

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.01.01

特殊类型脉冲星的研究进展

王双强^{1,2}, 王 娜^{1,7}, 张承民^{2,3,7,8}, 李 茵^{3,7,8},
尚伦华^{2,3,4}, 王德华^{4,8}, 潘元月⁵, 杨佚沿⁶, 岳友岭^{3,7,8}

(1. 中国科学院 新疆天文台, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 国家天文台, 北京 100012; 4. 贵州师范大学, 贵阳 550025; 5. 湘潭大学, 湘潭 411105; 6. 北京师范大学, 北京 100875; 7. 中国科学院 射电天文重点实验室, 北京 100012; 8. 贵州师范大学 贵州省射电天文数据处理重点实验室, 贵阳 550001)

摘要: 脉冲星是演化末期的大质量恒星经过核坍缩形成的产物, 它们在天体物理学、粒子物理学和卫星导航等方面具有重要的应用。自脉冲星发现 50 年来, 其观测和理论研究取得了巨大进展。脉冲星主要在射电波段被探测到, 部分脉冲星也有 X 射线和 γ 射线等波段的辐射, 它们的信息非常丰富。根据其不同的观测特征可以把脉冲星分为多种类型。主要对射电、X 射线以及 γ 射线波段的特殊类型脉冲星, 包括旋转射电暂现源、间歇脉冲星、态转换 X 射线脉冲星、磁星、暗 X 射线孤立中子星、中心致密天体以及 γ 射线脉冲星的基本性质及其研究进展进行综述。

关键词: 中子星; 脉冲星; 射电脉冲星; X 射线脉冲星; γ 射线脉冲星

1 引 言

脉冲星是大质量恒星 ($8 M_{\odot} \sim 25 M_{\odot}$, M_{\odot} 为太阳质量) 演化到末期并经过超新星爆发形成的产物。自 1967 年 Bell 女士发现第一颗射电脉冲星以来, 截至 2017 年 7 月 6 日, 已探测到 2613 颗脉冲星^[1]。关于它们的研究先后两次获得诺贝尔奖, 足见其巨大的科学价值^[2, 3]。脉冲星是具有核物态的致密天体 (中子星或夸克星), 因其具有极高的物质密度 (约 $10^{14} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、特定的质量范围 ($0.9 M_{\odot} \sim 2.7 M_{\odot}$)、极高的磁场 ($10^4 \sim 10^{11} \text{ T}$) 以及超短的自转周期 ($1.4 \text{ ms} \sim 11.8 \text{ s}$) 等特性, 已成为恒星演化、核天体物理以及相关物态研究的天然实验室: 其超强引力场可以对广义相对论进行检验; 关于其辐射机制的探索对于了解强磁场等离子体具有重要意义^[4, 5]。有关对脉冲星搜寻的研究还极大地推动了天文技术和方法的发展。除此之外, 近些年来应用脉冲星导航已成为一个热门研究课题。由此可见, 关于脉冲星的研究对于推动天体物理学、粒子物理学、天文学等学科的发展都有着非常重要的意义。

收稿日期: 2017-03-24; 修回日期: 2017-11-09

资助项目: 国家重点研发计划 (2016YFA0400804); 国家重点基础研究发展计划 (2015CB857104); 国家自然科学基金 (U1731238, 11703003, NAOC-Y834081V01)

通讯作者: 张承民, zhangcm@bao.ac.cn

50 年来, 关于脉冲星的观测和理论研究取得了重要的进展。脉冲星的性质非常丰富, 可以根据其不同的参数特征把它们分成多种类别, 如根据其辐射能段的不同可分为射电脉冲星、X 射线脉冲星和 γ 射线脉冲星等^[6]; 根据有无伴星可分为脉冲星双星和孤立脉冲星; 根据其自转周期和周期导数可分为常规脉冲星和毫秒脉冲星; 根据其供能机制的不同可分为旋转供能脉冲星、吸积供能脉冲星、热供能脉冲星、磁供能脉冲星和核供能脉冲星等^[7]。对这些不同性质的脉冲星的研究可对已有的理论进行验证。例如: 旋转射电暂现源和间歇脉冲星的发现促进了射电辐射机制的研究^[8, 9]; 毫秒脉冲星的发现对 neutron 星物态等提供了进一步的限制^[10]; 脉冲星双星的发现为引力波的验证提供了平台^[3]; 态转换 X 射线脉冲星的发现为毫秒脉冲星起源于低质量 X 射线双星系统的理论模型提供了证据^[11-13]; 磁星的发现促进了强磁场下物理规律研究的进步^[14]; 中心致密天体与暗 X 射线孤立中子星的发现可以对中子星的半径进行更好的约束^[15, 16]; γ 射线脉冲星的发现促进了脉冲星高能辐射机制的研究, 并开辟了多波段天文学的新篇章^[17, 18]。前人已经对部分类型的脉冲星研究进展进行评述, 如 Manchester^[19] 和 Beskin 等人^[20] 对射电脉冲星的评述, Lorimer^[21] 对双星和毫秒射电脉冲星的评述, Mereghetti^[22] 对 X 射线孤立中子星的评述, Kaspi 等人^[23] 和 Turolla 等人^[24] 对磁星的最新研究进展的评述, Caraveo^[25] 对 γ 射线脉冲星的评述, 以及 Harding^[7] 对不同供能机制的脉冲星的评述等。在脉冲星被发现 50 周年之际, 我们将更全面地对已发现的部分特殊类型脉冲星的性质及其研究进展进行概括。

本文将依照现有的数据和成果, 主要对各辐射能段的特殊种类脉冲星的基本性质及其研究进展进行概述, 其中第 2 章概述射电脉冲星, 包括旋转射电暂现源 (rotating radio transient, RRAT) 和间歇脉冲星 (intermittent pulsar); 第 3 章是对 X 射线和 γ 射线脉冲星的概述, 包括态转换 X 射线脉冲星 (transitional millisecond pulsar)、磁星 (magnetar)、中心致密天体 (central compact object, CCO)、暗 X 射线孤立中子星 (X-ray dim isolated neutron star, XDINS) 以及 γ 射线脉冲星 (γ -ray pulsar)。

2 射电脉冲星

射电辐射是脉冲星的一个重要特点, 其光度占自转能损率的约 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 。目前已发现 2 523 颗射电脉冲星, 占全部脉冲星数量的约 98%^[1]。这得益于世界上各大射电望远镜的巡天工作, 如澳大利亚 Parkes 64 m 射电望远镜^[26]、美国 Arecibo 305 m 射电望远镜^[27]、Green Bank 100 m 射电望远镜^[28] 和英国 Lovell 76 m 射电望远镜^[29] 等。目前, 理论上普遍认为, 脉冲星的射电辐射产生在极冠区, 但是其发生机制还不清楚, 可能是同步辐射^[30, 31]、曲率辐射^[32] 或者逆康普顿散射^[33, 34]。观测上, 其性质非常丰富, 如脉冲缺失和模式转变、微脉冲、中间脉冲、巨脉冲等^[19, 35]。下面我们将综述旋转射电暂现源和间歇脉冲星这两类特殊的射电脉冲星。

2.1 旋转射电暂现源

旋转射电暂现源是一类拥有潜在周期的重复射电源, 其辐射主要集中于射电波段, 表现

为大约在几分钟至几小时之间发生一次射电暴, 其潜在周期可通过分析暴与暴之间的相同成分, 并使用差分法确定^[36]。它们虽然没有明确的周期, 但也被认为是中子星, 原因主要有以下几点: (1) 其脉冲的持续时间为 1 ~ 30 ms, 比典型的白矮星短, 但与射电脉冲星的脉冲宽度类似; (2) 亮温度为 $10^{22} \sim 10^{23}$ K, 在射电脉冲星的亮温度范围之内; (3) 潜在周期为 0.1 ~ 7.7 s, 是典型的脉冲星自转周期; (4) 周期变化率为 $10^{-13} \sim 10^{-16}$, 在已知的脉冲星周期变化率范围内^[36]。RRAT 是 McLaughlin 等人^[9] 在 2006 年对 Parkes 多波束巡天数据进行分析后首次发现的。到目前为止已探测到约 110 颗 RRAT^[9, 36-42], 它们都是孤立的射电源, 在银河系中弥散分布 (见图 1)。已测得其中 88 颗 RRAT 的自转周期 P , 其范围为 125.23 ~ 7707.18 ms, 平均值为 2221.09 ms; 推算出了 29 颗 RRAT 的磁场 B , 其范围在 $4.37 \times 10^7 \sim 5.01 \times 10^9$ T, 平均值为 3.62×10^8 T (见图 2)。

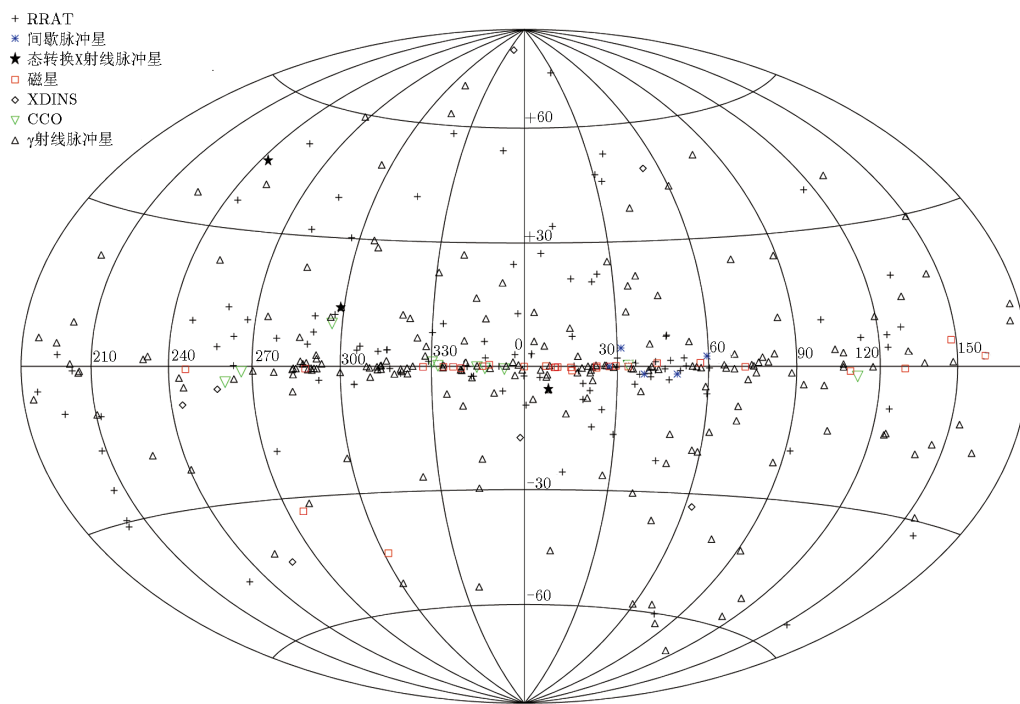
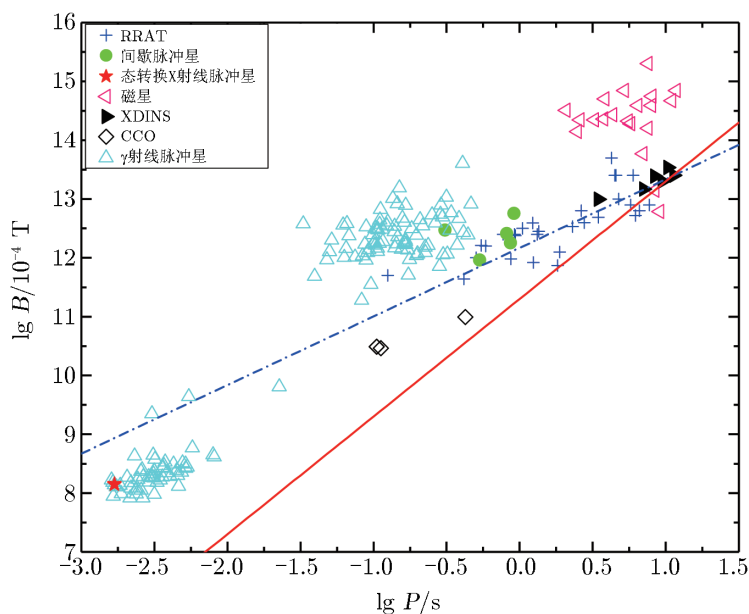


图 1 脉冲星的空间分布图

到目前为止, RRAT 的奇特射电辐射性质并没有得到很好的解释。最初在理论上认为, RRAT 是濒临死亡的脉冲星, 其辐射的单个脉冲很可能是巨脉冲。但是人们通过观测发现, 它们并没有位于死亡线附近, 且其脉冲宽度要宽于巨脉冲, 从而否定了这种理论^[43]。另外还有一些理论认为, RRAT 射电辐射触发机制是由于回落盘的扰动^[44]、周围环绕的小行星带^[45]或辐射带等离子体捕获的影响^[46]等, 但这些理论并没有得到观测的验证。此外, 不同 RRAT 所表现出来的性质也不尽相同, 说明它们本身很可能就包含多类脉冲星。例如: J1819-1458 是唯一一颗拥有 X 射线辐射的 RRAT, 其辐射频谱为黑体谱 $KT = 140$ eV, 此



注：蓝色点划线表示加速线；红色实线表示死亡线。

图 2 脉冲星的周期-磁场分布图

外还有 0.5 keV 的光谱吸收线。Lyne 等人^[47] 和 Hu 等人^[48] 还观测到了该源的反常跃变现象，即在其跃变恢复后，自转频率变化率 ($\dot{\nu}$) 反而减小。这与其他脉冲星的跃变性质相反。如果这种反常跃变是它的固有性质，那么该源很可能是由磁星演化而来的。总之，RRAT 还有很多问题有待解决。

2.2 间歇脉冲星

间歇脉冲星 (intermittent pulsar) 是指辐射在有辐射 (on) 和无辐射 (off) 两个状态之间转换的脉冲星，其转换时间是准周期的，从几十天到几年不等^[49]。间歇脉冲星由 Kramer 等人^[8] 通过英国 76 m 的 Lovell 射电望远镜发现。它们的一个重要特征是 $|\dot{\nu}_{\text{on}}| > |\dot{\nu}_{\text{off}}|$ ， $\dot{\nu}_{\text{on}}$ 和 $\dot{\nu}_{\text{off}}$ 分别表示脉冲星处于有辐射状态和无辐射状态的自转频率一阶导数。该特征为脉冲星射电辐射的研究提供了难得的依据。目前只发现 5 颗间歇脉冲星^[8, 49-51]，它们位于银盘附近 (图 1)，其自转周期分布在非常狭窄的范围内 (0.31 ~ 0.91 s)，磁场为 $9.2 \times 10^7 \sim 5.7 \times 10^8$ T (图 2)，占空比 f_{on} (表示脉冲星处于有辐射状态的时间与转换周期的比值) 在 0.01 ~ 0.6 之间， $|\dot{\nu}_{\text{on}}|/|\dot{\nu}_{\text{off}}|$ 的值在 1.5 ~ 2.5 之间。在间歇脉冲星中，J1929+1357 是一个比较特殊的源，它的转换周期随时间变化，最初观测得到的占空比 $f_{\text{on}}=0.008$ ，两年之后却变成了 $f_{\text{on}}=0.16$ 。目前这种现象还没有得到合理的解释^[49]。

关于间歇脉冲星的研究主要有三个热点问题：(1) 在有辐射和无辐射两个状态之间转换的原因是什么？(2) 准周期转换现象如何解释？(3) 为什么 $|\dot{\nu}_{\text{on}}| > |\dot{\nu}_{\text{off}}|$ ？目前关于间歇脉冲星无辐射状态的出现原因主要有两种理论：(1) 磁层等离子体的影响，如 Timokhim^[52]，

Kalopotharakos 等人^[53] 和 Li 等人^[54] 认为, 脉冲星磁层中等离子体的供应会影响电荷的分布, 从而导致出现两种状态, 而 Melrose 等人^[55] 却认为这种现象是由于磁层中等离子体的不同运动速度造成的; (2) 表面物理的影响, 如磁层中带电粒子加速区的改变^[56] 或磁场的扭曲^[57] 等。对于其转换的准周期性的解释也取得了一些进展: (1) 可能是由于脉冲星的进动导致的^[58, 59], 但目前尚未观测到预期的脉冲轮廓的改变^[60]; (2) Rea 等人^[61] 认为, 它们拥有小质量的行星伴星, 并且存在吸积过程。这可以解释其准周期特性, 但是人们并没有探测到因吸积所产生的 X 射线。其原因可能是其 X 射线辐射强度在目前望远镜可探测的阈值之下, 也可能是一种混沌的状态或马尔可夫过程^[62, 63]。星风模型可以解释其 $|\dot{\nu}_{\text{on}}| > |\dot{\nu}_{\text{off}}|$ 的问题。Li 等人认为, 当脉冲星处于有辐射状态时, 磁层内粒子较多, 为其制动提供了额外的力矩, 因此减速较快; 而处于无辐射状态时, 磁层内粒子耗尽, 无法为辐射提供充足的物质, 额外力矩也随之消失, 因此减速较慢^[64]。但是这种理论却无法解释其准周期特性。此外, Lyne 等人^[49] 发现, 间歇脉冲星与脉冲缺失的脉冲星的能损率都集中在 $\dot{E} \approx 5 \times 10^{15} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 附近, 据此推测它们极冠处的加速电压较为接近。此发现对其辐射机制以及演化关系的研究至关重要。

间歇脉冲星的发现表明宇宙中的脉冲星数量多于最初的预期 (类似于 RRAT), 因为在巡天过程中它们可能处于无辐射状态, 或者起初因处于有辐射状态被探测到, 而进一步认证时却转换到了无辐射状态。间歇脉冲星在巡天过程中被认证的概率约为 $f_{\text{on}} \times n_{\text{reobs}}^2$, 其中 f_{on} 表示占空比, n_{reobs} 表示望远镜对该源进行重新观测的次数, 通常取 5^[49]。由此可见, 发现间歇脉冲星的概率较低, 目前只发现 5 颗。它们的数量太少, 因此无法对已有理论进行精确的验证。幸运的是, 未来性能更高的射电望远镜即将投入使用 (如 FAST 望远镜等)。我们希望未来可以得到更多的间歇脉冲星样本, 以促进其研究的发展。

3 X/γ 射线脉冲星

高能辐射是脉冲星的一个重要性质。对于 X 射线脉冲星, 通常其光变曲线的占空比较高, 甚至可达 100%。其能量来源是热能、吸积能、自转能或磁能^[22]。脉冲星的 X 射线辐射可分为两类: 热辐射和非热辐射。脉冲星诞生时, 其内部温度约为 10^{11} K 。随着其年龄的增长, 温度逐渐降低, 大约经过 $10^5 \sim 10^6 \text{ a}$, 其表面温度可降低到 $10^5 \sim 10^6 \text{ K}$, 此时可产生软 X 射线辐射。如果冷却的时间较长, 则其热能无法提供 X 射线辐射能量, 所以, 很少探测到老年脉冲星的 X 射线辐射^[65]。对于非常年轻的脉冲星, 其热 X 射线辐射也很难探测到, 因为其非热辐射比热 X 射线辐射更强。脉冲星非热 X 射线辐射通常占据较宽的能量范围, 其辐射表现为幂律谱, 主要是由带电粒子在磁层中加速产生, 其能量来源是脉冲星的吸积能或自转能, 其光度大约占能损率的 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ ^[65]。一般情况下, 中心致密天体和暗 X 射线孤立中子星属于热供能, 存在吸积的脉冲星属于吸积供能, 而毫秒脉冲星在射电相往往被认为是无吸积的, 磁星则是磁供能。当然它们都存在自转供能^[7]。γ 射线脉冲星的能量可由其自转能提供, 其光度大约占能损率的 $10^{-2} \sim 10^{-1}$, 甚至更高^[66]。一般认为 γ 射线辐射

产生于磁层。与观测符合得较好的是外间隙模型和缝间隙模型，但是它们只能解释部分观测现象^[25]。下面我们将综述几类特殊的高能脉冲星，包括态转换 X 射线脉冲星、磁星、暗 X 射线孤立中子星、中心致密天体和 γ 射线脉冲星。

3.1 态转换 X 射线脉冲星

态转换 X 射线脉冲星是指在吸积供能 (X 射线) 和旋转供能 (射电) 两种状态之间转换的脉冲星。目前已经发现 3 颗: J0023+0038, J12270-4859 和 J1824-2452I。它们的自转周期较短, 分别为 1.69 ms, 1.69 ms, 3.93 ms, 磁场强度大约为 10^4 T (见图 2, 由于 3 颗态转换 X 射线脉冲星的周期相同、磁场大小接近, 因此在图中的位置重叠, 所以只有一个五角星)。这 3 颗态转换 X 射线脉冲星都位于双星系统中, 它们的伴星质量较小, 分别为 $0.24 M_{\odot}$, $0.15 M_{\odot} \sim 0.36 M_{\odot}$ 和 $0.17 M_{\odot} \sim 0.2 M_{\odot}$, 相应的轨道周期为 4.75 h, 6.91 h 和 11.01 h^[11-13, 67-70]。它们在空间分布比较弥散 (见图 1)。

态转换 X 射线脉冲星的观测性质非常丰富, 在射电、X 射线和 γ 射线等波段均对其有观测。下面我们将介绍它们在不同状态下的观测性质: (1) 在吸积供能状态下, 射电辐射消失, 而相应的光学、X 射线和 γ 射线的光度较高, 其中 X 射线光度约为 $10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[13, 71, 72]。存在吸积盘, 且在光学波段存在 H_{α} 双峰发射线^[73, 74], 其 X 射线能谱也为幂律谱, 且热成分较少, 轮廓图像大约为正弦函数^[13, 71, 75]。(2) 在旋转供能状态下, 射电辐射出现, 相应的光学、X 射线和 γ 射线光度降低, 其中 X 射线光度约为 $10^{25} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 吸积盘消失^[13, 71, 76]。其射线能谱为幂律谱, 但是较为扁平, 流量密度变化较大^[77]。(3) X 射线暴状态下, X 射线光度增加几个量级 (对 J1824-2452I, 约为 $10^{29} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$; 对 J0023+0038 和 J12270-4859, 约为 $10^{27.5} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$)。此现象产生的原因是, 由于吸积物质的堆积而产生核暴, 持续时间从几天到几个月不等^[11, 13, 71, 78]。

态转换 X 射线脉冲星的发现不仅为毫秒脉冲星起源于低质量 X 射线双星系统提供了证据, 而且促进了对脉冲星辐射机制的研究。关于其辐射的理论解释主要有三种: 旋转供能模型^[79-82]、吸积供能模型^[83] 和螺旋桨模型^[83, 84]。旋转供能模型认为, 态转换 X 射线脉冲星的能量来源于脉冲星的自转能, 其射电辐射的消失是由脉冲星磁层的变化所导致。高能辐射来自相对论性粒子流的外流与内流物质的相互作用, 其中 X 射线的产生机制是同步辐射, γ 射线的产生机制是逆康普顿散射^[80, 82]。但是此模型存在一些问题: (1) 通常旋转供能 X 射线脉冲星的脉冲较窄, 而态转换源 X 射线脉冲星的 X 射线脉冲轮廓为正弦函数; (2) X 射线转化效率过高, 对于 J1023+0038, 其 X 射线辐射光度能损率的比值超过 40%, 而旋转供能 X 射线脉冲星的 X 射线转化效率一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间; (3) 在旋转供能模型下, 很难解释脉冲星的 X 射线光度在几十秒内变化一个量级的现象^[13, 71, 83, 85]。吸积供能模型认为, 态转换 X 射线脉冲星的能量来源于脉冲星的吸积, 其射电辐射的消失是由于大量的吸积物质导致脉冲星射电加速区的破坏。该模型也存在一定的问题: (1) 如果 X 射线由吸积产生, 则可得出其相应的吸积率约为 $6 \times 10^{-13} M_{\odot} \text{ a}^{-1}$, 此时脉冲星的吸积盘内边界在共转半径之外, 吸积物质无法到达脉冲星表面^[83]; (2) 吸积无法产生 γ 射线, 在大约 200 颗低质量 X 射线双星系统中, 只有 J1023+0038 和 J12270-4859 拥有 γ 射线辐射^[86]。螺旋桨模型对态转换 X 射线脉冲星的解释较充分。该模型认为, 在吸积物质与磁场相互作用的边界处可通过费米过程或

磁重联产生相对论粒子。在此边界处 X 射线由相对论粒子的同步辐射产生, γ 射线的产生机制是自同步康普顿辐射, 射电由同步辐射产生^[83, 84]。

3.2 磁星

磁星指的是偶极磁场非常强 ($10^{10} \sim 10^{11}$ T) 的脉冲星。统计发现, 磁星具有较长的自转周期 ($P \approx 10$ s) 和较大的周期变化率 ($\dot{P} \approx 10^{-13} \sim 10^{-11}$), 且自转减速过程很不稳定, 通常伴随着跃变和计时噪音, 因此, 其脉冲轮廓、光谱等会发生变化^[14]; 磁星的特征年龄都比较短 (τ 为 $10^3 \sim 10^4$ a); 对于自转减速的能损率小于 X 射线辐射光度的磁星, 其辐射通常包含热辐射和非热辐射成分; 某些磁星还可以产生耀发^[24]。根据加拿大麦吉尔大学的磁星表^[14], 到现在为止共发现 29 颗磁星, 它们都是孤立的, 其中 15 颗为软 γ 射线复现源 (soft gamma repeater, SGR) (11 颗已确定, 4 颗候选), 14 颗为反常 X 射线脉冲星 (anomalous X-ray pulsar, AXP) (12 颗已确定, 2 颗候选)。对另外 1 颗源 (J1846-0258) 观测到了类似于磁星的耀发, 但并未确定其是否是磁星^[87]。除 CXOUJ010043.1-721134 以外 (特征年龄约为 6.76×10^3 a^[88]), 大部分磁星主要分布在银河系的银盘附近。

磁星主要分为 SGR 和 AXP 两类。SGR 是在硬 X/软 γ 射线波段产生的持续时间为几十毫秒, 释放的能量一般为 $10^{33} \sim 10^{34}$ J·s⁻¹ 的高强度短暴^[89] 的源。SGR 大约每隔几年会爆发一次。起初 SGR 被认为是 γ 射线暴 (γ -ray burst, GRB) 的候选体, 但后来发现暴是可重复的。部分 SGR 还出现了超级耀发, 能量最高可达 10^{40} J·s⁻¹, 光变曲线表现为持续几百毫秒尖峰脉冲后跟随着持续几百秒的脉冲尾巴, 脉冲轮廓在耀发出现前后会产生非常明显的变化, 即超级耀发出现前, 脉冲通常比较复杂, 表现为各种峰的混合; 在超级耀发出现后, 脉冲则变成了非常简单的单一的峰^[90]。目前已观测到 3 颗 SGR 有超级耀发现象, 分别是 SGR0526-66, SGR1900+14 和 SGR1806-20^[91-93]。空间分布上, 所有的 SGR 都分布在银盘附近。AXP 是可以产生光度约 10^{28} J·s⁻¹ 的软 X 射线辐射 ($E < 10$ keV)^[22], 自旋周期约为 $5 \sim 11$ s, 脉冲轮廓与 SGR 一样, 都比较宽。部分源存在光学或近红外波段的辐射, 同时它们还可以产生类似于 SGR 的耀发。AXP 刚被发现时被认为是反常 X 射线脉冲星。经过大量的观测和理论研究, 目前普遍认为 SGR 和 AXP 是同一类星体 (磁星) 的不同表现形式, 其辐射的能量主要由自身的极强磁场提供^[94, 95]。此外, 有些磁星也可以产生射电辐射。目前只探测到 4 颗此类磁星 (XTE J1810-197, AXP 1E 1547-5408, PSR 1622-4950 和 SGR J1745-2900^[96-99]), 其中 PSR 1622-4950 是唯一一颗由射电探测发现的磁星。未来的大射电望远镜可以把射电宁静的磁星作为重要观测目标, 对磁星的射电辐射进行更深层次的探索。

最近几十年来关于磁星的形成与演化、磁场结构以及辐射机制等问题的研究取得了巨大的进展。尤其是低磁磁星 (如 SGR0418+5729 和 J1822.3-1606^[100, 101]) 的发现, 表明磁星不一定拥有强偶极磁场。它们的发现还暗示磁星的真实数量要比我们以前预测的多, 因此其诞生率应该比预测的要高。在演化方面, 磁星可能诞生于大质量双星中^[102], 其磁场衰减后可能会形成孤立的暗 X 射线脉冲星 (XDINS)^[103]。最近有人还提出了吸积磁星, 认为极亮 X 射线源 (ultraluminous X-ray source, ULX) 是由处在高质量 X 射线双星中的磁星通过吸积产生的^[104], 但是, 至今尚没有观测到位于双星系统中的磁星。关于磁星磁场结构问题, 如磁场在

星体核与壳,壳与磁层交汇处会发生怎样的具体变化等尚不清楚。在辐射机制方面,磁星的扭曲磁层模型已被广泛接受。在磁层处粒子对的共振回旋加速散射解释了磁星的多波段辐射,尤其是在软 X 射线波段其结果与观测得到的光谱符合得非常好。但是,许多基础的问题仍不清楚,例如因磁星所造成的极端环境导致的光子分裂、电子偶素分裂等问题^[24]。在磁星耀发研究方面,其触发机制还不清楚,可能是由于星震产生的,但是目前对于星震模型的研究很有限^[24],磁重联是解释 γ 射线辐射的一个候选模型。此外,磁星耀发中也出现了准周期振荡现象。总之,还有许多问题有待解决。

3.3 暗 X 射线孤立中子星

迄今为止,人们通过 ROSAT 卫星巡天发现了 7 颗暗 X 射线孤立中子星 (XDINS)^[15],它们被认为正处于冷却时期,其附近并没有发现超新星遗迹或者星云^[22, 105]。XDINS 在 X 射线波段以热辐射为主,其辐射能谱可以很好地用普朗克公式描述,因此它们被认为是检验中子星表面物态以及状态方程的绝佳实验场所^[65]。它们在银河系中分布弥散(见图 1),其自转周期在 3.5 ~ 11.4 s 之间,平均值为 8.1 s;磁场在 $9.88 \times 10^8 \sim 3.44 \times 10^{10}$ T 之间,平均值为 2.15×10^9 T;特征年龄较大,约为 10^6 a (见图 2))。

XDINS 具有丰富的观测现象。它在光学/紫外波段的辐射要数倍于 X 射线黑体辐射外推的结果,这个现象称之为光学紫外超^[106]。Wang 等人^[107]提出用奇异夸克星表面大气的韧致辐射过程来统一理解这两个波段的辐射。XDINS 位于图 2 右上方,与磁星及一些强磁场中子星相邻,它们之间可能存在演化关系^[108]。红外波段观测发现, XDINS 周围可能并未形成回落盘,而是形成了尘埃带^[109]。XDINS 的软 X 射线辐射光度在 $10^{23} \sim 10^{25}$ J·s⁻¹ 之间。此光度不仅大于其本身自转减速所提供的能量,而且也高于普通的中子星冷却光度,据此推测其能量应该是由强磁场衰减提供的,也就是它们的能量有两个来源:热供能和磁供能。除 RX J1856 外,其他 XDINS 的光谱表现出了复杂的吸收线,其能量在 0.3~1 keV 之间。吸收线产生的原因可能是质子的回旋加速、H 或 He 原子的跃迁或电子海的集体震荡^[110]。此外,其中一个源 RX J0720.4-3125 还表现出了非常奇特的性质:其 X 射线流量、光谱以及脉冲轮廓随着时间的改变而发生了显著的变化^[111]。除磁星外,这是所发现的首颗拥有这种奇特性质的孤立中子星。

XDINS 与其他类型的脉冲星之间的联系也不清楚。它们分布的位置离死亡线非常近,可能是死亡的射电脉冲星或者极端的旋转射电暂现源 (RRAT)^[7]。但是,目前已发现的 RRAT 中只有 1 颗拥有 X 射线辐射,而且对它的 X 射线辐射探测非常困难。许多与 XDINS 年龄相似的脉冲星拥有 X 射线辐射或者 γ 射线辐射,为什么没有探测到 XDINS 非热的高能辐射?有人通过对 XDINS 吸收线的测量推出,其磁场高达 10^{10} T,处于磁星的磁场范围内,且部分性质也与磁星类似。据此,他们认为 XDINS 可能是磁星通过磁场衰减演化而来的,但是具体的演化过程目前还不清楚^[112]。目前发现的 XDINS 的数量太少,对于理论研究尚不能提供一个较为充足的样本。

到目前为止,还没有探测到 XDINS 源的足够强的射电辐射。尽管 Turolla^[65]和 Malofeev 等人^[113]在其中 2 个源中探测到了非常微弱的射电辐射,但还有待进一步确认。关于在 XDINS 源没有探测到射电辐射的原因可能有以下几个:(1)射电辐射束非常窄,可能没有扫

过我们的视线; (2) 射电辐射很弱, 低于现有的射电望远镜的探测阈值; (3) 它们可能处于死亡线附近, 无法提供产生射电辐射所需的能量^[114]。综上所述, 对 XDINS 源射电辐射的探测需要如 FAST 望远镜那样的灵敏度极高的射电望远镜。

3.4 中心致密天体

中心致密天体 (CCO) 是指位于超新星遗迹中心附近的孤立中子星^[16]。观测上, CCO 主要有三个性质: (1) 附近不存在脉冲星星风云, 但存在超新星遗迹, 估算的年龄大约为几千年; (2) 有相对稳定的热 X 射线辐射, 光度约为 $10^{26} \sim 10^{27} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 大于自身的能损率 \dot{E} , 且没有射电和光学辐射; (3) 磁场比较低, 在 $10^6 \sim 10^7 \text{ T}$ 之间^[115-117]。目前已经发现约 10 颗 CCO, 其中有 3 颗已被测出了自转周期 (周期介于常规和毫秒脉冲星之间) 和磁场^[118, 119], 它们分别是位于超新星遗迹仙后座 A 中心附近的 1E 1207.4-5209 ($P = 424 \text{ ms}$)、超新星遗迹船尾座 A 中心附近的 RX J0822.0-4300 ($P = 112 \text{ ms}$) 和超新星遗迹 Kes 79 内中心附近的 CXOU J185238.6+004020 ($P = 105 \text{ ms}$)^[120-122]。由图 1 可看出, 这 3 颗 CCO 主要分布在银盘附近。

CCO 的热 X 射线辐射光谱为黑体谱, 温度在 $0.2 \sim 0.5 \text{ keV}$ 之间^[22]。这可能是由于中子星冷却导致的。假设它们表面的大气由 H 组成, 通过计算得出, 其辐射区域的半径小于 1 km , 而其低磁场的性质并不支持产生如此小的辐射区域^[7, 123]。如果其大气层由重元素 C 等组成, 那么可以得出与理论相符的结果。但重元素的来源并不十分清楚, 可能是从附近的物质吸积获得的^[124]。此外, 其热辐射也可能是由于它们对残留盘的吸积造成的^[16]。观测上, 在部分 CCO 的光谱中发现了吸收线, 例如在 1E 1207.4-5209 的光谱中发现了 0.7 keV , 0.14 keV , 0.21 keV 和 0.28 keV 吸收线^[125], 在 J0822.0-4300 的光谱中发现了 0.8 keV 吸收线^[16]。据此得出的磁场与理论预测的一致。

CCO 因其磁场较弱 (仅为 $10^6 \sim 10^7 \text{ T}$) 而被称为反磁星^[126]。关于其弱磁场的形成原因主要有两种解释: (1) CCO 诞生时磁场就比较弱; (2) 诞生时磁场和常规中子星一样, 但经过演化后磁场减弱^[119]。如果它们在诞生时其磁场就弱, 那么其数量应该非常少。但是 de Luca^[115] 和 Halpern 等人^[116] 的研究指出, 银河系中存在较多 CCO, 从而否定了第一种解释。目前关于其磁场的研究已经取得了一些进展, 例如: Shabaltas 和 Lai^[127] 认为它们拥有较强的环向磁场, 并基于此构建模型, 成功解释了 Kes 79 的观测现象; Gotthelf 和 Halpern^[16] 认为其拥有强的径向磁场, 从而解释了 CCO 具有较小的辐射区域; Viganò 和 Pons^[128] 认为, 超新星爆发残留物的回落可导致 CCO 的磁场变弱, 在此过程中它们大约吸积 $10^{-3} M_{\odot}$ 的物质; Luo 等人^[117] 通过对回落物掩埋模型的模拟认为, 大约经过 10^5 a 之后, 其表面的磁场可以恢复到原来的水平。

CCO 中可能有一部分是磁星, 目前有 2 颗候选体: CXOU J2323 和 1E 161348-5055。CXOU J2323 可能是处于休眠状态的磁星。Krause 等人^[129] 通过观测认为, CXOU J2323 曾经产生过巨大的耀发, 其光度达到 $2 \times 10^{39} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$, 类似于 SGR。它的性质也与处于宁静时期的 AXP 或低光度的 SGR 相似, 但是目前还没有直接的观测证据。1E 161348-5055 可能是制动磁星, 它的周期约为 6.67 h , 光度和辐射流量等参数会随着时间的改变而发生周期性的变化^[130]。除了较长的周期外, 1E 161348-5055 的其他性质与 AXP 非常相似。可能存在特殊

的制动方式, 导致它的自转速度变得很慢。

CCO 很可能起源于双星系统。通过对超新星遗迹 G353.6-0.7 的观测, Doroshenko 等人^[131]推测, 此遗迹内的后渐近支巨星 (post-asymptotic giant branch star) 与该 CCO 的前身星曾经处于双星系统中, 它们由于超新星爆发而分离。这是目前所发现的唯一支持 CCO 起源于双星系统的证据。此外 CCO 与其附近的超新星遗迹是否成协需要更仔细的研究。对此问题的探索很可能会开辟 CCO 研究的新篇章。

3.5 γ 射线脉冲星

随着康普顿太空望远镜和费米 γ 射线太空望远镜等 γ 射线望远镜的相继投入使用^[17, 18], 对脉冲星的研究取得了巨大进步。人们不仅观测到了脉冲星的 γ 射线辐射 (如蟹云脉冲星), 而且还发现了新种类的脉冲星 (如射电宁静 γ 射线脉冲星), 这对脉冲星物理研究至关重要。因目前的 γ 射线脉冲星主要是由费米 γ 射线太空望远镜探测得到的, 所以也称为费米脉冲星。到目前为止, 已经发现了 205 颗费米脉冲星^[17, 18, 66, 132], 其中毫秒脉冲星 92 颗, 脉冲星双星 73 颗, 射电宁静费米脉冲星 63 颗。这些脉冲星的周期主要分布在 1.56 ~ 620.35 ms 之间, 磁场为 $8.23 \times 10^3 \sim 4.06 \times 10^9$ T (图 2)。它们在银河系中分布弥散 (图 1)。费米脉冲星可以分为三类: 毫秒费米脉冲星、射电宁静 (young radio quiet) 费米脉冲星和射电噪 (young radio loud) 费米脉冲星。它们拥有一些非常奇特的性质, 如: (1) 部分源表现为射电宁静; (2) 脉冲轮廓特殊, 如射电延迟, 两个分离的峰等; (3) 毫秒脉冲星所占的比例较大。

射电宁静费米脉冲星是指在 1400 MHz 处射电流量密度低于 $30 \mu\text{Jy}$ 的年轻费米脉冲星^[66]。大部分射电宁静费米脉冲星的能损率在 $10^{26} \sim 10^{28} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 且随着能损率的增加, 其数量呈减少的趋势。统计发现, 费米脉冲星中, 能损率 $\dot{E} > 10^{30} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$ 的 9 颗脉冲星中, 只有 1 颗是射电宁静的。Watters 和 Romani^[133]认为, 费米脉冲星的波束演化可以用于解释射电宁静现象。他们认为, 脉冲星的射电辐射产生在极冠附近, 而 γ 射线辐射产生在光束圆柱的磁层附近。较年轻的费米脉冲星可能拥有较大的磁倾角, 从而导致射电辐射和 γ 射线辐射都能被探测到。随着时间的演化, 脉冲星的磁倾角逐渐减小, 趋于与自转轴平行^[134], 导致射电波束与 γ 射线波束逐渐分开, 从而使得射电波束不能被探测到, 这样, 人们就观测到了射电宁静的费米脉冲星。还有另一种解释是, 对于能损率比较高的脉冲星, 射电束和 γ 射线束都位于磁层较高的地方, 而且它们的辐射覆盖范围也类似。能损率比较低的脉冲星的射电产生位置迁移到星体表面, 导致射电束的覆盖范围变小, 因此射电宁静脉冲星的数量也就相应的比较多^[135]。此外, 几乎所有的毫秒费米脉冲星都拥有射电辐射, 这也是一个值得探索的问题。

费米脉冲星的脉冲轮廓非常特殊, 部分表现为在射电主峰之后出现两个尖锐的 γ 射线峰 (分别为 P_1 和 P_2), 其峰高度的比值 P_1/P_2 随着能量的增加而增大。还有一些脉冲星的光变曲线在 P_1 和 P_2 峰之间存在第三个峰, 该峰的相位会随着能量的变化而移动。此外, 毫秒费米脉冲星与年轻费米脉冲星的光变曲线的轮廓有一定的差别。部分射电费米脉冲星的射电峰与 P_1 峰之间存在延迟 δ , 这是多波段观测的一个重大发现。通常毫秒费米脉冲星要比年轻费米脉冲星的射电延迟 δ 大一些。一般认为射电辐射来自脉冲星极冠, 而 γ 射线辐射来自磁层^[66, 136]。对于某些年轻的费米脉冲星, δ 与两个相邻 γ 射线峰之间的间隔 Δ 具有反相关的

联系^[137], 而对于毫秒费米脉冲星和单峰的年轻费米脉冲星, 这种联系则不明显。目前脉冲星的辐射模型还不完善, 有些脉冲星符合多种模型, 而有些则不符合任何一种^[25]。费米脉冲星如此丰富的光变曲线性质对脉冲星的几何结构和辐射等问题的研究起到了推动作用。

γ 射线探测比射电探测更容易发现能损率较高、自转较快的脉冲星, 如毫秒脉冲星。而射电观测具有更高的分辨率, 可以对费米 γ 射线太空望远镜盲搜探测到的不确定位置的源进行精确测定^[138], 还可以重点观测射电宁静的费米脉冲星, 这对揭开其辐射机制至关重要。总之, 这两种不同的观测方式得到的脉冲星样本之间通过互相引导、验证、互补, 可以减少选择效应带来的偏差, 从而获得更完整的数据, 极大地促进脉冲星研究的进步。

4 总结和展望

经过 50 年的发展, 关于脉冲星的研究已经取得了丰富的成果。表 1 是关于各类特殊脉冲星的简要统计结果。随着观测仪器的不断进步, 所发现的脉冲星数量、种类和性质越来越丰富, 相应的理论研究也在逐步前进。但是仍有一些基础的问题没有解决, 例如脉冲星的磁场和辐射机制、真实年龄以及演化等问题。

表 1 各类特殊脉冲星统计结果

类别	数量	P	B/T	分布范围
RRAT	110	125.23 ms ~ 7.71 s	$1.67 \times 10^7 \sim 5.01 \times 10^9$	弥散
间歇脉冲星	5	0.31 ~ 0.91 s	$9.2 \times 10^7 \sim 5.7 \times 10^8$	主要集中在银盘附近
态转换 X 射线脉冲星	3	1.69 ~ 3.93 ms	约 10^4	弥散
磁星	29	2.07 ~ 11.79 s	$6.10 \times 10^8 \sim 2.00 \times 10^{11}$	主要集中在银盘附近
XDINS	7	3.45 ~ 11.37 s	$9.88 \times 10^8 \sim 3.44 \times 10^9$	弥散
CCO	10	105 ~ 424 ms	$10^6 \sim 10^7$	主要集中在银盘附近
γ 射线脉冲星	205	1.56 ~ 620.35 ms	$8.23 \times 10^3 \sim 4.06 \times 10^9$	弥散

人们对脉冲星磁场的结构还不清楚, 可假设为磁偶极结构, 但这只是一个理想化的模型^[139]。此外, 不同类型脉冲星的磁场结构不尽相同, 如磁星可能存在局部强磁场, 而不一定是强的偶极磁场。因对其磁场结构缺乏了解, 进而导致其辐射机制研究的困难, 这方面的研究至今未取得重大突破。

脉冲星的年龄通常用特征年龄表示^[4], 但是它只能作为脉冲星年龄的上限, 例如: 蟹云脉冲星的真实年龄约为 960 a, 特征年龄约为 1 200 a。另一种脉冲星年龄估算方法是运动学年龄法^[140, 141]。运动学年龄是指脉冲星诞生在银道面上, 以其自行速度运动到现在的位置所需要的时间。用这种方法估算的年龄, 对于年轻的脉冲星, 与真实年龄符合得比较好, 而对于老年脉冲星, 则误差比较大。此外还有一些其他测量脉冲星年龄的方法, 但由于这些方法的要求比较苛刻, 或者准确性很差, 所以无法广泛使用, 仅可以与特征年龄或运动学年龄互相验证, 例如: 对于附近存在超新星遗迹的脉冲星, 可以通过研究与其成协的超新星遗迹的大小、辐射和动力学演化估计其年龄, 或者像蟹云脉冲星一样, 因直接观测到超新星爆发而

得到准确年龄。

目前超新星遗迹已观测到约 400 个, 拥有超新星遗迹的脉冲星约 100 颗。这对前人所推测的脉冲星的诞生率提出了挑战^[142]。此外, 不同类别的脉冲星之间存在一定的演化关系。毫秒脉冲星主要存在于低质量 X 射线双星 (low mass X-ray binary, LMXB) 中, 一般认为它们的低磁场是由于吸积造成的。LMXB 的伴星存活寿命比较长, 吸积时间也比较长, 所以 LMXB 内的脉冲星周期较短, 磁场比较弱; 而高质量 X 射线双星 (high mass X-ray binary, HMXB) 的伴星存活时间较短, 相应的吸积时间也较短, 所以 HMXB 内的脉冲星周期相对较长, 磁场较强, 这是吸积理论的有力证明。但是, 人们尚不能确定其磁场的恢复时间, 此外, 孤立毫秒脉冲星的存在也没有得到很好的解释。磁星与弱 X 射线孤立脉冲星的分布位置也存在重合。弱 X 射线孤立脉冲星真的是老年磁星吗? RRAT 的分布区域与射电脉冲星并没有非常明显的区别, 为什么 RRAT 的射电辐射如此特殊? 部分 γ 射线脉冲星的周围存在超新星遗迹, 年轻的脉冲星是否更容易产生高能辐射? 此外, 关于 CCO 的起源问题也没有得到很好解决。总之, 关于各类脉冲星之间的演化关系还需要进一步探索。

值得期待的是, FAST 望远镜等高性能射电望远镜将要投入使用^[143, 144]。通过其未来的巡天观测, 人们将可能发现大量新的脉冲星, 还可以针对不同种类的脉冲星进行重点观测。这将推动脉冲星研究的进步, 如: (1) 通过对毫秒脉冲星和脉冲星双星的搜寻, 很可能发现自转超快的亚毫秒脉冲星或脉冲星-黑洞系统; (2) 可以重点对射电宁静的磁星和射电宁静的 γ 射线脉冲星进行探测; (3) 其巡天观测将不仅会使自转型射电暂现源和间歇脉冲星数量显著增长, 而且还可望获得更精细的脉冲结构, 这对解释其射电辐射至关重要。

致谢

我们感谢澳大利亚国立天文台 (Australia Telescope National Facility, ATNF)、美国斯坦福大学 γ 射线脉冲星数据库和加拿大麦吉尔大学磁星数据库等为我们提供大量的资料。我们也感谢王维扬同学的讨论。最后我们非常感谢审稿人和编辑部, 他们对本文质量的提升提供了非常大的帮助。

参考文献:

- [1] Manchester R N, Hobbs G B, Teoh A, et al. *AJ*, 2005, 129: 1993
- [2] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. *Nature*, 1968, 217: 709
- [3] Hulse R A, Taylor J H. *ApJ*, 1975, 195: L51
- [4] Lyne A, Graham-Smith F. *Pulsar Astronomy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012: 1
- [5] Lorimer D R, Kramer M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012: 7
- [6] Giacconi R, Gursky H, Kellogg E, et al. *ApJ*, 1971, 167: L67
- [7] Harding A K. *Frontiers of Physics*, 2013, 8: 679
- [8] Kramer M, Lyne A G, O'Brien J T, et al. *Science*, 2006, 312: 549
- [9] McLaughlin M A, Lyne A G, Lorimer D R, et al. *Nature*, 2006, 439: 817
- [10] Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. *Nature*, 1982, 300: 615

-
- [11] Archibald A M, Stairs I H, Ransom S M, et al. *Science*, 2009, 324: 1411
- [12] Bassa C G, Patruno A, Hessels J W T, et al. *MNRAS*, 2014, 441: 1825
- [13] Patruno A, Archibald A M, Hessels J W T, et al. *ApJ*, 2014, 781: L3
- [14] Olausen S A, Kaspi V M. *ApJS*, 2014, 212: 6
- [15] Voges W, Aschenbach B, Boller T, et al. *IAU Circ*, 1996, 6420: 2
- [16] Gotthelf E V, Halpern J P. *40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More*, 2008, 983: 320
- [17] Hartman R C, Bertsch D L, Bloom S D, et al. *ApJS*, 1999, 123: 79
- [18] Abdo A A, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJS*, 2010, 187: 460
- [19] Manchester R N. *IAU Joint Discussion*, 2006, 2: 28
- [20] Beskin V S, Chernov S V, Gwinn C R, et al. *Space Sci Rev*, 2015, 191: 207
- [21] Lorimer D R. *Living Reviews in Relativity*, 2008, 11: 8
- [22] Mereghetti S. *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 2011, 21: 345
- [23] Kaspi V M, Beloborodov A M. *ARA&A*, 2017, 55: 261
- [24] Turolla R, Zane S, Watts A L. *Reports on Progress in Physics*, 2015, 78: 116901
- [25] Caraveo P A. *ARA&A*, 2014, 52: 211
- [26] Manchester R N, Lyne A G, Camilo F, et al. *MNRAS*, 2001, 328: 17
- [27] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. *ApJ*, 2007, 670: 363
- [28] Boyles J, Lynch R S, Ransom S M, et al. *ApJ*, 2013, 763: 80
- [29] Bigg J D, Lyne A G. *MNRAS*, 1992, 254: 257
- [30] Ginzburg V L, Syrovatskii S I. *ARA&A*, 1965, 3: 297
- [31] Ginzburg V L, Syrovatskii S I. *ARA&A*, 1969, 7: 375
- [32] Ruderman M A, Sutherland P G. *ApJ*, 1975, 196: 51
- [33] Qiao G J, Lin W P. *A&A*, 1998, 333: 172
- [34] Shang L H, Lu J G, Du Y J, et al. *MNRAS*, 2017, 468: 4389
- [35] Wang N, Manchester R N, Johnston S. *MNRAS*, 2007, 377: 1383
- [36] Keane E F, Kramer M, Lyne A G, et al. *MNRAS*, 2011, 415: 3065
- [37] Deneva J S, Cordes J M, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2009, 703: 2259
- [38] Shitov Y P, Kuzmin A D, Dumskii D V, et al. *Astronomy Reports*, 2009, 53: 561
- [39] Burke-Spolaor S, Bailes M. *MNRAS*, 2010, 402: 855
- [40] Keane E F, Ludovici D A, Eatough R P, et al. *MNRAS*, 2010, 401: 1057
- [41] Burke-Spolaor S, Bailes M, Johnston S, et al. *MNRAS*, 2011, 416: 2465
- [42] Cui B Y, Boyles J, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2017, 840: 5
- [43] Knight H S. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement*, 2006, 6: 41
- [44] Li X D. *ApJ*, 2006, 646: L139
- [45] Cordes J M, Shannon R M. *ApJ*, 2008, 682: 1152
- [46] Luo Q, Melrose D. *MNRAS*, 2007, 378: 1481
- [47] Lyne A G, McLaughlin M A, Keane E F, et al. *MNRAS*, 2009, 400: 1439
- [48] Hu H D, Esamdin A, Yuan J P, et al. *A&A*, 2011, 530: A67
- [49] Lyne A G, Stappers B W, Freire P C C, et al. *ApJ*, 2017, 834: 72
- [50] Lorimer D R, Lyne A G, McLaughlin M A, et al. *ApJ*, 2012, 758: 141
- [51] Camilo F, Ransom S M, Chatterjee S, et al. *ApJ*, 2012, 746: 63
- [52] Timokhin A N. *MNRAS*, 2010, 408: L41
- [53] Kalapotharakos C, Kazanas D, Harding A, et al. *ApJ*, 2012, 749: 2
- [54] Li J, Spitkovsky A, Tchekhovskoy A. *ApJ*, 2012, 746: L24
- [55] Melrose D B, Yuen R. *MNRAS*, 2014, 437: 262
- [56] Szary A, Melikidze G I, Gil J. *MNRAS*, 2015, 447: 2295
- [57] Huang L, Yu C, Tong H. *ApJ*, 2016, 827: 80
- [58] Akgün T, Link B, Wasserman I. *MNRAS*, 2006, 365: 653
- [59] Jones D I. *MNRAS*, 2012, 420: 2325

-
- [60] Stairs I H, Lyne A G, Shemar S L. *Nature*, 2000, 406: 484
- [61] Rea N, Kramer M, Stella L, et al. *MNRAS*, 2008, 391: 663
- [62] Seymour A D, Lorimer D R. *MNRAS*, 2013, 428: 983
- [63] Cordes J M. *ApJ*, 2013, 775: 47
- [64] Li L, Tong H, Yan W M, et al. *ApJ*, 2014, 788: 16
- [65] Turolla R. *Astrophysics and Space Science Library*, 2009, 357: 141
- [66] Abdo A A, Ajello M, Allafort A, et al. *ApJS*, 2013, 208: 17
- [67] Bogdanov S, Patruno A, Archibald A M, et al. *ApJ*, 2014, 789: 40
- [68] Roy J, Ray P S, Bhattacharyya B, et al. *ApJ*, 2015, 800: L12
- [69] Papitto A, Ferrigno C, Bozzo E, et al. *Nature*, 2013, 501: 517
- [70] Pallanca C, Dalessandro E, Ferraro F R, et al. *ApJ*, 2013, 773: 122
- [71] Linares M, Bahramian A, Heinke C, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 251
- [72] Archibald A M, Bogdanov S, Patruno A, et al. *ApJ*, 2015, 807: 62
- [73] Wang Z, Archibald A M, Thorstensen J R, et al. *ApJ*, 2009, 703: 2017
- [74] de Martino D, Casares J, Mason E, et al. *MNRAS*, 2014, 444: 3004
- [75] Archibald A M, Kaspi V M, Bogdanov S, et al. *ApJ*, 2010, 722: 88
- [76] de Martino D, Falanga M, Bonnet-Bidaud J -M, et al. *A&A*, 2010, 515: A25
- [77] Deller A T, Moldon J, Miller-Jones J C A, et al. *ApJ*, 2015, 809: 13
- [78] Saitou K, Tsujimoto M, Ebisawa K, et al. *PASJ*, 2009, 61: L13
- [79] Coti Zelati F, Campana S, D'Avanzo P, et al. *MNRAS*, 2014, 438: 2634
- [80] Li K L, Kong A K H, Takata J, et al. *ApJ*, 2014, 797: 111
- [81] Stappers B W, Archibald A M, Hessels J W T, et al. *ApJ*, 2014, 790: 39
- [82] Takata J, Li K L, Leung G C K, et al. *ApJ*, 2014, 785: 131
- [83] Papitto A, Torres D F. *ApJ*, 2015, 807: 33
- [84] Papitto A, Torres D F, Li J. *MNRAS*, 2014, 438: 2105
- [85] Zavlin V E. *Ap&SS*, 2007, 308: 297
- [86] Acero F, Ackermann M, Ajello M, et al. *ApJS*, 2015, 218: 23
- [87] Gavriil F P, Gonzalez M E, Gotthelf E V, et al. *Science*, 2008, 319: 1802
- [88] Lamb R C, Fox D W, Macomb D J, et al. *ApJ*, 2002, 574: L29
- [89] Mazets E P, Golenetskij S V, Guryan Y A. *Soviet Astronomy Letters*, 1979, 5: 641
- [90] Beloborodov A M, Li X. *ApJ*, 2016, 833: 261
- [91] Cline T L, Desai U D, Pizzichini G, et al. *ApJ*, 1980, 237: L1
- [92] Hurley K, Li P, Kouveliotou C, et al. *ApJ*, 1999, 510: L111
- [93] Palmer D M, Barthelmy S, Gehrels N, et al. *Nature*, 2005, 434: 1107
- [94] Woods P M, Thompson C. *Compact Stellar X-ray Sources*, 2006, 39: 547
- [95] Kaspi V M, Gavriil F P, Woods P M, et al. *ApJ*, 2003, 588: L93
- [96] Camilo F, Ransom S M, Halpern J P, et al. *Nature*, 2006, 442: 892
- [97] Camilo F, Ransom S M, Halpern J P, et al. *ApJ*, 2007, 666: L93
- [98] Levin L, Bailes M, Bates S, et al. *ApJ*, 2010, 721: L33
- [99] Rea N, Esposito P, Pons J A, et al. *ApJ*, 2013, 775: L34
- [100] van der Horst A J, Connaughton V, Kouveliotou C, et al. *ApJ*, 2010, 711: L1
- [101] Livingstone M A, Scholz P, Kaspi V M, et al. *ApJ*, 2011, 743: L38
- [102] Bogomazov A I, Tutukov A V. *Astronomy Reports*, 2009, 53: 214
- [103] Viganò D, Rea N, Pons J A, et al. *MNRAS*, 2013, 434: 123
- [104] Pan Y Y, Song L M, Zhang C M, et al. *MNRAS*, 2016, 461: 2
- [105] Haberl F. *Ap&SS*, 2007, 308: 181
- [106] Kaplan D L, Kamble A, van Kerkwijk M H, et al. *ApJ*, 2011, 736: 117
- [107] Wang W, Lu J, Tong H, et al. *ApJ*, 2017, 837: 81
- [108] Tong H. *Science China: Physics, Mechanics, and Astronomy*, 2016, 59: 5752

- [109] Posselt B, Pavlov G G, Popov S, et al. *ApJS*, 2014, 215: 3
- [110] Xu R X, Bastrukov S I, Weber F, et al. *Phys Rev D*, 2012, 85: 023008
- [111] de Vries C P, Vink J, Méndez M, et al. *A&A*, 2004, 415: L31
- [112] Heyl J S, Kulkarni S R. *ApJ*, 1998, 506: L61
- [113] Malofeev V M, Malov O I, Teplykh D A. *Ap&SS*, 2007, 308: 211
- [114] Ertan Ü, Çalışkan Ş, Benli O, et al. *MNRAS*, 2014, 444: 1559
- [115] de Luca A. *40 Years of Pulsars: Millisecond Pulsars, Magnetars and More*, 2008, 983: 311
- [116] Halpern J P, Gotthelf E V. *ApJ*, 2010, 709: 436
- [117] Luo J, Ng C Y, Ho W C G, et al. *ApJ*, 2015, 808: 130
- [118] Pavlov G G, Sanwal D, Teter M A. *Young Neutron Stars and Their Environments*, 2004, 218: 239
- [119] Ho W C G. *Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years*, 2013, 291: 101
- [120] Zavlin V E, Pavlov G G, Sanwal D, et al. *ApJ*, 2000, 540: L25
- [121] Gotthelf E V, Halpern J P. *ApJ*, 2009, 695: L35
- [122] Gotthelf E V, Halpern J P, Seward F D. *ApJ*, 2005, 627: 390
- [123] Zavlin V E, Pavlov G G, Shibano Y A, et al. *A&A*, 1995, 297: 441
- [124] Ho W C G, Heinke C O. *Nature*, 2009, 462: 71
- [125] Bignami G F, Caraveo P A, De Luca A, et al. *Nature*, 2003, 423: 725
- [126] Gotthelf E V, Halpern J P, Alford J. *ApJ*, 2013, 765: 58
- [127] Shabaltas N, Lai D. *ApJ*, 2012, 748: 148
- [128] Viganò D, Pons J A. *MNRAS*, 2012, 425: 2487
- [129] Krause O, Rieke G H, Birkmann S M, et al. *Science*, 2005, 308: 1604
- [130] De Luca A, Caraveo P A, Mereghetti S, et al. *Science*, 2006, 313: 814
- [131] Doroshenko V, Pühlhofer G, Kavanagh P, et al. *MNRAS*, 2016, 458: 2565
- [132] Ackermann M, Ajello M, Atwood W B, et al. *ApJ*, 2015, 810: 14
- [133] Watters K P, Romani R W. *ApJ*, 2011, 727: 123
- [134] Young M D T, Chan L S, Burman R R, et al. *MNRAS*, 2010, 402: 1317
- [135] Ravi V, Manchester R N, Hobbs G. *ApJ*, 2010, 716: L85
- [136] Hou X, Smith D A, Reposeur T, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2014, 335: 334
- [137] Romani R W, Yadigaroglu I A. *ApJ*, 1995, 438: 314
- [138] Guillemot L. *Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years*, 2013, 291: 87
- [139] Shapiro S L, Teukolsky S A. *Black Holes, White Dwarfs and Neutron Star*. New York: Wiley, 1983: 277
- [140] Hansen B M S, Phinney E S. *MNRAS*, 1997, 291: 569
- [141] Noutsos A, Schnitzeler D H F M, Keane E F, et al. *MNRAS*, 2013, 430: 2281
- [142] Keane E F, Kramer M. *MNRAS*, 2008, 391: 2009
- [143] Li D. *IAU General Assembly*, 2015, 22: 2251846
- [144] Nan R, Li D, Jin C, et al. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20: 989

Research Progress on the Special Types of Pulsars

WANG Shuang-qiang^{1,2}, WANG Na^{1,7}, ZHANG Cheng-min^{2,3,7,8},
LI Di^{3,7,8}, SHANG Lun-hua^{2,3,4}, WANG De-hua^{4,8},
PAN Yuan-yue⁵, YANG Yi-yan⁶, YUE You-ling^{3,7,8}

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Astronomical Observatory,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 4. Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China; 5. Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 6. Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 7. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China; 8. Guizhou Provincial Key Laboratory of Radio Astronomy and Data Processing, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: Neutron stars are the remnants of massive stars whose cores collapse during the supernova explosions at the end of their lifetimes. Research of them have provided applications in astrophysics, particle physics, astrometry and even navigation. Great progress has been made in the study of pulsars since it was discovered in 1967. The properties of pulsars are very abundant and they were detected in radio, X-ray and γ -ray bands, and they can be divided into different types according to their properties. In this paper, we reviewed the basic properties and the research progress of different type of pulsars, including rotating radio transients and intermittent pulsars in radio waveband, binary pulsars, millisecond pulsars, magnetars, X-ray dim isolated neutron stars, central compact objects and γ -ray pulsars in X-ray and γ -ray wavebands.

Key words: neutron star; pulsar; radio pulsar; X-ray pulsar; γ -ray pulsar