arXiv:2512.13960v1 [astro-ph.IM] 15 Dec 2025

拓展视野

2040年代的天文学变革

毫秒脉冲星双星的多个方面

科学类别： 时域、中子星、脉冲星、双星

提交作者： Arianna Miraval Zanon 所属机构：意大利航天局（IT）电子邮箱：arianna.miraval@asi.it

Giulia Illiano 所属机构：INAF–OAB（IT）电子邮箱：giulia.illiano@inaf.it

撰稿人： Filippo Ambrosino（INAF-OAR，IT）Domitilla de Martino（INAF-OACN，IT）Maria Cristina Baglio（INAF-OAB，IT）Caterina Ballocco（INAF-OAR，IT）David Buckley（南非天文台；开普敦大学，ZA）Francesco Coti Zelati（ICE-CSIC，ES）Melania Del Santo（INAF-IASF 巴勒莫分部）Paul J. Groot（拉德堡德大学，NL）Riccardo La Placa（INAF-OAR，IT）Christian Malacaria（INAF-OAR，IT）Alessio Marino（ICE-CSIC，ES）Alessandro Papitto（INAF-OAR，IT）Nanda Rea（ICE-CSIC，ES）Andrea Sanna（卡利亚里大学，IT）Simone Scaringi（杜伦大学，UK）James Turner（INAF-OAR，IT）Alexandra Veledina（图尔库大学，FI）Luca Zampieri（INAF-OAPd，IT）

1 引言与背景

毫秒脉冲星（MSP）是快速自转（<10 ms）、磁场较弱（10^{7-8} G）的中子星（NS），由低质量伴星（<1 M$_\odot$）在长达数十亿年的吸积阶段形成[1]。吸积毫秒脉冲星（AMSP）SAX J1808.4-3658 [2] 的发现，首次直接证实了这种演化联系。吸积毫秒脉冲星是暂现系统，大部分时间处于宁静态（X射线光度为 $L_X \lesssim 10^{31-33}$ erg s^{-1}），但偶尔会发生持续数天至数月的吸积暴发，伴随X射线大幅增亮（$L_X \sim 10^{36-37}$ erg s^{-1}）并出现X射线脉动。这些系统是独特的实验室，可用于研究地球上无法实现的极端条件下的物质和粒子加速。在这些轨道周期通常短于一天的致密双星中，脉冲星风与流入物质之间的相互作用决定了毫秒脉冲星的辐射状态。若引力占主导，等离子体便会被引导至磁极并吸积，从而产生X射线脉动；若脉冲星风足够强大，能够将物质驱逐出去，系统便会以射电和 γ射线形式发出自转供能毫秒脉冲星的辐射。观测中子星磁层和相对论性星风在不同质量损失率下与流入物质的相互作用，是解答以下基本问题的关键：**粒子在哪里与周围等离子体相互作用，从而产生覆盖所有能量范围的脉冲？脉冲星风如何将粒子加速至相对论能量？**

过渡态毫秒脉冲星（过渡毫秒脉冲星，tMSPs）的发现，进一步强化了吸积供能脉冲星与自转供能脉冲星之间的联系；它们能够在数天的时间尺度上在这两种状态之间切换 [3,4,5]。过渡毫秒脉冲星还表现出一种中间亚光度盘态，在该状态下，吸积供能和自转供能的特征并存，包括吸积盘、中等X射线光度，以及比典型自转供能毫秒脉冲星高出一个数量级的 γ射线光度[6 及其中所引参考文献]。这种状态的一个标志是不规则X射线辐射，其强度会在两个水平（“高”态和“低”态）之间快速切换 [7], ，并偶尔出现耀发事件。在过渡毫秒脉冲星原型PSR J1023+0038 [3] 中，高态期间可同时在X射线、紫外线和光学波段探测到相干脉动，而在低态时则消失 [8,9,10,11,12]。结合相似的脉冲轮廓，以及与单一幂律相一致的脉冲偏振能谱分布，这表明它们可能具有共同的辐射机制。无论是自转供能机制还是吸积供能机制，都无法单独解释全部性质。因此，有学者提出这样一种情景：高态下的多波段脉动源于距中子星 $\sim$100 千米处边界区域内的同步辐射，在那里，相对论性星风与流入物质发生相互作用 [10,13；另请参见 14,15]。

除过渡毫秒脉冲星 PSR J1023+0038外，吸积毫秒脉冲星 SAX J1808.4−3658 [16]也检测到了光学/紫外线脉动。在过渡毫秒脉冲星中，光学脉动与X射线脉动同相 [14]，，而在吸积毫秒脉冲星中，两者则反相。此外，PSR J1023+0038被观测到处于低效吸积状态（即亚光度盘态），而SAX J1808.4−3658在爆发期间则发生活跃的表面吸积。这些差异表明，SAX J1808.4−3658的光学脉动并不直接关联于其X射线脉动，意味着存在一种独立但尚未确定的过程，也凸显了毫秒脉冲星辐射机制的多样性。此外，在自转供能毫秒脉冲星 PSR J2339−0533 [17]中也有光学脉动的报告。

2040年代的两个开放科学问题

在不同演化状态下发现了三颗光学毫秒脉冲星——分别处于吸积供能、自转供能和中间的亚光度盘态 [16,17,9] ——这既引出了新的问题，也为解决长期悬而未决的问题提供了可能：

- **所有毫秒脉冲星都会产生光学脉动吗？**目前已知的毫秒脉冲星遍布各个演化阶段，数量达数百颗，而少数光学探测结果表明，脉动可能本质上

十分罕见，或因仪器限制和观测偏差而未能探测到。确定光学脉动是否普遍存在，还是只在特定条件下发生，对于粒子加速、磁层辐射以及光学辐射与高能辐射之间的联系，都具有重要意义。

- **吸积盘如何提高将自转减速功率转化为脉冲光学辐射的效率？**对于年轻、孤立的自转供能脉冲星，自转减速功率转化为脉冲光学辐射的过程（$\eta \simeq 10^{-5} - 10^{-8}$； [18]）可由磁层同步辐射模型很好地解释。光学自转供能毫秒脉冲星的效率与蟹状星云脉冲星相当，这表明两类天体很可能由相同的辐射过程主导 [17]。相比之下，光学过渡毫秒脉冲星和吸积毫秒脉冲星的效率比自转供能模型的预测值高出 ∼50–100 倍 [10,17]，这意味着仅靠磁层辐射并不足以解释。吸积盘可能会增强粒子加速 [10,13], ，但由于每类目前都只有一个已知源，这些结论仍属初步推测。我们需要在不同吸积状态下获得更多光学毫秒脉冲星样本，以确定吸积盘是否会提高效率，抑或观测到的高效率只是已研究的少数几个系统所特有的现象。

- **脉冲星与吸积盘如何相互作用？需要哪些诊断手段？**过渡毫秒脉冲星的中间亚光度盘态提供了一个难得的机会，使我们得以探测能量密度相当时吸积流与脉冲星风之间的相互作用。然而，在这一状态下吸积盘结构如何响应，尤其是在快速发生X射线模式切换时，仍未得到充分理解。有人提出，离散物质抛射可以解释从高模式到低模式的特殊切换 [19], ，而致密喷流或离散抛射则可能为耀发模式提供能量 [15]。通过观测紫外/光学/近红外波段的氢和氦发射线，可以研究模式切换和耀发事件，追踪不同半径处的吸积盘区域 [20] 。这需要采用中等分辨率的高时间分辨率光谱学，以描绘内盘和外盘，并揭示低模式期间脉动消失所伴随的结构变化。在耀发事件期间，目前仅探测到光学脉动，未发现相伴的X射线脉动 [11], ，因此追踪耀发期间吸积盘的响应至关重要。这些诊断对于检验吸积盘增厚及其伴随的自由电子注入增强是否发生于致密喷流中至关重要。

- **脉冲星风与伴星风如何相互作用？脉冲星风又如何影响伴星的物理状态及其在不同时间尺度上的演化，包括向吸积盘态的转变及从吸积盘态的转变？**在自转供能毫秒脉冲星中，脉冲星风与伴星风的相互作用会产生双星内激波（IBS），其主要观测特征是轨道调制的同步辐射X射线。双星内激波与伴星强烈相互作用，物质可能沿磁力线流动。越来越多的系统中观测到叠加在伴星吸收线上的光学发射特征；这些特征通常会变化，并与辐照驱动的亮度变化相关，可能源自双星内激波区域 [21]。仍需通过时间分辨光谱学研究这些特征，以确定它们是否反映风相互作用的变化，而这种变化可能导致盘形成并使系统呈现过渡毫秒脉冲星状态。尤其是，要追踪质量转移的开始或受抑制——这标志着系统进入过渡态——需要短于一天的响应时间，并进行轨道相位分辨光谱观测，以详细监测吸积盘的形成或消失。毫秒脉冲星双星中的强劲脉冲星风会以不同程度辐照伴星，其双星内激波的贡献取决于脉冲星的自转减速功率和双星性质。伴星剥蚀是毫秒脉冲星演化路径中的关键过程。尽管低质量伴星的毫秒脉冲星双星

（$< 0.1 M_\odot$）——即黑寡妇脉冲星——很可能处于演化末期，但具有较高质量非简并伴星的系统——即红背脉冲星，其中包括过渡毫秒脉冲星——是理解辐照对双星演化影响的关键系统。已发现的系统数量不断增加，目前已超过一百个（包括候选体），其辐照水平和双星内激波效率各不相同，因此需要确定双星参数，并通过测光和光谱学表征伴星的物理状态。对附近系统而言，这些观测切实可行；但许多新发现的毫秒脉冲星距离更远、亮度更暗，需要借助大口径设施开展时间分辨观测。

3 技术与数据处理要求

- **高时间分辨率：**发现新的光学毫秒脉冲星并探究其自转演化，需要配备超快速光度计，相对时间分辨率达到 μ 秒级，绝对定时精度达到 ≤ 10 μ 秒级。与 4 米望远镜相比，25 米级设施可将光子计数统计提升 ~ 60 倍；结合半相干搜索技术，即使无法精确估计系统的轨道参数 [22]，也能发现新的光学波段毫秒脉冲星。

- **中快速响应与灵活排程：**某些吸积阶段仅持续数天，因此需要在状态转换后数小时内开展观测，并制定动态排程，以便快速开展对暂现源的高优先级观测。

- **配置：**光度计应能够同时观测目标、参考星及附近天空（~ 1 角分），并使用白光和斯隆滤光片（u’、g’、r’、i’、z’），以研究不同波段的脉冲变化和相位偏移；还应扩展至近红外波段，以探测银河平面和银核球中吸收严重的区域。预计近红外波段会出现快速变异，尽管目前尚无仪器能在该波段实现亚毫秒级分辨率。

- **中等光谱分辨率 (R $\sim$ 5000–10000)**是追踪吸积盘和双星内激波的变化、监测谱线轮廓变化、通过径向速度测定轨道周期，以及构建光谱能量分布以区分各辐射成分所必需的。

- **偏振测量：** 快速（纳秒至毫秒级）的光学和近红外测光与偏振测量对于研究磁化致密天体至关重要。相位分辨偏振测量（$\lesssim$0.03%精度）可约束脉冲辐射几何，而亚秒级测光则可探测喷流基部的粒子加速、激波和磁重联，将外流与内流联系起来。这些观测为深入了解中子星系统的物理特性提供了独特视角。

这三种仪器——光度计、光谱仪和偏振仪——对于解答上述尚未解决的问题都至关重要。虽然它们各自都能独立运行，但到2040年能够同时运行将更具优势。

参考文献： [1] Alpar, M. A., Cheng, A. F., Ruderman, M. A., et al. 1982, 《自然》, 300, 5894, 728; [2]Wijnands, R. & van der Klis, M. 1998, 《自然》, 394, 6691, 344; [3] Archibald A. M., Stairs I. H., Ransom S. M., et al., 2009, 《科学》 , 324, 1411; [4]Papitto, A., Ferrigno, C., Bozzo, E., et al. 2013, 《自然》, 501, 7468, 517; [5]Bassa, C. G., Patruno, A., Hessels, J. W. T., et al. 2014, 《皇家天文学会月报》, 441, 2, 1825; [6] Papitto A., de Martino D., 2022, 《天体物理与空间科学图书馆》, 465, 157; [7] Linares M., 2014, 《天体物理学杂志》, 795, 72;[8] Archibald A. M., Bogdanov S., Patruno A., et al., 2015, 《天体物理学杂志》, 807, 62; [9]Ambrosino, F., Papitto, A., Stella, L., et al. 2017, 《自然·天文学》, 1, 854; [10] Papitto A., Ambrosino F., Stella L., et al., 2019, 《天体物理学杂志》, 882, 104; [11]Jaodand A. D., Hernández Santisteban J. V., Archibald A. M., et al., 2021, arXiv, arXiv:2102.13145; [12]Miraval Zanon A., Ambrosino F., Coti Zelati F., et al., 2022, 《天文学与天体物理学》, 660, A63; [13] Veledina A., Nättilä J., Beloborodov A. M., 2019, 《天体物理学杂志》, 884, 144; [14] Illiano G., Papitto A., Ambrosino F., et al., 2023, 《天文学与天体物理学》, 669, A26; [15] Baglio M. C., Coti Zelati F., Di Marco A., et al., 2025, 《天体物理学杂志快报》, 987, L19; [16] Ambrosino F., Miraval ZanonA., Papitto A., et al., 2021, NatAs, 5, 552; [17] Papitto A., Ambrosino F., Burgay M., et al., 2025, 《天文学与天体物理学》, 702, L21. doi; [18] Mignani R. P., 2011, 《空间研究进展》, 47, 1281; [19] Baglio M. C., Coti Zelati F., Campana S., et al., 2023, 《天文学与天体物理学》, 677, A30; [20] Messa M. M., D’Avanzo P., Coti Zelati F., et al., 2024, 《天文学与天体物理学》, 690, A344; [21]Miraval Zanon A., D’Avanzo P., Ridolfi A., et al., 2021, 《天文学与天体物理学》, 649, A120; [22] La Placa R., Papitto A., Illiano G., et al., 2025, arXiv, arXiv:2508.04873.
doi:10.48550/arXiv.2508.04873, 已投稿至《天文学与天体物理学》