室的原子时互为补充、相得益彰^[19-20]。

毫秒脉冲星还是将来深空自主导航的“灯塔”。对于发送到太阳系外的飞行器,目前所用的导航方式都将失效,因为在飞行器看来,整个地球近乎一个“点”。而脉冲星信号为周期严格的脉冲,其特性和全球定位系统(GPS)卫星的信标信号类似。深空探测飞行器同时观测3颗以上毫秒脉冲星,就可以获得飞行器自身的空间位置信息,实现自主导航^[21]。

FAST脉冲星观测将显著丰富周期稳定毫秒脉冲星的样本,还可以提高毫秒脉冲星观测信噪比并提供更加精确的星表,使人们能更好地了解脉冲星到达时间特性。这是将来建立脉冲星时和飞行器定位精度的基础。

3 结论

FAST在完成有关科学目标的过程中,肯定不是孤军奋战。在FAST科学新闻发布会中提到的2颗脉冲星,目前只知道其周期和大致距离,后续还有一系列问题需要回答,如,脉冲星年龄多大,运动速度是多少等。对于FAST望远镜新发现的脉冲星,通常需要花费大量时间进行后续长期监测,一方面是为了对其进一步认证,另一方面是为进一步揭示其物理性质,这些有关任务可以由其他射电望远镜协同完成。中国已先后建成了上海佘山25 m、新疆南山25 m、北京密云50 m、云南昆明40 m以及上海天马65 m等全天可动射电望远镜。这些望远镜可以组成甚长基线干涉测量(VLBI)网开展高精度脉冲星天体测量学研究^[22],还可以部分完成FAST新发现脉冲星的后续监测任务。上海天马望远镜也已成功探测到FAST新发现的一颗脉冲星。而且上述望远镜可以在相对高频对FAST新发现的部分脉冲星进行观测,以和在较低频率工作的FAST相互补充,此外也可与中国的空间硬X射线调制望远镜(HXMT)开展协同观测^[23],这对了解脉冲星辐射物理大有裨益。

总之,随着国家经济实力的不断增强以及在科技领域投入的持续增加,FAST等一批望远镜的建设和投入观测运行,一定能提升国内脉冲星研究水平,为最终实现从跟随到引领国际前沿的转变做出应有的贡献。

参考文献(References)

- [1] 国家天文台举办FAST首批成果新闻发布会[EB/OL]. (2017-10-10) [2017-10-10]. http://www.bao.ac.cn/xwzx/zyxw/201710/t20171010_4871382.html.
- [2] Rickett B J. Radio propagation through the turbulent interstellar plasma [J]. *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 1990, 28(1): 561-605.
- [3] Han J L, Manchester R N, Lyne A G, et al. Pulsar rotation measures and the large-scale structure of Galactic magnetic field[J]. *Astrophysical Journal*, 2006, 642(2): 533-541.
- [4] Manchester R N. Millisecond pulsars, their evolution and applications [J]. *Journal of Astrophysics & Astronomy*, 2017, 38(3): 42.

- [5] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source[J]. *Nature*, 1968, 217(5130): 709-713.
- [6] 吴鑫基, 温学诗. 宇宙佳音: 天体物理学[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2001.
- [7] “中国天眼”在贵州落成启用[EB/OL]. (2017-09-26) [2017-09-26]. <http://www.xinhuanet.com/jrgz/20160926a/index.htm>.
- [8] Nan Rendong, Li Di, Jin Chengjin, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (fast) project[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20(6): 989-1024.
- [9] Li D. Summary of the FAST project[C]// *Frontiers in Radio Astronomy and FAST Early Sciences Symposium*. Guizhou: *Frontiers in Radio Astronomy & Fast Early Sciences Symposium*, 2015.
- [10] Lorimer D R. The galactic population and birth rate of radio pulsars [C]// *Symposium International Astronomical Union*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 105.
- [11] Lyne A G, Parkes 20 cm Multibeam Pulsar Surveys[J]. *American Institute of Physics*, 2008, 983: 561-566.
- [12] Smits R, Lorimer D R, Kramer M, et al. Pulsar science with the five hundred metre aperture spherical telescope[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 505(2): 919-926.
- [13] Yue Y, Di L, Nan R. FAST low frequency pulsar survey[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2012, 8(S291): 577-579.
- [14] Liu K, Eatough R P, Wex N, et al. Pulsar-pepcts for new gravity tests with future radio telescopes[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 445(3): 3115-3132.
- [15] 徐仁新, 岳友岭. 脉冲星与夸克星[J]. *科技导报*, 2006, 24(9): 5-8.
- [16] 李柯伽, 袁建平, 王晶波, 等. 中国大型射电望远镜在引力波探测方面的潜在突破[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2017(5): 059507-1- 059507-6.
- [17] Cordes J M. NE2001: A new model for the galactic electron density and its fluctuations[J]. *Milky Way Surveys the Structure & Evolution of Our Galaxy*, 2004, 317: 211.
- [18] Yao J M, Manchester R N, Wang N. A new electron density model for estimation of pulsar and FRB distances[J]. *Astrophysical Journal*, 2016, doi: 10.3847/1538-4357/835/1/29.
- [19] 陈鼎, 朱幸芝, 王娜. 基于实测数据的综合脉冲星时研究[J]. *天文学报*, 2011, 52(5): 392-400.
- [20] 尹东山, 高玉平, 赵书红. 综合脉冲星时间尺度[J]. *天文学报*, 2016, 57(3): 326-335.
- [21] 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 等. X射线脉冲星导航原理[J]. *宇航学报*, 2007, 28(6): 104-109.
- [22] 闫振, 沈志强, 袁建平. 脉冲星 VLBI 观测软件相关处理进展[J]. *天文学进展*, 2011, 29(3): 309-322.
- [23] 卢方军, 张双南. 硬X射线调制望远镜——中国第一颗X射线天文卫星[J]. *物理*, 2017, 46(6): 341-347.

FAST: A sharp tool to do pulsar studies

YAN Zhen^{1,2}, SHEN Zhiqiang^{1,2}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China
2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

Abstract The Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST), which is independently designed and built in China, is the largest single-dish telescope on the earth. The construction was completed on September 25th, 2016. A few new pulsars were discovered by the FAST during its commissioning phase, as the first pulsar discovery with the telescope in China. The pulsar is a fantastic object, which serves as the natural lab on the sky for studies of the extreme physical conditions, including the strong gravitational field, the strong magnetic field and the high density. The FAST is a very useful tool for pulsar studies, and can make breakthroughs in the following areas: boosting the pulsar number, detecting gravitational wave, studying the interstellar and intergalactic medium, building the pulsar timescale and the deep space navigation system, and others. In the field of pulsar research, all kinds of telescopes may play a role, and it can be anticipated that with the addition of the FAST, the domestic pulsar research will have a leap forward.

Keywords radio telescope; pulsar; gravitational wave; interstellar medium; intergalactic medium

(责任编辑 傅雪)