

快速射电暴双星起源的关键突破——基于 FAST 观测的多时间尺度证据

王发印[†]

(南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

快速射电暴(Fast Radio Burst, FRB)的起源及周边磁环境特性,长期以来是天体物理学界的研究热点与核心谜题,而法拉第旋转量(Rotation Measure, RM)作为探测射电波传播路径上磁场与电子密度分布的关键物理量,其变化特征是破解这一谜题的重要突破口.笔者于2022年通过系统研究提出,FRB的RM异常变化与双星系统密切相关,认为磁陀星(magnetar)与伴星构成的双星环境,是导致RM波动的核心原因,这一观点为FRB起源研究提供了全新的理论方向^[1].近期,中国科学院紫金山天文台牵头的国际合作团队依托500 m口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, FAST)取得的两项成果,从短期突发变化和长期周期性演化两个时间尺度,为这一观点提供了关键观测支撑,两项成果共同构建了一例重复快速射电暴FRB 20220529磁等离子体环境的精细变化图景,显著推进了我们对这一宇宙极端爆发现象起源的认知.

其中一项成果首次捕获到FRB 20220529的RM剧烈跳变与快速回落现象,另一项则发现该暴源RM演化存在约200 d的潜在周期性,两者相互补充、彼此印证,进一步夯实了双星系统作为部分FRB起源的观测基础,也为笔者此前提出的双星系统相关物理模型提供了重要支持.

研究团队对FRB 20220529开展了长达2.2 yr的系统性监测,捕获到1156个爆发信号,构建了

该暴源完整的偏振演化序列^[2].前17个月,FRB 20220529的RM值稳定在 -300 至 $+300$ $\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}$ 区间,1个标准差仅 100 $\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}$.2023年12月,FAST探测到RM值异常飙升至 (1977 ± 84) $\text{rad} \cdot \text{m}^{-2}$,较基线值提升约20倍,随后在14 d内快速回落至基线区间,形成“跳变—回落”演化曲线.此次观测首次捕捉到FRB磁环境的极端突变,且可能伴随线偏振度从约80%降至 $27\% \pm 3\%$ 后同步恢复,进一步验证了磁环境变化的真实性,这与笔者2022年提出的双星系统中伴星活动会引发周边磁环境剧烈扰动的推测高度契合.

基于FAST近3 yr的监测数据(累计58.4 h观测,1169个爆发),研究团队通过Lomb-Scargle周期图和相位折叠法两种独立方法,发现FRB 20220529(除去RM跳变期)的RM演化存在可能的周期性信号^[3].两种方法给出的周期分别为 (199 ± 10) d(显著性4.1个标准差)和 204^{+8}_{-11} d(显著性3.1个标准差)表明这可能是暴源磁环境的固有特征,与短期突变形成“短期突变+长期调制”的互补图景.值得注意的是,中国科学院国家天文台牵头的另一研究团队基于FAST观测还发现另一重复暴FRB 20201124A存在约26.24 d的RM周期性信号^[4],进一步佐证了重复FRB双星起源的普遍性.这一周期性演化特征,恰好与笔者此前提出的双星轨道运动将周期性调制FRB周边磁环境进而导致RM值呈现规律波动的观点一致,为部分重复快速

2026-01-23收到原稿

[†] fayinwang@nju.edu.cn

射电暴起源于双星系统的猜测提供了又一关键观测支撑。

法拉第旋转量RM是探测天体磁环境的直接探针,其数值与电子密度和传播方向上磁场强度的路径积分成正比。RM剧烈跳变表明有一团致密磁化等离子体云短期内穿越了观测视线,研究团队通过物理建模排除了磁陀星耀发、超新星遗迹和星际介质扰动3种非双星起源可能性,唯一合理的解释来自双星系统:FRB暴源(磁陀星)的伴星发生星冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME),形成的致密磁化等离子体云穿越观测视线时,导致RM值急剧上升,随后随云团膨胀或移出视线而回落,模型计算表明该CME参数符合双星系统物理特性。这一物理过程,与笔者2022年提出的双星系统模型中伴星活动(如星冕物质抛射)会改变周边等离子体环境,进而引发RM短期剧烈变化的机制相吻合,为该机制的合理性提供了观测佐证。

约200 d的RM周期性,本质是双星轨道运动对磁环境的调制效应。当磁陀星(FRB暴源)在椭圆轨道上绕伴星运行时,与伴星的相对距离周期性变化,导致穿越的伴星星风密度和磁场强度规律性波动,进而引发RM值周期性演化。这一调制效应与CME模型形成统一物理图像:轨道运动决定暴源与伴星的平均位置,CME是伴星偶发式的剧烈磁活动,两者共同印证了双星系统的存在,且该周期与其他重复暴周期的差异反映了FRB双星系统轨道特性的多样性。这一发现,也为笔者此前提出的模型补充了重要观测细节,为不同FRB双星系统的轨道差异研究提供了新的样本支撑。

两项成果的科学意义深远,其核心价值在于破解FRB起源的部分谜题,同时通过观测数据,与笔者2022年提出的FRB与双星系统相关的观点形成了有力呼应,完善了“理论推测—观测支撑”的研究链条。自2007年FRB被发现以来,其起源一直是天体物理学重大谜团,已知与银河系磁陀星关联的FRB事件虽证实部分FRB与磁陀星相关^[5-6],但重复暴的能量危机和周期性特征对单一磁陀星模型提出挑战。此次RM跳变揭示了伴星的剧烈磁活动,周期信号反映了轨道运动,双重证据部分解

决了重复FRB的起源争议,建立了“磁陀星+伴星”的爆发和环境模型,既解释了能量供给问题,又统一了磁陀星关联和周期性起源两大关键特征,与笔者此前的理论推测形成了良好的呼应关系。

成果同时彰显了FAST的极端探测能力。其500 m口径带来的超高灵敏度,使其能捕捉到暗弱重复暴的微弱偏振信号,长达3 yr的高频次监测则实现了对短期突变和长期演化的完整覆盖。此前国际上其他射电望远镜因灵敏度或观测时长限制,未能探测到此类精细结构,FAST的突破证明了其在极端微弱、动态宇宙信号探测中的不可替代性,为后续重复FRB的系统性研究奠定了技术基础,也为进一步探索FRB与双星系统的关联、完善相关理论模型提供了强大的观测支撑。

此外,该成果进一步推动了FRB极端天体物理环境研究新方向。FRB辐射区在磁陀星附近约数百公里的区域,周围是强磁场、强引力、高密度的极端环境,通过RM跳变反推的CME关键参数,为研究致密天体与伴星的相互作用、恒星风与CME物理特性提供了独特样本;周期性成果则为约束双星轨道参数提供了线索,估算出的双星系统轨道半长轴与太阳—行星系统尺度相当,这些数据深化了对FRB周围环境的认知,推动了极端条件下等离子体物理和恒星演化理论的发展,也为后续完善双星系统相关模型、探索更多FRB相关物理机制提供了重要的数据参考。

面向未来,后续研究需聚焦3大方向,进一步拓展此次观测成果与前期理论研究的深度融合:依托FAST扩大重复FRB监测样本^[7-8],搜索RM跳变现象的普适性,同时结合多波段观测捕捉FRB爆发与伴星CME的同步信号,为双星系统相关模型的普适性提供更多观测支撑;对周期性FRB开展更长时间监测,精确测量轨道偏心率、伴星质量等参数,建立“轨道参数—伴星活动—FRB爆发特性”的关联,为完善双星系统物理模型提供助力;利用FAST核心阵升级机遇提升观测能力,发展更高效的数据分析方法,挖掘RM数据中隐藏的物理信息,进一步揭示FRB与双星系统的内在关联。

综上,FAST捕获的RM剧烈跳变与周期性演

化两项成果, 共同构建了FRB双星系统的完整物理图像, 既为双星起源提供了直接观测证据, 也与笔者2022年提出的FRB法拉第旋转量变化与双星系统相关的观点和模型形成了有力呼应, 实现了理论与观测的有机结合. 两项成果不仅部分解决了长期困扰天体物理学界的FRB起源谜题, 更彰显了FAST的国际领先地位. 随着后续观测的深入和多波段协作的推进, 人类对这一宇宙极端爆发现象的认知将不断深化, 为极端天体物理和恒星演化研究开辟新的道路, 也为后续开展FRB与双星系统相关的理论与观测研究奠定了坚实基础.

参考文献

- [1] Wang F Y, Zhang G Q, Dai Z G, et al. *NatCo*, 2022, 13: 4382
- [2] Li Y, Zhang S B, Yang Y P, et al. *Science*, 2026, 391: 280
- [3] Liang Y F, Li Y, Tang Z F, et al. *ApJL*, 2025, 994: 32
- [4] Xu J, Xu H, Guo Y, et al. 2025, arXiv: 2505.06006
- [5] CHIME/FRB Collaboration, Andersen B C, Bandura K M, et al. *Nature*, 2020, 587: 54
- [6] Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. *NatAs*, 2021, 5: 378
- [7] Zhang J S, Wang T C, Wang P, et al. 2025, arXiv: 2507.14707
- [8] FRB Collaboration, Abbott T, Andersen B C, et al. 2026, arXiv: 2601.09399