

五百米口径球面射电望远镜脉冲星研讨会
(14)

Local organizers

Shunshun Cao (PKU)
Wencong Chen (QUT, chair)
Pengcheng Chu (QUT)
Long Jiang (QUT)
He Liu (QUT)
Hongming Liu (QUT)
Jiguang Lu (NAOC)
Kun Xu (QUT)

FAST/Future Pulsar Symposium 14

<https://psr.pku.edu.cn/fps/FPS14/FPS14.html>

Qingdao University of Technology
Qingdao
July 4-6, 2025

Organized by FPS Advisory Committee

Hsiang-Kuang Chang (NTHU)	Biping Gong (HUST)
Longfei Hao (YNO)	Yongfeng Huang (NJU)
Stephen Ng (HKU)	Liming Song (IHEP)
Hongguang Wang (GZU)	Renxin Xu (PKU)
Jianping Yuan (XAO)	Yefei Yuan (USTC)
Youling Yue (NAO)	Zhen Yan (SHAO)
Li Zhang (YNU)	Xiaoping Zheng (CCNU)

第 1 4 届 全 国 脉 冲 星 研 讨 会 (F P S 1 4)

中国·青岛 2025.7.4



500 米口径球面射电望远镜/未来脉冲星专题研讨会

第十四次会议

FPS 年会于 2012 年首次在新疆昌吉举办，第 14 次年会（FPS14）于 2025 年 7 月 4 日至 6 日在山东青岛召开。FPS14 评奖委员会（陈偲源、陈文聪、戴子高、高志福、龚碧平、郭彦君、黄永锋、来小禹、李柯伽、刘荷蕾、罗佳伟、邵立晶、石洵、温志刚、吴志勇、夏铨君、徐仁新、闫振、袁业飞、张祥光、张振辉、郑小平、朱炜玮等 23 人构成）最终遴选出 Crab 奖一名（杨宗霖）、Vela 奖二名（曹顺顺和袁懋）。获奖者与颁奖嘉宾、主持人、RAA 编辑部代表合影如下。

一年一度喜相逢；
谈笑有鸿儒、往来无白丁！FPS14 的特别之处：国家天文台负责主办的 RAA 杂志（即“天文与天体物理研究”，英文名：Research in Astronomy and Astrophysics）加盟 FPS 并资助 Crab 奖和 Vela 奖。话说 RAA 跟北大还有着深厚的历史渊源：1980 年中国天文学会创刊“天体物理学报”的编辑部起初就设在北京大学。1992 年，编辑部迁至北京天文台（2001 年成为“国家天文台”总部）；2001 年，中文版“天体物理学报”更名为英文版“Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics”，2009 年再更名为“Research in Astronomy and Astrophysics”。科学的进步并非止于论文，却由学术刊物承载。在学术传媒竞争日益加剧的今天，期待对 RAA 的支持终将营造一个“返璞归真”的学术环境。

作为 FPS 人共同的“历史记忆”，您手中的文集与 RAA 一样折射出中国脉冲星研究前进的步伐和“FPS 们”自强不息、敢为人先的精神风貌：

作为 FPS 人共同的“历史记忆”，您手中的文集与 RAA 一样折射出中国脉冲星研究前进的步伐和“FPS 们”自强不息、敢为人先的精神风貌：

[https://psr.pku.edu.cn/conference/fps/Proceedings/FPS \$\alpha\$.pdf](https://psr.pku.edu.cn/conference/fps/Proceedings/FPSα.pdf)

这里 $\alpha = 1, 2, 3, \dots, 14$ 代表获取的第一到十四次 FPS 文集。是的，让所有 FPS 学人继续以精辟的语言在文集中留下自己关于“脉冲星”的真知灼见！

会议组织者：“FPS”咨询委员会成员，以及

LOC：青岛理工大学 陈文聪（主席）、初鹏程、姜龙、刘鹤、刘宏铭、许坤
国家天文台 卢吉光，北京大学 曹顺顺



FPS14 获奖者

杨宗霖（右四）、曹顺顺（左四）和袁懋（右三）

公元贰零贰伍年拾贰月

目 录

1. A low mass and radius neutron star candidate in XTE J1810-189?	班首涛.....	1
2. 脉冲星辐射中的波模叠加简介	曹顺顺 (Vela 奖获得者)	2
3. Timing Study of the First FAST-Discovered Pulsar PSR J2338+4818	陈语杰.....	4
4. 利用 FAST 筛选潜在 PTA 脉冲星	贺莎莎.....	6
5. 从奇异星到致密星爆发现象的科研历程	黄永锋.....	7
6. 利用 FAST 望远镜对脉冲星闪烁弧曲率年调制的测量精确确定闪烁屏参数	黄源尚.....	9
7. 磁星 XTE J1810-197 在射电活跃期是否遵循相同的演化模式?	黄志鹏, 闫振, 沈志强, 仝号, 葛明玉, 高志福, 吴亚军, 赵融冰, 刘杰, 王睿, 王啸威, 杨帆, 张楚原, 廖振龙, 林扬洋.....	11
8. 极亮 X 射线脉冲星的中微子辐射研究	李洪波.....	13
9. 基于 FAST 单脉冲搜索的双中子星伴星搜索方法	李文泽.....	15
10. 利用 FAST 从 Fermi-LAT 未关联源中发现两颗新脉冲星	刘通, 潘之辰.....	17
11. Polarization Position Angle Swing and the Rotating Vector Model of Repeating Fast Radio Bursts	刘小辉.....	20
12. 基于 FAST 脉冲星观测建立脉冲星时间	卢吉光.....	22
13. 基于 RMF 模型的致密物质状态方程研究——零温 EOS 与统一方法	牛家兴.....	23
14. 中子星壳层和 Δ 共振态对 g -mode 振荡的影响	孙浩.....	25
15. 球状星团脉冲星搜索	田进发, 潘之辰, 钱磊.....	27
16. Magnetospheric structure and radiation of the whole pulse phase radio emission pulsar B1929+10	王正理.....	29
17. Interstellar Scintillation of RRATs	吴子为.....	31
18. 致密物质的统一理论描述	夏铖君.....	32
19. “ $2=1.5+0.5$ ”: 纪念量子力学百年诞辰	徐仁新.....	34
20. 脉冲星表面可能会长山!	徐子浩.....	36
21. 发现由共有包层演化形成的罕见掩食脉冲星	杨宗霖 (Crab 奖获得者)	38
22. DART Long period radio transient search	袁懋 (Vela 奖获得者)	40
23. 最新的天文观测对奇子物态的启示	苑文莉.....	43
24. 浅谈致密物质、致密星与物态方程	张晨.....	46
25. 单脉冲搜索和在 FAST 漂移扫描数据中的脉冲星发现	张亦弛, 潘之辰, 钱磊, 王路尧, 张光远, 张欣雨	47
26. 状态方程在毫秒脉冲星自转加速过程中的作用	钟昕怡.....	50
27. 会议日程.....		52

A low mass and radius neutron star candidate in XTE J1810-189?

班首涛 (Shoutao Ban)
新疆大学物理科学与技术学院
乌鲁木齐 830000
Email: 2277310697@qq.com

I 型 X 射线暴是中子星表面的不稳定热核燃烧现象, 其中一些非常强的爆发会将中子星表面的光球层抬起, 造成观测上的光球半径膨胀现象, 即光球半径膨胀暴。光球半径膨胀暴可用于测量中子星的质量和半径等参数, 为约束中子星物态方程提供了新途径。

XTE J1810-189 是一个中子星低质量 X 射线双星系统, 其在 2008 年的一次 I 型暴表现出明显的光球半径膨胀特征, 其能谱可以使用吸收黑体模型进行拟合。爆发过程中可以检测到吸收限能量, 吸收限能量在光球半径膨胀过程中和冷却尾部出现, 并且吸收限能量的变化与辐射通量的变化一致。

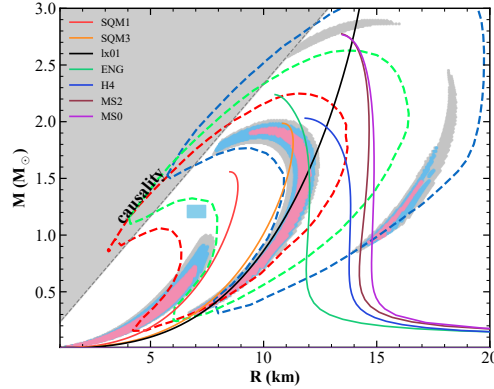


Figure 1: XTE J1810-189 的质量-半径约束结果。

本工作使用直接冷却尾法对 XTE J1810-189 的光球半径膨胀暴进行分析, 结果表明其质量和半径取决于大气成分。直接冷却尾中高金属丰度大气 ($20 Z_{\odot}$ 、 $40 Z_{\odot}$)、富氢大气 (纯氢、 $Z_{\odot}$ 、 $0.3 Z_{\odot}$ 、 $0.1 Z_{\odot}$ 和 $0.01 Z_{\odot}$) 和纯氦大气对应的结果分别为小、典型、大中子星三类。纯氦大气的结果与目前的观测约束冲突, 如 GW170817, 这排除了 XTE J1810-189 作为大中子星的情况。富氢大气的结果能够支持大部分常规的物态。光谱中的吸收限成分暗示其大气可能具有较高的金属丰度, 表明 XTE J1810-189 可能是一个极其致密的小中子星, 这对当前的物态提出了挑战。最后, 使用触地法进行交叉验证, 两种方法的结果一致, 但是触地法得到的范围更大。未来 eXTP 对 XTE J1810-189 大气成分的确定可进一步限制该中子星的质量和半径。

脉冲星辐射中的波模叠加

曹顺顺 (Shunshun Cao)
北京大学物理学院
北京 100871
Email: 19css@pku.edu.cn

本文是本人报告的背景补充, 简单介绍一下脉冲星辐射波模叠加, 及其在解释脉冲星偏振现象方面的应用。

射电脉冲星信号有丰富的偏振现象。不同脉冲星, 或者一颗脉冲星的不同单脉冲, 都可能有差别很大的椭圆偏振特征与消偏振行为。具体而言, 这些偏振行为可以用线偏振度 (L/I)、圆偏振度 (V/I)、偏振位置角 (PA, ψ)、椭圆率角 (EA, χ)等偏振参数来描述。理论上, 脉冲星的偏振辐射一定经过磁层中传播过程或多或少的塑造。理解这些过程, 首先要了解脉冲星磁层中的波传播的本征模式——简称波模。

射电波在磁层等离子体中的传播方向经常与局域磁场有显著的夹角, 其本征模式包括寻常模 (O模) 和非寻常模 (X模), 在强磁场中偏振方向分别平行磁力线平面和垂直磁力线平面, 且线偏振主导 (参考例如 Arons & Barnard, 1986)。这两个模式对应了脉冲星偏振观测中常见的正交偏振模式 (OPM)。OPM 往往表现为积分轮廓或单脉冲的PA的90度跳变, 或单脉冲PA分布中相差90度的数据点聚集 (参考 Stinebring et al., 1984; Wang et al., 2023, 等文章)。

但实际观测数据中, 有时会出现不能仅通过90度跳变或旋转矢量模型 (RVM, Radhakrishnan & Cooke, 1969) 解释的现象。例如Dyks (2017); Oswald et al. (2023)中的一系列积分轮廓中“非RVM”的现象, 以及Cao et al. (2025)中脉冲星B1919+21单脉冲的准单调快速连续变化PA曲线。

这类现象的一种解释是OPM的叠加效应。首先, PA随相位的90度跳变, 并不一定代表了波模从纯的O或X模突变成纯的X或O模, 而可以只代表主导波模发生变化 (Cheng & Ruderman, 1979)。换句话说, 在多个相位上O模和X模可能都同时存在, 观测到的偏振是它们非相干叠加的结果: 在 ϕ_0 相位之前O模占主导, 在 ϕ_0 相位之后X模占主导, 于是跳变在 ϕ_0 处发生了。

如果波模之间相干叠加, 跳变不会发生, 取而代之的是跨越90度的一个连续变化。图 1 展示了两个正交且振幅相等的波模, 完全非相干叠加 (左) 和完全相干叠加 (右) 所得到的偏振辐射特征。非相干叠加与相干叠加在数学形式上的区别可参考本人的FPS14报告。只有完全非相干叠加可等效为斯托克斯参数的叠加。值得一提的是, “S”型曲线未必对应着RVM, 也有可能是波模相干叠加产生的。

References

Arons, J., & Barnard, J. J. 1986, ApJ, 302, 120, doi:10.1086/163978

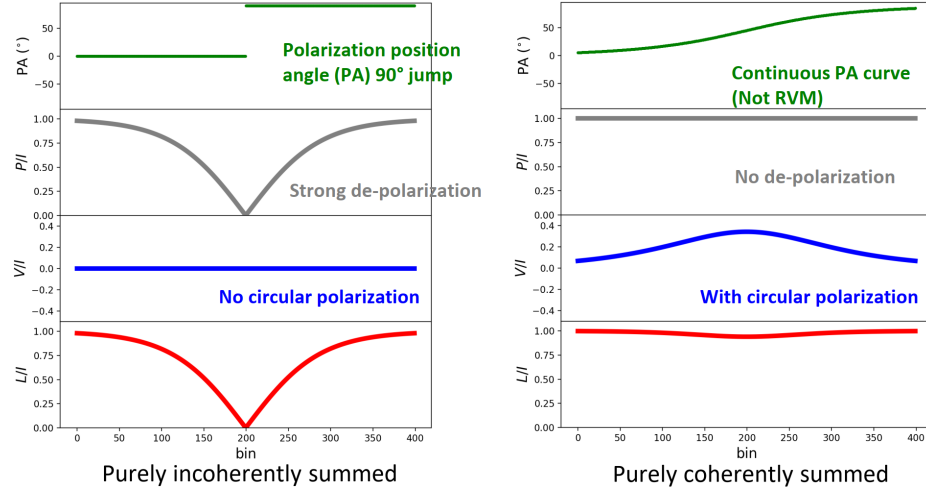


Figure 1:

- Stinebring, D. R., Cordes, J. M., Rankin, J. M., et al. 1984, ApJS, 55, 247.
doi:10.1086/190954
- Wang, P. F., Han, J. L., Xu, J., et al. 2023, RAA, 23, 104002, doi:10.1088/1674-4527/acea1f
- Radhakrishnan, V., & Cooke, D. J. 1969, ApL, 3, 225
- Dyks, J. 2017, MNRAS, 472, 4598, doi:10.1093/mnras/stx2101
- Oswald, L. S., Karastergiou, A., & Johnston, S. 2023, MNRAS, 525, 840,
doi:10.1093/mnras/stad2271
- Cao, S., Jiang, J., Dyks, J., et al. 2025, ApJ, 983, 43, doi:10.3847/1538-4357/adbe33
- Cheng, A. F., & Ruderman, M. A. 1979, ApJ, 229, 348, doi:10.1086/156959

Timing Study of the First FAST-Discovered Pulsar PSR J2338+4818

Yujie Chen
College of Physics
Guizhou University
550025
Email: gs.yujiechen23@gzu.edu.cn

1 PSR J2338+4818

PSR J2338+4818 was discovered and confirmed by the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST; Nan et al. 2011) on August 9th, 2017, from the drift scan data taken on August 4th and 6th. It was designated (and hereafter) as C1 which is the first candidate (and then confirmed as a new pulsar) from FAST (see Figure 1). It is with a 118-ms spin period, and a dispersion measure (DM) of $35.3 \text{ cm}^{-3} \text{ pc}$. It was then observed for two years with the Effelsberg telescope (Cruces et al., 2021). Its timing solution was derived by using DRACULA¹ (Freire & Ridolfi, 2018). It is an old (with an inferred age of $\sim 0.95 \text{ Gyr}$) mildly recycled pulsar, locating in a binary system, with an orbital period of about 95 days, and a mild eccentricity of 0.0018237(9). Cruces et al. (2021) report that the minimum companion mass is $1.049 M_{\odot}$, derived from a mass function of $0.19263(4) M_{\odot}$ (assuming a pulsar mass of $1.4 M_{\odot}$). The companion is mostly likely a carbon - oxygen white-dwarf (Tauris et al., 2011).

We utilized the APTB² (Taylor et al., 2024), based on PINT³ (Susobhanan et al., 2024), to remove the phase jump in TOAs and successfully obtain the phase-connected timing solution.

We performed the auto-correlation function (ACF) analysis on all observations and obtained the scintillation parameters for C1 from those observations where the parameters could be reliably fitted. Aided by the sensitivity of FAST, the single pulses of PSR J2338+4818 were systematically studied (see Figure 2 using the TRANSIENTX⁴).

¹<https://github.com/pfreire163/Dracula>

²<https://github.com/Camryn-Phillips/APT>

³<https://github.com/nanograv/PINT>

⁴<https://github.com/ypmen/TransientX>

利用FAST筛选潜在PTA脉冲星

贺莎莎 (Shasha He)
贵州大学
贵阳 550025
Email:heshasha77@126.com

脉冲星是 8 - 20 倍太阳质量的大质量恒星演化至晚期，经核心坍缩超新星爆发后残留的致密天体。其超高密度、超强磁场、高速自转的极端物理环境，为检验基础物理理论的普适性提供了天然理想的实验室，相关研究涵盖广义相对论等核心理论，而广义相对论检验更是该领域长期核心方向之一。毫秒脉冲星（MSPs，通常指自转周期短于 30 ms 的脉冲星）是一类特殊脉冲星，由中子星通过吸积伴星物质获得角动量、加速自转形成。因其自转周期高度稳定、脉冲信号规律性强，毫秒脉冲星成为检验广义相对论与探测低频引力波的关键天然实验室，在基础物理研究中具有不可替代的价值。

纳赫兹低频引力波是重要的引力波波段，其波长达星系尺度，振幅极其微弱，远低于现有设备直接探测阈值，无法通过常规手段直接探测。针对这一难题，科研人员基于类似布朗运动的扰动思想，构建了间接探测方案：通过高精度监测多颗脉冲星的脉冲到达时间（TOAs）与其理论预测值之间的同步微小偏差，捕捉纳赫兹引力波对脉冲星测时信号的微弱扰动，从而实现间接探测。不同脉冲星在自转周期、色散量及天球位置上存在显著差异，因此其脉冲到达时间具有独特的个体特征，对纳赫兹引力波的响应灵敏度与响应模式也各不相同。在脉冲星测时阵列（PTA）中纳入更多数量、类型更丰富的脉冲星，可有效降低探测噪声、提升信号辨识度，提高纳赫兹引力波探测的准确性与可靠性，为后续研究奠定坚实基础。

为筛选适合扩充中国脉冲星测时阵列（CPTA）的高质量候选源，解决当前 CPTA 脉冲星数量不足、天球覆盖不均等问题，本研究建立了一套三步递进式筛选策略，确保候选源质量与 CPTA 观测需求高度匹配。首先，明确筛选目标，优先选取信号强度高、自转稳定性好的脉冲星，重点聚焦毫秒脉冲星。经初步筛选，本研究将候选库限定为 127 颗未纳入现有 CPTA、且可被 500 米口径球面射电望远镜（FAST）有效观测的毫秒脉冲星，排除了不可观测与信号质量较差的源。其次，基于对 CPTA 现有 57 颗脉冲星的统计分析，系统梳理其流量密度数据后发现，超过 80% 的源在 1400 MHz 观测频率下流量密度高于 0.26 mJy，该阈值可有效保障观测信噪比。以此为标准，本研究从 127 颗候选毫秒脉冲星中进一步筛选出 20 颗满足流量要求的源，显著提升了后续观测可行性。最后，为优化 CPTA 天球分布均匀性、减少覆盖盲区，研究利用现有 57 颗脉冲星的精确天球坐标，系统分析了当前阵列的覆盖情况，通过定量评估覆盖完整性与均匀性，最终确定 5 颗核心候选脉冲星：J2007+2722、J1810+1744、J1904+0553g、J2205+6012 和 J1300+1240。由于 J1904+0553g 位于球状星团 M5 内部，恒星密集、星际环境复杂，易引入额外观测噪声并降低测时精度，与 CPTA 对独立、稳定测时源的核心要求不符，因此将其排除，最终保证了入选候选源的稳定性与可靠性。

从奇异星到致密星爆发现象的科研历程

黄永锋 (Yong-Feng Huang)
南京大学 天文与空间科学学院
南京 210023
Email: hyf@nju.edu.cn

很荣幸有机会在本次会议上同大家分享我的科研工作经历。1990年，我从湖北省武汉市新洲县第一中学（现为武汉市新洲区第一中学）高中毕业。由于中学里就一直对天文学非常感兴趣，高考志愿我填报了南京大学天文学系并被顺利录取。本科毕业后，我继续留校攻读博士学位，师从高能天体物理方向的陆埏教授，1999年获得博士学位。

博士生期间，我选择的第一个研究课题是关于奇异夸克星的壳层厚度的探索。我在阅读文献时发现，前人只考虑了单粒子在奇异物质表面附近电场中的受力问题，但普遍没有考虑到壳层中的整体静力学平衡问题。考虑这一因素后，我们发现奇异星壳层底部的最大密度无法达到中子滴密度，而是只有其五分之一左右。该研究成果发表在《Chinese Physics Letters》上（Huang Y.F. & Lu T., 1997, Chin. Phys. Lett. 14, 314）。特别值得一提的是，由于我当时对撰写英文科研论文完全没有经验，该论文稿是由导师陆埏教授亲自撰写的，但陆老师仍让我作为第一作者。该论文的审稿过程也特别顺利，初次科研工作取得成功，对我是很大的鼓励。

关于奇异星的第一个科研工作完成后，1997–1999的博士生第二阶段，我转向了伽马射线暴方向。当时，伽马暴的余辉刚刚被发现，该领域进展日新月异。我从最初的文献调研做起，逐渐对伽马暴领域有了初步了解。在尝试复现前人的一些计算结果的过程中，我注意到前人广泛使用的一个关于余辉动力学的公式在非相对论阶段与分析解的预期不符。由此，我们改正了其中的问题，提出了对余辉早期的极端相对论阶段和晚期非相对论阶段都普遍适用的统一动力学公式，通过设置其中的辐射效率参数，该公式对高度辐射火球和绝热火球也都可以应用（Huang Y.F., Dai Z.G. & Lu T., 1999, MNRAS, 309, 513）。该论文得到了审稿人高度肯定的评价：“This paper sets straight an obvious problem in the equations for the evolution of fireballs, and as is usual with things that are right, you almost wonder how we could have got it wrong in the first place. It is a must-publish, since it prevents the further propagation of the error addressed by the authors.”论文发表后也得到了同行的广泛引用，更加坚定了我科研道路上继续前行的信心。

最终，在1994–1999的5年直博期间，我一共发表了10篇论文，其中8篇为SCI论文，7篇SCI论文为第一作者。其实，同很多研究生和年轻学者一样，在博士生期间，我也有过很多迷茫和困惑。尤其是在刚开始接触科研时，面对着海量的历史文献，自己对领域一无所知，完全不知道如何找到自己的发力点。我觉得最重要的是，越是感到迷茫，我们就越是要努力，才能改变困难的局面。反之，如果沉沦下去，可能就永远无法摆脱困境。我们需要从文献调研入手，积极行动，主动思考，

一步一个脚印走下去。如果一开始实在是没有任何思路，我们也可以从重复前人的一些工作着手，这个过程中就能学习到很多重要的知识，掌握必要的工具，也有可能发现一些内在的问题。在阅读文献的过程中，要随时把自己脑海中一闪而过的一些想法记录下来，即使这些想法当前暂时没法实现，但是后面可以经常回看一下，其中总有一些想法是可以落实并最终转化为科研成果的。

博士毕业以后，我继续在伽马射线暴、脉冲星、快速射电暴等领域开展工作，发表了一系列论文。最近几年中，我的兴趣重新又转向了奇异夸克星方向，我们希望能找到一些行之有效的方法，帮助我们判断脉冲星到底是传统意义上的中子星，还是奇异夸克星（包括徐仁新教授等人提出的奇子星）。从理论上讲，重子物质的真正基态有可能是奇异夸克物质，而不是通常认为的中子物质。因此，人们看到的脉冲星有可能是奇异夸克星，而并不是通常所认为的中子星。但是，如何从观测上区分奇异夸克星和中子星，从而对重子物质的基态这一基本物理问题给出检验，却一直是非常困难的课题。我们注意到，在奇异夸克物质绝对稳定的假说下，将存在着从普通奇异星到奇异夸克矮星再到奇异夸克行星的一整个质量从大到小的星体系列。特别是由奇异夸克物质构成的行星由于密度非常高，不会被其宿主星的潮汐力撕裂，因此公转轨道半径可以很小，轨道周期可显著小于6100秒(Huang Y.F. & Yu Y.B., 2017, ApJ, 848, 115)。而且当它们最终与致密宿主星并合时，还会产生很强的引力波辐射(Geng J.J., Huang Y.F. & Lu T., 2015, ApJ, 804, 21)，这些方面都是明显区别于普通行星的。因此，我们提议可以通过观测脉冲星的密近行星以及通过观测奇异夸克星-奇异行星并合过程中的引力波爆发事件来搜寻奇异夸克天体。

在奇异星领域，我们还探讨了当小质量的原初黑洞在奇异星或者中子星内部旋进的过程中，在引力波辐射方面的区别，希望能通过此类引力波的观测来探测致密星内部的物质成分和状态(Zou Z. & Huang Y.F., 2022, ApJL, 928, L13)。我们也研究了当奇异星壳层坍缩时产生快速射电暴的可能性，为快速射电暴这种奇特现象的触发机制提供了一个新视角(Zhang Y., Geng J.J. & Huang Y.F., 2018, ApJ, 858, 88 ; Geng J., Li B. & Huang Y., 2021, The Innovation, 2, 100152)。

科研工作贵在创新，我认为我们上面这些研究工作还是颇有新意的。年轻学者们在闲暇时也可以经常思考一下，在自己的研究领域还有哪些重大问题没有解决，我们自己又有什么奇思妙想，可以帮助从意想不到的角度解决这些问题。

利用FAST望远镜对脉冲星闪烁弧曲率年调制的测量精确确定闪烁屏参数

黄源尚 (Yuanshang Huang)

云南大学

Email: huangyuanshang42@gmail.com

脉冲星是高度磁化的旋转中子星，其射电波在穿过电离星际介质（IISM）时，由于电子密度的不均匀性而发生散射，导致多径干涉。因为地球、脉冲星和星际介质之间的相对运动，干涉条件随时间变化，所以脉冲星的射电信号强度在时间和频率上被调制，这一现象被称为星际闪烁（ISS）。对闪烁的观测表明，星际闪烁集中在视线方向上的离散区域——即“闪烁屏”中，这些闪烁屏在星际介质中普遍存在（Stinebring et al. 2022; Main et al. 2022）。然而，闪烁屏的距离往往很少被精确地确定，这阻碍了将闪烁屏与银河系中已知结构进行精确关联。闪烁屏在二维功率谱中产生抛物线特征，即闪烁弧（Stinebring et al. 2001），其曲率编码了闪烁屏的距离信息（Walker et al. 2004; Cordes et al. 2006）。在考虑高度各向异性散射的情况下，抛物线弧的曲率取决于三个屏幕参数：与观测者的距离、主散射方向和沿该方向的投影速度（Briskin et al. 2010）。除了VLBI观测外，测量这些屏幕参数的唯一可行方法是建模拟合抛物线弧曲率的调制。弧曲率由地球公转运动所调制，若脉冲星位于一个双星系统中，则脉冲星的公转运动也参与了调制。

我们利用500米口径球面射电望远镜（FAST）对脉冲星PSR B1237+25、PSR B1842+14和PSR B2021+51进行了多次观测，同时也获取这三个源已有的公开数据。数据样本的观测时间为2019年11月至2023年7月，频率范围覆盖1000 MHz至1500 MHz。我们采用了改进的方法以提高功率谱的质量。我们在Wiener滤波后对动态谱进行了第二次掩蔽以进一步去除射频干扰，并采用反射填充方法替代传统的Hanning窗函数，以保留更多边缘信号并降低功率谱中的背景噪声。

得益于FAST的高灵敏度和改进的数据处理方法，我们在三颗脉冲星方向上共探测到了至少17条闪烁弧，确认存在16个离散的闪烁屏。其中PSR B1237+25方向探测到10条，PSR B1842+14方向探测到1条，PSR B2021+51方向探测到至少6条。

我们对这些闪烁弧的调制进行了建模。对于其中5个闪烁屏，我们成功约束了全部三个屏幕参数（距离、速度和散射方向）；对于其余闪烁屏，我们基于简化假设提供了距离估计。其中，PSR B1237+25方向最亮的闪烁弧对应的闪烁屏距离地球 267^{+32}_{-28} pc；PSR B1842+14方向的闪烁屏距离为 240^{+210}_{-120} pc；PSR B2021+51方向最亮的闪烁弧对应的闪烁屏距离为 887^{+167}_{-132} pc。

我们的结果表明，能够引起脉冲星闪烁的电子密度涨落在星际空间的各个区域普遍存在。我们样本中的几个闪烁屏出现在与本地泡边界吻合的距离上，例如PSR B1237+25方向最亮的闪烁弧。PSR B1237+25具有高达86.5度的银纬，在确认其与本地泡边界的关联后，闪烁屏的距离测量将为高银纬方向上的本地泡形状提供约束。

靠近脉冲星的闪烁屏与弓形激波有可能关联。然而，由于PSR B1237+25和PSR B2021+51的自旋损耗光度较低，不太可能产生可观测的弓形激波。即便弓形激波存在，其沿视线方向的尺度也远小于近脉冲星屏幕到脉冲星距离的不确定度，因此目前无法确定这些屏幕是否与弓形激波相关。

我们所研究的闪烁屏距离误差主要来源于脉冲星距离的不确定性，特别是PSR B1842+14（距离 1.7 ± 0.7 kpc），其距离不确定度大导致其方向上的屏幕距离误差很大。这表明高精度的脉冲星距离测量对于准确确定屏幕距离很重要。

本研究提供了丰富的闪烁屏观测样本，揭示了银河系中星际介质中多样化的等离子体密度涨落结构，为未来将闪烁屏与星际结构进行关联、理解其天体物理起源提供了一定的基础。未来更长时间的观测将进一步提高参数精度，并帮助阐明这些星际介质结构的物理本质。

References

- Briskin, W. F., Macquart, J. P., Gao, J. J., et al. 2010, *ApJ*, 708, 232
Cordes, J. M., Rickett, B. J., Stinebring, D. R., & Coles, W. A. 2006, *ApJ*, 637, 346
Main, R. A., Parthasarathy, A., Johnston, S., et al. 2022, *MNRAS*, 518, 1086
Stinebring, D. R., McLaughlin, M. A., Cordes, J. M., et al. 2001, *ApJ*, 549, L97
Stinebring, D. R., Rickett, B. J., Minter, A. H., et al. 2022, *ApJ*, 941, 34
Walker, M. A., Melrose, D. B., Stinebring, D. R., & Zhang, C. M. 2004, *MNRAS*, 354, 43

磁星XTE J1810–197在射电活跃期是否遵循相同的演化模式？

黄志鹏^[1], 闫振^[2*], 沈志强^[2*], 仝号^[3], 葛明玉^[4], 高志福^[5], 吴亚军^[2], 赵融冰^[2], 刘杰^[2], 王睿^[2], 王啸威^[2], 杨帆^[2], 张楚原^[2], 廖振龙^[2], 林扬洋^[2]

[1]湖北第二师范学院, 中国 武汉 430205

[2]中国科学院上海天文台, 中国 上海 200030

[3]广州大学, 中国 广州 510006

[4]中国科学院高能物理研究所, 中国 北京 100049

[5]中国科学院新疆天文台, 中国 乌鲁木齐 830011

*Email: yanzhen@shao.ac.cn, zshen@shao.ac.cn

磁陀星是宇宙中磁场最强的致密天体之一，其磁场强度可高达 $10^{14} - 10^{15}$ 高斯。作为一类极端物理条件下的天体，它们被认为与多种高能爆发现象密切相关，如巨型耀斑、快速射电暴等(Duncan & Thompson, 1992)。然而，目前仅有6颗磁陀星被探测到射电脉冲辐射，加之其辐射具有明显的暂现性，使得科学界对其辐射机制和演化规律的认识仍十分有限(Olausen & Kaspi, 2014)。尤其关键的是，磁陀星在不同射电活跃期演化是否具有可重复性，直接关系到我们能否建立统一的物理模型来描述其磁层结构演化及辐射过程，并进一步实现对其未来活动的预测。

磁陀星XTE J1810–197是首颗被发现具有射电脉冲辐射的磁陀星，该天体曾在2003至2008年经历一次射电活跃期，并在2018年再次进入活跃状态(Ibrahim et al., 2004; Camilo et al., 2016)。对其第二轮射电活跃期的系统研究，不仅有助于与2003年历史观测进行直接对比，也为揭示其辐射与自转演化是否遵循相同物理规律提供了重要契机。围绕其最新一次爆发后的射电行为，我们利用上海天马射电望远镜(TMRT)开展了系统的双频同时监测研究，对其整个射电活跃期进行了长期跟踪观测：

本研究取得了以下主要进展：

【1】依托天马望远镜“一镜双频”的观测能力，我们同时在2.25和8.60 GHz两个频率对磁陀星XTE J1810–197开展了连续监测，完整覆盖了其从射电激活到辐射消失的整个演化过程。基于这一高质量数据，我们精确刻画了其平均脉冲轮廓、自转频率及其导数、流量密度以及谱指数(α , 定义为 $S \propto f^\alpha$)等关键物理量的演化规律，揭示了该磁陀星辐射与自转行为的复杂变化及其磁层结构的高度动态性。

【2】如图1所示，我们将本次（始于2018年）的射电活跃期与2003年历史活跃期进行系统对比，首次证实XTE J1810–197在不同爆发周期中表现出高度一致的演化特征。这种“可重复性”不仅体现在自转减慢率的幅度与时间尺度上，同时也体现在射电辐射行为的整体演化趋势上。

【3】进一步将观测结果与磁层扭曲衰减模型进行对比分析，发现该理论模型能够很好地解释磁陀星的自转演化及辐射变化特征。本研究为该模型提供了重要的观测支持，并为未来预测磁陀星射电活跃行为提供了新的依据。

本项研究不仅加深了我们对磁陀星射电辐射机制的理解，也为探索极端磁场环境下的等离子体物理过程提供了关键观测证据。随着后续持续监测工作的推进，磁陀星这一类天体的物理本质有望得到更加深入的揭示。

更多细节请见我们的论文(Huang et al., 2026)。有关磁陀星的后续监测还在天马望远镜进行，将进一步揭示这类天体奥秘。

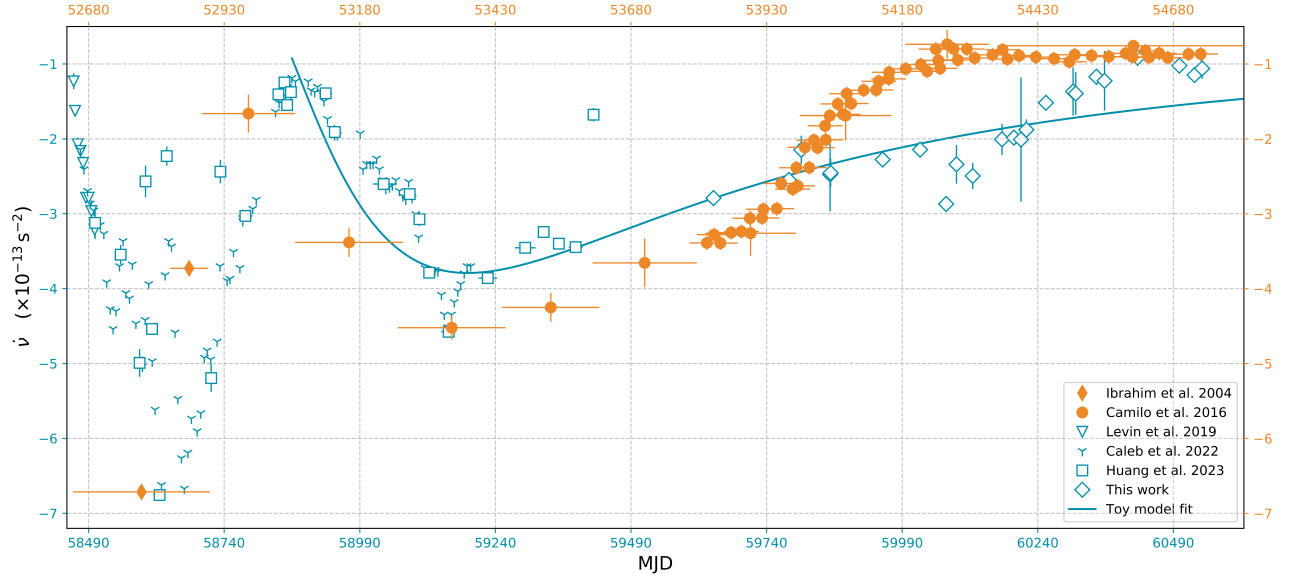


Figure 1: XTE J1810–197在其2003年和2018年爆发期间自转频率导数 ($\dot{\nu}$) 演化的对比。2003年爆发（橙色）和2018年爆发（浅蓝色）的 $\dot{\nu}$ 数值经过时间对齐处理，使得射电辐射消失的时刻相互对应。

References

- Duncan R. C., Thompson C., 1992, ApJ, 392, L9
 Olausen S. A., Kaspi V. M., 2014, ApJS, 212, 6
 Ibrahim A. I. et al., 2004, ApJ, 609, L21
 Camilo F. et al., 2016, ApJ, 820, 110
 Huang Z.-P. et al., 2026, Sci. China Phys. Mech. Astron., 69, 259512

极亮X射线脉冲星的中微子辐射研究

李洪波 (*Hong-Bo Li*)
北京大学科维理天文与天体物理研究所
100871
Email: lih2020@stu.pku.edu.cn

极亮X射线脉冲星 (ultraluminous X-ray pulsars, ULXPs) 是一类具有极端辐射输出的吸积致密星系统, 其X射线光度通常超过 $L_X > 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ (King et al., 2023), 显著高于传统爱丁顿极限。ULXP的发现表明, 在强磁场和高吸积率条件下, 中子星类致密天体也能够维持超爱丁顿吸积过程, 因此为研究强引力场、强磁场以及高能辐射输运提供了重要的天体物理实验室。与此同时, ULXP的辐射机制、吸积柱结构以及中心致密星的物质组成, 仍然是当前高能天体物理中的前沿问题。

我们的工作(Li et al., 2025)围绕极亮X射线脉冲星中的中微子辐射机制展开研究, 重点讨论当中心致密星不是传统中子星, 而是奇子星时(Xu, 2003), 吸积柱底部的热结构及其辐射性质将发生怎样的变化。奇子星模型认为, 脉冲星内部可能由奇子团块构成, 其表面物理性质与普通中子星存在显著差异。特别是在强磁场引导下, 落向磁极区域的吸积物质在奇子星表面附近可能受到库仑势垒以及奇异势垒的共同影响, 从而在极冠区堆积并形成较高的热丘 (polar mound)。这一热丘结构将显著影响局域温度分布和能量释放方式, 并可能引入额外的中微子冷却 (耗能) 通道。在理论建模方面, 本工作基于一维稳态吸积柱模型, 系统计算了ULXP吸积柱中的速度、密度、辐射压和温度随高度的演化规律, 并进一步分析了柱底热丘区域的形成条件。研究表明, 在超高吸积率条件下, 当温度达到 10^9 K 量级时, 电子-正电子对湮灭所产生的中微子辐射将不再可以忽略, 而可能成为重要的冷却机制。

与传统中子星模型相比, 奇子星模型下最重要的物理特征在于其表面的密度间断以及物质转化过程的迟滞效应。正常吸积物质到达奇子星表面后, 并不会立即完全转化为奇子物质, 因此能够在极区形成一定高度的普通重子物质层。由于该区域的有效热容相对较低, 吸积释放的能量更容易将其加热至较高温度, 从而增强电子正负对的产生及其湮灭中微子辐射。换言之, 奇子星表面的特殊微观物理性质, 会通过改变热丘的结构和温度, 进一步改变整个吸积系统的能量分配方式。

数值结果如图1所示。在奇子星模型下, ULXP磁极附近可以形成高度约为千米量级的热丘结构, 其高度明显大于普通中子星情形。随着吸积率升高, 吸积柱总高度和柱底温度均显著增加。在较低吸积率条件下, 系统释放的引力能仍主要通过光子辐射形式逃逸, 因此X射线光度占主导地位; 但在更高吸积率下, 由于吸积柱内部光学深度增大, 部分光子被困在柱内, 辐射扩散效率下降, 此时中微子辐射开始发挥更加重要的作用。在某些极端参数范围内, 中微子甚至可能成为主要冷却通道

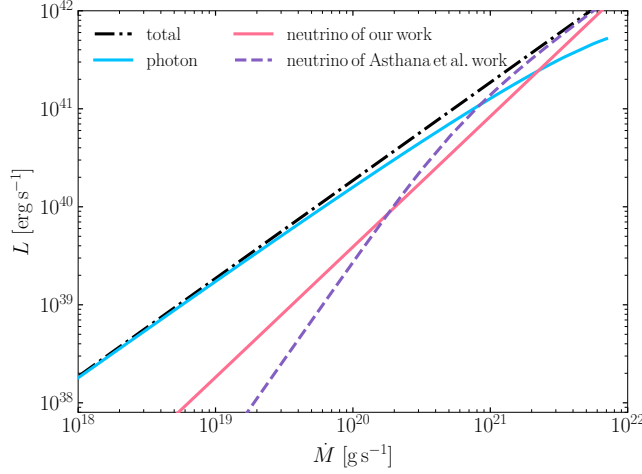


Figure 1: 图中给出了本工作计算的中微子光度，基于中子星模型得到的中微子光度（虚线）(Asthana et al., 2023) 以及光子光度随质量吸积率的变化关系。点划线为总光度，本工作中磁场强度 $B = 10^{12}$ G。

之一。这表明，在超爱丁顿吸积条件下，ULXP的能量输出不能仅由传统电磁辐射描述，还应考虑中微子辐射对热平衡和辐射结构的反馈作用。

总体而言，本工作从奇子星模型出发，研究了极亮X射线脉冲星吸积柱底部极区热丘的形成及其中微子辐射特征，揭示了奇子星表面特殊物理性质对超爱丁顿吸积辐射过程的重要影响。研究表明，在高吸积率和强磁场条件下，奇子星极区热丘能够显著提高局域温度，并增强电子—正电子对湮灭产生的中微子辐射。这不仅拓展了对ULXP辐射机制的理解，也为利用多信使观测研究致密星内部物质状态提供了新的理论思路。未来，随着高灵敏度中微子探测器和更精确的X射线观测数据的发展，ULXP有望成为检验奇子星模型和探索超核密度物质性质的重要天体实验室。

References

- King, Andrew and Lasota, Jean-Pierre and Middleton, Matthew, Ultraluminous X-ray sources, *New Astron. Rev.*, 96, 101672, 2023
- Li, Hong-Bo and Gao, Shi-Jie and Li, Xiang-Dong and Xu, Ren-Xin, Polar mounds on strangeon stars: the neutrino emission from ultraluminous X-ray pulsars, *MNRAS*, 546, 4, stag241, 2026
- Xu, Ren-Xin, Solid quark matter?, *ApJL*, 596, L59–L62, 2003
- Asthana, Aman and Mushtukov, Alexander A. and Dobrynina, Alexandra A. and Ognev, Igor S., Bright X-ray pulsars as sources of MeV neutrinos in the sky, *MNRAS*, 522, 3, 3405–3411, 2023

基于FAST单脉冲搜索的双中子星伴星搜索方法

李文泽 (Wenze Li)

贵州大学

贵阳 550025

Email: wenze_li@qq.com

双中子星 (Double Neutron Star, DNS) 系统是研究致密天体演化、强引力物理以及引力波源的重要天体实验室。然而, 与多数DNS系统中已被探测到的吸积加速脉冲星不同, 其伴星通常未被直接观测到, 成为当前脉冲星研究中的一个关键问题。传统周期搜索方法 (如FFT与FFA) 在寻找伴星周期信号方面已取得一定进展, 但整体探测成功率仍然较低, 表明伴星信号在观测上可能具有更加复杂或非稳定的辐射特性。

FAST 作为目前世界上最灵敏的单口径射电望远镜, 在瞬变源探测方面展现出卓越能力, 尤其是在快速射电暴 (Fast Radio Bursts, FRBs) 领域取得了一系列突破性成果(Xu et al., 2023)。这些成果表明, FAST在单脉冲搜索方面具有极高的灵敏度和可靠性, 为探测暗弱或非周期性辐射信号提供了理想平台。

从演化角度来看, DNS系统中的第二颗中子星 (伴星) 通常是在第二次超新星爆发后形成, 未经历显著的物质吸积过程, 因此通常表现为年轻、非吸积加速脉冲星(Tauris et al., 2017)。这类脉冲星往往具有较长的自转周期和较强的磁场, 其辐射束开角较小, 导致其射电辐射不易扫过地球视线。此外, 一部分伴星甚至可能已经停止稳定的周期性辐射, 仅表现为类似RRAT (Rotating Radio Transients) 源的偶发单脉冲辐射。因此, 单纯依赖周期搜索方法可能难以有效探测这类目标。

基于上述认识, 单脉冲搜索成为探测DNS伴星的重要补充。通过对FAST天区内DNS系统的观测数据进行系统单脉冲搜索, 发现有多个系统存在显著的单脉冲事件。这些单脉冲在强度、到达时间以及形态上呈现出一定的多样性, 其中部分脉冲在统计性质上可能无法完全由主星辐射解释, 暗示其可能包含来自伴星的辐射贡献。

然而, 在实际分析过程中, 一个核心挑战在于如何区分这些单脉冲是来源于已知主星, 还是潜在的伴星。为此, 可采用逐脉冲对比分析的方法, 即将所有探测到的单脉冲事件与主星已知的周期性脉冲行为进行系统比对, 包括其脉冲相位分布、到达时间残差以及脉冲形态特征等。对于数量达到百万级别的单脉冲事件, 该过程需要结合自动化算法与统计方法, 以提高处理效率与可靠性。

在此基础上, 进一步提出一种改进策略, 即通过构建主星周期信号模板, 对原始时间序列中的主星周期性信号进行屏蔽, 从而降低其对单脉冲搜索的干扰。该方法的核心思想在于: 主星的周期性辐射在时间域具有高度可预测性, 因此可以通过模板匹配与相位折叠技术对其进行建模, 并从观测数据中减去该成分。经过处理后, 剩余信号中将显著减少主星辐射的贡献, 从而使潜在的伴星单脉冲信号更加突出。这种“主星信号去除 + 单脉冲搜索”的联合方法, 在理论上能够显著提升对

弱单脉冲信号的探测能力，尤其适用于伴星辐射极为微弱或呈现间歇性发射的情形。此外，该方法还可有效降低误检率，提高候选信号的可信度。

结合FAST高灵敏度观测数据，单脉冲搜索为双中子星伴星的探测提供了一条新的有效路径。通过引入主星信号屏蔽技术与系统的单脉冲统计分析方法，有望在未来识别出来自伴星的偶发辐射信号，从而实现双脉冲星系统的进一步发现。这不仅是加深对DNS系统演化的理解，也将为强引力物理与多信使天文学研究提供新的观测基础。

References

- Xu, J., Feng, Y., Li, D., Wang, P., Zhang, Y., Xie, J., et al. 2023. *Universe*, 9(7), 330.
Tauris, T. M., Kramer, M., Freire, P. C. C., et al. 2017, *ApJ*, 846, 170

利用FAST从Fermi-LAT未关联源中发现两颗新脉冲星

刘通 (Tong Liu) 潘之辰 (Zhichen Pan)

中国科学院国家天文台

北京 100101

Email: panzc@bao.ac.cn

自Fermi-LAT望远镜2009年投入运行以来, 已经发现了超过300颗脉冲星, 其中有超过100颗是通过射电望远镜在Fermi无对应体源中搜索发现的(Smith et al., 2023)。通过Fermi源发现的脉冲星中约50%是毫秒脉冲星, 约占总数的18%, 构成了毫秒脉冲星主要的发现目标之一(Smith et al., 2023)。然而, 目前在Fermi 4FGL星表中仍有超过2000个无对应体源(Abdollahi et al., 2022), 为更多脉冲星的发现提供了机会, 而五百米口径射电望远镜(FAST)的空前灵敏度为Fermi脉冲星发现提供了新机遇(Nan et al., 2011)。

我们在Fermi 4FGL星表中筛选了20个无对应体源, 使用FAST中心波束进行观测, 并使用PRESTO软件进行搜索(Ransom, 2001; Ransom et al., 2002), 最终发现了两颗新脉冲星: PSR J0237+5238 和 PSR J0533+5945, 原始搜索结果如图 1所示。此前的发现报告见引文Liu et al. (2025a,b)。

PSR J0237+5238是通过FAST对Fermi源4FGL J0237.8+5238的搜索中发现的。我们的首次观测日期为2025年2月24日, 并于2025年3月2日首次发现了脉冲星的射电信号。结果显示, PSR J0237+5238是一颗毫秒脉冲星, 自转周期为4.35 ms, 色散量(DM)为10.30 pc cm⁻³。在发现该脉冲星的观测中, 其在1250 MHz的流量密度估算为12 μ Jy(Lynch et al., 2011)。该脉冲星在后续观测中表现出强烈的闪烁现象。初步的计时工作仅能拟合其自转周期和轨道参数。结果显示, 它位于一个轨道周期约为16天的圆形轨道中。假设脉冲星质量为1.4 M_⊙, 我们估算出伴星的最小质量约为0.44 M_⊙, 暗示其可能是一颗碳氧白矮星(Tauris et al., 2012)。我们对该脉冲星进行了偏振校准, 获取了其偏振轮廓。其线偏振和圆偏振比例分别为33(2)%和-1(3)%, 法拉第旋转量(RM)为-19(3) rad m⁻²。利用初步的计时结果, 我们从Fermi-LAT的数据中发现了对应的伽马脉冲, 证实了该脉冲星的射电信号与Fermi源成协, 是一颗伽马射线脉冲星。

PSR J0533+5945是通过FAST对Fermi源4FGL J0533.6+5945的搜索中发现的。我们的首次观测日期为2025年3月4日, 并于2025年3月9日首次发现了脉冲星的射电信号。结果显示, PSR J0533+5945是一颗普通的孤立脉冲星, 自转周期为191 ms, DM为18.75 pc cm⁻³。在发现该脉冲星的观测中, 其在1250 MHz的流量密度估算为49 μ Jy, 并且使用TransientX软件发现了单脉冲(Men & Barr, 2024)。初步的计时工作仅能拟合其自转周期和周期导数。结果显示, 其自转周期导数, 1.02×10^{-15} s s⁻¹, 为正值。由此推算出的自转能量损失率为 5.8×10^{33} erg s⁻¹, 特征年龄约为3 Myr, 暗示其是典型的年轻或中年脉冲星。我们对该脉冲星

进行了偏振校准，获取了其偏振轮廓。其线偏振和圆偏振比例分别为14(1)%和-1(1)%，RM值为-14(2) rad m⁻²。利用初步的计时结果，我们从Fermi-LAT的数据中发现了对应的伽马脉冲，证实了该脉冲星的射电信号与Fermi源成协，是一颗伽马射线脉冲星。

References

- Smith, D. A., Abdollahi, S., Ajello, M., et al. 2023, *The Astrophysical Journal*, 958, 191
- Abdollahi, S., Acero, F., Baldini, L., et al. 2022, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 260, 53
- Nan, R., LI, D., JIN, C., et al. 2011, *International Journal of Modern Physics D*, 20, 989 – 1024
- Ransom, S. M. 2001, *New Search Techniques for Binary Pulsars*, Ph.d. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, USA
- Ransom, S. M., Eikenberry, S. S., & Middleditch, J. 2002, *The Astronomical Journal*, 124, 1788 – 1809
- Liu, T., Pan, Z., Smith, D. A., et al. 2025a, Correction to ATel #17382, *The Astronomer’ s Telegram*, #17383
- Liu, T., Pan, Z., Smith, D. A., et al. 2025b, The FAST Discovery of Two Radio Pulsars Coincident with Fermi-LAT Gamma-ray Sources, *The Astronomer’ s Telegram*, #17382
- Lynch, R. S., Ransom, S. M., Freire, P. C. C., & Stairs, I. H. 2011, *The Astrophysical Journal*, 734, 89
- Tauris, T. M., Langer, N., & Kramer, M. 2012, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 425, 1601 – 1627
- Men, Y., & Barr, E. 2024, *Astronomy & Astrophysics*, 683, A183

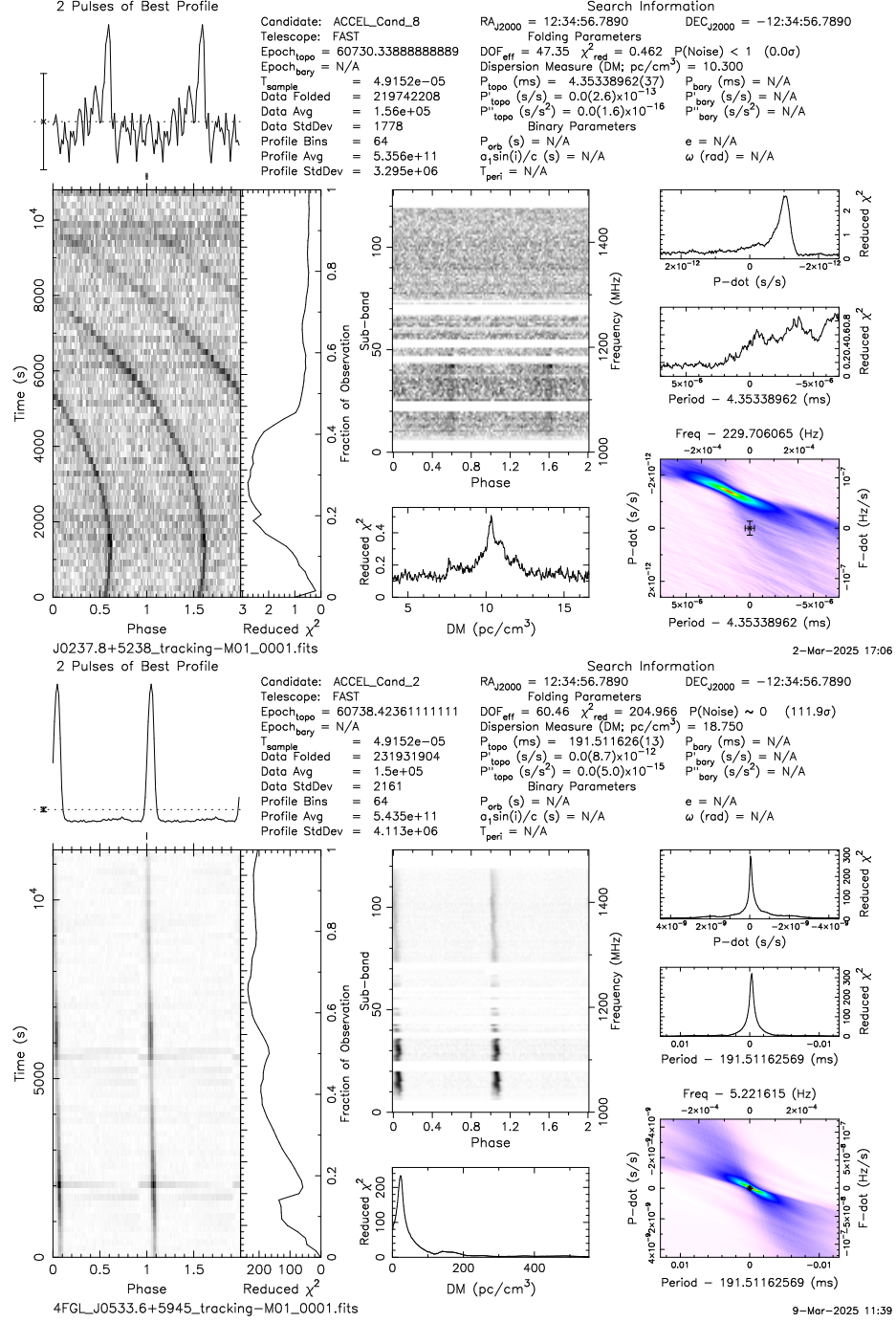


Figure 1: PSR J0237+5238和PSR J0533+5945的PRESTO原始搜索结果

Polarization Position Angle Swing and the Rotating Vector Model of Repeating Fast Radio Bursts

Xiaohui Liu

*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences
Beijing 100101*

Email: `liuxh@bao.ac.cn`

Fast radio bursts (FRBs), typically highly polarized, usually have a nearly constant polarization position angle (PA) during each burst. Some bursts show significant PA variations, and one of the non-repeating FRBs was claimed to have a PA variation pattern consistent with the prediction of the rotating vector model (RVM) commonly adopted to fit the PA variations in radio pulsars. We systematically study the PA evolution pattern of 1727 bursts from three active repeating FRB sources (FRB 20180301A, FRB 20201124A, and FRB 20220912A) monitored by the Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST). We identify 46 bursts whose PA variations are fully consistent with the RVM. However, the inferred geometrical parameters and rotation periods derived from these RVM fitting are inconsistent from each other. This suggests that the magnetosphere of the FRB central engine is constantly distorted by the FRB emitter, and the magnetic configuration is dynamically evolving. As a result, the effective magnetic axis may vary from case to case, so that under certain configurations, given the same viewing direction, the LoS would sweep across different field lines with significant PA variations, so that the RVM-like PA swings would show up.

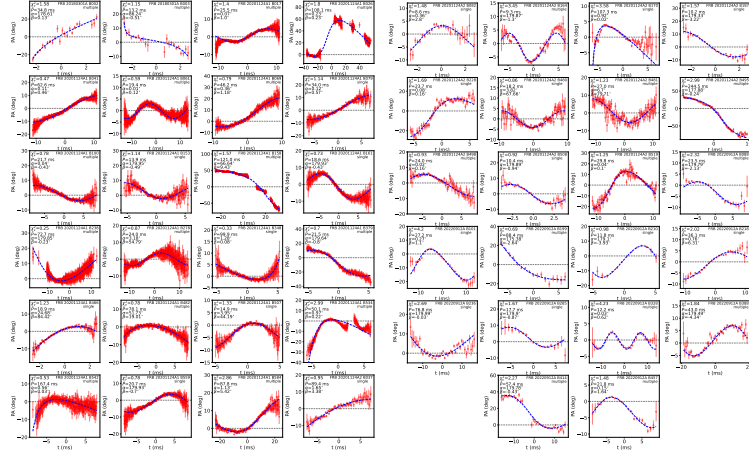


Figure 1: The measured PA profiles and the best-fit RVM curves for 46 PA profiles that exhibit RVM-like variations. For each panel, the corresponding sample and the identifier within that sample are labeled. The top left corner of each panel indicates the quality of fits χ^2_ν , along with the best-fit effective period $\hat{P}$, inclination angle α , and the impact angle β . Additionally, each panel specifies whether the burst has a single or multiple components.

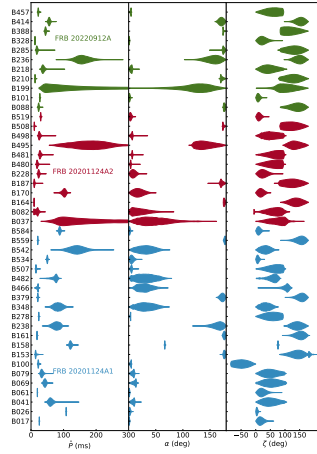


Figure 2: The violin summary of the 44 marginalized posterior distributions of the effective spin period $\hat{P}$, the inclination angle α and the angle between the rotation axis and the LOS ζ for a sub-sample of PA profiles exhibiting RVM-like variations. The violins from FRB 20201124A1, FRB 20201124A2, and FRB 20220912A are represented using blue, red, and green violins, respectively.

基于FAST脉冲星观测建立脉冲星时间

卢吉光 (*Jiguang Lu*)
贵州射电天文台
贵阳 550032
Email: lujig@nao.cas.cn

脉冲星时间概念在几十年前就已经被提出，到目前为止已经经过了各种验证，包括理论精度、稳定度与实际搭建脉冲星时间输出设备等。但直到目前为止，我们尚未建立一个脉冲星时间基准——像原子时那样稳定运行提供时间的基准。脉冲星时间基准的建立听起来是一个比较容易的事情，只要按照脉冲星观测结果去调整相应的时频设备它就可以输出时间。这个步骤听上去没有什么问题，实际上也确实就是这样，但这个系统需要较多的资源——如观测时间与人力——才能维持下去。我们都了解，相对于原子时来说，脉冲星转动的长期稳定度更高，但这个长期稳定度的应用价值在目前仍比较低。我们目前所研究的各种对象都并不迫切需要在年尺度或十年尺度上具有比原子时更高稳定度的时间基准，在空间尺度上我们目前也并不存在把研究范围拓展到地球通讯信号难以到达区域的迫切需求。这导致脉冲星时间研究处在一个比较尴尬的位置：它需求资源多，但是回报少。

那么，是不是不适合用FAST来做脉冲星时间研究？对于FAST望远镜，很多脉冲星的计时噪声已经由jitter噪声主导；但对于更小些的望远镜，比如百米级望远镜，多数脉冲星计时噪声依然受望远镜灵敏度影响。所以，理论上使用FAST进行脉冲星时间研究能够得到更优的结果，基于FAST脉冲星观测建立脉冲星时间也更为恰当。

另一方面，脉冲星时间是不是一个不合时宜的研究？或者，能不能等技术再进步一些再研究。实际上，我们现在正处于一个向外太空探索的关键时间点——探索对象由木星轨道以内转向木星轨道以外（比如，航天探索的下一代热门天体土卫六），二者的区别就是位于木星轨道以外的探测器难以与地球间进行通讯。因此，开发基于天文技术的计时手段，如脉冲星时间，已经迫在眉睫。所以，建立稳定运行的脉冲星时间基准也必然被提上日程。

脉冲星转动不受人为了干扰，与太阳系附近的参考系变换无关，因此脉冲星时间基准可以作为深空原子钟群协同与自主守时的重要手段。在任意位置（比如FAST处）建立脉冲星时间基准后，它可以成为太阳系及周边邻域较大尺度空间内时间比对的关键参考。在脉冲星时间体系中，脉冲星组中不同脉冲星辐射到达太阳系质心处的脉冲相位数组将成为标定时间的依据，为深空探索提供更便利的定时定位能力。

基于RMF模型的致密物质状态方程研究 ——零温EOS与统一方法

牛家兴 (Jia-Xing Niu)
扬州大学物理科学与技术学院
扬州 225009
Email: DX120250062@stu.yzu.edu.cn

多信使天文学时代，状态方程 (Equation of State, EOS) 不仅是理解中子星内部结构的关键，更是引力波、X射线及射电观测共同约束的核心物理量。随着GW170817双中子星并合事件的探测及FAST等高灵敏度射电望远镜的投入运行，人们对核物质密度区的强相互作用性质提出了前所未有的精确要求。

中子星内部的密度跨度很大，传统研究常对不同区域采用独立的核相互作用参数，这样EOS不确定性就会变得更大，直接影响半径、潮汐形变等宏观可观测量的理论预测。因此，我们发展了一套基于相对论平均场 (RMF) 的统一、自洽计算方法，从内核到外壳层的很大密度范围内，采用统一的RMF模型参数，通过虚时间演化在Wigner-Seitz (WS) 原胞内求解非均匀核物质分布，在零温下使用多组RMF参数集对中子星物质热力学性质进行了计算并和观测对比分析。

研究中采用了两大类的RMF模型。其一是非线性自耦合模型：介子场包含 σ 、 ω 、 ρ 的非线性自相互作用项，参数满足 $a_{\sigma,\omega} = 1$, $b_{\sigma,\omega} = c_{\sigma,\omega} = a_\rho = 0$ ，典型参数组包括NL3、PK1、PK1r、GM1、MTVTC等。其二是密度依赖耦合模型：令非线性自耦合项 (g_2, g_3, c_3, d_3 为0)，而核子-介子耦合常数随重子数密度 n_b 变化，代表参数组有DD-LZ1、DD-ME2、DD-MEX、DD-MEX1、DD-MEX2、DD-MEY、PKDD、TW99等。两类模型均在零温下求解Klein-Gordon方程，通过自洽迭代获得介子场与核子有效质量 m_i^* ，进而导出化学势，能量，压强等物理量。

为描述内壳层出现的“pasta”非均匀相，我们引入WS原胞近似。每个原胞都是电中性几何对称结构，内部包含质子和中子形成的团簇结构，外围弥散自由中子。给定原胞平均重子数密度 $\bar{n}_b$ 与质子分数 Y_p ，初始给定一个猜测的密度分布，然后通过虚时间演化方法迭代求解Dirac方程与泊松方程，更新介子场及密度分布，直至全局化学势相等且能量最低。

在密度 $n_b \lesssim 0.01 \text{ fm}^{-3}$ 时，随着密度的增加，各种非均匀相 (droplet、rod、slab、tube、bubble) 依次出现，之后变成均匀物质。非均匀结构更为稳定，其每重子能量相较均匀物质最大可降低约 8 MeV。总体而言， E/A 降幅随 Y_p 增大而增加：当 $Y_p = 0.1$ 时约为 2 MeV， $Y_p = 0.3$ 时约为 7 MeV， $Y_p = 0.5$ 时约为 8 MeV。当密度增大至 $n_b > 0.1 \text{ fm}^{-3}$ 时，两种结构的结合能差异最终消失，均匀物质变得更为稳定。在密度 $n_b < 10^{-4} \text{ fm}^{-3}$ 区域，不同相对论密度泛函 (RDFs) 所预测的 E/A 差异主要源于核子质量的差别，而各模型获得的结合能本身彼此吻合良好。

对于低密度 ($n_b < 10^{-5} \text{ fm}^{-3}$) 或大质子分数 ($n_b > 0.1 \text{ fm}^{-3}$ 且 $Y_p > Y_p^{\text{drip}}$) 下的致密物质，其状态方程和微观结构对所采用的RDFs通常不敏感。由RDF不确定性引起的差异出现在中子滴出开始后的密度区间 ($10^{-5} < n_b < 0.1 \text{ fm}^{-3}$) 及相应的质子分数条件 ($Y_p > Y_p^{\text{drip}}$) 下。特别地，当 $Y_p > Y_p^{\text{drip}}$ 时，计算得到的质子数 N_p 和液滴半径 R_d 大致随对称能斜率 L 的减小而减小，同时WS原胞半径 R_W 也略有减小。若采用更小 L 的RDF，在 $Y_p > Y_p^{\text{drip}}$ 条件下会出现更多的核意面结构，且相应的密度范围更宽。当密度进一步增大至 $n_b > 0.1 \text{ fm}^{-3}$ 时，致密星物质变为均匀相，状态方程的不确定性显著增加。(Niu et al., 2026)

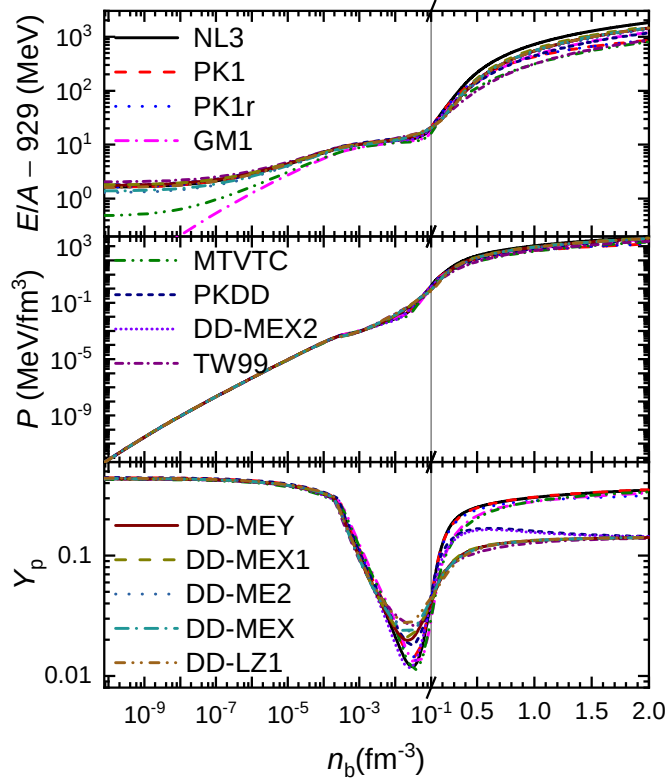


Figure 1: 中子星物质的每重子能量 E/A 、压强 P 和质子分数 Y_p 随重子数密度 n_b 的变化。

随着密度增加，质子分数 Y_p 减小，并在中子滴出开始时 ($n_b \approx 0.0002 \text{ fm}^{-3}$)，当 $Y_p < Y_p^{\text{drip}}$ 时斜率发生突变，从而形成中子星的内壳层。随后，对于中子星物质， Y_p 在 $n_b \approx 0.026 \text{ fm}^{-3}$ 附近达到最小值。因此，对于内壳层中的中子星物质，由于 RDFs 变化引起的压强和每核子能量的不确定性随密度增加而增大。特别地，在密度范围 $0.003 < n_b < 0.1 \text{ fm}^{-3}$ 内，由 RDFs 变化引起的不确定性上升并在 $n_b \approx 0.02 \text{ fm}^{-3}$ 处达到峰值，这也导致了中子星物质状态方程的变化。

后续工作将沿以下方向深入：引入有限温度效应，将统一EOS方法扩展至超新星爆发与原中子星热演化模拟；结合GW170817、PSR J0030+0451及NICER观测数据，对RMF参数实施贝叶斯约束，降低核物理不确定性向天文观测的传递；探索奇异自由度（超子、夸克物质）在统一RMF框架下的实现，研究奇异星与中子星的EOS异同及其在多信使信号中的可区分性。

References

J.-X. Niu, H. Sun, C.-J. Xia, and T. Maruyama, Phys. Rev. C, **113**, 025804 (2026).

中子星壳层和 Δ 共振态对 g -mode振荡的影响

孙浩(Hao Sun)
扬州大学物理科学与技术学院
扬州 225009
Email: dx120250063@stu.yzu.edu.cn

中子星是宇宙中密度极高的天体，其内部极端的物理环境是当前地面实验室无法复现的。尽管通过观测中子星的质量和半径可以对致密物质状态方程（EOS）进行一定限制，但仅凭静态性质难以完全解开中子星内部组分之谜（如是否存在超子、 Δ 共振态或夸克物质）。随着引力波天文学的发展，中子星的星震学研究成为了解致密物质内部结构的重要手段。在中子星双星并合过程中，强烈的潮汐场可能激发中子星的准正则模（QNMs）振荡。其中基频模式（f-mode）和重力模式（g-mode）最有可能被引力波探测器捕捉。特别是g-mode，其恢复力主要来源于流体元在化学成分梯度下的浮力，因此直接关联于声速的差异（绝热声速平方与平衡声速平方之差），是对致密物质微观结构极为敏感的探针。以往的研究多关注于核心区域的振荡，往往忽略了壳层（特别是内壳层）的贡献，或者未充分考虑重子激发态（如 Δ 共振态）的影响。此项工作基于统一的微观模型，分别探讨了内壳层非均匀结构以及核心 Δ 共振态对g-mode振荡特性的修正。

本文基于相对论平均场（RMF）模型，采用了能够统一描述中子星壳层与核心的微观状态方程，系统研究了中子星内壳层非均匀结构以及核心可能出现的 Δ 共振态对g-mode振荡频率的影响。研究涵盖了非线性自耦合（NL3, PK1, TM1, GM1, MTVTC）和密度依赖耦合（DD-LZ1, DDME-X, PKDD, DDME2, TW99）相互作用参数组（Niu et al., 2025; Xia et al., 2022），通过在Cowling近似下求解流体微扰方程，揭示了微观物理输入对宏观振荡特性的修正。主要研究进展如下：

1. 内壳层结构引发的壳层g-mode与避免交叉现象

中子星内壳层由非均匀的核“意面”相和渗透的中子气组成。研究发现，在略高于中子滴出密度的区域，由于自由中子气的出现以及核素的变化，绝热声速与平衡声速的差异（ $c_s^2 - c_e^2$ ）会出现显著峰值。这一物理机制直接导致了局限在壳层区域的“壳层g-mode”的产生。随着中子星质量的增加，壳层厚度减小导致壳层g-mode频率降低，而核心g-mode频率随核心密度增加而升高。当两者频率接近时，会发生明显的“避免交叉”（avoided crossing）现象，此时振荡能量在壳层与核心之间重新分布，形成全星范围的混合振荡模式。（Sun et al., 2025）

2. Δ 共振态导致的频率跃升效应

在中子星核心的高密区域，当化学势超过 Δ 重子的有效质量时， Δ 共振态将陆续出现。计算表明，每当一种新的粒子自由度（特别是 Δ^- ）出现时，平衡声

速会发生突降，导致声速差剧烈增大，从而在星体核心形成一个新的强浮力谐振腔。与仅含核子 ($npe\mu$) 的物质相比， Δ 共振态的出现会导致g-mode频率急剧上升。相比于f-mode和p-mode，g-mode对 Δ 共振态的响应最为敏感，是探测中子星内部奇异自由度的理想探针。

3. 利用g-mode约束核物质对称能斜率

研究还发现，对于固定质量的中子星，其核心g-mode频率与核物质对称能斜率 L 呈现出强烈的正相关性 (Sun et al., 2025)。然而，对于低质量中子星，由于振荡主要由壳层主导，这种相关性会变弱。因此，若要利用未来的引力波数据精确约束 L ，必须充分考虑壳层结构的贡献以及奇异自由度带来的系统性偏差。

综上所述，中子星的内壳层结构与核心中的新自由度（如 Δ 共振态）均会对g-mode振荡产生不可忽略的影响。未来的工作将进一步结合双星系统的潮汐相互作用，研究这些特征频率如何在引力波波形中留下可观测的印记，为利用第三代引力波探测器解密中子星内部结构提供理论依据。

References

- J.-X. Niu, H. Sun, C.-J. Xia, and T. Maruyama, Phys. Rev. C, **113**, 025804 (2026).
H. Sun, J.-X. Niu, H.-B. Li, C.-J. Xia, E. Zhou, Y. Ma, and Y.-X. Zhang, Phys. Rev. D **111**, 103019 (2025).
C.-J. Xia, B. Y. Sun, T. Maruyama, W.-H. Long, and A. Li, Phys. Rev. C **105**, 045803 (2022).

球状星团脉冲星搜索

田进发 (Jinfa Tian) 潘之辰 (Zhichen Pan) 钱磊 (Lei Qian)
 中国科学院国家天文台
 北京 100101
 Email: lqian@bao.ac.cn

很多球状星团中存在脉冲星，目前已在多个球状星团中探测到超过300颗脉冲星，其中包含了大多数毫秒脉冲星。如47 Tuc (Camilo et al., 2000), M28 (Stairs et al., 2006), Terzan 5 (Ransom et al., 2005)等等。尽管如此，但是仍有大量的球状星团中未发现脉冲星，我们利用FAST的高灵敏度对五个未曾发现脉冲星的球状星团 (NGC 6426, Pal 5, NGC 4147, NGC 5053, NGC 5634) 进行了观测，并使用PRESTO软件对这五个球状星团进行搜索(Ransom, 2001; Ransom et al., 2002)。最终没有脉冲星的发现。我们对未曾发现脉冲星进行了讨论，总结出来没有发现脉冲星的原因。我们收集了这五个球状星团的一些基本参数，详细信息见表一。

Table 1: 球状星团物理参数

星团名称	$\log \rho_c$ [$M_\odot/\text{pc}^3$]	v_{esc} [km/sec]	[Fe/H]	$R_\odot$ [kpc]
NGC 6426	1.98	11.0	-2.15	20.6
Pal 5	-0.77	2.2	-1.41	23.2
NGC 4147	3.78	14.0	-1.80	19.3
NGC 5053	0.54	6.4	-2.27	17.4
NGC 5634	3.70	25.3	-1.88	25.2

NGC 6426是一颗核心塌缩型球状星团，其核心密度对数仅为1.98，远低于其他发现过脉冲星的星团。中心逃逸速度11.0 km/s，远小于中子星诞生时典型的踢速度。因此绝大部分中子星在超新星爆发后直接逃逸。其金属丰度 - 2.15属于极贫金属，导致超新星爆发能量更高，进一步增大踢速度，且低金属丰度伴星的星风质量损失率低，难以通过吸积将中子星加速为毫秒脉冲星。Pal 5的核心密度对数低至 - 0.77，是银河系密度最低的球状星团之一。中心逃逸速度仅2.2 km/s，几乎无法束缚任何中子星。极低的金属丰度同样抑制了毫秒脉冲星的重生过程。NGC 4147的核心密度对数3.78,在五个星团中密度最高，但对比脉冲星富集星团仍然要低得多，中心逃逸速度14.0 km/s，仍远低于典型中子星踢速。其金属丰度 - 1.80，属于贫金属，不利于吸积加速。NGC 5053的核心密度对数0.54，中心逃逸速度6.4 km/s，金属丰度 - 2.27、密度最低的球状星团之一。极低的密度和金属丰度影响了脉冲星的形成与留存。NGC 5634在五个星团中拥有最高的逃逸速度25.3 km/s，但其核心密度对数3.70仍显著低于脉冲星富集星团。尽管25.3 km/s的逃逸速度可

束缚部分低踢速中子星，但其金属丰度 -1.88 仍属贫金属，抑制了毫秒脉冲星的再生。上述五个星团的核心密度和中心逃逸速度均远低于已发现脉冲星的星团，除NGC 5634外，其余星团的逃逸速度甚至低于典型中子星踢速的下限，导致中子星几乎全部逃逸。金属丰度普遍低于 -1.4 ，进一步抑制了毫秒脉冲星的形成。5个星团距离均超过17 kpc，远于大多数已发现脉冲星的球状星团（如Terzan 5距离约6.9kpc），显著增加了探测难度。总之，没有发现脉冲星是星团本身及观测设备等多种因素的结果。

References

- F. Camilo, D. R. Lorimer, P. Freire, A. G. Lyne, and R. N. Manchester, *ApJ* 535, 975 – 990 (2000).
- I. H. Stairs, S. Begin, S. Ransom, P. Freire, J. Hessels, J. Katz, V. Kaspi, and F. Camilo, “New Pulsars in the Globular Cluster M28,” in *American Astronomical Society Meeting Abstracts*, 2006, pp. 159.02 – +.
- S. M. Ransom, J. W. T. Hessels, I. H. Stairs, P. C. C. Freire, F. Camilo, V. M. Kaspi, and D. L. Kaplan, *Science* 307, 892 – 896 (2005), [astro-ph/0501230](#).
- Ransom, S. M. 2001, *New Search Techniques for Binary Pulsars*, Ph.d. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, USA
- Ransom, S. M., Eikenberry, S. S., & Middleditch, J. 2002, *The Astronomical Journal*, 124, 1788 – 1809

Magnetospheric structure and radiation of the whole pulse phase radio emission pulsar B1929+10

Zhengli Wang
Guangxi University
Nanning 530004
Email: 2107301139@st.gxu.edu.cn

We investigate the three-dimensional magnetosphere of the whole pulse phase radio emission pulsar B1929+10 using Runge-Kutta integration. Under rotating magnetosphere approximation, the magnetospheric structure and radiation of PSR B1929+10 are shown in Fig.1. One can see that the magnetic field lines behave as direction-dependent distortion. Distortion in the magnetic field lines yields high-altitude magnetospheric radio emission. Meanwhile, some magnetic field lines bunch at low magnetospheric altitude, as indicated by the black field line. The phenomenon of “bunching” in the magnetic field lines is attributed to the relativistic effect that become significant at high magnetospheric altitudes as the inclination angle increases. These characteristics seen in the magnetosphere of PSR B1929+10 cause a wide radio emission beam that sweeps across a large area of the sky, responsible for the whole pulse phase radio emission.

In addition, we find that the weak emission windows usually originate from narrow regions on the polar cap surface, accompanied by a high-altitude magnetosphere. Interestingly, the linear polarization of the weak emission windows from this pulsar exhibits a high fraction. This characteristic in the magnetospheric radio emission of this pulsar sheds light on the origin of the high linear polarization emission in pulsars.

References

- Philippov, A., & Kramer, M. 2022, ARA&A, 60, 495
Cheng, K. S., Ruderman, M., & Zhang, L. 2000, ApJ, 537, 964
Wang et al. 2024, ApJ, 963, 65
Wang et al. 2024 Astron. Nachr., 345, e20240010
Wang et al. 2025 A&A 700, 255

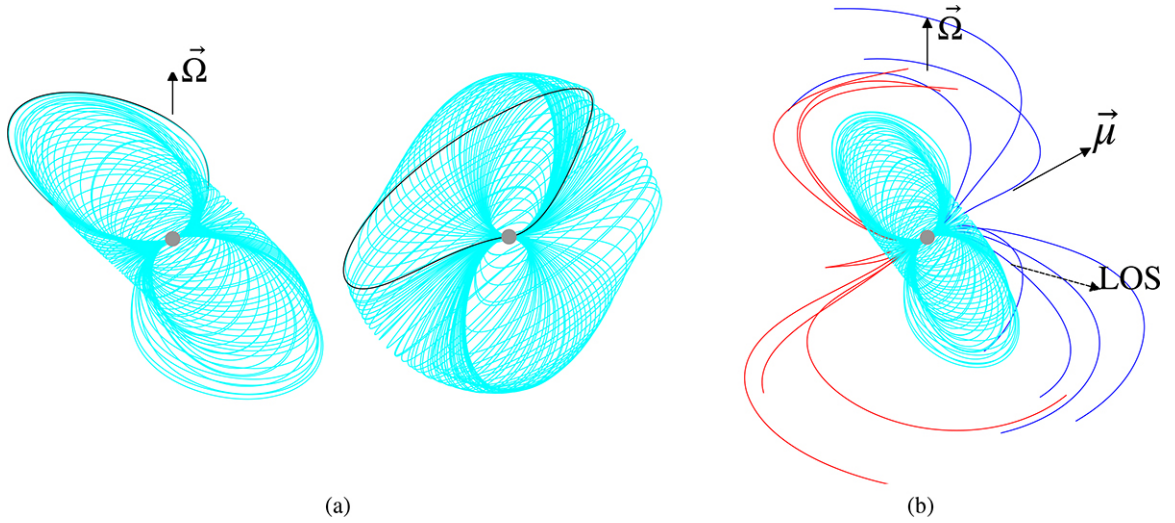


Figure 1: Three-dimensional pulsar magnetosphere for PSR B1929+10 assuming the rotating vector model (RVM) geometry of the inclination angle $\alpha = 55^\circ.62$ and the impact angle $\beta = 53^\circ.67$ under the rotating magnetosphere approximation. (a) Left: Plot of the last closed field lines (in cyan). Here, the radius of the pulsar is enlarged to unravel the geometry of the magnetosphere for better clarity. The rotation axis is upward, as labeled $\vec{\Omega}$. In this view of the plot, the elevation, azimuth, and roll angles are $0^\circ, -110^\circ$, and 0° , respectively. (a) Right: Projection looking down on the rotation axis ($x-y$ plane). The view of the plot corresponds to the elevation, azimuth, and roll angles being $90^\circ, -90^\circ$, and 0° , respectively. The magnetic field lines exhibit the phenomenon that they are bunching at low altitude due to the relativistic effect. We also select one of them as the representation and plot it in the black curve. (b) Geometry of the magnetosphere of this pulsar with some open field lines. To better reveal the pulsar magnetosphere, the magnetic field lines that come from the magnetic pole with the inclination angle, α , with respect to the rotation axis, are in dark blue curves. Meanwhile, the opposite magnetic poles are in red curves. The magnetic pole and the line of sight are also included, as labeled $\vec{\mu}$ and line of sight. Same as the view in the left panel of (a).

Interstellar Scintillation of RRATs

Ziwei Wu

*National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences,
20A Datun Road, Chaoyang District, Beijing 100012,
Peoples Republic of China
Email: wuzw@bao.ac.cn*

The interstellar medium affects the wavefront from a distant source, which causes propagation effects, including scattering, angular broadening, and Interstellar scintillation (ISS). Studies of pulsar ISS provide insights into pulsar proper motion, orbital motion, the interstellar medium, emission region properties, and etc. Rotating Radio Transient (RRAT) is a special class of neutron stars characterized by short, random, and extremely bright radio pulses. These pulses typically last only a few milliseconds, but the source remains quiescent between successive pulses, which may be separated by minutes, hours, or even days. The random nature of RRAT emission makes studying their interstellar scintillation properties particularly challenging.

We applied a single-pulse-based interstellar scintillation analysis method to systematically study public RRAT data from the Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope (FAST). The single-pulse-based interstellar scintillation analysis method has been successfully applied to fast radio bursts (Wu et al., 2024a,b). We obtained basic interstellar scintillation parameters for four RRATs and further constrained the proper motions of RRATs. The high proper motions of up to several hundred kilometers per second provide further evidence that RRATs originate from neutron stars.

For a more detailed analysis, please refer to Wu et al. (2025). We will carry out further in-depth investigations of ISS in RRATs with FAST, aiming to uncover their physical nature.

References

- Wu, Z.-W., Main, R. A., Zhu, W.-W., et al. 2024, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 67, 219512
Wu, Z., Zhu, W., Zhang, B., et al. 2024, *The Astrophysical Journal Letters*, 969, L23
Wu, Z., Zhu, W., Fang, Z., et al. 2025, *The Astrophysical Journal Letters*, 982, L49

致密物质的统一理论描述

夏钺君 (Cheng-Jun Xia)
 扬州大学物理科学与技术学院
 扬州 225009
 Email: cjxia@yzu.edu.cn

致密星（中子星、奇异星、白矮星）是致密QCD物质的天然实验室。由于无法直接应用格点QCD得到关于低温高密物质明确的计算结果，致密星从表面到核心的成分和物态方程仍存在很大的不确定性，涉及各种复杂结构和物相，如核意面、超子、玻色凝聚和夸克物质等 (McLerran et al., 2009)。而传统方法将不同密度区域分开处理，导致不一致性。

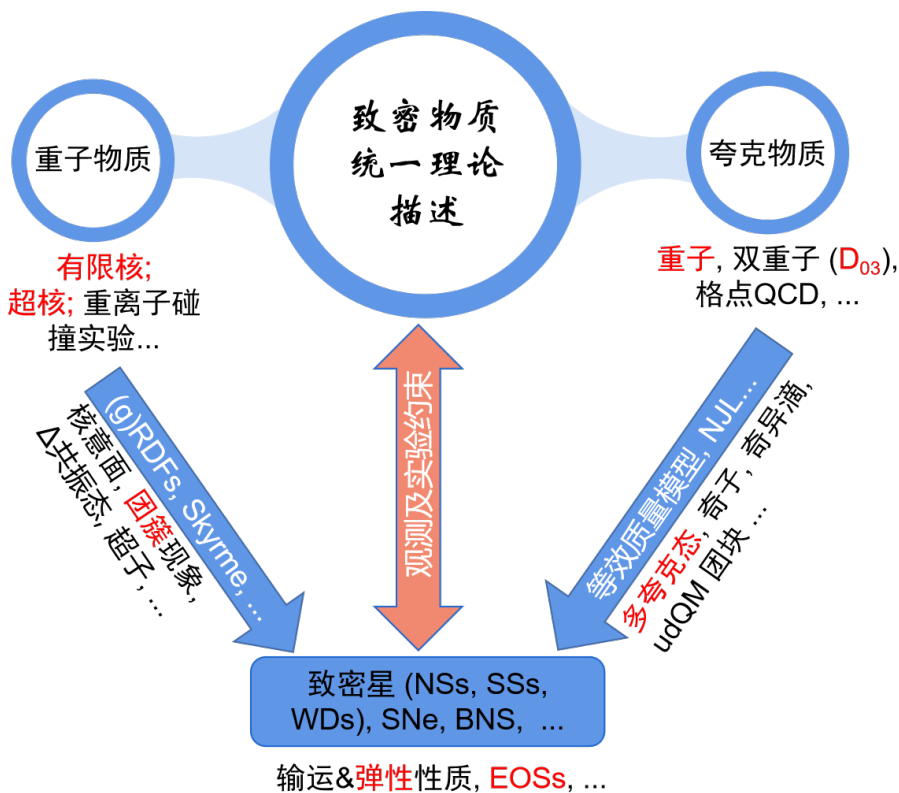


Figure 1: 致密物质统一理论描述的研究框架图。

如图 1 所示，我们的目标是从夸克自由度出发构建致密物质的统一理论描述，能够自洽地描述从有限核到致密物质的性质及其相变过程。本文简要介绍我们的一些进展：

(1) 利用相对论平均场模型获得统一的物态方程和微观结构： 采用若干相对论平均场密度泛函（如DD-LZ1）统一给出 $npe\mu$ 物质的物态方程 (Niu et al., 2025)。其中内壳层采用单核近似，并假设Wigner-Seitz原胞为球或柱形以描述核意面相 (Xia et al., 2021)。进一步应用于中子星 g 模振荡的研究，发现对称能斜率 L 显著影响 g 模频率，有望利用引力波数据约束 L (Sun et al., 2025)。

(2) 使用等效质量模型研究奇异多夸克态（双重子、多重子、奇异滴、udQM团块）的性质： 等效质量模型中夸克质量随密度标度演化，该模型被扩展到不仅能描述均匀夸克物质，也能描述有限多夸克系统。我们系统地计算了双重子态（如 D_{03} ）、重子数为 $A = 2, 3, 4$ 的多重子态的能谱，以及奇异滴和udQM块的性质 (You et al., 2024, 2025)。这些物体可能以稳定或亚稳态存在于致密星内部，并可能在重离子碰撞中被探测。

(3) 在扩展的SU(3) NJL模型框架下统一描述重子、夸克物质和相变过程： 从扩展的SU(3) NJL模型出发，构建了包含重子和夸克的统一拉格朗日密度 (Xia et al., 2024a,b)，其中重子被视为夸克团簇，其相互作用源于相同的有效拉格朗日量。该框架允许同时研究核物质、超子物质和夸克物质，以及液-气、手征和解禁闭相变。

综上所述，我们通过结合相对论平均场模型、等效质量模型和扩展的NJL模型，在致密物质的统一描述方面取得了进展。主要成果包括：

- 给出了 $npe\mu$ 物质的统一物态方程，其中自洽考虑了核意面相及其弹性性质。
- 在等效质量模型中系统研究了多夸克态（双重子、多重子、奇异滴、udQM团块）。
- 建立了将重子视为夸克团簇并描述多种相变的扩展NJL框架。

未来工作将集中于将这些统一物态方程应用于双中子星并合和超新星爆发的数值模拟，并探索奇异多夸克态在致密星天体物理和重离子碰撞实验中的可观测信号。

References

- L. McLerran and R. D. Pisarski, Nucl. Phys. B **195**, 275 (2009).
J.-X. Niu, H. Sun, C.-J. Xia, and T. Maruyama, Phys. Rev. C, **113**, 025804 (2026).
C.-J. Xia, T. Maruyama, N. Yasutake, T. Tatsumi, and Y.-X. Zhang, Phys. Rev. C **103**, 055812 (2021).
H. Sun, J.-X. Niu, H.-B. Li, C.-J. Xia, E. Zhou, Y. Ma, and Y.-X. Zhang, Phys. Rev. D **111**, 103019 (2025).
H.-S. You, H. Sun, H.-B. Li, C.-J. Xia, and R.-X. Xu, Phys. Rev. D **110**, 054041 (2024).
H.-S. You, X. Zhu, C.-J. Xia, J. Ping, and R.-X. Xu, Phys. Rev. D **112**, 114016 (2025).
C.-J. Xia, Phys. Rev. D **110**, 014022 (2024).
C.-J. Xia, T. Maruyama, N. Yasutake, and T. Tatsumi, Phys. Rev. D **110**, 114024 (2024).

“ $2 = 1.5 + 0.5$ ”: 纪念量子力学百年诞辰

徐仁新 (Renxin Xu)
北京大学物理学院
北京 100871
Email: r.x.xu@pku.edu.cn

在量子力学诞生一百年后的2025年回顾并展望，意味深长。众所周知，量子论和相对论铸就现代物理学两大基石，其中相对论这一基石又可“分解”为狭义的（“半个”基石）和广义的（另外“一半”）。基于量子力学¹和狭义相对论建立的量子场论蓬勃发展后成就伟业：“粒子物理标准模型”，被视作“1.5”个基石上孕育而成的瑰宝。如今是探索极端弯曲时空中物质形态的时代，即基于标准模型（SM）和广义相对论（GR）来理解宇宙中丰富多彩的物质世界：“**1.5 + 0.5**”。

事实上现代宇宙学就是建立在GR基础之上的；它使得古老的“宇宙学”成为一门定量而精确的科学，并提供了研究超越SM的测试场所。年逾百亿的宇宙中会充斥着哪些物质形态？答案同样离不开“SM (**1.5**) + GR (**0.5**)”。

SM是人们在总结所熟悉的原子²物质属性基础上建立的，但让我们反过来品味这一认识历程：鉴于QCD的三色和低能非微扰行为，存在重子是自然的，且核子（最轻的重子）可被其间剩余强力而凝聚成原子核。为维持电中性，两味（价）夸克对称的重子物质（即“核子物质”）中必然含有电子，这种不参与强相互作用的、由较弱的电磁力约束的粒子导致形成一种束缚态——原子！可见，以原子作为基本单元而构成的物质（即原子物质）是电磁作用主导的；我们简单地称之为“电物质”。即使对于天文学家而言，也一直“以近度远”并保守地认为：宇宙中主要充斥着电物质（从地球以及其他行星，到恒星，甚至星际物质）。然而，考虑到“SM + GR”，我们将会自然地认为还应该存在另外两种物质形态：强物质和奇点物质（即：黑洞）。

事实上，Roger Penrose于1965年证明的“奇点定理”已暗示黑洞的形成不可避免，而X射线双星和活动星系核表现出的难以置信的巨大能量释放让天文学家于1960年代不得不慎重思考黑洞存在的真实性。只不过，仅十年前成功地直接探测

¹人们一般将Heisenberg于1925年建立量子力学之前发展出的量子理论称为“旧量子论”，以“ $E = h\nu$ ”的三次使用为代表（使用者分别为Planck、Einstein和Bohr；参见：徐仁新，2025，物理，54(6)，437）。值得注意：该式被Einstein的第二次使用是激进的；虽然解释了光电效应并预言可检验的实验后果（即1916年Millikan发现的光电效应的频率依赖性），但并未被主流学术界所完全接受（那时学者们普遍沉浸于经典物理架构内解决任何挑战性科学问题的崇拜和迷信之氛围）。直到Bohr模型可以精确地描述氢离子光谱（Einstein惊呼“太棒了！”）之后，人们才不得不承认经典物理的局限性并切身地体会构建全新的物理学体系的紧迫性（正如Max Born那样，1923年开始对经典物理持严肃的怀疑态度）。

²“原子论”的重要性以费曼写在他的物理讲义中的一句名言最具代表性：所有物体由原子构成；这些小小的粒子不停地运动，且之间远程吸引、近程排斥。这句话蕴含着海量的关于物质世界的信息！

引力波之后，人们才惊讶于黑洞存在的普遍性超出过去的想象。此外，一个孪生的概念在稍早于“奇点定理”的1930年代即悄然涌现：恒星耗尽核能后残骸质量较大但尚未能够塌缩成黑洞之时将形成重子数 $A \sim 10^{57}$ 的强作用主导的凝聚态物质。类似地，称之为“强物质”。如果 $A > \sim 10^9$ 强物质块的基本单元为三味对称的奇子（FPS13文集31页），则宇宙QCD相变时可能残留大量的 $A \sim 10^{10 \sim 30}$ 奇子块。

一种观点认为，科学的进步并非线性地依赖时间，而是归功于大小不等的“阶跃”，即范式转变（如图1）。紧随百年前建立的量子力学新范式，我们正在逐步并谨慎地消化着“ $1.5 + 0.5$ ”。在这个“SM+GR”主导的时代，相信自然不会让我们失望，更多的让人惊喜的进展正等待着物理学家和天文学家们披露。年轻后辈们，加油！

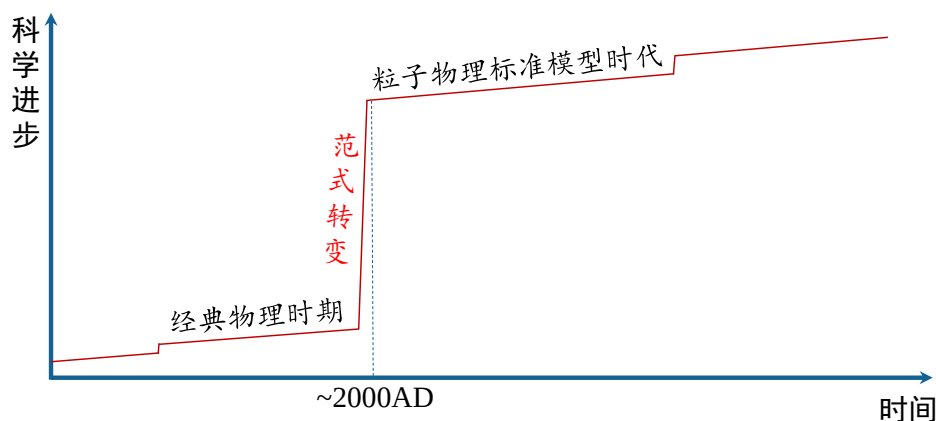


Figure 1: 科学的进步以一次次新范式替代旧范式来表征。一百年前从经典物理到量子力学的科学革命开启了人类认识“物质世界”的新纪元，其辉煌成就以粒子物理标准模型的建立为代表。标准模型跟广义相对论的深度融合改变了我们的宇宙观，或许也将拓展对于物质世界的理解：从传统的电物质，到强物质、奇点物质（即黑洞）。

脉冲星表面可能会长山！

徐子浩 (Zihao Xu)
北京大学物理学院
北京 100871
Email: 2501110202@stu.pku.edu.cn

在浩瀚宇宙中，脉冲星有如精准的宇宙时钟，以毫秒至数十秒为周期规律性地发出射电脉冲，而这看似单调重复的信号却隐藏着关于脉冲星物态组成的线索。天文学家长期困惑于一类“不该发光”的脉冲星：它们位于传统理论预测的“死亡线”之下——按经典模型，其自转感应电场 $E_{\parallel}$ （即平行于磁场方向的电场）已不足以驱动维持射电辐射所需的粒子级联过程，理应沉寂无声。但现实中，如PSR J0250+5854（周期 23.5 s）和PSR J2144-3933（周期8.5 s）等天体却能够持续发出脉冲信号。

一个可能的解释是：脉冲星的表面可能并非完全平坦，而是存在一些小山或类似的凸起结构。尽管这些小山的高度甚至不足毫米，但它们仍然能够显著改变真空间隙区¹的电磁场环境，从而降低对于射电辐射至关重要的真空间隙层高度，因此更加容易形成火花放电，进而形成我们所观测到的射电脉冲。一个陡度（高度/底径）约为 $\eta = 2.1$ 的山峰便可重新“打开”脉冲星PSR J0250+5854的射电辐射，类似地，PSR J2144-3933则需要 $\eta = 6.4$ 的小山，如图 1 所示。除了能够解释部分脉冲星的“死而复生”，小山的存在还可能为单脉冲调制、模式转换和子脉冲漂移等复杂现象提供一个统一的框架。

更关键的意义在于，山存在与否能够为揭示脉冲星的物质组成提供线索。若脉冲星为传统认为的中子星，依靠电磁相互作用结合在一起，表面结合能约为 $10 \sim 100$ eV，不规则的小山结构很难经受在真空间隙区被反向加速的高能电子的持续轰击，会被很快夷平或改变结构。若脉冲星是固态奇子物质构成——一种由u, d, s三种夸克组成的强相互作用凝聚体（其基本单元为类似核子的奇子），具有更高的结合能，则有可能保持小山结构稳定。因此脉冲星表面可能长山也就意味着星体很有可能是奇子物质构成的。

未来借助FAST等大型射电望远镜对单脉冲结构的精细观测，我们有望找到更多疑似脉冲星小山留下的痕迹，进而为脉冲星的物态研究提供更多有价值的信息。详细内容，参见：Xu等“Pulsar Sparking: What if mountains are on the surface?” RAA, 2026, 26, 035014。

¹按照M. A. Rudermann和P. G. Sutherland在1975提出的脉冲星理论模型，在脉冲星极冠区，由于单级感应效应和星体表面较大的正离子束缚能，磁场与表面之间会形成具有加速电场（平行于磁力线）的真空间隙，荷电粒子在该区域被加速后，通过曲率辐射或逆康普顿散射等过程产生高能光子，这些高能光子在强磁场背景下激发正负电子对并触发级联反应产生火花放电，最终形成射电脉冲。

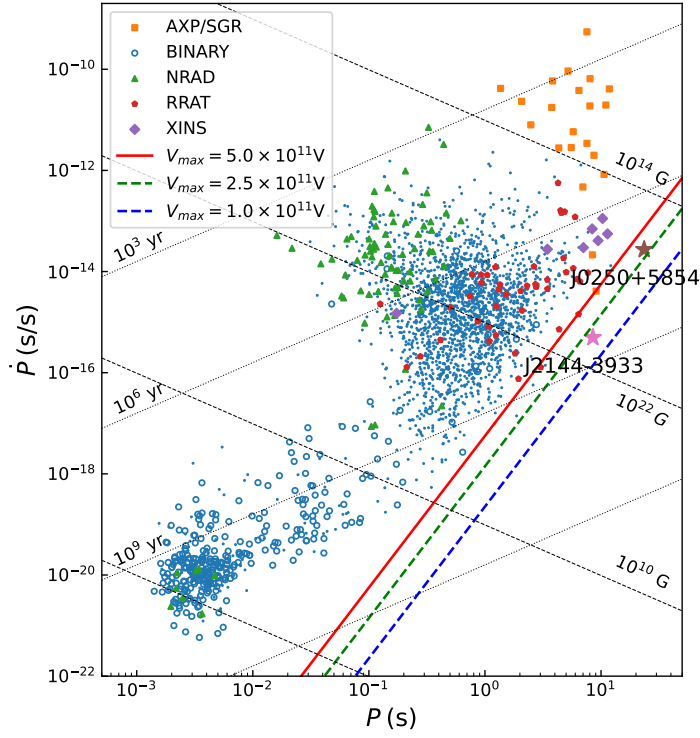


Figure 1: 已观测到的脉冲星周期-周期导数图。脉冲星表面长山能够放宽脉冲星产生射电辐射所需的条件，可以直观理解为脉冲星“死亡线”向图中右下方移动。红色实线为表面无山情形下的“死亡线”，绿色和蓝色虚线分别表示假设存在不同陡峭程度的小山情形下的“死亡线”。PSR J0250+5854和PSR J2144-3933 已用五角星在图上标出。存在小山或许能够解释这两颗原本“力不从心”的脉冲星为何有能力发出周期性射电脉冲。

发现由共有包层演化形成的罕见掩食脉冲星

杨宗霖 (Zonglin Yang)
中国科学院国家天文台
北京 100012
Email: zlyang@bao.ac.cn

共有包层演化在致密双星系统的形成过程中扮演着关键角色。在脉冲双星系统里，双中子星以及短轨道周期的中子星 - 大质量白矮星双星，通常被认为经由共有包层演化形成。该过程中，中子星进入膨胀的伴星内部，在不到1000年的轨道旋进阶段，轨道能量被转移至共有的氢包层，导致包层被抛射，仅留下燃烧的氦核。最终，一个初始轨道周期可达数百天的宽轨道双星，演变为由中子星与氦星组成的致密双星系统；而氦星在后续演化中可能形成大质量白矮星、中子星甚至黑洞。由于共有包层涉及的空间尺度和时间尺度跨越多个数量级，基于数值模拟的理论研究极其困难。通过观测由共有包层演化直接产生的脉冲星 - 氦星双星，可以对共有包层演化过程施加观测约束；然而这类系统仅能存留约几千万年，在银河系中极为罕见，过去从未在观测中发现。

借助中国天眼FAST强大的观测能力，FAST银道面脉冲星巡天发现了一颗奇特的掩食脉冲星PSR J1928+1815 (Yang et al., 2025 Science)。该脉冲星轨道周期为3.6小时，其中17%的时间信号被伴星物质遮挡。同时，其伴星质量超过1个太阳质量，远高于其他类似掩食脉冲星（红背脉冲星与黑寡妇脉冲星）的伴星¹。深入研究表明：若该伴星为主序星，其半径过大，无法容纳于当前致密的轨道；若为白矮星或中子星，则半径过小，难以长时间遮挡脉冲星信号。因此，这颗伴星极有可能是一颗半径介于二者之间的氦星（图1）。该系统的发现，为致密脉冲双星的共有包层演化形成通道提供了关键的观测证据与研究样本。

我们对PSR J1928+1815的形成及未来演化进行了模拟，发现系统中的氦星前身星应为一颗中等质量恒星，未来将演化成大质量白矮星，并最终通过引力波辐射与中子星并合。研究还表明，类似PSR J1928+1815的系统在银河系中可能仅存在数十例，极为稀有。此外，该发现对理解共有包层阶段中子星的吸积过程具有重要意义。为解释脉冲星10.55毫秒的自转周期，中子星需吸积超过 $0.01 M_{\odot}$ 的物质。由于共有包层演化时标很短，该过程中很可能发生了超爱丁顿吸积。对脉冲星辐射几何的分析进一步显示，吸积过程中的角动量传递可能具有较大的随机性。

¹ 观测数据公开在<http://zmtt.bao.ac.cn/GPPS/gpps0121/>

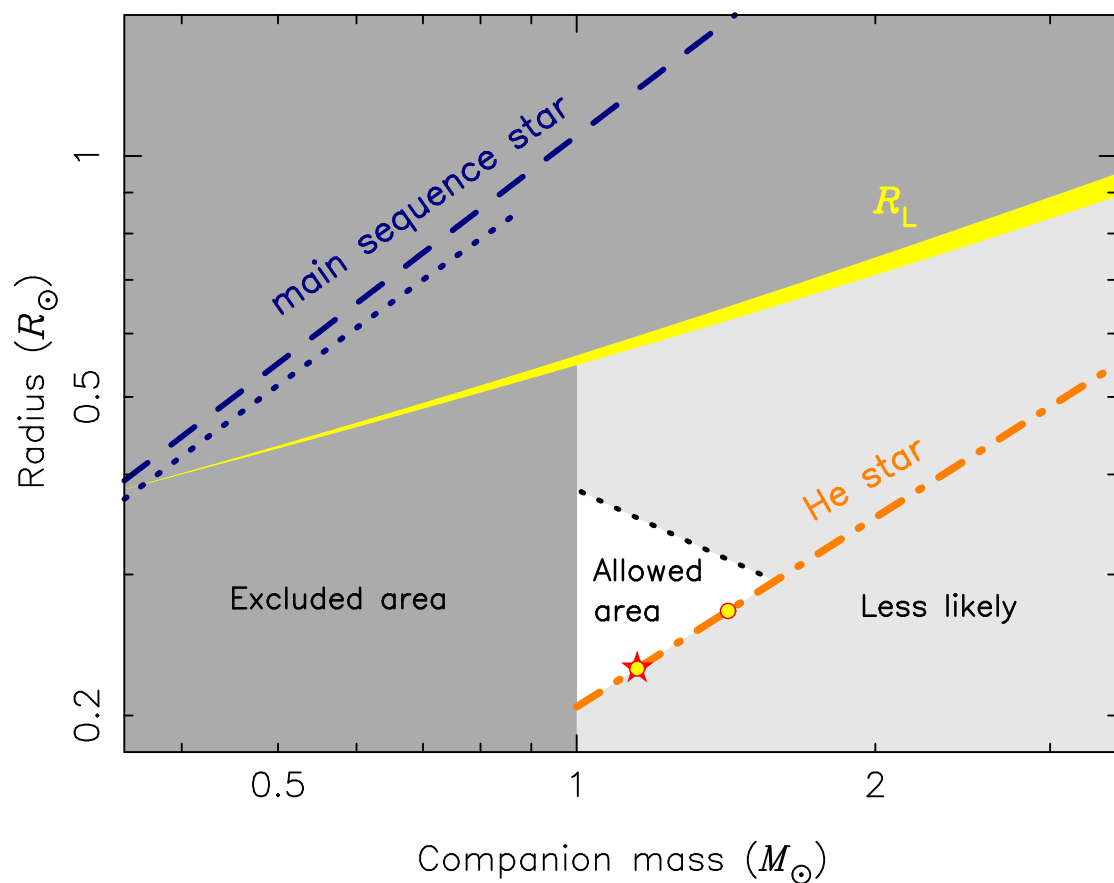


Figure 1: 对伴星质量半径的限制。根据测量轨道参数得到的质量函数 $f(M_p, M_c, \sin i) = 0.2342 M_\odot$ ，伴星质量不低于 $1 M_\odot$ ，同时伴星的半径不能超过黄色区域表示的洛希瓣半径(R_L)。图中的灰色区域被排除，因此PSR J1928+1815的伴星不是主序星，很可能是一颗失去氢包层的恒星裸核，也就是氦星。

DART Long period radio transient search

M. Yuan
National Space Science Center
Beijing 100871
Email: yuanmao@nssc.ac.cn

1 Introduction

Long-period radio transients (LPTs) are a recently recognized class of coherent radio emitters with periods from minutes to hours. Their extreme periodicities and high polarization challenge the standard rotation-powered pulsar paradigm and the viability of white-dwarf models. In particular, isolated LPTs without confirmed companions probe a largely unexplored region in the $P-\dot{P}$ plane, often approaching or exceeding the theoretical “death line” for dipolar radio emission.

Here we introduce the discovery of a 44-minute periodic radio transient, DART J1832-0911, located within the projected boundary of the supernova remnant (SNR) G22.7–0.2. The source exhibits a stable period $P = 2656.23 \pm 0.15$ s, placing it among the longest-period coherent radio emitters known. The spatial coincidence with an SNR provides compelling evidence that at least a subset of isolated LPTs originate from neutron stars.

2 Observation

The transient was detected with the Daocheng Radio Telescope (DART), a 1-km circular interferometric array operating in the 149–459 MHz band. The source was first identified on MJD 60374, and subsequent monitoring between MJD 60401 and 60443 captured multiple active epochs.

Interferometric localization yields $\text{RA} = 18^{\text{h}}32^{\text{m}}48.5^{\text{s}}$, $\text{Dec} = -09^{\circ}11'17''$, with an uncertainty of $\pm 5''$, placing the source within the radio shell of SNR G22.7–0.2 (Fig. 1). During active phases, pulses show peak flux densities of 0.5–2 Jy and widths of 40–300 s.

Complementary observations with FAST at 1–1.5 GHz during a DART non-detection epoch detected a short burst (~ 0.2 s) at the predicted rotational phase with peak flux density ~ 94 mJy. The dispersion measure is $\text{DM} = 464.5 \pm 0.7$ pc cm $^{-3}$, implying a distance of ~ 4.5 kpc under the YMW16 electron-density model, consistent (within uncertainties) with independent estimates for the SNR.

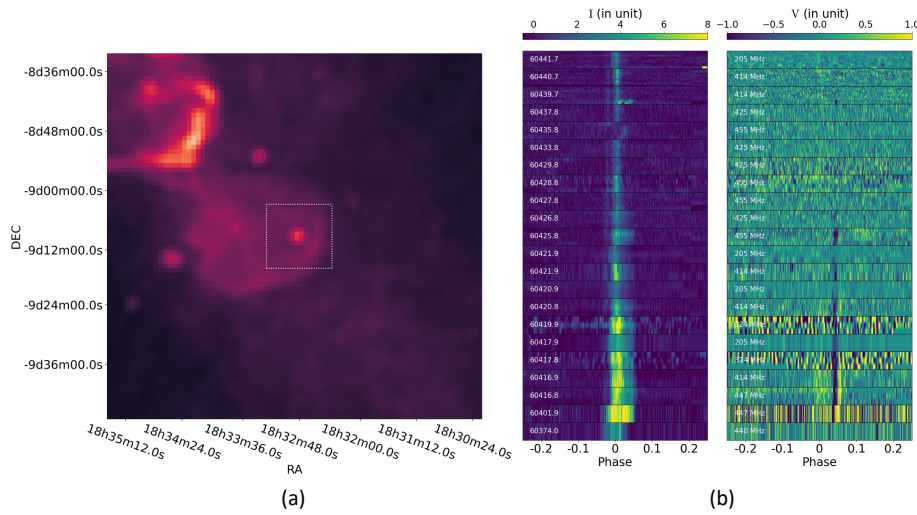


Figure 1: DART interferometric image of DART J1832–0911 at 425 MHz during pulse-on phase, located within SNR G22.7–0.2.

Optical follow-up with GTC reveals no counterpart down to $r \sim 26.6$ mag. Archival XMM–Newton observations show no persistent X-ray emission, placing a 99% upper limit of $6.6 \times 10^{-14} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (0.2–10 keV).

3 Results

Timing analysis of over 200 pulses yields a stable periodicity of 2656.23 s and constrains the period derivative to $\dot{P} < 5 \times 10^{-9} \text{ s s}^{-1}$. The source occupies an extreme region in the P – $\dot{P}$ diagram (Fig. 2), consistent with strong braking scenarios such as fallback-disk torques acting on a neutron star.

The absence of a luminous optical counterpart, the non-detection of persistent X-ray emission, and the positional and distance consistency with SNR G22.7–0.2 collectively favor a neutron-star origin. The SNR age, constrained between 3×10^4 and 2×10^5 yr, is compatible with spin-down to $\sim 10^3$ s under fallback-disk braking within the remnant lifetime. A chance-alignment probability of $\sim 0.7\%$ further supports a genuine physical association.

In summary, DART J1832–0911 links an isolated LPT to a supernova remnant, establishing a direct evolutionary pathway between ultra-long-period radio transients and young neutron stars.

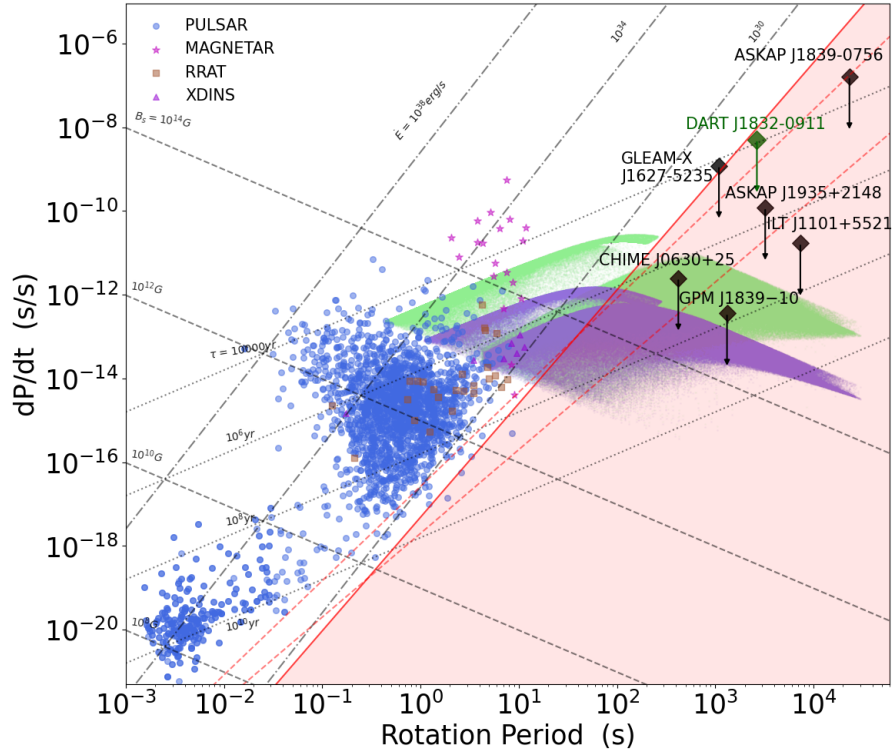


Figure 2: $P-\dot{P}$ diagram including DART J1832–0911 and other LPTs. The source lies beyond the conventional dipolar death line.

最新的天文观测对奇子物态的启示

苑文莉 (Wenli Yuan)
北京大学物理学院
北京 100871
Email: wlyuan@pku.edu.cn

在极端物理环境中，物质会呈现出怎样的形态？这一问题直指强相互作用的本质。基于量子色动力学（QCD）的理论框架，人们已经认识到：强相互作用物质的相图极其丰富，从高温高密下的夸克-胶子等离子体，到低能标区域可能出现的各种强耦合态，物质的存在形态远超出我们日常所熟悉的气体、液体与固体。在低能标下，由于QCD耦合常数较大，夸克之间的相互作用可以通过微扰方法处理，此时夸克物质可近似看作近自由气体；而在低能标区域，夸克之间的耦合增强，非微扰效应占主导，从而形成束缚态甚至呈现出类晶体结构。这种从“自由”到“强耦合”的转变，使得致密物质的微观结构充满未知。

在天体物理环境中，致密星体正是研究这一问题的天然实验室。这些星体的质量、半径以及潮汐形变参数对物态方程有直接的约束，从而为反向窥探致密物质的性质提供了关键窗口。“奇子星”（strangeon star）是致密星体的候选模型：即由“奇子”（strangeon）构成的表面自束缚致密星体。奇子可以理解为由多个夸克组成的类核子束缚态，是强相互作用在非微扰区的一种可能表现形式。由于奇子之间存在较强相互作用，这类物质不再是简单的流体，更可能呈现出晶格结构。为了刻画这种体系，可以采用经典的Lennard-Jones势唯象描述奇子之间的相互作用：其核心特征是短程强排斥、长程弱吸引。基于这一势函数，可以构建奇子物质的物态方程，其基本参数包括：奇子内部的夸克数目 N_q 、势井深度 ϵ 以及表面重子数密度 n_{sur} 。通过适当的无量纲化处理，模型还可以从三参数简化为两参数形式，从而提高分析效率并降低模型复杂度。一个关键问题在于：这些参数的物理取值目前仍存在较大不确定性。因此本工作引入贝叶斯统计分析的方法，将理论模型与最新的多信使天文观测数据相结合，对奇子物质的参数空间进行系统约束，拟重点探讨两个问题：其一，当前观测对奇子内部结构能够提供何种启示？其二，不同参数维度的模型在相同观测约束下是否能够给出自洽结果？所采用的数据包括脉冲星的质量和半径测量（PSR J0030+0451、PSR J0740+6620以及最新的观测PSR J0437-4715），以及双星并合事件产生的引力波信号（GW170817和GW190814）。

研究结果显示，在合理的先验范围内，观测数据明显偏好较大的 N_q 取值，特别是 $N_q = 18$ 的情况。这意味着，一个奇子可能由18个夸克组成，并在自旋、味道和颜色空间中呈现完全对称结构。这一结果不仅在统计上具有显著优势，也在物理上具有优美的对称性，为奇子结构提供了重要启示。进一步分析表明，在固定 $N_q = 18$ 后，不同观测组合（从仅包含质量-半径数据，到加入引力波约束，再到考虑质量间隙区天体）对模型参数的限制逐渐收紧。同时，我们发现无论采用三参数模型还是简化的两参数模型，在相同观测约束下得到的后验分布具有高度

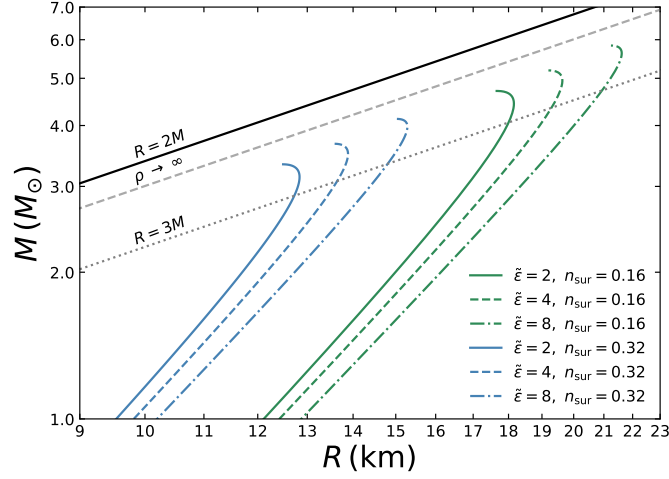


Figure 1: 在双参数模型下，不同参数组合 (ϵ 和 n_{sur}) 对应的质量 - 半径 ($M - R$) 关系。坐标轴采用对数刻度。同时还给出了黑洞极限 ($R = 2M$) 以及中心压强趋于无穷大时的极限 $R = 9M/4$ 。

一致性。在宏观性质方面，该模型预测奇子星具有较硬的物态方程，因此可以支持质量达到3.5 - 3.8倍太阳质量的超大质量致密星体。这一特性使其能够自然解释GW190814事件中约2.6倍太阳质量的质量间隙天体。同时，对于典型的1.4倍太阳质量星体，其半径被约束在约12公里附近，与当前观测结果一致。

本研究不仅为奇子物质提供了系统的观测约束，也展示了多信使天文学在探索强相互作用物质中的巨大潜力。随着未来更精确的脉冲星观测和引力波探测数据的积累，我们有望进一步揭示致密物质的真实状态，甚至回答一个根本问题：重子物质的真正基态是什么？此外，本工作还依托一个开源贝叶斯分析工具包（CompactObject, <https://arxiv.org/abs/2411.14615>），以实现多种物态方程（包括RMF、MIT袋模型以及奇子模型）的统一分析框架。该工具已公开发布并附有完整文档，旨在为社区提供高效的致密物质物态分析研究平台。这项研究从唯象相互作用出发，通过统计方法连接观测与理论，深化了我们对奇子物质的理解。

参考：Physical Review D 111, 063033 (2025)

Bayesian inference of strangeon matter using the measurements of PSR J0437-4715 and GW190814

Wen-Li Yuan, Chun Huang, Chen Zhang, Enping Zhou, and Renxin Xu

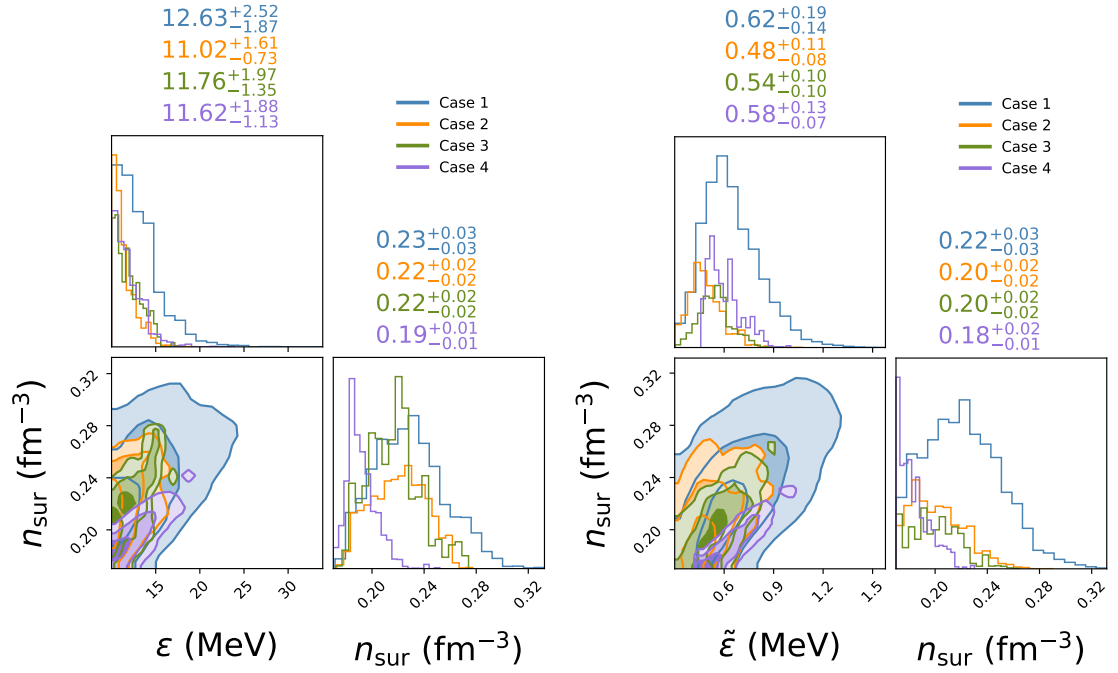


Figure 2: 在固定 $N_q = 18$ 的情况下，三参数模型的状态方程（EOS）的后验分布（左图）以及双参数模型的状态方程（EOS）的后验分布（右图）。每个分布对应Case 1、2、3和4所施加的不同约束。图中的等高线由深到浅分别表示 68.3%、95.4% 和 99.7% 的置信度。

浅谈致密物质、致密星与物态方程

张晨 (Chen Zhang)

同济大学物理科学与工程学院

上海 200092

Email: zhangvchen@tongji.edu.cn

如果在一场大灾难中所有的科学知识都被摧毁，只剩下一句话传给下一代，该留哪句话？费曼说，他会选择“所有物质都是由原子组成的”。物质基本组成是科学核心问题之一，对其的探索也推动着科技和人类文明的发展。

原子核内的中子、质子和更基本的夸克，由强相互作用禁闭在原子核内。而描述强相互作用的量子色动力学（QCD）告诉我们，渐近自由——即强相互作用强度随能量升高而减弱——不仅发生在能量标度，还发生在温度和密度标度，所以在高温、高密条件下所有物质的质子、中子会解禁闭成以夸克为基本自由度的夸克物质。这个基本图像揭示了不同核物质的相在QCD相图的大体分布，尤其在极高温和极高密，物质是以夸克物质这一物质形态存在。然而在更符合宇宙天体环境的中高密区域呢？在这个区域QCD因其非微扰的特性变得在数学上难以确定性地处理，而这个区域恰是中子星内部环境之所在。解禁闭效应可能在这个密度区域已经发生，从而引发强子-夸克相变，形成混合星（Hybrid star）。更颠覆性的可能是整个星体都由夸克物质组成，即夸克星（Quark star）。

夸克星的概念起源要追溯到Bodmer 和 Witten 四十年前的奇异夸克物质（Strange Quark Matter, SQM）假说，即由上、下、奇异夸克组成的SQM其每重子能量（ E/A ）在零压强条件下也能低于核素（ <930 MeV）。这不仅暗示中子星可能为由SQM组成的奇异夸克星（Strange Quark Star），甚至暗物质也可能为SQM。在此基础上，本人和合作者提出了上下夸克物质（Up-down Quark Matter, udQM）假说，指出如考虑QCD真空能对夸克味道的依赖，没有奇异夸克的夸克物质的 E/A 要比SQM和核素更低，且可稳定存在于超出元素周期表的区域。对于夸克星，因夸克物质内外真空压强差而具备的自束缚特性使其不需要引力作用也可保持稳定，其具有在小质量区域的质量正比于体积、即质量与半径正相关的这一与中子星截然相反的特征，从而小质量小半径的观测会帮助区分星体类型。

夸克星内部如果发生相变会怎样？基于这个很自然的问题，最近由本人和合作者探索了夸克星内部发生夸克-强子相变、夸克-夸克相变，和分别对应的反混合星与混合夸克星，发现这些新的构型能够帮助解释一些近期天文观测之间的疑似矛盾。

怎么去定量的描述和区分这些物质和其组成的星体呢？最相关的基本热力学物理量包含温度-压强-密度，其之间的关系即是物质状态方程。对于核物质，在中低密度区域，物态方程可通过地面实验进行约束，但在中子星核心所对应的高密区域，由于量子色动力学的非微扰效应，理论预言存在较大不确定性。夸克物质的物态方程则依赖于夸克间相互作用的具体模型，如MIT袋模型、Nambu - Jona-Lasinio (NJL) 模型等。致密物质的状态方程决定了致密星体的诸如质量、半径、潮汐形变等宏观特征。不同状态方程会给出迥异的质量-半径关系，尤其对于夸克星，其物态方程往往更“硬”（即压强随密度增长更快），从而更容易解释有关大质量的天文观测。而对于星体宏观性质的天文学观测可以反过来限制物态方程的不确定性。随着多信使天文学进入了黄金时代，实验观测和理论乃至与机器学习的结合在不断收窄物态方程的候选范围，正不断加深我们对于核物质基本性质和宇宙极端环境的理解。

单脉冲搜索和在FAST漂移扫描数据中的脉冲星发现

张亦弛 (Yichi Zhang) 潘之辰 (Zhichen Pan) 钱磊 (Lei Qian) 王路尧 (Luyao Wang) 张光远 (Guangyuan Zhang) 张欣雨 (Xinyu Zhang)
中国科学院国家天文台
北京 100101
Email: panzc@bao.ac.cn

500米口径球面射电望远镜（FAST）以其极高的灵敏度，在脉冲星搜寻领域展现出巨大潜力(Nan et al., 2011)。漂移扫描观测模式能够在不转动望远镜的情况下，利用地球自转对天区进行扫描，是一种高效的巡天方式(Jiang et al., 2019)。然而，由于其有效积分时间短（一次漂移扫描的波束通过时间大约为15秒(Li et al., 2018)）、数据量大，给数据处理带来了独特挑战。本文介绍了在FAST漂移扫描项目POP (Piggyback Observation of Pulsars)¹ 数据中开展单脉冲搜索的方法，并报告两颗新脉冲星的发现（DC001和DC002）。

FAST漂移扫描项目POP的天区覆盖范围与FAST-CRAFTS项目相似(Li et al., 2018)，但更侧重于ALFALFA巡天未覆盖的区域(Haynes et al., 2018)，是同时开启谱线终端和脉冲星终端的巡天项目。

本项目的脉冲星搜寻目前分为单脉冲搜索和周期折叠搜索验证两个流程。在正式搜寻之前，我们在数据中测试搜索了已知的脉冲星信号，验证了POP项目开展脉冲星搜寻的可行性。

对于单脉冲搜索，我们计划搜寻长周期脉冲星、旋转射电暂现源（RRAT）和快速射电暴（FRB），使用TransientX软件包(Men & Barr, 2024)，在色散量（DM）范围1.0至5000.0 pc cm⁻³、脉冲宽度0.2至100 ms、信噪比（SNR）阈值7.5的条件下进行搜索。筛选单脉冲图像后，发现了多颗脉冲星候选体信号并定位，再使用FAST中心波束跟踪观测验证，通过PRESTO软件包周期折叠搜索信号(Ransom, 2001; Ransom et al., 2002)，包括射频干扰（RFI）去除、消色散和快速傅里叶（FFT）搜索。最终确认了两颗长周期脉冲星。

DC001是在对天区DEC+061859-1的漂移扫描数据中发现的，位于RA(J2000) = 19 : 33 : 38.59, DEC(J2000) = +06 : 23 : 56.03，首次观测日期为2024年4月19日，并于2026年2月13日，该候选体在信噪比为19.8的单个脉冲中被首次识别，其色散量（DM）约为97.6 pc cm⁻³，脉冲宽度约为3.7 ms，发现图像如图1左图所示。经过后续跟踪观测，我们于2026年3月17日确认其为一颗新的射电脉冲星，自转周期约为0.546527268秒，其周期折叠图像如图1右图所示。

DC002是在对天区DEC+070219-1的漂移扫描数据中发现的，位于RA(J2000) = 20:12:50.49, DEC(J2000) = +07:03:03.5，首次观测日期为2024年4月17日，并于2026年3月3日，该候选体在信噪比为11.1的单个脉冲中被首次识别，其色散量

¹<https://fast.bao.ac.cn/cms/article/2034282224688386050>

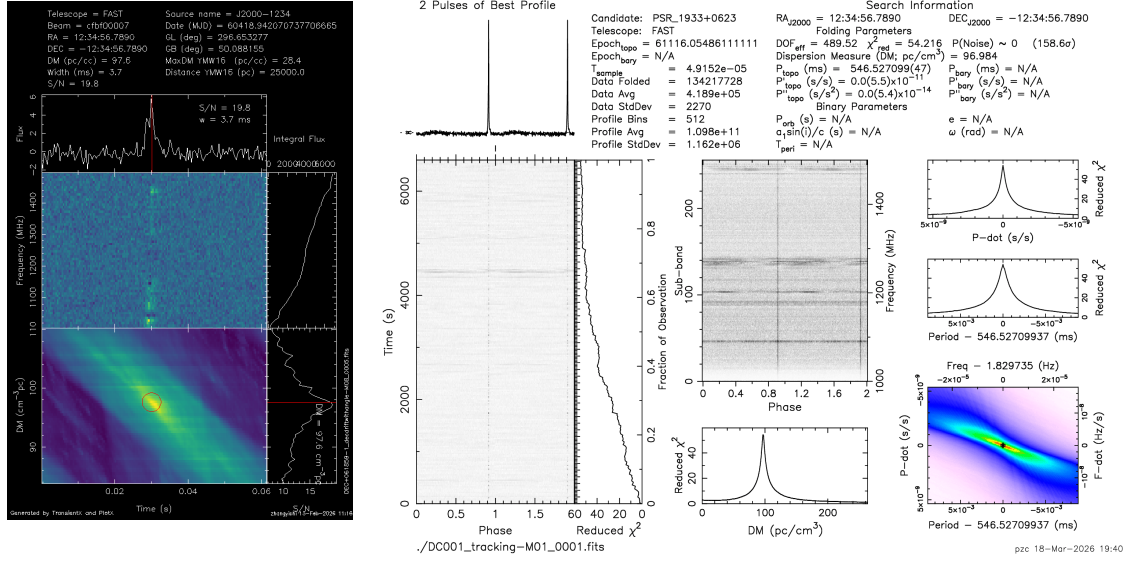


Figure 1: 左图为DC001发现时的单脉冲图像，右图为DC001 验证时的周期折叠图像

(DM) 约为 63.9 pc cm^{-3} ，脉冲宽度约为 22.2 ms ，发现图像2如图左图所示。经过后续跟踪观测，我们于2026年3月19日确认其为一颗新的射电脉冲星，自转周期为 6.35526238 s ，其周期折叠图像如图2右图所示。

这些发现证明了在FAST漂移扫描数据中开展高灵敏度脉冲星搜寻的可行性。单脉冲搜索在探测长周期脉冲星和快速射电暴（FRB）方面具有独特优势。结合FAST的高灵敏度与19波束漂移扫描的高效巡天能力，预计未来将在POP项目中发现更多新的脉冲星，丰富银河系脉冲星族群，并为引力波探测和星际介质研究提供重要样本。

References

- Nan, R., LI, D., JIN, C., et al. 2011, International Journal of Modern Physics D, 20, 989 – 1024
- Jiang, P., Yue, Y., Gan, H., et al. 2019, Science China Physics, Mechanics, and Astronomy, 62, 5, 959502. doi:10.1007/s11433-018-9376-1
- Li, D., Wang, P., Qian, L., et al. 2018, IEEE Microwave Magazine, 19, 3, 112. doi:10.1109/MMM.2018.2802178
- Haynes, M. P., Giovanelli, R., Kent, B. R., et al. 2018, apj, 861, 1, 49. doi:10.3847/1538-4357/aac956

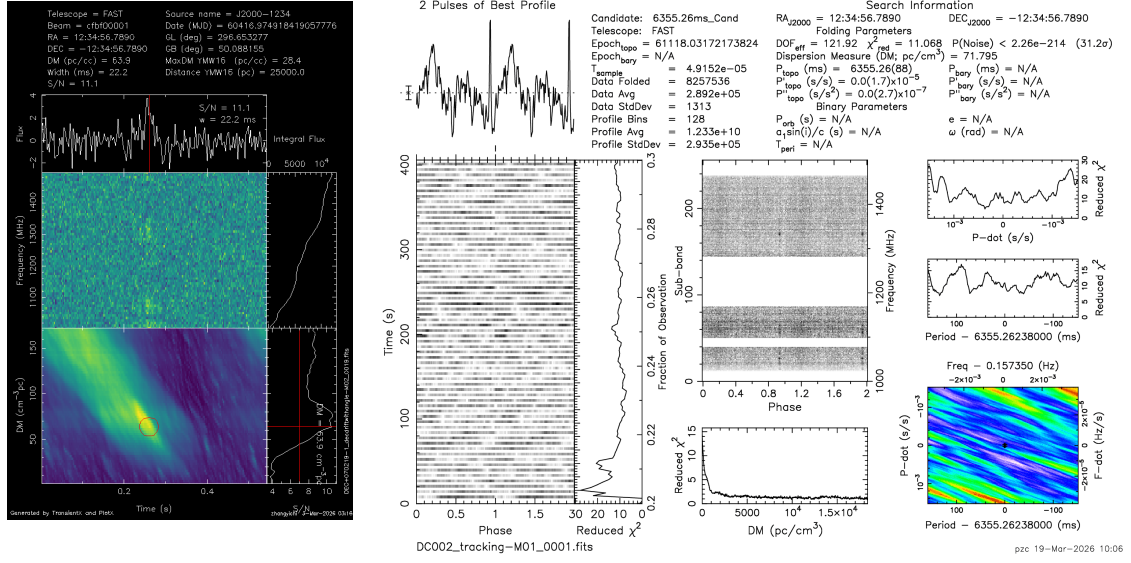


Figure 2: 左图为DC002发现时的单脉冲图像，右图为DC002 验证时的周期折叠图像

Men, Y., & Barr, E. 2024, *Astronomy & Astrophysics*, 683, A183

Ransom, S. M. 2001, *New Search Techniques for Binary Pulsars*, Ph.d. thesis, Harvard University, Cambridge, MA, USA

Ransom, S. M., Eikenberry, S. S., & Middleditch, J. 2002, *The Astronomical Journal*, 124, 1788 – 1809

状态方程在毫秒脉冲星自转加速过程中的作用

钟昕怡 (Xinyi Zhong)

长江大学物理与光电工程学院

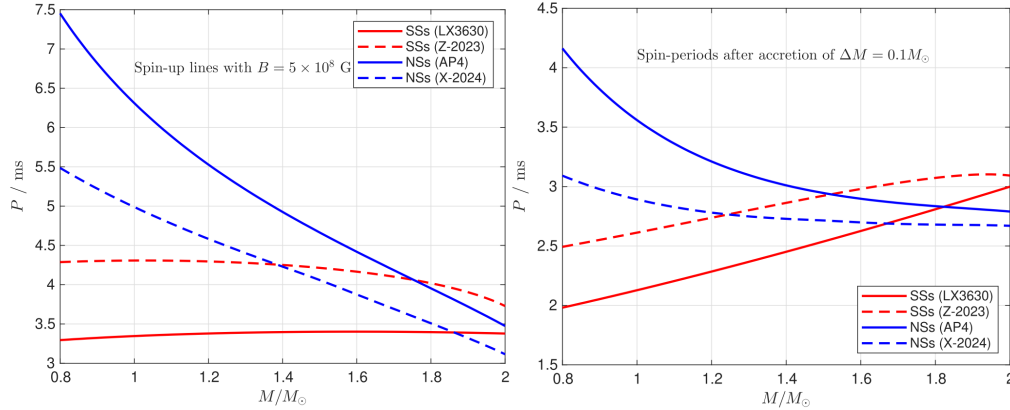
荆州 450000

Email: 2023710211@yangtzeu.edu.cn

脉冲星类天体是研究超核密度下物质状态的理想对象，但其状态方程（EoS）目前仍存在争议，主要模型包括中子星（NS）、夸克星（QS）和奇子星（SS）等。尽管高质量脉冲星和GW 170817潮汐形变的结果对EoS有一定的限制，但脉冲星本质仍不明确。

EoS决定了脉冲星的整体结构（如质量、半径、转动惯量）。毫秒脉冲星（MSPs）通过双星中的脉冲星吸积伴星质量演化而来，其自旋周期与吸积质量相关。以往关于MSPs演化的研究大多集中在双星演化的吸积过程，使用的是中子星的典型值，并未系统探讨EoS差异对MSPs自旋加速的影响，但具体EoS模型下算出的 M 、 R 、 I 也应对这一过程有作用。通过不同模型算出的 M 、 R 、 I 可以得到中子星和奇异星不同的结果，而这种不同的结果是有可能对引力束缚的中子星和自束缚的奇异星给出观测上的区分。

EoS应该满足两个太阳质量以上脉冲星的存在和GW 170817的潮汐形变的约束，因此我们选取通过观测检验的NS（AP4、X-2024）和SS（LX3630、Z-2023）模型，结合spin-up条件、角动量转移方程及磁场演化规律，建立质量-自旋周期（M-P）关系。



Spin-up条件需要把 $Alfvén$ 半径和共转半径 r_{co} 相比较。 $Alfvén$ 半径是磁能密度等于吸积物质动能密度的位置， r_{co} 是吸积物质的开普勒角速度等于星体自旋角

速度的位置。要被吸积加速，星体的自旋角速度应满足 $\Omega \leq \omega_c \cdot \Omega_K(r_m)$ ，其中 $\Omega_K(r_m)$ 为半径 r_m 处的开普勒角速度， $r_m = \phi \cdot r_A$ ， ϕ 与吸积盘形状有关， ω_c 与吸积力矩有关。因此spin-up条件也可表示为 $r_A \leq [\omega_c^{2/3}/\phi]r_{co}$ 。由于我们重点关注自旋加速过程中与EoS相关的结果，因此将不考虑对其他因素的依赖，我们取 $\phi = 0.7, \omega_c = 0.55$ 。可以看到，NSs(AP4和X-2024)的spin-up line随着质量的增加而减小，而SSs(LX3630 和Z-2023)的spin-up line却几乎与质量无关。

另一方面，我们从吸积质量的角度来考虑能达到的最小周期，当星体吸积了 dm 的物质后，获得的角动量为 dJ ，进一步就可以得到星体从 M_1 吸积到 M_2 能达到的最小周期 P_{min} 。其中，无量纲力矩 $n = 1 - \Omega/\Omega_K(r_m)$ ，它会随着自旋加速的进程而减小；而吸积会引起磁场衰减，进而改变 r_m ，我们使用 $B \simeq 0.8B_f(\delta M/M_{cr})^{-1.75}$ ， $B_f = 10^8 G$ ， $M_{cr} = 0.2M_\odot$ 来描述磁场。可以看到，在吸积质量相同的情况下，NSs的自转周期会随着质量的增加而减小，而SSs的自转周期随着质量的增加而增大，并且，低质量时，SSs会比NSs转的更快。

Spin-up line的推导没有考虑吸积质量，而最小自转周期的推导没有考虑spin-up条件，因此，我们可以把图中的两个M-P图的曲线放在一张M-P图上来同时考虑，每种模型的容许区域为spin-up line和 P_{min} 的曲线相交以上的区域，而SSs(LX3630和Z-2023)的容许区域覆盖了NSs(AP4和X-2024)无法覆盖的左下角区域，这表明了当质量小于约 $1.2M_\odot$ 时，SS比NS更容易加速到小于3ms的周期。这个例子表明，EoS对MSPs自旋加速的作用可以在低质量的情况下表现出来。而SSs中的LX3630模型与NSs中的AP4模型之间的差异要比SSs中的Z-2023模型与NSs中的X-2024模型之间的差异更明显。

为了与观测数据相对比，我们把结果扩展到吸积质量的不同值。在低质量($M < 1.2M_\odot$)的情况下，当吸积质量相同时，SS可以比相同质量的NS旋转得更快，当 $\Delta M < 0.1M_\odot$ 时，两者的差异更为显著。如果我们能找到一些低质量的快速旋转脉冲星，并且知道 ΔM 的上限，我们就有可能看到这些脉冲星到底是NS还是SS，例如，如果我们能约束 $\Delta M < 0.04M_\odot$ ，那么 $M < 1.2M_\odot$ 的NS不可能旋转到 $P < 11ms$ ，但SS可以。此外，如果我们只考虑SSs中的LX3630模型，SSs与NSs之间的差异会更显著。

最后做个简单的总结，我们发现，由EoS决定的脉冲星的整体特性，如质量、半径和转动惯量，可能在毫秒脉冲星的自旋加速过程中发挥作用。并且磁场对NS自旋加速的阻碍作用比对SS更显著，特别是对于小质量($M < 1.4M_\odot$)的情况。并且在低质量的情况下，对EoS模型的约束也会更好，如果未来能发现更多的小质量、小周期的毫秒脉冲星，是可以区分NS和SS的。更一般的讲，如果取别的物态的中子星或者别的物态的奇异星，定性的结论也应该是一样的，即自束缚的奇异星更容易有小质量，小周期的情况，而引力束缚的中子星，在小质量的情况下，很难被加速到足够小的周期。

参考文献：Zhong X, Lai X. The role of equation of state on the spin-up of millisecond pulsars[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2025, 544(1): 293-298.

Scientific Program of FAST/Future Pulsar Symposium 14

July 4-6, 2025, Qingdao University of Technology (QUT), Longhefupengxilaiheng Hotel (青岛西海岸隆和福朋喜来登酒店), Qingdao

(Language: English or Chinese; but the presentation is suggested to be written in English)

===== Friday, July 4 =====

09:00 -- 11:30 *Arrival & Registration*

(Joint sessions with SPSS'25)

Chair: 黄永锋 (15min = 12+3)

10:45 -- 11:00 班首涛: *XTE J1810-189: A new small size neutron star candidate?*

11:00 -- 11:15 蔡沿庆: *Ten-Year Monitoring of PSR J0814+7429 with LOFAR*

11:15 -- 11:30 曹顺顺: *New Results on Analysis of the Wave Summation in the Radio Emission of B1919+21*

11:30 -- 11:45 陈 瑶: *Towards DM-free search for Fast Radio Bursts with Machine Learning -- An implementation in multibeam data*

11:45 -- 12:00 牛家兴: *零温致密物质状态方程*

12:00 -- 12:15 丁若彬: *Discovery of Periodic Radio Signal from the formerly Radio-quiet Gamma-ray Pulsar J0359+5414 with FAST*

Chair: 徐仁新 (15min = 12+3)

13:58 -- 14:00 仪 式: 升 FPS 会议旗帜

14:00 -- 14:15 贺莎莎: *Pulsar Search and Timing in Globular Cluster M15*

14:15 -- 14:30 黄俊翔: *Constraining the Nuclear Equation of State of a Neutron Star via High-frequency Quasiperiodic Oscillation in Short Gamma-Ray Bursts*

14:30 -- 14:45 黄源尚: *Precision Determination of Scintillation Screen Parameters from Annual Modulation Measurement of Pulsar Scintillation Arc Curvature with the FAST Telescope*

14:45 -- 15:00 景威聪: *Pulse Broadening Observation by FAST*

15:00 -- 15:15 兰顺义: *Effect of Irradiation on the formation of Millisecond Pulsars*

15:15 -- 15:30 李洪波: *Ultraluminous X-ray sources: evidence for polar mound of strangeon stars*

15:30 -- 15:45 李锐楠: *利用快速射电暴宿主星系校准 DM-z 关系*

15:45 -- 16:15 *Coffee Break*

Chair: 韩金林 (15min = 12+3)

16:15 -- 16:30 林姿璇: *Correlations between Radio Emissions from Pulsars and Their X-ray Properties*

16:30 -- 16:45 刘 杰: *Analyses of pulsar emission components with the correlation method*

16:45 -- 17:00 刘小辉: *Polarization Position Angle Swing and the Rotating Vector Model of Repeating Fast Radio Bursts*
17:00 -- 17:15 刘 通: *Polarization Profiles of Globular Cluster Pulsars from FAST*
17:15 -- 17:30 刘佳忻: *Investigation for binary characteristics of LS I + 61°303 with optical polarization*
17:30 -- 17:45 马文琦: *The Event Rate and Energy Function of Fast Radio Bursts*
17:45 -- 18:00 缪雪丽: *GR test project with FAST*
18:00 -- 18:15 *Group Photograph*

晚宴 18:00 – 20:00

===== Saturday, July 5 =====

Chair: 王发印 (15min = 12+3)

08:30 -- 08:45 陈语杰: *Timing analysis of PSR J2338+4818 discovered by FAST*
08:45 -- 09:00 彭 龙: *Radio pulse search from Aql X-1*
09:00 -- 09:15 彭寒龙: *The long-term timing evolution of four Anomalous X-Ray Pulsars*
09:15 -- 09:30 石志鸿: *Pulsar population synthesis with magneto-rotational evolution: constrain the magnetic field decay*
09:30 -- 09:45 宋玥琦: *Linking Planetary Ephemeris Reference Frames to ICRF via Millisecond Pulsars*
09:45 -- 10:00 孙 浩: *中子星壳层和 Δ 共振态对 g 模振荡的影响*

10:00 -- 10:30 *Coffee Break*

Chair: 闫 振 (15min = 12+3)

10:30 -- 10:45 王琳琳: *脉冲星时间尺度一年期精度的研究*
10:45 -- 11:00 王正理: *The radiative subpulse modulation and spectral features of PSR B1929+10 with the whole pulse phase emission*
11:00 -- 11:15 王宇杰: *Timing Analysis of Highly Eccentric Pulsar Systems in M10*
11:15 -- 11:30 魏 宇: *The Timing and Polarization of PSR J0002+6216*
11:45 -- 12:00 吴子为: *Single-pulse-based interstellar scintillation of compact radio sources*
12:00 -- 12:15 徐艺琳: *PSR J1115+5030 单脉冲的研究*

----- Lunch time -----

Chair: 王洪光 (15min = 12+3)

14:00 -- 14:15 杨宗霖: *A pulsar-helium star compact binary system formed by common envelope evolution*
14:15 -- 14:30 杨 可: *Follow-up investigation of 11 pulsars discovered in Commensal Radio Astronomy FAST Survey*
14:30 -- 14:45 叶文韬: *Discovery of a γ -ray Pulse Radiation Change Associated with a Glitch in PSR J0205+6449*
14:45 -- 15:00 尤浩松: *轻夸克团块构成的致密矮星*

15:00 -- 15:15 苑文莉: *Constrain the strangeon matter EOS using the measurements of PSR J0437-4715 and GW190814*

15:15 -- 15:30 袁 懋 *DART 射电暂现源巡天*

15:30 -- 16:00 *Coffee Break*

Chair: 吴志勇 (15min = 12+3)

16:00 -- 16:15 张 晨: *slow-stable self-bound hybrid stars*

16:15 -- 16:30 赵仕乾: *Magnetosphere geometry revealed from a long-period radio pulsar*

16:30 -- 16:45 郑雨佳: *EP-FXT observations of magnetars 1E 2259+586, 4U 0142+61 and 1E 1048.1-5937*

16:45 -- 17:00 钟昕怡: *The role of equation of state on the spin-up of millisecond pulsars*

17:00 -- 17:15 周宇凯: *Progress of 2ICMA pulsar backend system*

17:15 -- 17:30 朱沛鑫: *脉冲星 glitch 现象的周期性与随机性*

17:30 -- 17:45 邹 靓: *Limits on the strength of individual supermassive black hole binary gravitational wave sources using high-cadence timing observations of PSR J1909-3744*

17:45 -- 18:00 吴岳: *The unique FRB associated X-ray burst: Inverse Compton Scattering of FRBs by Extreme Pair Flow during Magnetosphere Activities*

18:00 -- 18:15 温亚媛: *RAA 期刊: 助力科研成果发表 赋能天文创新发展*

Dinner, 18:00 – 19:00

===== Sunday, July 6 =====

Chair: 張祥光 (15min = 12+3)

09:00 -- 09:15 吴志勇: *Bow Shock Pulsar Wind Nebulae*

09:15 -- 09:30 张振辉: *The cyclotron radiation model of fast radio bursts*

09:30 -- 09:45 潘之辰: *谱叠加搜索暗弱短轨道脉冲双星*

9:45 -- 10:00 **Announcement of the Crab Prize and the Vela Prizes**

10:00 -- 10:30 *Coffee Break*

Chair: 袁业飞 (15min = 12+3)

10:30 -- 11:00 黄永锋: *从奇异星到致密星爆发现象——科研经验分享 (特邀)*

11:00 -- 11:15 谭柏轩: *Finding new compact binaries using photometry*

11:15 -- 11:30 武旭浩: *Symmetry energy effect on hot nuclear matter and proto-neutron stars*

11:30 -- 11:45 徐仁新: *“2=1.5+0.5”: 纪念量子力学百年诞辰*

11:45 -- 12:00 尚伦华: *FPS15 介绍, 转交 FPS 会议旗帜*