



过渡毫秒脉冲星及候选体的射电脉冲搜寻

彭龙^{1, 2, 3}, 李兆升¹, 潘元月¹, 潘之辰², 王双强^{3, 4*}, 王娜^{3, 4}

1. 湘潭大学物理与光电工程学院, 星际介质与恒星重点实验室, 湘潭, 411105;

2. 中国科学院, 国家天文台, 北京, 100012;

3. 中国科学院, 新疆天文台, 乌鲁木齐, 830011;

4. 中国科学院, 射电天文学重点实验室, 乌鲁木齐, 830011;

* 联系人, E-mail: wangshuangqiang@xao.ac.cn

收稿日期: 20XX-XX-XX; 接受日期: 20XX-XX-XX;

国家重点基础研究发展计划 (编号: 2022YFC2205202) 资助项目

摘要 毫秒脉冲星在不同演化阶段展现出多样的辐射特性. 研究过渡毫秒脉冲星的射电辐射现象, 对于理解毫秒脉冲星的形成机制及其演化路径具有重要意义. 本文使用 500 米口径球面射电望远镜观测过渡毫秒脉冲星 PSR J1023+0038 和候选体 3FGL J1544.6-1125, 并开展射电脉冲辐射搜寻. 搜寻结果表明两者均未检测到显著的射电脉冲辐射, 流量密度上限分别限制在 $6.5 \mu\text{Jy}$ 和 $5.3 \mu\text{Jy}$, 研究结果表明这两颗源当前可能仍处于吸积供能状态.

关键词 脉冲星, 中子星, 脉冲星搜寻, 脉冲星辐射

PACS: 97.60.Gb, 97.80.Jp, 95.85.Bh

1 引言

脉冲星被认为是快速自转的中子星, 其典型质量为 $1.4 M_{\odot}$, 半径约 10–12 km, 磁场强度通常为 10^8 – 10^{15} G [1]. 脉冲星是开展基础物理实验的宝贵研究对象, 可以用于开展引力理论检验 [2], 约束致密物质状态方程 [3] 以及探测纳赫兹引力波 [4]. 脉冲星按自转周期可分为常规脉冲星 (周期通常大于 30 毫秒) 和毫秒脉冲星 (周期通常小于 30 毫秒). 1967 年, Hewish 和 Bell 在射电波段首次发现脉冲星 PSR B1919+21, 自转周期为 1.3373 s [5].

1982 年, 通过更高时间采样的观测, 首颗毫秒脉冲星 PSR B1937+21 (周期 1.6 ms) 才得以发现 [6]. 相较常规脉冲星, 毫秒脉冲星具有更弱磁场、更大特征年龄及更快自转 [7]. 循环再生理论认为毫秒脉冲星由低质量 X 射线双星演化而来 [8,9]. 低质量 X 射线双星通常由中子星和质量低于 $1 M_{\odot}$ 的恒星组成. 在该系统中, 中子星通过洛希瓣溢流从伴星吸积物质并获得角动量 [10], 吸积过程导致中子星磁场衰减和自转加速, 最终演化为一颗年老的毫秒脉冲星. 由于毫秒脉冲星具有良好的守时性, 通过长期监测多颗毫秒脉冲星的脉冲到达时间, 即脉冲星测

引用格式: 彭龙.

. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 50: 013002, doi: ??

Long Peng.

(in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 50: 013002, doi: ??

时阵, 可以用于探测纳赫兹引力波^[11]. 目前脉冲星测时阵是探测纳赫兹引力波的唯一手段.

1998 年发现了毫秒脉冲星循环再生理论的首个观测证据, 罗西 X 射线时变探测器首次在低质量 X 射线双星系统 SAX J1808.4–3658 中探测到主星的自转周期, 约为 2.49 ms^[12], 证实毫秒脉冲星可以产生于低质量 X 射线双星系统. 因此, SAX J1808.4–3658 被称为吸积 X 射线毫秒脉冲星. 更有力的证据来自过渡毫秒脉冲星的发现. 这类特殊天体被观测到能够在旋转供能 (射电脉冲星态) 和吸积供能 (低质量 X 射线双星态) 两种状态之间相互转变, 即态转换. 目前已确认 PSR J1023+0038、XSS J12270–4859 和 IGR J18245–2452 三个样本^[13–15]. 其中, 前两颗源的态转换需要数年, 而位于球状星团 M28 的 IGR J18245–2452 则在几周内完成了态转换: 经历一个月 X 射线爆发后, 仅隔两周便转变为旋转供能态, 伴随 X 射线辐射的减弱和射电脉冲出现^[16].

PSR J1023+0038 是首个被证实在吸积供能和自转供能之间转换的过渡毫秒脉冲星. 2000 年 5 月, 该源首次被探测为一个可变射电源, 随后 2001 年的光谱分析以及光学对应体的光变曲线揭示了其吸积盘的存在^[17–19]. 2007 年, 该源被确认为一颗 1.67 ms 的射电毫秒脉冲星, 此时吸积盘已消失^[13]. 2013 年 6 月末, 吸积盘重新显现, 射电脉冲消失, 同时 X 射线、紫外以及伽马射线辐射显著增强^[20,21], 表明该系统已转换到低质量 X 射线双星态. 在低质量 X 射线双星态下, PSR J1023+0038 展现出独特的亚光度吸积盘特性, 存在两种稳定的 X 射线辐射状态: 高态 ($L_{2-10\text{keV}} \sim 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$, 时间占比约 80%) 和低态 ($L_{2-10\text{keV}} \sim 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$, 时间占比约 20%)^[22]. 模式切换的下降和上升时间尺度约为 10 秒, 模式通常持续几分钟到几小时, 并伴随间歇性耀发 ($L_{2-10\text{keV}} \sim 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$). 自 2013 年以来, PSR J1023+0038 一直处于低质量 X 射线双星态. 因此, 对 PSR J1023+0038 的射电观测有助于判断是否再次发生了态转换.

亚光度吸积盘特性在三颗过渡毫秒脉冲星都存在^[23], 是衡量候选过渡毫秒脉冲星的重要依据.

2015 年, 通过研究未识别的高能伽马射线源, 3FGL J1544.6–1125 被识别为吸积态的过渡毫秒脉冲星候选体^[24]. 此前十年的 X 射线和射电数据表明 3FGL J1544.6–1125 尚未转换到自转供能态, 维持在一个较低水平的吸积状态^[25]. 低 X 射线光度和亚光度吸积盘特性使得 3FGL J1544.6–1125 成为最有希望成为过渡毫秒脉冲星的候选系统.

本文将介绍我们使用 500 米口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST) 对 PSR J1023+0038 和 3FGL J1544.6–1125 的射电脉冲搜寻结果^[26]. 文章结构如下: 第 2 节介绍 FAST 数据的观测信息, 第 3 节介绍射电脉冲搜寻, 第 4 节介绍搜寻结果, 第 5 节讨论搜寻结果.

2 观测信息

表 1 观测源信息

Table 1 Informations of observation source .

源名	PSR J1023+0038	3FGL J1544.6–1125
赤经 RA (°)	155.95	236.06
赤纬 DEC (°)	0.64	-11.41
观测起始 MJD	60138.28	60136.52
观测时长 (hr)	0.75	1.22
轨道周期 (hr)	4.75	5.8
积分时间 (min)	23	36
自转频率 (hz)	591	716*
轨道投影半长轴 (lt-s)	0.34	0.23*
预估 z_{max}	53	64
流量密度上限 (μJy)	6.5	5.3

2023 年 7 月 11 日和 13 日, 我们使用 FAST 分别对 3FGL J1544.6–1125 和 PSR J1023+0038 进行了一次观测, 具体观测信息如表 1 所示. 这些观测采用 19 波束接收机的中心波束, 覆盖 1.05–1.45 GHz 的频率范围, 中心观测频率为 1.25 GHz. 观测系统采用 8 比特采样精度, 四种极化方式进行采样, 采样间隔为 49.152 μs , 频率通道数为 4096, 每个通道的带宽为 0.122 MHz^[27], 数据为 PSRFITS 格式^[28].

3 射电脉冲搜寻

我们使用基于 PRESTO¹⁾ [29] 设计的自动化处理流程 (pipeline²⁾ 进行脉冲信号搜寻, 该 pipeline 包括周期搜寻和单脉冲搜寻, 其整体工作流程如图1所示, 其中灰色方框中的步骤采用了多线程并行, 以提高搜寻效率. 下面我们将详细介绍周期搜寻和单脉冲搜寻的相关流程和参数设置.

3.1 去除射频干扰

我们使用 PRESTO 的 rfifind 程序在时域和频域中识别显著的射频干扰 (Radio Frequency Interference, RFI), 时间窗口参数设置为 0.1 s, 识别出包含 RFI 的频率通道记录在用于后续的搜寻的掩膜文件.mask 中 [30]. 此外, 色散值为 0 pc cm^{-3} 的显著周期信号也标记为 RFI, 后续在频域中去除.

3.2 消色散

不同频率的电磁波在星际介质中的传播速度不同, 这会导致脉冲信号产生色散现象. 对于不同频率 ν , 信号到达的延迟时间 t 为:

$$t = D \times \frac{DM}{\nu^2}, \quad (1)$$

其中 D 是色散常数, DM 为色散值. 色散值的定义为从脉冲源到地球的自由电子积分数:

$$DM = \int_0^d n_e dl, \quad (2)$$

其中 d 为脉冲源到地球的距离, n_e 为空间的电子密度. 据此, 可根据脉冲星距离与银河系电子密度模型估算其色散量. 目前比较广泛使用的银河系电子密度模型 YMW16³⁾ 估计 3FGL J1544.6-1125 的色散值为 24.3 pc cm^{-3} . PSR J1023+0038 在 PSRCAT⁴⁾ 脉冲星目录中的星历表的色散值

14.3 pc cm^{-3} [13]. 我们使用 ddplan 程序制定去色散方案, 该程序使用最大色散值和望远镜的参数给出最优的色散步长方案. 为覆盖可能存在的极端情况, 我们对这两颗源都采用了最大 $DM = 500 \text{ pc cm}^{-3}$, 制定的消色散方案如表2所示. 确定消色散方案后, 利用 prepsubband 程序进行消色散, 对两颗源各生成了多个不同色散值的时间序列. 在使用 realfft 程序对每个时序文件应用傅里叶变换后, 我们通过 rednoise 程序抑制低频红噪声, 并使用 zapbirds 程序在频域中去除零色散值时序中获取的 RFI, 随后使用 accelsearch 程序进行加速度搜索.

表 2 消色散方案

Table 2 De-dispersion plan.

Low-DM (pc cm^{-3})	High-DM (pc cm^{-3})	dDM (pc cm^{-3})	Nsteps
0.0	371.3	0.05	7426
371.3	500	0.1	1287

3.3 加速度搜索

在频域中, 周期性脉冲星信号的功率集中于基频及其谐波, 谐波叠加技术通过对这些分量的功率求和来增强信号响应. 值得注意的是, 在双星系统中, 加速度效应对高次谐波的影响往往大于基频. 导致更高次谐波叠加产生的计算开销成倍增加, 但实际增益有限. 为防止漏检潜在的真实脉冲信号, 我们最终叠加至 16 次谐波.

在双星系统中, 轨道运动产生的多普勒效应会导致脉冲信号的频率发生变化, 降低信号的可检测性. 加速度搜索采用一个常数的轨道加速度去近似双星轨道运动, 从而对傅里叶功率谱进行相应的补偿. $z_{\max}$ 参数定义了功率谱中最高次谐波的最大线性漂移量:

$$z_{\max} = \frac{a_{\max} t_{\text{int}}^2 f_0}{c}, \quad (3)$$

1) <https://github.com/scottransom/presto>

2) https://github.com/liangbingkaer/FAST_pulsar_search_pipeline

3) <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/ymw16/>

4) <https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

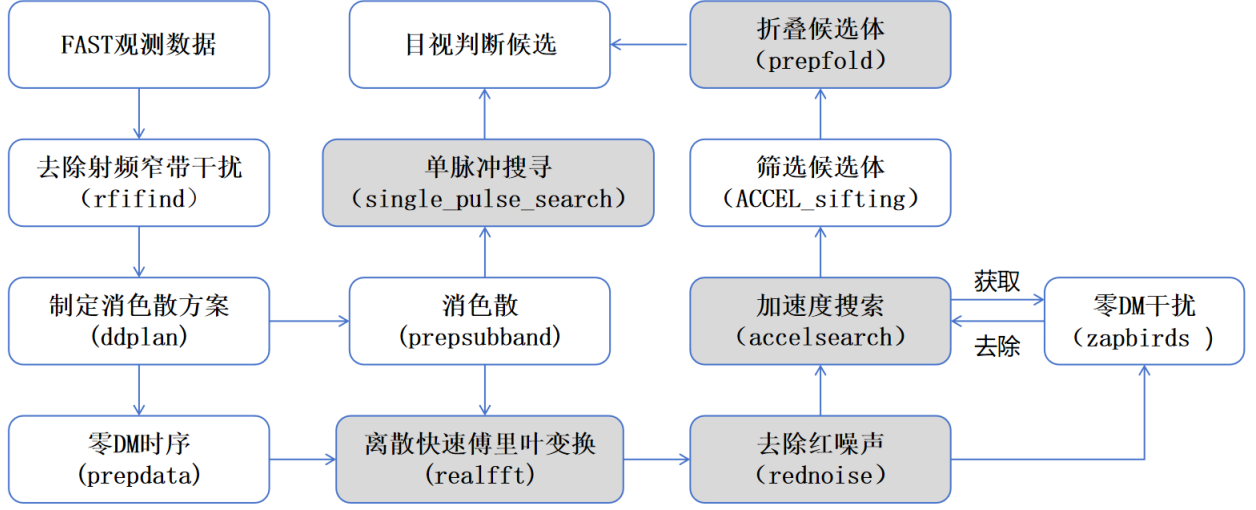


图 1 基于 PRESTO 进行脉冲星搜寻的流程图

Figure 1 Standard flow chart for pulsar search based on PRESTO.

其中 t_{int} 为积分时间, f_0 为脉冲星的自转频率, c 为光速, a_{max} 为脉冲星的最大轨道加速度, 可以由开普勒第三定律推导出:

$$a_{\text{max}} = \left(\frac{2\pi}{P_{\text{orb}}} \right)^2 xc, \quad (4)$$

其中 P_{orb} 为轨道周期, x 是轨道投影半长轴, 单位为光秒. 3FGL J1544.6-1125 的自转频率未知, 我们采用了预估值 (表 1 中用星号标注) 来计算 z_{max} 参数, 自转频率取目前发现的最快脉冲星的自转频率, 半长轴采用 Britt 等人给出的轨道参数约束的最大值 [31]. 在对两颗源进行搜寻时, 为了保留加速度搜索的灵敏度, 实际采用的积分时间约为轨道周期 10%, 并使用比预估值更大的 z_{max} 参数值 300.

3.4 筛选方法

我们采用两种方法筛选加速度搜索生成的候选体. 第一种为常规筛选方法, 使用 PRESTO 中的 ACCEL_sift.py 程序对候选集进行筛选. 第二种方法为 Jinglepulsar [5], 其筛选条件更为宽松, 能够探测到常规筛选可能遗漏的微弱信号 [32]. 基于脉冲

星的信号会在非零 DM 值处显示出信噪比峰值的色散特征, Jinglepulsar 按周期分组生成的诊断图能够有效评估候选体. 最终所有候选体的色散值和周期均基于原始数据进行折叠, 折叠结果经肉眼判断, 依据时域和频域信息、脉冲轮廓形状以及非零 DM 处显著峰值的存在来判断是否为脉冲信号.

3.5 单脉冲搜寻

有些脉冲星仅具有零星的脉冲辐射, 因此难以通过周期搜寻的方法识别, 例如旋转射电暂现源 [33], 需要使用单脉冲搜寻. 本质上, 单脉冲搜寻是一种匹配滤波操作, 使用一组宽度不同的矩形滤波器 (boxcar) 与时间序列进行卷积匹配. 由于实际脉冲的宽度未知, 为覆盖更宽脉冲, 我们使用最多 300 个采样点, 并记录所有信噪比 (signal to noise ratio, S/N) 超过 7 的阈值的脉冲事件.

单脉冲搜寻的 DM 步长和范围与周期性搜寻一致. 我们使用 PRESTO 提供的 single_pulse_search.py 程序识别出时序文件中大于阈值的单脉冲候选信号, 该阈值能有效降低 RFI 背景的干扰. 我们对所有生成的二维色散量时间图进

5) <https://github.com/jinglepulsar>

行逐一目视检查, 未发现显著的单脉冲候选体.

4 结论

在本研究的观测数据里, 周期搜寻未检测到脉冲信号. 我们使用如下的辐射计方程限制流量密度的上限:

$$S_{\min} = \frac{(S/N)\beta T_{\text{sys}}}{G(n_p t_{\text{int}} \Delta F)^{1/2}} \left(\frac{W}{P-W} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

其中, G 为望远镜增益, T_{sys} 为系统温度, n_p 为极化数, ΔF 为观测频率带宽, β 为采样效率, W 为脉冲宽度, P 为脉冲星自转周期, S/N 为检测所需的信噪比阈值. 对于 FAST 观测, 相关参数分别为 $G = 16 \text{ KJy}^{-1}$, $T_{\text{sys}} = 24 \text{ K}$, $n_p = 2$, $\beta = 1$, $S/N = 7$, $\Delta F = 400 \text{ MHz}$ [27]. 实际观测到的脉冲宽度取决于内禀脉冲宽度、星际散射以及单个频率信道内的展宽效应 [34], 这里我们使用毫秒脉冲星典型的脉冲占空比 $W = 0.3P$ 进行计算. PSR J1023+0038 和 3FGL J1544.6–1125 流量密度上限分别限制在 $6.5 \mu\text{Jy}$ 和 $5.3 \mu\text{Jy}$.

单脉冲的流量密度约束方程由公式(5)修改而来:

$$S_{\min} = \frac{(S/N)2\beta T_{\text{sys}}}{G(n_p W \Delta F)^{1/2}}, \quad (6)$$

来自同一颗脉冲星的单个脉冲通常不稳定, 表现出不同的宽度. 在假设 $W = 0.3P$ 的前提下, 估计的单脉冲流量密度上限约为 16 mJy . 由于单脉冲的不稳定性, 该上限具有很大的不确定性.

5 讨论

在我们之前, 已有多项工作搜寻 PSR J1023+0038 的射电辐射, 但均未找到显著的脉冲信号. 例如, Baglio 等人对 PSR J1023+0038 进行了多波段观测研究, 覆盖了从射电波段到 X 射线波段, 其在 2021 年共 2.8 小时的 FAST 观测数据没有探测到显著信号, 获得 1.25 GHz 的流量密度上限为 $2.5 \mu\text{Jy}$ [35]. 我们在 2023 年 7 月对该源使用 FAST 开展观测, 同样没有探测到脉冲信号, 结

果表明 PSR J1023+0038 仍处于低质量 X 射线双星态, 没有发现态转换的证据. 我们首次对 3FGL J1544.6–1125 开展了射电脉冲搜寻, 也未发现射电脉冲信号.

基于毫秒脉冲星的循环再生理论 [8,9], 我们推测 PSR J1023+0038 和 3FGL J1544.6–1125 当前仍处于低质量 X 射线双星态. 在该状态下, 射电脉冲辐射消失, 取而代之的是连续的射电辐射, 可能与系统中的喷流活动有关 [36]. Bogdanov 等人发现, PSR J1023+0038 的射电连续辐射与亚光度吸积盘状态下的 X 射线辐射呈现显著的反相关关系 [37]: 在 X 射线高态时, 射电连续辐射流量减弱; 而在系统转换至 X 射线低态后, X 射线脉冲消失, 射电连续辐射则迅速且明显增强. 值得注意的是, 射电连续辐射的流量变化发生在分钟量级, 而 X 射线和其他波段的变化则集中在秒级时间尺度内, 这表明射电喷流可能源自距离中子星较远的区域. 类似的 X 射线与射电反相关现象也在 3FGL J1544.6–1125 中被观测到 [38], 进一步支持喷流行为与吸积率变化密切相关的观点. 理论上, 过渡毫秒脉冲星的不同辐射态由三个关键半径的相对关系决定, 分别为共转半径 (R_{co})、磁层半径 (R_{m}) 和光速圆柱半径 (R_{lc}).

- 共转半径 (R_{co}): 物体在中子星引力作用下开普勒轨道运动角速度与中子星自转角速度相同的轨道半径;

$$R_{\text{co}} = 1683 m_{1.4}^{1/3} f_0^{-2/3} \text{ km}. \quad (7)$$

- 光速圆柱半径 (R_{lc}): 物体若与中子星同步自转, 其线速度等于光速所对应的圆柱面半径;

$$R_{\text{lc}} = c(2\pi f_0)^{-1} \approx 4800 f_0^{-1} \text{ km}. \quad (8)$$

- 磁层半径 (R_{m}): 磁场截断吸积盘的内边界半径.

$$R_{\text{m}} \approx 15.4 \xi_{0.5}^{4/7} \mu_{26}^{-2/7} \dot{m}_{16}^{-1/7} m_{1.4}^{-1/7} \text{ km}, \quad (9)$$

其中, $\xi_{0.5} = 0.5$ 代表阿尔文半径的截断分数, μ_{26} 是中子星的磁偶极矩, 单位为 $10^{26} \text{ G} \cdot \text{cm}^3$, $\dot{m}$ 是吸积率, 单位为 $10^{16} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, $m_{1.4}$ 是中子星的质量, 单位为 $1.4 M_{\odot}$.

在磁层半径处, 向内的吸积物质压力与向外的磁场压力达到平衡, 该平衡位置与吸积率密切相关. 当吸积率较高时, 磁层半径 R_m 小于共转半径 R_{co} , 系统表现为典型的低质量 X 射线双星态. 随着吸积率的降低, 系统进入螺旋桨态, 此时 $R_{co} < R_m < R_{lc}$, 由于离心力的作用, 大部分吸积物质无法到达中子星表面. 然而, 在该过程中, 仍有少量物质能够穿越磁层并落到中子星表面, 产生 X 射线脉冲辐射, 对应于亚光度吸积盘状态中的高 X 射线光度状态 [39]. 当吸积率进一步降低至 $R_m > R_{lc}$, 此时磁层将物质完全阻挡在光速圆柱之外, 脉冲星的电磁辐射驱逐剩余吸积物质, 形成射电喷出相态 [40], 对应于亚光度吸积盘状态中的低 X 射线光度状态. 尽管吸积已被完全抑制, 但喷出物仍可能环绕在系统附近, 在此状态下脉冲辐射可能被遮挡, 导致低频观测下射电脉冲信号仍然无法被探测到 [41]. 如果伴星继

续减少物质供应, 系统周围的物质最终被脉冲星辐射完全清除, 此时射电脉冲信号被探测到, 系统表现为射电毫秒脉冲星态.

过渡毫秒脉冲星需要吸积率足够低时才能转换到射电脉冲星态, 从而被探测为射电毫秒脉冲星. 不同过渡毫秒脉冲星完成态转换所需时间差异较大, 这可能与吸积率的剧烈变化有关. 例如 IGR J18245–2452 在吸积爆发后的两周发生了态转换, 而 PSR J1023+0038 和 3FGL J1544.6–1125 在过去近十年内均未出现 X 射线爆发事件, 吸积率一直维持在较低水平. 我们的观测结果显示, PSR J1023+0038 和 3FGL J1544.6–1125 目前可能仍处于低质量 X 射线双星态. 未来使用奇台射电望远镜对过渡毫秒脉冲星进行高频观测 [42], 并结合射电与 X 射线联合观测 [43], 将有助于深入理解毫秒脉冲星的形成机制及其吸积演化过程.

致谢 本工作在 FAST (500 米口径球面射电望远镜) (<https://cstr.cn/31116.02.FAST>) 数据基础上完成. FAST 是由中国科学院国家天文台运行和管理的国家大科学装置.

参考文献

- 1 Sturrock P A. A model of pulsars[J]. *Astrophysical Journal*, vol. 164, p. 529, 1971, 164: 529.
- 2 Kramer M, Stairs I H, Manchester R N, et al. Strong-field gravity tests with the double pulsar[J]. *Physical Review X*, 2021, 11(4): 041050.
- 3 Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M, et al. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay[J]. *nature*, 2010, 467(7319): 1081-1083.
- 4 Agazie G, Anumalapudi A, Archibald A M, et al. The NANOGrav 15 yr data set: Evidence for a gravitational-wave background[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2023, 951(1): L8.
- 5 Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al. Observation of a rapidly pulsating radio source[M]//A Source Book in Astronomy and Astrophysics, 1900–1975. Harvard University Press, 1979: 498-504.
- 6 Backer D C, Kulkarni S R, Heiles C, et al. A millisecond pulsar[J]. *Nature*, 1982, 300(5893): 615-618.
- 7 Bhattacharya D, van den Heuvel E P J. Formation and evolution of binary and millisecond radio pulsars[J]. *Physics Reports*, 1991, 203(1-2): 1-124.
- 8 Alpar M A, Cheng A F, Ruderman M A, et al. A new class of radio pulsars[J]. *Nature*, 1982, 300(5894): 728-730.
- 9 Radhakrishnan V, Srinivasan G. On the origin of the recently discovered ultra-rapid pulsar[J]. *Current Science*, 1982: 1096-1099.
- 10 Verbunt F, Van Den Heuvel E P J. Formation and evolution of neutron stars and black holes in binaries[J]. *X-ray Binaries*, 1995: 457-494.
- 11 Xu H, Chen S, Guo Y, et al. Searching for the nano-hertz stochastic gravitational wave background with the Chinese pulsar timing array data release I[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2023, 23(7): 075024.
- 12 Wijnands R, Van Der Klis M. A millisecond pulsar in an X-ray binary system[J]. *nature*, 1998, 394(6691): 344-346.
- 13 Archibald A M, Stairs I H, Ransom S M, et al. A radio pulsar/X-ray binary link[J]. *Science*, 2009, 324(5933): 1411-1414.
- 14 Papitto A, Ferrigno C, Bozzo E, et al. Swings between rotation and accretion power in a binary millisecond pulsar[J]. *Nature*, 2013, 501(7468): 517-520.

- 15 Bassa C G, Patruno A, Hessels J W T, et al. A state change in the low-mass X-ray binary XSS J12270– 4859[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 441(2): 1825-1830.
- 16 Papitto A, Ferrigno C, Bozzo E, et al. Swinging between rotation and accretion power in a binary millisecond pulsar[C]//EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2014, 64: 01004.
- 17 Bond H E, White R L, Becker R H, et al. FIRST J102347.6+ 003841: The First Radio-selected Cataclysmic Variable[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2002, 114(802): 1359.
- 18 Szkody P, Fraser O, Silvestri N, et al. Cataclysmic Variables from the Sloan Digital Sky Survey. II. TheSecond Year[J]. *The Astronomical Journal*, 2003, 126(3): 1499.
- 19 Wang Z, Archibald A M, Thorstensen J R, et al. SDSS J102347.6+ 003841: a millisecond radio pulsar binary that had a hot disk during 2000-2001[J]. *The Astrophysical Journal*, 2009, 703(2): 2017.
- 20 Stappers B W, Archibald A M, Hessels J W T, et al. A state change in the missing link binary pulsar system PSR J1023+ 0038[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 790(1): 39.
- 21 Patruno A, Archibald A M, Hessels J W T, et al. A new accretion disk around the missing link binary system PSR J1023+ 0038[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2013, 781(1): L3.
- 22 Jaodand A, Archibald A M, Hessels J W T, et al. Timing observations of PSR J1023+ 0038 during a low-mass X-ray binary state[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 830(2): 122.
- 23 Papitto A, Martino D. Transitional millisecond pulsars[M]//Millisecond Pulsars. Cham: Springer International Publishing, 2021: 157-200.
- 24 Bogdanov S, Halpern J P. Identification of the high-energy gamma-ray source 3FGL J1544.6-1125 as a transitional millisecond pulsar binary in an accreting state[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2015, 803(2): L27.
- 25 Bogdanov S. A NuSTAR observation of the gamma-ray-emitting X-ray binary and transitional millisecond pulsar candidate 1RXS J154439.4-112820[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, 826(1): 28.
- 26 Nan R, Li D, Jin C, et al. The five-hundred-meter aperture spherical radio telescope (FAST) project[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2011, 20(06): 989-1024.
- 27 Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al. The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2020, 20(5): 064.
- 28 Hotan A W, van Straten W, Manchester R N. PSRCRIVE and PSRFITS: an open approach to radio pulsar data storage and analysis[J]. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 2004, 21(3): 302-309.
- 29 Ransom S M. New search techniques for binary pulsars[M]. Harvard University, 2001.
- 30 Akeret J, Chang C, Lucchi A, et al. Radio frequency interference mitigation using deep convolutional neural networks[J]. *Astronomy and computing*, 2017, 18: 35-39.
- 31 Britt C T, Strader J, Chomiuk L, et al. Orbital dynamics of candidate transitional millisecond pulsar 3FGL J1544. 6-1125: an unusually face-on system[J]. *The Astrophysical Journal*, 2017, 849(1): 21.
- 32 Pan Z, Ma X Y, Qian L, et al. Three pulsars discovered by FAST in the globular cluster NGC 6517 with a pulsar candidate sifting code based on dispersion measure to signal-to-noise ratio plots[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2021, 21(6): 143.
- 33 Lorimer D R, Kramer M. Handbook of pulsar astronomy[M]. Cambridge university press, 2005.
- 34 Cordes J M, McLaughlin M A. Searches for fast radio transients[J]. *The Astrophysical Journal*, 2003, 596(2): 1142.
- 35 Baglio M C, Zelati F C, Campana S, et al. Matter ejections behind the highs and lows of the transitional millisecond pulsar PSR J1023+ 0038[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2023, 677: A30.
- 36 Deller A T, Moldon J, Miller-Jones J C A, et al. Radio imaging observations of PSR J1023+ 0038 in an LMXB state[J]. *The Astrophysical Journal*, 2015, 809(1): 13.
- 37 Bogdanov S, Deller A T, Miller-Jones J C A, et al. Simultaneous Chandra and VLA observations of the transitional millisecond pulsar PSR J1023+ 0038: anti-correlated X-ray and radio variability[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, 856(1): 54.
- 38 Gusinskaia N V, Jaodand A D, Hessels J W T, et al. Simultaneous radio and X-ray observations of the transitional millisecond pulsar candidate 3FGL J1544.6– 1125[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2025, 536(1): 99-118.
- 39 Zanon A M, Campana S, Ridolfi A, et al. X-ray study of high-and-low luminosity modes and peculiar low-soft-and-hard activity in the transitional pulsar XSS J12270– 4859[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2020, 635: A30.
- 40 Burderi L, Possenti A, D' Antona F, et al. Where may ultrafast rotating neutron stars be hidden?[J]. *The Astrophysical*

- Journal, 2001, 560(1): L71.
- 41 Peng L, Li Z, Pan Y, et al. Radio pulse search from Aql X-1[J]. The Astrophysical Journal, 2025, 983(1): 44.
- 42 Wang, N., Xu, Q., Ma, J., et al. 2023, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, The Qitai radio telescope, 66, 8, 289512.
- 43 Yuan, W., Dai, L., Feng, H., et al. 2025, , Science objectives of the Einstein Probe mission, arXiv:2501.07362.

Radio Pulse Search of a Transitional Millisecond Pulsar and Candidate

Long Peng^{1, 2, 3}, Zhaosheng Li¹, Yuanyue Pan¹, Zhichen Pan², Shuangqiang Wang^{3, 4} & Na Wang^{3, 4}

1. Key Laboratory of Stars and Interstellar Medium, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, P.R. China;
2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, 20A Datun Road, Chaoyang District Beijing, 100101, P.R. China;
3. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, P.R. China;
4. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, P.R. China

Millisecond pulsars exhibit diverse radiation characteristics at different evolutionary stages. Studying the radio emission phenomena of transitional millisecond pulsars (transitional millisecond pulsars, tMSPs) is of great significance for understanding the formation mechanisms and evolutionary paths of millisecond pulsars. In this paper, we used the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope to observe the tMSP PSR J1023+0038 and the tMSPs candidate 3FGL J1544.6–1125, aiming to search for their radio pulse signals. The observational results show that no significant radio pulse emission was detected from either source, with the flux density upper limits being constrained to $6.5 \mu\text{Jy}$ and $5.3 \mu\text{Jy}$, respectively. The research results indicate that these two sources are likely still in the accretion-powered state at present.

Pulsars, Neutron stars, Pulsar search, Pulsar radiation

PACS: 97.60.Gb, 97.80.Jp, 95.85.Bh

doi: ??