

# 脉冲星发现 55 年：中国天眼展望

张承民<sup>1,2,3</sup>, 崔翔翰<sup>1,2,3</sup>, 王德华<sup>4</sup>, 杨佚沿<sup>5</sup>, 张见微<sup>1,2,3</sup>, 余竞<sup>4</sup>, 孙益洪<sup>4</sup>,  
王双强<sup>6</sup>, 吴庆东<sup>6</sup>, 潘元月<sup>7</sup>, 周世奇<sup>8</sup>, 叶长青<sup>8</sup>

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101
2. 中国科学院大学物理科学学院, 北京 100049
3. 中国科学院 FAST 重点实验室, 北京 100101
4. 贵州师范大学物理与电子科学学院, 贵阳 550025
5. 贵州师范学院物理与电子科学学院, 贵阳 550018
6. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011
7. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湘潭 411105
8. 中山大学物理与天文学院, 珠海 519082

**摘要** 脉冲星的发现是人类认识宇宙的重要里程碑之一。介绍了脉冲星自发现至今 55 年来的研究进展, 包括引力波与广义相对论的验证、毫秒脉冲星、脉冲星周期跃变、脉冲星射电辐射效率、快速射电暴与河外脉冲星等方面。展望了中国天眼 (FAST) 未来发现新的特殊类型脉冲星的潜力, 如黑洞脉冲星系统/亚毫秒脉冲星/新型双脉冲星系统, 依此实施更高精度验证引力波实验; 利用 FAST 的高灵敏度、高精度研究脉冲星辐射的精细结构, 深入了解其物理机制。

**关键词** 脉冲星; 中子星; 引力波; 中国天眼

1967 年, 乔瑟琳·贝尔 (Jocelyn Bell) 首次发现脉冲星 (转动中子星)。55 年来, 天文学家探测脉冲星的数目接近 4000 颗, 其中世界最大单口径射电望远镜——中国天眼 (FAST) 发现 500 多颗。脉冲星已经成为现代物理学的天然实验室, 其观测研究具有涵盖多波段和多信使 (电磁波、引力波、中微子、宇宙线) 的全方位特性。目前发现的脉冲星有 10 余种, 星体的磁场、自转、质量、辐射机制等表现出多样特征, 其起源与演化依然是个谜团。

## 1 脉冲星的发现

1967 年夏天, 英国剑桥大学的射电望远镜意外地接收到一系列奇特的电波, 那是有规则的无线电流变化, 即间隔 1.33 s 的脉冲周期信号<sup>[1]</sup>。当时一位正在监测仪器的博士研究生乔瑟琳·贝尔首先注意到这一奇特现象, 感到非常困惑。她排除了各种“干扰”, 认定这个宇宙的“心电图”来自致密天体, 即后来的脉冲星。脉冲星是富含中子的星体,

收稿日期: 2022-01-02; 修回日期: 2022-07-01

基金项目: 国家自然科学基金天文联合基金项目 (U1938117); 贵州师范学院博士课题 (2020BS021)

作者简介: 张承民, 研究员, 研究方向为脉冲星与中子星天体物理, 电子信箱: zhangcm@bao.ac.cn

引用格式: 张承民, 崔翔翰, 王德华, 等. 脉冲星发现 55 年: 中国天眼展望 [J]. 科技导报, 2022, 40(24): 72-77; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.24.008

其超高密度相当于太阳压缩到一个城市大小。脉冲星的电磁波辐射来自其磁场极冠区,如同宇宙的灯塔随着星体转动扫过地球,使人类探测到“脉冲信号”。脉冲星成为人类认识宇宙的重要里程碑发现之一。

这个发现使贝尔的导师安东尼·休伊什(Antony Hewish)获得1974年度的诺贝尔物理学奖。2018年,科学突破奖(Breakthrough Prizes)评选委员会将基础物理学特别奖授予乔瑟琳·贝尔,表彰她发现脉冲星的重要贡献,以及在引导科学界方面所发挥的作用。为推动中英天文学的合作,贝尔多次来华访问,于2012年在北京出席国际天文学联合会大会开幕式,作为参会嘉宾之一受到时任国家副主席习近平的接见(图1<sup>[2]</sup>)。贝尔还积极支持FAST的建设方案,并在国际场合协助全球天文学家参加FAST的合作。

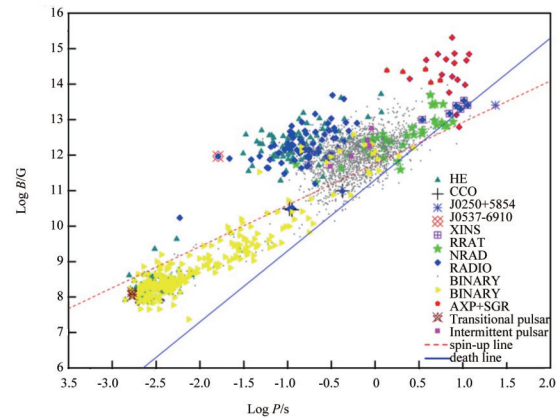


图1 乔瑟琳·贝尔(前排左二)2012年在北京出席国际天文学联合会大会开幕式

## 2 多信使时代脉冲星的研究

55年来天文学家探测到脉冲星近4000颗,其中射电脉冲星3500颗(包括FAST探测到的500多颗)<sup>[3-4]</sup>。脉冲星的类型丰富多彩,约有10类以上,包括常规单星、双星、吸积双星、遗迹脉冲星、高能、磁星、转动中心致密星体、间歇、暂现脉冲星、高能脉冲星、转换毫秒脉冲星等(图2)。

脉冲星基本参数的测量更加精细,包括自转周期、磁场、质量、轨道等,由于半径测量的精度有限,中子星内部的核物质状态细节一直未决。已知中



HE—高能,CCO—中心致密星体,XINS—X-射线独立中子星,RRAT—射电转动暂源,NRAD—红外或高能脉冲星,RADIO—射电源,BINARY—双星系统,AXP+SGR—磁星,Transitional MSP—转换毫秒脉冲星,Intermittent PSR—间歇脉冲星,Spin-up Line—加速线,Death Line—死亡线

图2 脉冲星磁场—周期

子星磁场强度介于亿高斯到千万亿高斯,射电脉冲星周期介于1.强度39 ms和23.5 s,质量约为1.4太阳质量。脉冲星自转演化主要源于其磁场偶极辐射制动,然而观测发现这一构想只是总体上成立,具体过程仍有待深入探讨。

脉冲星探测器从地面到太空,从射电波段到多能段,所涉及的研究学科囊括多信使物理(电磁、引力波、中微子和高能宇宙线),同时脉冲星成为验证爱因斯坦广义相对论和其他引力理论的利器<sup>[5]</sup>。脉冲星多数在射电波段被探测到,但在其他波段也发现了几百颗,诸如双星X射线中子星和伽玛射线脉冲星。

美国引力波干涉仪LIGO也发现了双中子星合并以及疑似中子星黑洞合并的事例<sup>[6]</sup>。地面的望远镜主要是射电和光学波段,而高能探测主要在空间卫星上进行。在FAST建成以前,阿雷西博305 m口径射电望远镜曾经是世界上最大最灵敏(于2020年12月1日倒塌)的,FAST现在担当新型脉冲星发现的任务<sup>[7-11]</sup>。脉冲星研究取得的如下特别成就,也是未来FAST需要继续跟踪的课题。

### 2.1 引力波与广义相对论验证

1974年,拉塞尔·赫尔斯(Russell A. Hulse)和约瑟夫·泰勒(Joseph H. Taylor)发现了第一对脉冲

星双星(2个中子星)PSR B1913+16<sup>[12]</sup>,首次观测到引力波的间接证据,即引力辐射导致轨道收缩,这与广义相对论预言吻合,这一研究荣获1993年诺贝尔物理学奖。目前总共探测到的脉冲双星系统为286颗,双中子星的数量是19对,双中子星在脉冲双星系统中的占比约为6%。在双中子星系统中,一般把首先形成的中子星称为主星;较晚形成的,没有经历吸积加速的中子星称为伴星。双中子星系统通常起源于2个大质量恒星,其中较大质量的恒星首先经历第一次超新星爆发,产生一个中子星并伴随一个大质量的伴星;在第二次超新星爆发之前,会发生物质转移过程,即第一个形成的中子星会吸积其大质量伴星的物质,在这个阶段探测到的系统称为大质量X射线双星。由于不稳定的质量转移过程,第二个大质量伴星再次经历超新星爆炸,最终形成了2个中子星组成的系统<sup>[13]</sup>。双中子星探测率小的主要原因是其独特的形成机制。在其形成过程中,需要经历2次超新星爆发。当踢速度(发生超新星爆炸后新形成中子星获得的速度)较大时,双星系统就会瓦解。影响踢速度的主要有双星之间的潮汐力,演化过程中不同阶段的质量转移等因素。较大的踢速度是打断双中子星形成的最为重要的原因之一。其次,满足质量范围为8~25太阳质量的大质量恒星的量少,双星配比更小,这也限制了双中子星的数量。

## 2.2 毫秒脉冲星

1982年阿雷西博望远镜发现第一个毫秒脉冲星<sup>[14]</sup>,这是一颗被伴星吸积物质加速到毫秒周期的脉冲星——PSR B1937+21,自转周期为1.56 ms,其磁场比常规脉冲星(蟹状星云脉冲星)低了4个数量级。起初,这一发现使得脉冲星理论陷入危机。然而,毫秒脉冲星的发现使人们对脉冲星在双星系统的吸积理论方面有了新认识,这些年老的脉冲星可以通过吸积获取伴星物质从而加速到毫秒量级旋转,其间磁场降低4个量级,而质量增加0.1~0.2太阳质量<sup>[15]</sup>。目前已发现400多颗这样的脉冲星。在脉冲星天文学中,磁场演化一直是一个备受关注的话题,因为它与脉冲星的辐射机制和演化过程密切相关<sup>[16-17]</sup>。对于处在双星系统中吸积的脉冲星

而言,其表面磁场会因其从伴星吸积物质而衰减<sup>[15]</sup>。例如,位于高质量X射线双星中的中子星大约从伴星吸积了1/1000太阳质量,其磁场衰减较小,保持在 $10^8\sim 10^9$  T;但是,对于处在低质量X射线双星中的中子星,吸积质量大约为0.1~0.5太阳质量,其磁场会衰减到 $10^4\sim 10^5$  T,同时其自转周期可被加速到毫秒量级,形成毫秒脉冲星。X射线双星中的回旋共振散射吸收特征是直接测量中子星磁场的工具,表现为X射线能谱中多阶吸收特征。对比研究转动供能的射电脉冲星与吸积供能的X射线脉冲星测量的磁场后认为,年轻的射电脉冲星磁偶极辐射测量的磁场和回旋吸收线测量的磁场趋于一致,而对于年老的射电脉冲星,磁偶极测量的磁场可能有较大误差。对于孤立的正常脉冲星,其磁场在演化过程中是否存在明显衰减还存在争议。其中一部分研究认为其磁场会在百万年内存在明显衰减。而另一部分研究的结论则恰好相反,认为磁场衰减的时标可能高达1亿年,这意味着磁场在其寿命周期内不存在明显衰减。需要指出的是,上述关于脉冲星磁场演化的研究都是基于磁偶极模型得到的特征磁场,其不一定等于真实磁场,二者可能只是在数量级上相等。因此,笔者认为对脉冲星表面磁场的直接测量(目前只有利用回旋吸收线的性质这一种方法)对将来解决上述争论具有关键性的作用。

## 2.3 脉冲星周期跃变(Glitch)现象与机制

1969年,理查德·曼彻斯特(Richard N. Manchester)首次在船夫座 Vela 脉冲星(PSR J0835-4510)中发现了自转突然加快的周期跃变(Glitch)现象<sup>[18]</sup>。通常,典型的一次跃变,跃变后还伴有几周到几年不等的指数衰减过程,约208颗脉冲星中探测到660次周期跃变事件,周期跃变现象产生于脉冲星内部结构的改变,理论解释主要有3种<sup>[19]</sup>。第一种是中子星震模型:脉冲星的自转突快是中子星星壳的弹性应力的突然释放而引起的。在中子星旋转速度减慢过程中,这种弹性应力逐渐积累在原子核晶格所组成的固态星壳内。应力突然释放导致椭率变化,并使星体转动惯量突然减小。为保持星体角动量守恒,中子星转速突然增加。现在

这种模型无法解释大幅度周期跃变的观测特征。第二种是超流模型:中子星壳层和中子星核内中子超流层的旋转速度不同。超流层比外部壳层转动得更快,超流涡丝的突然拖拽和放开把内部的角动量转移到壳层,产生自转突然加快。但几十年来该模型在定量计算上几乎没有进展。第三种是中子星和外界交换能量、角动量模型,如中子星星风制动导致反周期跃变或者吸积造成磁星发生周期跃变时伴随X-射线发射等。

#### 2.4 脉冲星射电辐射效率

脉冲星的射电光度( $L$ ),占脉冲星能损率( $\dot{E}$ )的比例被称为射电脉冲星的辐射效率( $\xi$ ),故射电辐射效率可以定义为 $\xi \equiv L/\dot{E}$ 。脉冲星的射电光度有很大的差异( $10^{18}\sim 10^{25}$  J/s),分布在一个广阔的范围,其射电光度符合对数高斯分布,峰值 $L\approx 10^{22}$  J/s给出射电效率与能损率存在极强的负相关关系( $\xi \propto \dot{E}^{-0.94}$ )<sup>[20]</sup>。在此之前, Malov 和 Szary 等曾认为射电效率与能损率的关系表现了脉冲星辐射的物理本质<sup>[21-23]</sup>,上限 $\xi = 0.01$ 。研究者提出了“观测限制线”代替目前的死亡线思想<sup>[20]</sup>,这是因为脉冲星死亡线下面出现了 50 多颗脉冲星,这说明脉冲星在此没有真的“射电死亡”。观测限制线是在 $\xi = 0.01$ 的基础上,得到在单位距离(1 kpc)和实测在 1400 MHz 为中心带宽可测量到的最小流量密度的条件下,所能观测到的最小能损率。当可测量的流量密度 $\geq 1$  mJy ( $1 \text{ mJy} = 10^{-29} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{Hz})$ )时,观测限制线为 $\dot{E} \approx 10^{23}$  J/s;而当能测量的流量密度 $\geq 0.01$  mJy 时,观测限制线为 $\dot{E} \approx 10^{21}$  J/s。因此,正好可以解释为什么早先观测到的脉冲星大量在经典死亡线( $\dot{E} \approx 1.5 \times 10^{23}$  J/s)截止,最近观测的脉冲星又出现超出经典死亡线的现象。

#### 2.5 快速射电暴与河外脉冲星

快速射电暴是一类持续时间毫秒级、非常明亮的、多数起源于银河系之外的射电爆发。该现象由 Lorimer 研究团队于 2007 年开始进行系统地研究<sup>[23]</sup>。随着观测数据的增多,以及 FRB 重复暴的发现<sup>[24]</sup>,对此现象的理论解释也日渐丰富,特别是 FRB 的起源和辐射机制问题,但是至今仍无定论<sup>[25]</sup>。2020 年 4 月,天文学家观测到了来自一颗银

河系内磁星(SGR 1935+2154)的射电爆发<sup>[26]</sup>,并且在此爆发之前 8.62 s 曾观测到高能爆发现象<sup>[27]</sup>。本次事件成为解释 FRB 起源的关键,因为这不仅是对 FRB 的首次多频段联合观测,更是第一次在河内观测到此现象,这有力地支持了 FRB 的磁星起源理论。FRB 磁星或脉冲星起源模型认为多数的河外 FRB 产生自河外磁星或脉冲星的爆发现象,并可能由强磁场或高速自转的星体来供能。然而 FRB 的磁星或脉冲星起源模型也存在至少 3 个方面的问题。例如,FRB 现象并没有观测到准确和稳定的周期或准周期特征,FRB 诞生率与磁星和脉冲星不相符,河外 FRB 的射电光度明显高于河内 FRB。而且在对 SGR 1935+2154 这颗源的后续观测中,并未再次接收到类似的 FRB 信号<sup>[28]</sup>。因此有研究推测,尽管磁星可以产生 FRB,但其所需的周边环境或许较为特殊且复杂多变<sup>[29]</sup>。还有研究者认为,FRB 可能是多天体起源的,并且是由多种机制共同作用的结果<sup>[30-31]</sup>。由此可见,FRB 的起源和机制以及 FRB 同磁星与河外脉冲星的关系仍值得进一步研究。

### 3 中国天眼未来脉冲星探测目标

中国天眼的口径是 500 m,其大面积反射面提升了观测能力,因此发现暗弱和长周期射电脉冲星是其独特能力(如已经观测到最长周期 23.5 s),对以下探测目标具有天然优势。

1) 在球状星团里寻找亚毫秒脉冲星和脉冲星+黑洞系统。这是天文学家翘首盼望已久之事,前者稳定的高速转动可能与夸克物质有关,而后的发现将精确验证引力波和黑洞理论,其重要意义不言而喻。

2) FAST 可以尝试搜寻具有行星系统的脉冲星。这不仅是一种特别重要的脉冲星类型,还可能提供奇异夸克星存在的重要线索<sup>[32-33]</sup>。FAST 高精度测量不仅可以了解脉冲星辐射的精细特征(图 3),还可确定其运动方向,探测爱因斯坦预言的脉冲星自转进动<sup>[34-35]</sup>,以及特殊的磁星+射电脉冲星/双脉冲星系统,X 射线双星吸积中子星的射电辐

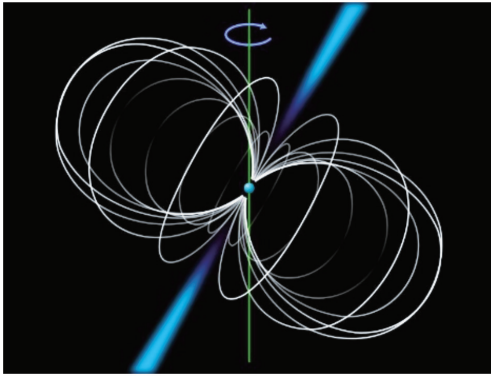


图3 脉冲星辐射示意

射<sup>[36-37]</sup>。

FAST高灵敏度观测将会得到脉冲星的辐射区精细结构,包括蜘蛛毫秒脉冲星掩食过程中辐射变化的细节,从而有助于认识其等离子体环境;其高质量的偏振研究将有助于探究掩食介质的性质。

3) 有望发现新的态转换毫秒脉冲星,促进对毫秒脉冲星吸积再加速理论的理解,从而更加深入了解毫秒脉冲星的起源和演化。进一步探索FRB的中子星自转也是值得期待的创新课题。

### 参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] 习近平会见国际天文学联合会主席罗伯特·威廉姆斯等与会嘉宾[EB/OL]. (2012-08-21)[2022-05-19]. <http://politics.people.com.cn/n/2012/0822/c1024-18805171-3.html>.
- [3] Manchester R N, Hobbs T A, Hobbs M. The Australia telescope national facility pulsar catalogue[J]. *Astronomical Journal*, 2005, 129(4): 1993-2006.
- [4] Pan Z C, Ransom S M, Lorimer D R, et al. The FAST discovery of an eclipsing binary millisecond pulsar in the globular cluster M92 (NGC 6341)[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 892(1): L6-L10.
- [5] Miller M C. Astrophysical constraints on dense matter in neutron stars[M]//*Timing Neutron Stars: Pulsations, Oscillations and Explosions*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2021: 1-51.
- [6] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Search for gravitational waves from a long-lived remnant of the binary neutron star merger GW170817[J]. *The Astrophysical Journal*, 2019, 875(2): 160-179.
- [7] Li D, Pan Z. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope project[J]. *Radio Science*, 2016, 51(7): 1060-1064.
- [8] Jiang P, Yao R. The latest progress of Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope[J]. *Science China Science China(Technological Sciences)*, 2022, 65(4): 987-988.
- [9] 张承民, 崔翔翰, 杨佚沿, 等. 从阿雷西博到中国天眼射电望远镜: 工业革命的接力[J]. *科技导报*, 2021, 39(11): 9-15.
- [10] 南仁东. 500 m球反射面射电望远镜FAST[J]. *中国科学: G辑*, 2005, 35(5): 3-20.
- [11] Peng B, Nan R D, Su Y, et al. Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope project[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2001, 278(1): 219-224.
- [12] Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system[J]. *Astrophysical Journal*, 1975, 195(15): L51-L53.
- [13] Lorimer D R, Kramer M. *Handbook of pulsar astronomy* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [14] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. A millisecond pulsar[J]. *Nature*, 1982, 300(5893): 615-618.
- [15] Zhang C M, Kojima Y. The bottom magnetic field and magnetosphere evolution of neutron star in low-mass X-ray binary[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2006, 366(1): 137-143.
- [16] Faucher-Giguere C A, Kaspi V M. Birth and evolution of isolated radio pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 643(1): 332-355.
- [17] Igoshev A P, Popov S B, Hollerbach R. Evolution of neutron star magnetic fields[J]. *Universe*, 2021, 7(9): 351.
- [18] Radhakrishnan V, Manchester R N. Detection of a change of state in the pulsar PSR 0833-45[J]. *Nature*, 1969, 222(5190): 228-229.
- [19] Haskell B, Melatos A. Models of pulsar glitches[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2015, 24(3): 1530008.
- [20] Wu Q D, Zhi Q J, Zhang C M, et al. Luminosity of a radio pulsar and its new emission death line[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(11): 159-166.
- [21] Malov I, Malov O. Integrated radio luminosities of pulsars[J]. *Astronomy Reports*, 2006, 50(6): 483-495.
- [22] Szary A, Zhang B, Melikidze G I, et al. Radio efficiency of pulsars[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 784(1): 59-68.
- [23] Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin[J]. *Science*, 2007, 318(5851): 777-780.
- [24] Spitler L, Scholz P, Hessels J, et al. A repeating fast ra-

- dio burst[J]. *Nature*, 2016, 531(7593): 202–205.
- [25] Xiao D, Wang F Y, Dai Z G. The physics of fast radio bursts[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2021, 64(4): 39–70.
- [26] Bochenek C D, Ravi V, Belov K V, et al. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar[J]. *Nature*, 2020, 587(7832): 59–62.
- [27] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(4): 378–384.
- [28] Lin L, Zhang C F, Wang P, et al. No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar[J]. *Nature*, 2020, 587(7832): 63–65.
- [29] Feng Y, Li D, Yang Y P, et al. Frequency-dependent polarization of repeating fast radio bursts—implications for their origin[J]. *Science*, 2022, 375(6586): 1266–1270.
- [30] Li D, Wang P, Zhu W W, et al. A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source[J]. *Nature*, 2021, 598(7880): 267–271.
- [31] Cui X H, Zhang C M, Wang S Q, et al. Fast radio bursts: Do repeaters and non-repeaters originate in statistically similar ensembles[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021, 500(3): 3275–3280.
- [32] Huang Y F, Yu Y B. Searching for strange quark matter objects in exoplanets[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 848(2), 115.
- [33] Kuerban A, Geng J J, Huang Y F, et al. Close-in exoplanets as candidates for strange quark matter objects[J]. *The Astrophysical Journal*, 2020, 890(1): 41–52.
- [34] Stairs I H, Thorsett S E, Arzoumanian Z. Measurement of gravitational spin-orbit coupling in a binary pulsar system[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93(14): 141101.
- [35] van Leeuwen J, Kasian L, Stairs I H, et al. The binary companion of young, relativistic pulsar J1906+0746[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 798(2): 118.
- [36] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. Catalogue of high-mass X-ray binaries in the Galaxy (4th edition) [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2006, 455(3): 1165–1168.
- [37] Liu Q Z, van Paradijs J, van den Heuvel E P J. A catalogue of low-mass X-ray binaries in the Galaxy, LMC, and SMC (fourth edition)[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 469(2): 807–810.

## 55 years after pulsar discovery: Future of FAST telescope

ZHANG Chengmin<sup>1,2,3</sup>, CUI Xianghan<sup>1,2,3</sup>, WANG Dehua<sup>4</sup>, YANG Yiyan<sup>5</sup>, ZHANG Jianwei<sup>1,2,3</sup>, YU Jing<sup>4</sup>, SUN Yihong<sup>4</sup>, WANG Shuangqiang<sup>6</sup>, WU Qingdong<sup>6</sup>, PAN Yuanyue<sup>7</sup>, ZHOU Shiqi<sup>8</sup>, YE Changqing<sup>8</sup>

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
2. School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. CAS Key Laboratory of FAST, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China
4. School of Physics and Electronic Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China
5. School of Physics and Electronic Science, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China
6. Xinjiang Observatories, CAS, Urumqi 830011, China
7. Key Laboratory of Stars and Interstellar Medium, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China
8. School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China

**Abstract** Pulsars discovery is one of the important milestones in human understanding of the universe. In this paper, we briefly introduce the pulsar research of recent 55 years, including the verification of gravitational waves and general relativity, the findings of millisecond pulsars, pulsar periodic jumps, pulsar radio radiation efficiency, fast radio bursts and extragalactic pulsars. we look forward to the potential of the Chinese FAST telescope for the discovery of new types of special pulsars in the future, including black hole pulsar, sub-millisecond pulsar, and new double pulsar systems, which will lead to more accurate validation of gravitational wave experiments; the fine structure of pulsar radiation is also studied by FAST with high sensitivity and high precision, and the physical mechanism of pulsar radiation will be deeply understood.

**Keywords** pulsar; neutron star; gravitational wave; FAST telescope ●



(责任编辑 王志敏)