

# 脉冲星发现50年

张承民<sup>1,2</sup>, 王双强<sup>2,3</sup>, 尚伦华<sup>1,2</sup>, 杨佚沿<sup>4</sup>

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100020
2. 中国科学院大学, 北京 101400
3. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830001
4. 北京师范大学天文系, 北京 100089

**摘要** 脉冲星自1967年发现以来, 50年的观测和理论研究取得巨大进展, 期间曾2次获颁诺贝尔物理学奖。脉冲星以其高度致密和强引力场堪称宇宙天然实验室, 可用来验证爱因斯坦广义相对论及进行引力波探测, 推动了天文学与物理学研究的发展。本文简介了脉冲星的发现及其性质, 并综述了脉冲星导航以及最近建成的500 m口径球面射电望远镜(FAST)的脉冲星探测研究进展。

**关键词** 脉冲星; 中子星; 引力波

## 1 脉冲星发现与诺贝尔奖

### 1.1 戏剧性的科学发现

1967年夏天, 英国剑桥大学的安东尼·休伊什(Antony Hewish)和他的研究生乔瑟琳·贝尔(Jocelyn Bell)开始使用射电望远镜进行星际闪烁的观测, 这是星际介质或太阳周围的行星际带电粒子导致的无线电信号流量有规则的变化和起伏, 由此探测空间的电磁波与介质的相互作用特性。贝尔夜以继日地工作, 在大量并纷乱的记录纸带上仔细摸索射电闪烁信号的特征, 这是太阳系带电介质干扰星空无线电传播的结果, 其流量呈现出射电波秒量级的准周期变化。此现象可以类比于“天上的星星在眨眼”, 这源于地球大气层扰动引发的光学波段的闪烁。然而, 贝尔偶然察觉到一个奇怪且周期极其规则的“干扰”信号, 每隔1.33 s精准时间的脉冲信号。这令她十分诧异, 难道宇宙的“心电图”存在“人为故意”的钟表准时效应?

得知这一令人难以置信的观测分析, 她的导师休伊什曾猜想这可能是外星人——“小绿人”——发出的摩尔斯电码, 在向地球呼叫。然而, 进一步查找观测数据表明, 这个脉冲信号的频率极其精确。接下来, 贝尔和同事又发现不同天区的另外2个周期各异的脉冲信号源, 这排除了外星人信号, 因为不可能有3个“小绿人”在不同方向、同时向地球发射不同

的脉冲信号。接着, 他们进一步分析发现, 这个脉冲信号的频率精确得令人难以置信, 其变化率约s/s, 亦即几百万年内的时间变化大约1 s, 这是精准的氢原子钟精度。再经过射电望远镜的色散测量, 贝尔得出脉冲星距离地球大约是几万光年, 这意味着脉冲信号源于银河系起源的天体。经过一番努力, 贝尔和休伊什在《Nature》上发表了脉冲星发现的论文, 并认为脉冲星可能就是物理学家预言的超级致密的中子星<sup>[1]</sup>。这是一个意外的重大发现, 消息很快轰动了国际科学界。脉冲星与星际分子、类星体、微波背景辐射并称为19世纪4个重大天文学发现, 为天文学和天体物理研究开辟了新的领域, 而且对现代物理学的验证产生了深远影响(图1)。

### 1.2 “名副其实”的诺贝尔奖?

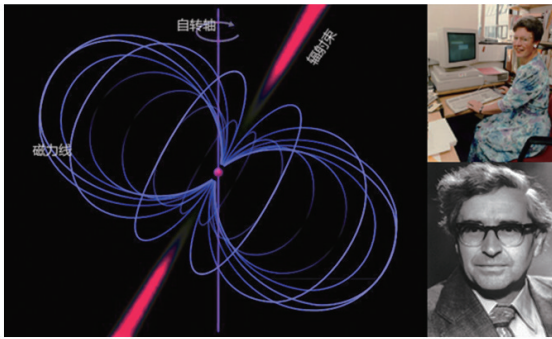
戏剧性的科学发现只是故事的开头, 随之而来的是脉冲星发现者的荣誉归属争议, 举世成就与诺贝尔奖委员会的是非恩怨竟然成为世界舆论焦点话题。1974年的诺贝尔物理学奖桂冠只戴在导师休伊什的头上, 完全忽略了学生贝尔的贡献, 舆论一片哗然。英国著名天文学家霍伊尔爵士(Sir Fred Hoyle)在伦敦《The Times》发表谈话, 他认为, 贝尔应同休伊什共享诺贝尔奖, 并对诺贝尔奖委员会授奖前的调查工作欠周密提出了批评, 甚至认为是诺贝尔奖历史上一桩丑闻、性别歧视案。英国焦德雷班克(Jodrell Bank)射电天文台

收稿日期: 2017-05-05; 修回日期: 2017-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(11173034)

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, 王双强, 尚伦华, 等. 脉冲星发现50年[J]. 科技导报, 2017, 35(18): 52-57; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.18.006



注:脉冲星的偶极磁场偏离转动轴,射电辐射来自极冠区

图1 脉冲星示意及其发现者

Fig.1 Diagram of pulsar

的天文学家史密斯(F. G. Smith)指出,脉冲星是贝尔发现的,但休伊什在这一发现过程中发挥了重要作用。著名天文学家曼彻斯特(R. N. Manchester)和泰勒(J. H. Taylor)所著《脉冲星》一书的扉页上写道:“献给乔瑟琳·贝尔,没有她的聪明和执着,我们不可能获得脉冲星的喜悦”。半个世纪过去了,回首往事,作为导师的休伊什获得了诺贝尔物理学奖,无可厚非,但贝尔失去殊荣,却令人感到惋惜。如果没有贝尔对“干扰”信号一丝不苟的追究,很可能错过脉冲星的发现。近年,贝尔教授访问中国国家天文台期间,我们多次与她谈起脉冲星的发现经历和她对诺贝尔奖的看法。她说,脉冲星发现后不久,自己由于种种原因被迫离开了剑桥大学,而且当时普遍存在导师忽视学生科学贡献的倾向,尤其是女学生;1993年,美国天文学家泰勒和赫尔斯因发现脉冲星双星验证引力波而获诺贝尔奖时,这次诺贝尔奖委员会非常慎重,邀请贝尔参加了颁奖仪式,算是一种补偿吧。离开剑桥大学后,贝尔和休伊什没有再合作,他们两人不约而同地远离了脉冲星这个“是非”研究领域。直到若干年后,他们才在一次国际会议上相见,并握手言和。在2007年纪念脉冲星发现40年的国际会议上,他们一起出席会议,在大会开幕式上,与会者全体起立鼓掌向贝尔致敬。虽然错失诺贝尔物理学奖,她荣获了多项世界级科学奖、诸多奖章和头衔,并被学术界尊称为“脉冲星之母”。她至今依然繁忙,担任各种社会公职,俨然英国的“科学大使”。她曾担任英国皇家物理学会会长、英国皇家天文学会会长,被英国伊丽莎白女王授予“女爵士”头衔,2014年起担任爱丁堡皇家学会会长。贝尔女士多次来华访问,一直关注中国500 m口径射电望远镜的建设,并给予科技指导意见。2012年,她在北京参加国际天文学大会期间,受到时任国家副主席习近平的接见。她为此深感荣幸地说:“一个世界大国的领袖亲自参加科学会议,这不仅是科学家的荣誉,也让世界感受到中国为人类科学事业竭诚奉献的态度和热情。”

## 2 脉冲星的特性

经过50年的观测与研究,目前已经发现约2700颗脉冲

星<sup>[2]</sup>。它是一种极端致密的天体,其质量约1.4个太阳质量,半径在10~20 km,物质密度极高( $\sim 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>),相当于把整个太阳压缩到北京市区的范围;磁场极高约为 $10^{12}$  Gs( $10^8$  T),地球上最大的人造磁场约100万Gs(100 T),射电脉冲星自转周期约在 $1.4 \times 10^{-3}$ ~8.5 s。所以,脉冲星是宇宙中天然的极端物理实验室,其超强引力场为广义相对论和引力波的检验提供了场所。由此可以看出,基于脉冲星理论和观测上的研究对推动天体物理学、粒子物理学、天文学等学科的发展都有着非常重要的意义。

1) 脉冲星的形成。天文学家认为脉冲星产生于大质量恒星(约8~25倍太阳质量)演化到末期经过超新星爆发形成<sup>[3-4]</sup>,因此脉冲星与超新星遗迹有一定的相关性。目前发现400多个超新星遗迹,其中约1/4遗迹附近存在脉冲星。在蟹状星云内发现的脉冲星PSR0531-21,周期约33 ms,它诞生于公元1054年的超新星爆发,当时被中国宋朝天文学家详细记载,这为脉冲星的起源提供了直接的证据,也是人类历史上第一次记录的一颗恒星演化史。脉冲星是转动的中子星,在恒星塌缩的过程中,由于引力塌缩作用它所包含的物质挤压在一起,密度极大,乒乓球大小的中子星物质相当于喜马拉雅山的质量;因角动量守恒,星体塌缩成中子星时会高速旋转,这与花样滑冰运动员两臂在向内收紧时,也会越转越快的道理相同,目前发现自转最快的脉冲星每秒可转4386圈。据估计,银河系中存在几百万颗中子星,而可观测的脉冲星约6万颗,因为大部分脉冲星的辐射方向并不指向地球。

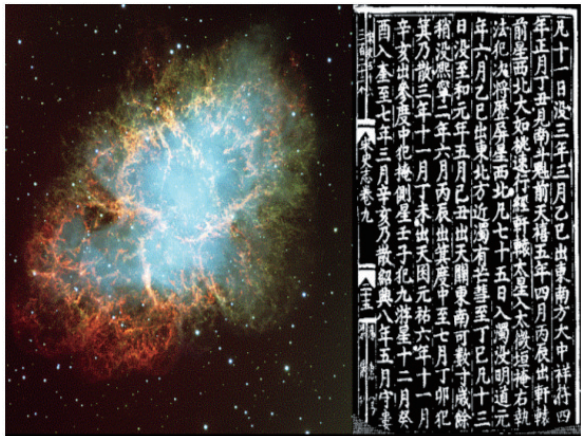
2) 脉冲星辐射的产生。公认的模式是灯塔模型,将脉冲星看成旋转的强磁场辐射天体,变动的磁场将产生电场,而电子在电场中加速将辐射电磁波。或者,脉冲星类比于地球,其自转轴与磁轴之间存在夹角,当星体旋转时,磁极处产生的辐射像光束一样扫过太空,这好比航海的灯塔,当辐射束扫过地球即可以观测一次脉冲。脉冲星来自银河系,距离地球比较遥远,天文学家可通过望远镜进行探测。脉冲星除产生射电辐射外,在光学、X射线、 $\gamma$ 射线等波段也被探测到。

脉冲星的种类非常丰富,其分类标准也有很多。可根据辐射能段的不同分为射电脉冲星、X射线脉冲星和 $\gamma$ 射线脉冲星等;根据有无伴星可以分为脉冲星双星和孤立脉冲星;根据演化历史和自转周期,可以分为常规脉冲星和毫秒脉冲星;根据供能机制的不同可以分为旋转供能脉冲星、吸积供能脉冲星、热供能脉冲星及磁供能脉冲星等。

## 3 蟹状星云脉冲星——中国古代天文学的记录

1054年7月4日,即宋仁宗至和元年五月二十六日,天空中忽然出现了一颗“客星”,在白天可见达23 d,被中国宋代天文学家详细文字记载,其他国家和地区也有零星的记录,诸如朝鲜、日本、印度、阿拉伯、欧洲;美国亚利桑那的印第安人把这个天象绘成了2幅图像,这便是著名的1054超新星爆炸(图2)。此次事件被遗忘了700年后,直到18世纪天文学

家采用望远镜观测到这个遗迹,其光度已经暗到无法用肉眼分辨细节,发现它随着时间逐渐膨胀,速度高达 1100 km/s,因它的丝状结构看起来很像甲壳类生物脚,因此 1850 年罗斯爵士将此星云命名为“Crab(蟹状)”星云。



(a) 蟹状星云 (b) 中国宋朝天文学家对 1054 年“天关客星”的记录

图 2 蟹状星云及中国宋朝相关记录

Fig. 2 Crab Nebula and records in Song Dynasty of China

脉冲星发现后,其起源引起了人们的兴趣,其前身星是什么?遗迹是怎样的?1054 年超新星爆炸是否产生中子星?直到 1968 年,美国天文学家大卫·施特林(David Staelin)和爱德华·赖芬斯坦(Edward Reifenstein)家在蟹状星云中发现了一颗脉冲星(PSRB 0531+21),即蟹状星云脉冲星(Crab 脉冲星)。此观测发现解决了天文学家一直以来的困惑,直接证明了中子星的形成,而且验证了理论学家们提出的恒星演化理论:超新星爆发时,气体外壳被抛射出去,形成超新星遗迹,就像蟹状星云,而恒星核心却迅速坍缩,形成一种致密星体,如果其前身星质量在 8~25 倍太阳质量之间,则会产生中子星。

Crab 脉冲星是位于北天区的一颗著名的源,其周期约 33 ms,计算出的磁场约  $10^{12}$  Gs ( $10^8$  T),距离地球 2 kpc (1 kpc=3260 光年=3.081019 m)。它虽然不是观测到的第一颗脉冲星,但是在脉冲星的研究过程中却起了举足轻重的作用。它于 1969 年首先在射电波段发现,随后发现它还是光学、X 射线、 $\gamma$  射线和红外波段的脉冲星,其辐射光子的能量超过 30 keV,而且非常稳定。迄今为止,在几乎所有电磁波段上都能观测到脉冲星现象的只有它和帆船座脉冲星,但帆船座脉冲星光学亮度很暗,只有蟹状星云脉冲星的 1/104,很难观测。天文学家将 Crab 脉冲星看成是宇宙中最具参考性、多波段源之一,并将其作为一种标准源来测量宇宙其他辐射源。Crab 脉冲星有着长期的观测记录,也是唯一一颗准确知道其诞生年龄的脉冲星,在研究脉冲星自旋周期的特性中具

有重要的作用。观测发现 Crab 脉冲星的自转速度正在逐渐减慢,这主要是由于它自身的电磁辐射消耗自转能导致的。据此推测, Crab 脉冲星诞生时自转周期约 20 ms,经过 1 万年后,它大约减慢到 100 ms。

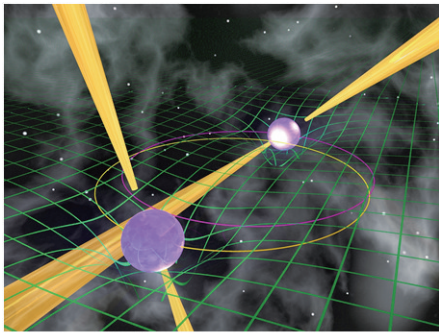
#### 4 脉冲星与引力波

2015 年 9 月 14 日,美国激光干涉仪引力波天文台(简称 LIGO)位于路易斯安那州的利文斯顿和华盛顿州的汉福德的 2 个探测器几乎同时探测到一个信号。后来此事件被命名为 GW150914,被证明是距离地球十几亿光年之外的 2 个恒星级黑洞的并合产生的引力波事件。这次重大发现打开人类探测宇宙的新窗口,标志着引力波天文时代的到来。其实,早在 1974 年,科学家已经利用双中子星系统间接测到了引力波,并获得 1993 年度诺贝尔物理学奖。当时,2 名普林斯顿大学天文学家泰勒(J. Taylor)和赫尔斯(R. Hulse)利用美国波多黎各山谷的阿雷西博天文台(Arecibo Observatory)的 300 m 口径射电望远镜首次发现脉冲星双星系统(PSR1913+16)<sup>[9]</sup>。此发现可以用来检验爱因斯坦关于引力波的预言。双星绕转运动将辐射引力波,导致能量和角动量损失,双星轨道收缩。这个效应很小,无法在太阳系测到,但在脉冲星双星系统应当可以测到,即通过精确观测脉冲双星轨道周期的变化检测引力波的存在(图 3)。

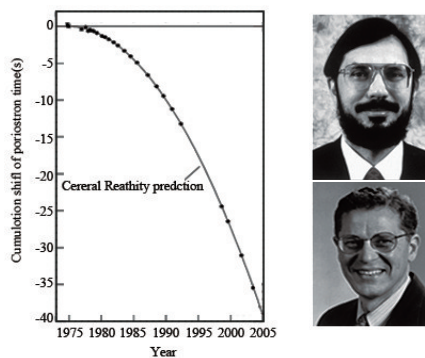
PSR1913+16 系统由 2 颗中子星组成。其中一颗发射脉冲信号,它们轨道周期为 7.75 h。通过对其周期变率的测定后得到与爱因斯坦理论预言符合的结果。此消息一经传出,世界为之轰动,在地面上不易验证的爱因斯坦理论,在遥远的脉冲星系统找到了证据。为此,泰勒和赫尔斯获得 1993 年度诺贝尔物理学奖。直到 2005 年,历经 30 年观测表明(1975—2005 年),爱因斯坦理论和观测吻合得很好。

2004 年,意大利女天文学家博盖利用澳大利亚帕克斯(Parkes)64 m 口径天文望远镜发现了一对互相绕行的双脉冲星系统(PSRJ0737-3039AB),距离地球 2000 光年。它们轨道周期仅为 2.4 h,相距 100 万 km 的这两颗中子星都发射电波,这是已知的唯一一对观测到的射电脉冲双星系统。此系统轨道周期更短,所以引力辐射更强。美国绿岸望远镜(Green Bank Telescope, 100 m 口径)对其进行长达 3 年的精确测量,得到双星的间距以每月 7 mm 的速度变小,这进一步验证了引力波的预言。此外,天文学家还观测到了其他的相对论效应,如夏皮罗(Shapiro)延迟(脉冲星附近的时空弯曲导致的时钟变慢),此次测量误差在 0.05% 以内,是目前为止对广义相对论最精确的检验。

脉冲星计时阵列也可以对引力波进行直接探测<sup>[6]</sup>。引力波是时空的涟漪,当其通过脉冲星与地球之间时,会导致空间的压缩或者拉伸,因此,脉冲星脉冲到达地球的时间会产生变化。理论上对脉冲星进行长时间的观测即可探测到引力波,但是由于各类噪声的影响,微弱的引力波信号很容易



(a) 脉冲星双星轨道示意



(b) 长期观测的轨道收缩随时间变化示意 (c) 天文学家赫尔斯和泰勒

图3 脉冲星双星运动时轨道收缩可以验证引力波  
Fig. 3 Orbital contraction of pulsar binaries, which can validate gravitational waves

被淹没。可以利用毫秒脉冲星的高度时间稳定性,同时对50颗毫秒脉冲星同时检测,寻找引力波造成的相关影响,这便是脉冲星计时阵列探测引力波的基本原理。

## 5 脉冲星导航

脉冲星转动的高度稳定性表现在周期变化率上,例如1999年测得的脉冲星 PSRJ0437-4715 的周期为 5.757451831072007 ms,误差极限达到  $10^{-15}$  s/s,亦即几百万年时间内脉冲星周期慢约 1 s,而毫秒脉冲星的自转周期变化率一般分布在  $10^{-18}$ ~ $10^{-21}$  s/s,所以脉冲星被誉为自然界最稳定的天文时钟,可以与地面上的氢原子钟和铯原子钟媲美。天文学家设想使用脉冲星作为计时标准,进行空间卫星的自主导航。目前,中国开展的X射线脉冲星导航技术研究属于基础性、前瞻性和战略性课题,具有重要的学术理论意义和实际工程应用价值(图4)。

脉冲星导航不受地球距离的影响,其他常用的导航主要有美国全球定位系统(GPS)。自20世纪以来,世界各国先后发展了多种自主导航方法,如惯性导航、卫星导航、天文导航和地磁导航等,其中中国的“北斗”导航就属于卫星导航系统。上述各类自主导航技术均有其特定适用范围和缺陷,除

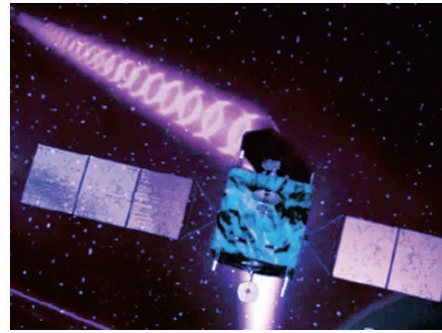


图4 中国脉冲星自主导航卫星示意

Fig. 4 Pulsar autonomous navigation satellite in China

了脉冲星导航外,其他导航均不能在太阳系外使用。

首次将脉冲星用于导航的设想在1974年提出。2004年,美国国防部国防预先研究计划局提出“基于X射线源的自主导航定位验证”计划。基于X射线脉冲星的导航,首先是接收脉冲星的X射线信号作为时间基准,然后经过相应的终端处理,主要是光电转换及信号处理之后,还相应地做背景辐射信号的干扰,最终精确地进行轨道、时间和姿态测量。所以,X射线脉冲星为导航卫星的自主导航提供了一种全新的思路和有效的实现途径<sup>[7]</sup>。

脉冲星导航具有定位精度高、抗干扰能力强、无需地面系统支持等特点,尤其在深空、战争等极端条件下对航天器自主导航具有不可替代的优势,是各航天强国争相发展的尖端技术<sup>[8]</sup>。X射线脉冲星导航比起传统导航技术导航的优点主要体现在:1) X射线脉冲星导航可以提供10维导航信息(三维位置、三维速度、三维姿态和一维时间);2) 脉冲星辐射的X射线信号可在大气层外的整个太阳系空间被探测到,所以其适用于整个太阳系;3) 脉冲星导航的定轨精度最小可达到10 m,时间同步精度差不多1 ns,姿态测量精度3",这是传统的其他导航技术都无法实现的。

## 6 脉冲星与FAST望远镜

位于中国贵州省、世界最大的500 m口径射电望远镜(FAST)已经建设完成(图5),其口径超过美国波多黎各的阿雷西博望远镜(口径300 m)。FAST将利用贵州地区独特的地形条件——喀斯特地貌的山谷,来构建望远镜的支撑架构,铺设4300块三角形反射单元,面积相当于30个足球场。与号称“地球上最大的机器”的德国波恩100 m射电望远镜相比,灵敏度可望提高约10倍。与被评“人类20世纪10大工程”之首的美国300 m望远镜相比,其综合性能可望提高约10倍。它通过主动控制形成抛物面以汇聚电磁波,采用轻型钢索拖动并联机器人实现望远镜的指向跟踪,这3项创新开创了建造巨型单口径望远镜的新模式<sup>[9]</sup>。

FAST拥有5大科学目标:1) 巡视宇宙中的中性氢;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



图5 中国已经建成的贵州500 m口径球面射电望远镜全景  
Fig. 5 Panoramic view of the Guizhou 500 meter caliber spherical radio telescope built in China

导国际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——研究恒星形成与演化及探索太空生命起源;5) 搜索星际通信信号——寻找地外文明。其涵盖了丰富的天文学内容,在宇宙初始、星系的演化、恒星、行星等的观测研究方面具有非常强的竞争力,其中在脉冲星探测、中性氢和奇异暗弱天体成像等方面具有巨大的研究潜力。此外,FAST在人文方面也有巨大的价值,例如科技与环境和谐发展、青少年天文科普工作等。

FAST的建成为脉冲星研究提供了巨大的机遇。随着探测到的脉冲星数量越来越多,脉冲星的种类将越来越丰富,毫秒脉冲星,双中子星,脉冲星—白矮星,脉冲星—行星等奇特类型逐渐出现。目前已发现了近2700颗脉冲星,种类极为丰富,其辐射性质也多种多样,这极大地推动了天文学、物理学、工程技术等多学科的发展<sup>[10]</sup>。然而,目前世界上现有设备大多已到探测极限,不易发现新的脉冲星品种,所以迫切需要性能更高的FAST望远镜的投入使用。

天文学家估计,银河系约有6万颗可观测的脉冲星,目前只探测到了约4.5%,由于FAST高灵敏度和分辨率,很多暗弱的脉冲星均在其视野里,预计可测4000颗以上脉冲星<sup>[9]</sup>。FAST未来探测的一些优势目标包括:1) 将可能首次发现脉冲星—黑洞双星系统,此系统将对引力波进行更精确的验证;2) 周期大于10 s的长周期脉冲星;3) 射电暗弱的脉冲星;4) 射电—高能转换脉冲星;5) 亚毫秒脉冲星,自转周期小于1 ms;6) 低磁场毫秒脉冲星;7) 射电宁静的伽马射线脉冲星;8) 河外和球状星团脉冲星;9)  $\gamma$ 暴的余晖。尤其在脉冲星—黑洞系统的搜寻,一旦成功,这可能是获得诺贝尔奖的杰出发现,期待FAST的精彩表现。

## 7 结论

经过50年的观测和理论研究,天文学家关于脉冲星的认识已经取得巨大进展。随着各种空间和地面望远镜(例如,中国的硬X射线调制望远镜(HXMT)、500 m单口径球面射电望远镜(FAST)的建设和投入使用,为新脉冲星的发现提供了巨大的机遇,预计未来若干年将会有越来越多的奇特脉冲星被探测到。随着脉冲星研究的深入,宇宙各种极端物理状态将变得更加清晰,这使揭示物质结构与新物理规律、验证爱因斯坦广义相对论及进行引力波探测、开发应用脉冲星导航等成为可能。同时,脉冲星研究对大科学装备提出高精度要求,这极大地推动了天文学、物理学、工程技术等多学科的协调与综合发展。

### 参考文献(References)

- [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 T A, Hobbs M. The Australia telescope national facility pulsar catalogue[J]. Astronomical Journal, 2005, 129(4): 1993-2006.
- [3] Lyne A, Graham-Smith F. Pulsar Astronomy[M]. Cambridge UK: Cambridge University Press, 2012: 50-62.
- [4] Lorimer D R, Kramer M. Handbook of pulsar Astronomy[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [5] Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system[J]. Astrophysical Journal, 1975, 195(15): L51-L53.
- [6] Verbiest J P W, Lentati L, Hobbs G, et al. The international pulsar timing array: First data release[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2016, 458(2): 1267-1288.
- [7] Shi H, Xiong K, Wei C, et al. X-ray pulsar navigation precision analysis considering orbit propagation error effects[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9796: 979620-979628.
- [8] 全林, 欧阳晓平. 脉冲星导航X射线探测技术发展综述[J]. 现代应用物理, 2014(5): 98-103.  
Quan Lin, Ouyang Xiaoping. Overview of pulsar X-ray detection technology development[J]. Modern Applied Physics, 2014(5): 98-103.
- [9] 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.  
Nan Rendong, Zhang Haiyan, Zhang ying, et al. FAST construction progress[J]. Acta Astronomica Sinica, 2016(6): 623-630.
- [10] 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.  
Nan Rendong. Five-hundred-meter aperture spherical telescope[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2005(5): 3-20.

## 50 Year's progress since the pulsar discovery and the detection of gravitational waves

ZHANG Chengmin<sup>1,2</sup>, WANG Shuangqiang<sup>2,3</sup>, SHANG Lunhua<sup>1,2</sup>, YANG Yiyan<sup>4</sup>

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100020, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China
3. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830001, China
4. Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100089, China

**Abstract** The observation and the theoretical study of the pulsar have made a great progress since the first pulsar was discovered in 1967, honored with two Nobel Prizes. It is an extremely large physical laboratory in the universe, which not only can test the general relativity, but also measure the predicted gravitational waves. In this paper, we review the history and the properties of pulsars, and analyze its applications in the gravitational wave detection and the pulsar navigation. The pulsar detection of the five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope (FAST) is discussed, at the end.

**Keywords** pulsar; neutron star; gravitational waves

(责任编辑 王志敏)