

五百米口径球面射电望远镜脉冲星研讨会
(13)

Local organizers

Shan Chang (YNU , co-chair)
Jun Fang (YNU)
Jinchen Jiang (NAOC)
Zejun Jiang (YNU, co-chair)
Wenhui Lin (YNU)
Jiguang Lu (NAOC)
Jianwei Zhang (YNU)
Li Zhang (YNU, chair)

FAST Pulsar Symposium 13

<https://psr.pku.edu.cn/conference/fps/FPS13/FPS13.html>

Yunnan University
Kunming
July 14-16, 2024

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)

第十三届全国脉冲星研讨会（FPS13）

2024年7月14日-16日 云南·昆明



500 米口径球面射电望远镜/未来脉冲星专题研讨会

第十三次会议

FPS 年会于 2012 年首次在新疆昌吉举办、第 13 次年会（FPS13）于 2024 年 7 月 14 日至 16 日在云南昆明召开。FPS13 评奖委员会（常姗、陈文聪、戴子高、高志福、龚碧平、姜泽军、来小禹、李剑、李兆升、彭秋和、钱磊、邵立晶、石洵、孙保元、全号、王发印、王洪光、夏铨君、徐仁新、闫振、袁业飞、岳友岭、张力、郑小平、周恩平、朱炜玮等 26 人构成）最终遴选出 Crab 奖一名（牛佳瑞）、Vela 奖二名（胡宸然和郑冬）。三位获奖者与颁奖嘉宾们合影如下。

这是 FPS 系列会议第二次在昆明举办。回顾 2013 年于滇池大酒店召开 FPS2，人数不足五十，但欣喜可见那时的“小苗苗”已经成才。这恰如其分地诠释了宋黎明老师在 FPS13 特邀演讲中所言（见 16 页）：“见证国家的发展与富强”。十来年，“弹指一挥间”；相信再过十余年，第三次*在昆明举办 FPS 系列会议之时，脉冲星学人会更强大！



FPS13 获奖者

牛佳瑞（右三）、胡宸然（右二）和郑冬（左三）

作为 FPS 人共同的“历史记忆”，您手中的第十三本会议文集将持续绽放 FPS 的更多精神魅力。所有 FPS 文集电子版 PDF 文件都能下载，网址如下：

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

这里 $\alpha = 1, 2, 3, \dots, 13$ 代表获取第一到十三次的 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 成员：云南大学 常姗（副主席）、方军、姜泽军（副主席）
林文慧、张见微，张力（主席）
国家天文台 姜金辰、卢吉光

公元贰零贰肆年拾贰月

*这一可能性是比较高的。除了目前领衔的 FAST，我国还在建或筹划三个百米级的射电望远镜（建于新疆、吉林、云南）。其中，云南 120 米望远镜面向南天，得天独厚。值得期待！

目 录

1. 脉冲星 B1919+21 的单脉冲偏振转动的分析与建模	曹顺顺.....	1
2. 普通脉冲星中的周期跃变与反跃变	葛明玉.....	2
3. 脉冲星散射与银河系星际介质结构研究	何秋忆.....	3
4. 快速射电暴的观测截断效应	胡宸然 (Vela 奖获得者)	5
5. 利用星震学方法探究致密星的物态方程	李洪波.....	7
6. 脉冲星数据处理程序包 LAPUDA	卢吉光	8
7. FRB 20201124A 的周期分析与偏振位置角跳变	牛佳瑞 (Crab 奖获得者)	9
8. 天体物理学和宇宙工程	钱磊.....	11
9. 用声学信使探测强作用块	祁昊洋.....	12
10. 用多站强度观测探索脉冲星闪烁屏的未知特性	石洵.....	14
11. 个人研究经历的几点回忆	宋黎明.....	16
12. 古姆星云是否为背景脉冲星的散射屏?	王睿, 闫振, 沈志强, 李柯伽, 赵融冰, 吴亚军, 黄志鹏, 王啸威, 刘杰.....	19
13. 上海天马望远镜的 170 颗脉冲星 8.60GHz 观测	王啸威, 闫振, 沈志强, 吴亚军, 赵融冰, 黄志鹏, 王睿, 刘杰	22
14. An extreme flux event evidenced by pulsar B1929+10	王正理.....	25
15. Interstellar Scintillation of Pulsars and FRBs	吴子为.....	27
16. 《奇异物质与奇异星》简介——致密星研究者的前沿指南	夏铖君.....	29
17. 漫谈奇子	徐仁新.....	31
18. 基于等效质量模型研究多重子态、夸克块和致密星	尤浩松.....	32
19. 脉冲星低频频谱反转的探索和来自 Gum Nebula 的发现	余婷, 张仲莉.....	35
20. 甚高能脉冲星晕的搜索与相似性研究	郑冬 (Vela 奖获得者), 王仲翔	37
21. 会议日程		40

脉冲星B1919+21的单脉冲偏振转动的分析与建模

曹顺顺 (*Shunshun Cao*)

北京大学物理学院

北京 100871

Email: 19css@pku.edu.cn

B1919+21是人类发现的第一颗脉冲星，因此曾被多次研究。我们利用FAST射电望远镜的数据，对脉冲星B1919+21的单脉冲信号进行了分析，发现在超过三分之一的单脉冲中，辐射偏振主轴有超过180度甚至360度的旋转。有的脉冲的偏振主轴甚至在其辐射区间内旋转接近720度。这种旋转伴随着圆偏振成分的变号振荡，并且旋转的方向的分布具有显著不对称性。这一现象的另一特点是，单脉冲偏振在FAST观测波段（1-1.5 GHz）内对频率的依赖很弱。

我们把这种现象归结为脉冲星磁层内波模的相干叠加，将脉冲星磁层简化为两层等离子体，半定量地复现了这一现象。我们提出B1919+21偏振旋转的核心在于磁层波模间的相位差随辐射相位有接近单调的变化，这可能暗示了磁层等离子体粒子的能量分布存在不对称性。同时我们认为这一现象的弱频率依赖可以从波模相位差对频率的依赖导出，并指出这要求B1919+21的辐射应该来自磁层中较低的位置，约10倍中子星半径的高度。

补充：此工作成型于FPS13会议之后，故未能在FPS13汇报。文章已于2025年4月发表于*ApJ* (Rapid Rotation of Polarization Orientations in PSR B1919+21's Single Pulses: Implications on Pulsar's Magnetospheric Dynamics. <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/adbe33>), 欢迎各位同行阅读后与我们交流讨论。

普通脉冲星中的周期跃变与反跃变

葛明玉 (Mingyu Ge)
中国科学院高能物理研究所
北京 100049
Email: gemy@ihep.ac.cn

在磁陀星的自转演化中，周期跃变与反跃变是比较常见的，往往与磁陀星的活动存在关联，尤其是周期反跃变。相比周期跃变，周期反跃变的事例更加稀少，并且有的事例是跃变后过恢复造成的。甚至有学者认为周期反跃变都是过恢复造成的。自然有一个疑问，在普通的自转供能脉冲星中周期反跃变这类现象是否也是存在呢？答案是肯定的。我们利用X射线观测和伽马射线观测，在PSR B0540-69和PSR J1522-5735自转演化中发现了周期反跃变的事例，并且跃变前后脉冲辐射特征不变。尤其在PSR J1522-5735中观测到的反跃变事例，不仅存在周期反跃变，而且也观测到了过恢复造成的周期反跃变。

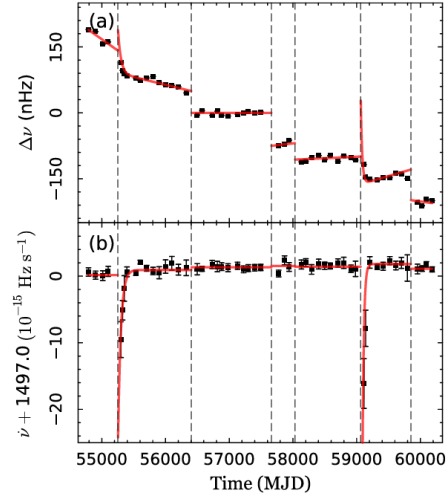


Figure 1: PSR J1522-5735自转演化中的周期反跃变和过恢复造成的周期反跃变事例。

脉冲星散射与银河系星际介质结构研究

何秋忆 (Qiuyi He)

云南大学物理与天文学院 (中国西南天文研究所)

云南昆明 650500

Email: qiuyi981022@gmail.com

脉冲星的信号在穿越星际介质时, 受到散射、色散和闪烁等传播效应的影响, 为研究银河系中电离气体的分布和性质提供了丰富信息。从1997年, 初步发现脉冲信号的延迟 (τ) 和色散量 (DM) 的关系, 到后来Cordes等人利用大量脉冲星样本, 提出了该关系的公式, 使得 τ -DM的关系研究得到了实质性的发展。这种 τ -DM关系在低DM脉冲星和高DM脉冲星上表现出不同的幂律斜率, 而DM值越高, 斜率越陡, 一般认为这与银河系内部区域的散射增加有关。

我们通过分析473颗脉冲星的1110条多频率散射观测数据并基于银河系的三维结构重新研究了 τ -DM这一关系¹, 认为在其中的脉冲星数据背后存在两个主要的脉冲星群。我们首次提出了约化散射强度 $\tilde{\tau}$ 的概念, 即 $\tilde{\tau} = \frac{\tau \cdot d}{DM^2} \sim \frac{\langle \Delta n_e^2 \rangle}{\langle n_e \rangle^2}$, 其中 d 代表脉冲星距离, 它有效消除了电子密度分布和距离的简并性。我们发现无论低频还是高频观测数据在 $\tilde{\tau} = 10^{-5.1} \text{ s cm}^6 \text{ pc}^{-1}$ 两侧形成了双峰分布, 将样本分成了两个明显的脉冲星群, 通过银河系的三维结构发现它们分别处在local和inner附近, 它们具有不同的 τ -DM关系 (图1b)。

通过研究内银盘区域脉冲星的散射标高分布, 我们发现散射介质的垂直尺度高度约为0.28 kpc (图1c), 这一结果暗示如果是由单一的结构引起的散射可能与电离气体和恒星活动有关, 而并非与中性气体或分子云相关。

脉冲星的约化散射强度 $\tilde{\tau}$ 的贡献可以分为两部分: 来自银河系平滑、大尺度散射的贡献 $\tilde{\tau}_g$ 和波动的散射强度 $\tilde{\tau}_s$ 。我们通过对我们样本的脉冲星散射数据进行三维结构分析并拟合得到了 $\tilde{\tau}_g$: $\log \tilde{\tau}_g = -1.99 \times |b|^{0.156} + 0.321 \times d \times H(8.3 - d) + 2.66 \times H(d - 8.3) - 3.79$, 其中 b 是脉冲星银河系纬度, $H(x)$ 是Heaviside阶跃函数。 $\tilde{\tau}_s$ ($\log \tilde{\tau}_s = \log \tilde{\tau} - \log \tilde{\tau}_g$) 使我们能够排除距离和银河纬度的影响, 更深入地揭示视线方向上特定结构对散射的影响。我们通过 $\tilde{\tau}_s$ 确认了已知的Vela区域对散射的影响较Gum Nebula更为明显 (图1d), 并发现了一个新的远距离超级气泡结构G38 (图1e)。这些研究结果不仅加深了我们对银河系电离介质结构的认识, 也证实了脉冲星散射观测可作为探测银河系结构的独立有效工具。

¹我们的收集的数据已公开: <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/J/MNRAS/527/5183>

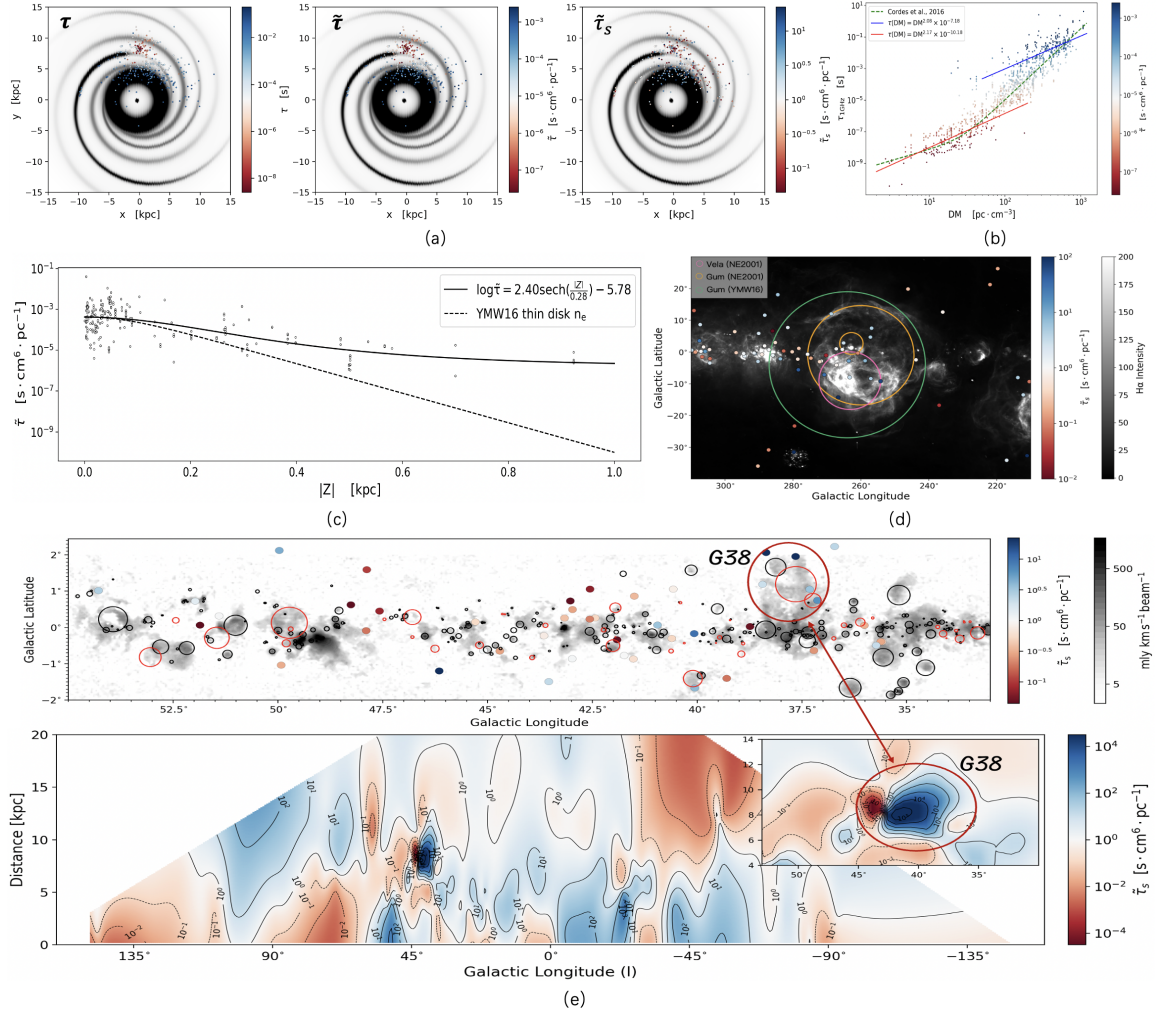


Figure 1: (a) 以YMW16电子数密度模型为背景的脉冲星样本的 τ 、 $\tilde{\tau}$ 、 $\tilde{\tau}_s$ 的银河系分布图。(b) 两个脉冲星群的 τ -DM的关系图。(c) 内银盘脉冲星的标高分布。(d) Vela区域对散射的影响，以H α 巡天图作为背景。(e) G38对散射的影响。上图以RRL数据作为背景，红黑圈表示认证的HII区结构。下图对与G38同纬度的所有脉冲星散射值进行差值处理后的结果，G38对散射的影响非常明显。

快速射电暴的观测截断效应

胡宸然 (*Chen-Ran Hu*)

南京大学天文与空间科学学院 南京 210023

Email: hcr@smail.nju.edu.cn

快速射电暴（Fast Radio Bursts, FRBs）会受到观测截断效应的严重影响。由于望远镜灵敏度和接收频段的限制，观测到的爆发频谱往往是不完整的，这严重限制了我们对其实质物理的探索。先前的研究提出了快速射电暴的频谱呈现为高斯轮廓（Hewitt et al. 2015, Law et al. 2017, Gajjar et al. 2018, Josephy et al. 2019, Lyu et al. 2022），而将接收频段对爆发频谱的截断与高斯谱形相结合，可以有效地解释不同爆发的谱指数在正值与负值之间变化（Spitler et al. 2016）。

利用阿雷西博天文台305米William E. Gordon望远镜（Arecibo, Hewitt et al. 2022）、Robert C. Byrd Green Bank望远镜（GBT, Zhang et al. 2018）和500米口径球面射电望远镜（FAST, Li et al. 2021）的观测数据，我们试图通过逆向建模来修正观测截断效应对FRB 20121102A大量爆发带来的影响。我们的反演重构包括使用数学和统计技术从观测数据中恢复真实的爆发特性。在重构爆发的基础上，进一步分析了爆发的内禀能量及频率特征。研究发现，高能爆发倾向于将能量集中在一个较窄的频谱范围内，而弱爆发的频谱范围可宽可窄。但那些具有宽谱的弱爆发很容易被望远镜的流量阈值截断，导致观测到的频谱很窄。这意味着重复快速射电暴的“窄谱特征”实际上是一种观测选择效应。此外值得注意的是，观测截断效应还会导致大量的能量损失，并使观测到的爆发能量分布发生变形。

我们发现，在重构的Arecibo样本（1.15-1.73 GHz）中，爆发的带宽会随着其中心频率的增加而增加，而在重构的FAST（1-1.5 GHz）和GBT（4-8 GHz）样本中没有发现这样的联系。这表明，在不同的活跃周期和高低频段之间，快速射电暴源的行为可能会变化。

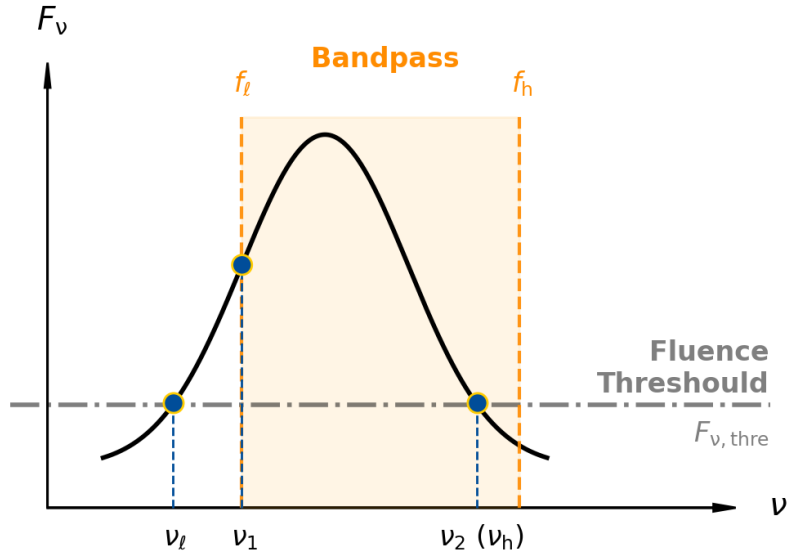


Figure 1: 快速射电暴的观测截断效应示意图（这里为共六种截断情形的其中一种）。

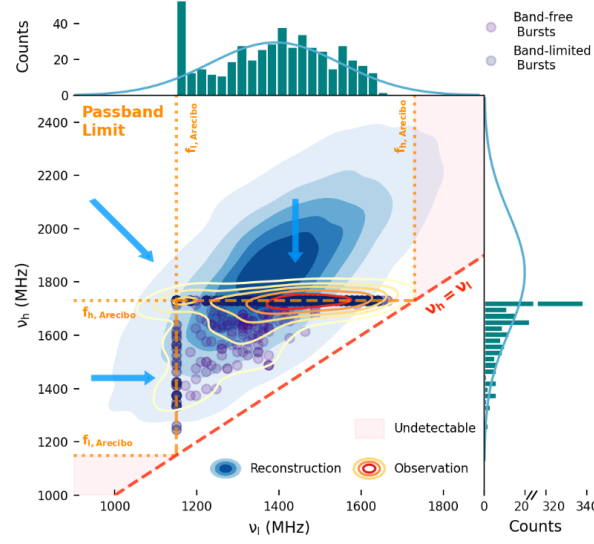


Figure 2: 爆发频谱的上界与下界的二维分布（Arecibo样本）：可以看到重构的内禀分布（蓝色等高线）在观测截断效应的影响下被挤压成为观测到的分布（黄-红色等高线）。

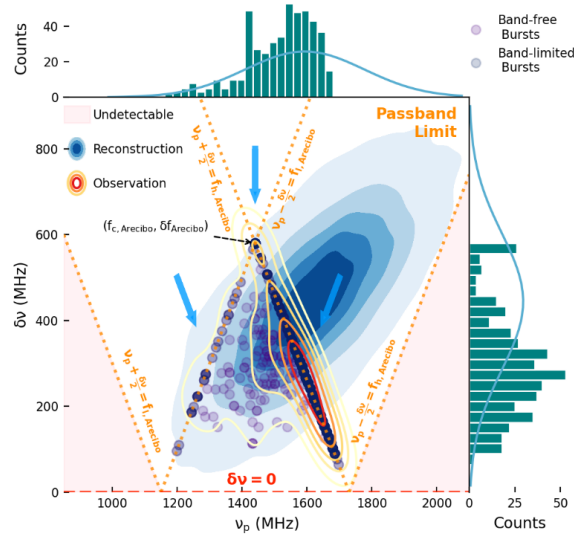


Figure 3: 爆发频谱的带宽与峰值频率的二维分布（Arecibo样本）：在观测截断效应的影响下，内禀分布（蓝色等高线）所呈现的相关关系会被隐藏起来，在观测到的分布（黄-红色等高线）中我们是看不到这样的相关关系的。

利用星震学方法探究致密星的物态方程

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

星震学是根据不同的振荡模式来研究星体内部的物质构成和特性。例如，日震学专注于观测太阳的振动以及解释这些振动所揭示的太阳内部结构。太阳是离我们最近的恒星，因此它的观测数据对于研究恒星内部物理过程具有重要的参考价值。类似地，致密星包括白矮星，中子星和夸克星也存在各类振荡模式。我们通过星震学的研究可以了解致密星的内部结构和物质组分。

我们的工作利用Lennard-Jones 模型来描述奇子星的物态方程，根据广义相对论下的流体静力学平衡方程得到了奇子星的质量半径关系。为了能够证明奇子星的动力学稳定性，我们计算了奇子星的径向震荡频率，讨论了震荡频率与质量之间的关系。另一方面，我们还计算了奇子星的潮汐形变参数、非径向震荡的频率，并且讨论了潮汐形变参数与频率之间的普适关系[1]。

软伽马射线重复暴被广泛认为是缓慢旋转的孤立的中子星。它们一般自旋速率大，磁性强 场和强大的爆发能量使它们不同于普通脉冲星。在一些巨大的耀斑和短暂的软伽马射线重复暴爆发中，观察到了准周期振荡 (quasi-periodic oscillations, QPOs)。理论研究表明，星体的扭转振荡可以解释QPOs。在这种情况下，我们系统地研究奇子星的扭转振荡频率。数值结果表明，由于奇子星的剪切模量大，我们的结果很好地解释了高频QPOs (> 150 Hz)。低频QPOs (< 150 Hz) 也可以被解释为奇子星的海洋层与壳层之间的界面模式。我们还讨论了磁场对QPOs频率的影响，发现当磁场的强度大于 4×10^{15} G时，才会对震荡频率有明显的改变，与传统的中子星相比，磁场的强度要大一个数量级[2]。

References

- [1] Li, Hong-Bo and Gao, Yong and Shao, Lijing and Xu, Ren-Xin and Xu, Rui, Oscillation modes and gravitational waves from strangeon stars, 2022, MNRAS, 516, 6172
- [2] Li, Hong-Bo and Kang, Yacheng and Hu, Zexin and Shao, Lijing and Xia, Cheng-Jun and Xu, Ren-Xin, Quasi-periodic oscillations during magnetar giant flares in the strangeon star model, 2024, MNRAS, 527, 855

脉冲星数据处理程序包LAPUDA

卢吉光 (*Jiguang Lu*)
中国科学院国家天文台
北京 100101
Email: lujig@nao.cas.cn

我们在之前编写的专门用于处理FAST脉冲星观测数据的数据处理程序包LAPUDA¹的基础上进行了相关改进，欢迎大家试用！修改内容如下：

- 软件增加了setup.py可用于软件快捷安装。
- 软件增加了语言设置功能，可以将按需求设置成英文、中文或其它语言。
- 射频干扰消除程序增加了在时域与动态谱域消干扰与脉冲轮廓显示等功能。
- 脉冲星测时交互程序增加了选点拟合、界面缩放、周期跳变的分支选择撤回功能以及脉冲轮廓查看功能。
- 程序对文件信息、变量名、参数名等进行规范，便于程序读写与修改。

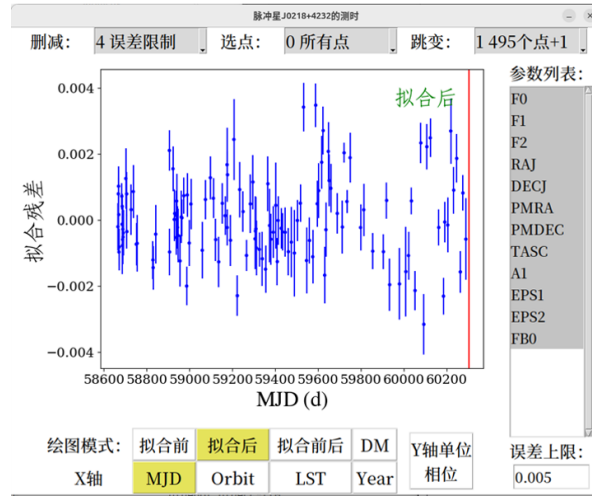


Figure 1: LAPUDA脉冲星测时交互程序界面，其中可以看到选点拟合、界面缩放、周期跳变的分支选择撤回功能与中文显示界面。

¹注：软件目前发布在<https://gitee.com/lujig/lapuda>，之前发布在GitHub网站的链接已失效。

FRB 20201124A的周期分析与偏振位置角跳变

牛佳瑞 (Jiarui Niu)
中国科学院国家天文台
北京 100101
Email: niujiarui@nao.cas.cn

通过研究FRB与脉冲星之间的相似性和差异性，可能揭示FRB的起源与脉冲星之间的潜在关系。其中，时序分析和偏振研究意义重大。通过时序分析，可以识别FRB是否具有周期性特征，这对于了解其中心引擎（如脉冲星或磁星）至关重要；通过分析FRB的偏振特征，能够推断源周围的磁场环境，区分不同的辐射机制，理解FRB在极端环境中的传播过程。

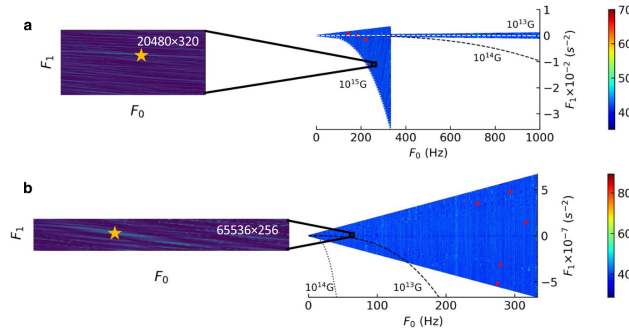


Figure 1: 图a展示了单天一小时观测内线性加速度的到达时间搜索的网格。图b展示了整个四天活跃期内线性加速度的到达时间搜索网格[1]。

根据目前已有的观测结果，FRB在时序分析中呈现出以下特点：1. 部分重复FRB中观测到周期为天量级的活跃窗口。如FRB 20180916B存在约为16天的周期，可能解释为双星系统的轨道或者中心引擎的进动。2. 重复FRB在秒量级没有找到明确的周期。我们对FRB 20201124A高暴发率的观测进行了详细的周期搜索。我们排除了在1毫秒到600秒范围内存在显著周期性的可能性。3. FRB中存在毫秒量级的具有准周期的微结构。我们在FRB 20201124A的一个活跃期中观测到53个具有准周期的微结构暴发团。由于这些准周期并不相同并且不是倍频关系，所以我们认为微结构的准周期可能并不对应自转周期。

我们在FRB 20201124A中首次发现了偏振位置角的跳变现象，为FRB的磁层内起源提供了新的支持。由于观测到的跳变发生的时间尺度非常短（约1毫秒），如图2中所示，这暗示了辐射区域必须非常小，小于大多数脉冲星的光速圆柱，通过对数千次暴发的数据分析，我们发现了三例偏振角跳跃的暴发。跳变暴发非常罕

见，这表明需要非常特殊的条件，可能是特殊的几何引起。这些跳变现象与脉冲星中的观测极为相似，表明FRB的辐射可能源自一个高度磁化的等离子体环境。在如此短暂的时间内捕捉到偏振角的跳跃现象，需要极高的观测灵敏度和大样本的数据。快速射电暴的偏振位置角的跳变可能来自磁层内不同模式的叠加，这为FRB辐射区域的物理条件提供了新的限制。

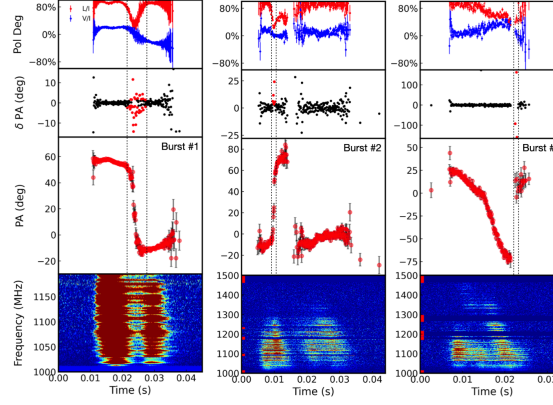


Figure 2: 该图展示了在FRB 20201124A的两轮观测中发现的三例偏振位置角的跳变现象[2]。

References

- [1] Jia-Rui Niu et al. “FAST observations of an extremely active episode of FRB 20201124A. IV. Spin period search” . In: RAA 22.12 (2022), p. 124004.
- [2] JR Niu et al. “Sudden polarization angle jumps of the repeating fast radio burst FRB 20201124A” . In: APJL 972.2 (2024), p. L20.

天体物理学和宇宙工程

钱磊 (Lei Qian)

中国科学院国家天文台

北京 100101

Email: lqian@nao.cas.cn

天文学是一门古老的科学。在最近一百多年天文学经历了快速发展，进入了全波段、多信使观测的时代。在此过程中也衍生出了空间天文学等学科。最近一些年，随着学科交叉的深入，天文学的内涵又发生了变化，太阳物理的很大一部分被归为空间科学，太阳行星的研究被归为行星科学，天文数据的处理有变为信息科学一部分的趋势。天文学未来会向何处去？是否会消失在历史的长河中？

我们来看一下和天文学相对应的地学。在地学中，地理学是研究地球表面地形地貌特征的科学，虽然已经不可能发现新的大陆，但地理学并未消失。人类的生活和地理学密切相关，只要人类社会还存在，地理学就仍然会发挥巨大作用。地质学是研究地球组成和结构的科学，虽然我们了解了地球的大致结构，但地球是不断变化的，新的现象层出不穷。此外，随着太阳系行星探索的开展，地质学的边界也在不断扩张。地学不仅包括我们对地球的认识，也指导我们对地球的改造，可以说，地学可以称为地球科学和地球工程。

再来看一下化学，化学是研究分子结构和相互作用规律的学科。但是化学不仅仅是了解分子的结构和相互作用，还要对分子进行改造。所以化学也被称为化学和分子工程。

长期以来，天文学虽然在人类生活中发挥了授时、导航等巨大的作用，但一直被认为是一门观测科学。地学在认识地球的同时也对地球进行工程改造（虽然只能对地球表面附近进行改造），化学在认识分子的同时也对分子进行工程应用（虽然不能控制所有的分子），天文学在认识宇宙的同时也应该对宇宙进行工程改造和工程应用（虽然不能改变整个宇宙）！

我们建议在招生时将天文学改名为天体物理学和宇宙工程，在实践中逐步增加天文学中的工程内涵。这不是天方夜谭，而是人类迈向更远的星际空间的必经之路。

致谢

感谢王乔对作者的启发。

用声学信使探测强作用块

祁昊洋 (Haoyang Qi)
北京大学物理学院
北京 100871
Email: qhy021@pku.edu.cn

强作用块是指由强相互作用结合的物质块，其密度为核物质密度的量级，约 10^{14} g/cm^3 。离我们日常生活最近的强作用块是原子核，此外强作用块还包含夸克块 (Witten, 1984)、轴子夸克块 (Zhitnitsky, 2021)、反夸克块 (Flambaum, 2023)、奇子块 (Qi, 2025)等。每种夸克块模型都有其特定的理论出发点，如轴子夸克块由轴子将夸克或反夸克聚集在一起，反夸克块则基于反夸克可能与夸克在强作用结合行为上有差异，奇子块则基于较轻的三味 (u、d、s) 夸克的对称性与强相互作用在核物质密度下的非微扰性。不同种类的夸克块也有共同之处，最重要的是，它们核质比均很低 ($10^{-7} \sim 10^{-4}$ (Farhi, 1984))，因此电磁信号很弱，可以作为暗物质候选体。强作用块暗物质属于冷暗物质，单粒子质量大约在 10 g 到 10^{11} g 之间（其下限考虑了现有观测限制，上限则考虑了事件率不能太低的因素），对应重子数 $10^{25} \sim 10^{35}$ ，运动被宇宙引力场维里化，典型速度为 $10^{-3}c$ ，为非相对论运动。这类非相对论运动的暗物质粒子在轰击地球，穿过大气或地表介质时，其高能粒子簇射过程不明显，而是会在所穿过的介质中产生压缩激波。基于这一观点，可以探测机械波的声学阵列（或地震仪阵列）是探测强作用块暗物质的优良探测器。本人在FPS13会议上就此问题作了报告，现已成文，投稿给RAA (Qi, 2025)，若感兴趣，欢迎阅读、交流。

强作用块产生的声学信号的性质主要取决于块质量（重子数）和块与常规物质的作用截面两大因素。重子数在上一段有所提及，跨10个量级。大气中的声波信号可忽略，而在地表的岩石或水介质中，同等重子数、不同种类强作用块的有效相互作用截面有3个量级的差异。最小的是几何截面，由于块密度极高故而很小。最大的则是通过奇子块中电子费米气自发磁化，再与周围被摩擦加热介质形成的等离子体相互作用而产生的磁层的截面，可以达到数百倍几何截面。经过一系列计算，可以得到，强作用块轰击地球的事件率大约为每年在整个地球截面上300次，块的穿透深度大于 10 km ，产生声波的频率为kHz到MHz 频段，声波衰减到环境噪声（设为70 dB）之前可以传播30 km左右。我们可以据此对声学阵列做初步设计：为节约成本，采用浅埋平面阵列。可采用民用级192 kHz采样率麦克风，阵列的空间格点可取为 10 km 方格。不过，由于事件率较低，需要 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 大小的阵列，以期10年左右能够测到一次事件。声学阵列同时还可以探测事件率高1到2个量级的陨石事件 (Koschny, 2017)，或者作为地震监测站的高频段补充。特别一提，曹臻院士、陈明君研究员所推动的高能水下中微子望远镜项目 (High-energy Underwater Neutrino Telescope, HUNT) 拟使用声纳安装在每个光电倍增管上用来定位。如若能够借上“东风”，此声纳系统恰好可以随光电倍增管阵列一起形成声学阵列，用于声学探测的先导试验。

References

- Farhi, E. and Jaffe, R. L. (1984). Strange matter. *Physical Review D*, 30(11):2379 – 2390.
- Flambaum, V. V., Samsonov, I. B., and Vong, G. K. (2023). Possibility of antiquark nuggets detection using meteor searching radars. *Physical Review D*, 107(12):123501. arXiv:2303.01697 [hep-ph].
- Koschny, D., Drolshagen, E., Drolshagen, S., Kretschmer, J., Ott, T., Drolshagen, G., and Poppe, B. (2017). Flux densities of meteoroids derived from optical double-station observations. *Planetary and Space Science*, 143:230 – 237.
- Qi, H. and Xu, R. (2025). To detect strong nugget with an acoustic array. arXiv:2503.20597 [astro-ph.IM].
- Witten, E. (1984). Cosmic separation of phases. *Physical Review D*, 30(2):272 – 285.
- Zhitnitsky, A. (2021). Axion Quark Nuggets. Dark Matter and Matter-Antimatter asymmetry: theory, observations and future experiments. *Modern Physics Letters A*, 36(18):2130017. arXiv:2105.08719 [hep-ph].

用多站强度观测探索脉冲星闪烁屏的未知特性

石洵 (Xun Shi)
云南大学
昆明 650500
Email: xun@ynu.edu.cn

综合孔径方法运用多个望远镜一起观测，通常是为了同时实现高分辨率和高灵敏度的测量。我们熟知的综合孔径方法如甚长基线干涉测量VLBI，其核心在于记录 and 综合每个望远镜接收到信号的相位信息。而这里我要介绍我们做的一种独特的综合孔径测量，它既不求用综合孔径实现高分辨率，也不需要直接测量电磁波的相位，但却又有高分辨率、又有相位信息。这就是用多站强度观测测量脉冲星闪烁。

之所以这种观测听起来这么神，是因为脉冲星闪烁信号本身是“自带”相位信息和高分辨率的。脉冲星闪烁是脉冲星流量随时间和频率的变化，这一变化的流量记录下来称为“动态谱”。动态谱的形态看起来就像一幅干涉图样，而这的确是它的物理本质。在星际介质中，不均匀的电子密度分布就像一系列小小的透镜，使脉冲星的射电信号发生偏折，产生了许多额外的像。这些像在观测平面由于相干生成干涉图样。因为这里的透镜是“等离子体透镜”，它们的焦距依赖于射电波的频率，所以得到的干涉图样也随频率变化。随着脉冲星自行，观测者的位置扫过这一频率依赖的干涉图样，就形成了我们观测到的动态谱。

相应的，星际介质中的电子密度涨落可以被视为一个天然的“星际干涉仪”。它的尺度相当于那些脉冲星像分布的尺度，能有AU尺度那么大，比地球上的望远镜阵列尺度要大得多，相应的分辨能力也就大得多。而由于我们观测到的是干涉图样，所以只需观测强度，就能包含相位信息。从这个意义上来讲，脉冲星闪烁动态谱就类似一张全息图。这全息图所蕴含着的，就是我们的“星际干涉仪”——电离星际介质小尺度结构的信息。弄清楚这些信息，了解了“星际干涉仪”的结构，我们就能进一步用它的高分辨率去揭示脉冲星辐射的奥秘。

自然给予了我们丰厚的馈赠。近年来的观测发现，这些“星际干涉仪”的结构非常特殊。与早年人们期待的充满星际空间的湍流结构相反，观测到的透镜集中在一些分立的“散射屏”上。而且，一些研究得比较透彻的散射屏，如脉冲星B0834+06前景的主散射屏，明显地呈现出一维的、类似平面波的结构。一方面，“星际干涉仪”这样分立的、一维的几何结构使得破解全息图的信息变得相对容易。另一方面，这样特殊的几何对应着什么天体物理结构，又成了琢磨不透、无比吸引人的谜题。

我们到现在为止还没提综合孔径的事。既然高分辨率和相位信息都被脉冲星闪烁“自带”了，还要综合孔径做什么呢？其实不然。当一个信号本身相对复杂，就像一个黑盒子的时候，我们往往可以先“摇一摇”这个黑盒子——去改变一点点观测条件，来观察、理解这个信号相应的变化。我们在这里用综合孔径就是做这件事。通过两个或多个站点同时观测一个脉冲星的闪烁，我们可以测量出在不同位置观测

到的动态谱的微小差别。通过这些微小的差别，我们能精确测定整个系统的动态几何，具体来说就是散射屏的位置、一维结构的方向和运动速度。

和德国马普射电所的同事合作，我们用FAST（中国500米口径球面射电望远镜）与Effelsberg（德国100米射电望远镜）同时观测了脉冲星B1508+55的动态频谱。两次4.5小时的同步观测成功记录了脉冲星B1508+55动态频谱图案的微小时间偏移。我们由此推导出了闪烁屏的参数。这种方法比传统的多次观测推导方式更为高效。此外，由于望远镜基线的旋转，我们还能由相位结构的变化，重建闪烁屏的二维图像。不出意外地，在这一二维图像中，脉冲星的像实际上都近似排列在一条一维的直线上。

更细致的数据分析还在进行之中。已经可以确定的是，基于这些观测，我们能“破解”这颗脉冲星前景的“星际干涉仪”的几何结构。至于这结构的物理本质，或像人们推测的那样，与磁重联片、波动、湍流等现象相关。人们还需更多的观测样本、以及对星际等离子体小尺度行为的更深理解来确定。

用多站同步强度观测研究脉冲星闪烁这种观测模式，在被Simard等人于2019年提出之后，只有极有限的尝试。我们这次的观测证实了这种观测模式的有效性：它能比单个望远镜分别观测提供多得多的信息。我与马普所同事合作观测、分析的过程也使我学到了很多。希望未来有更多这样望远镜与望远镜、人与人之间的合作，推动我们破解更多的天体物理信息。最后必须要感谢FAST运行团队—这样的联合观测能够成功，与你们的靠谱、给力是分不开的！

个人研究经历的几点回忆

宋黎明 (Liming Song)
中国科学院高能物理研究所
北京 100049
Email: songlm@ihep.ac.cn

非常感谢徐仁新教授的邀请，他希望能总结几条从事研究工作的体会。借这个机会，梳理了个人几十年的工作经历，体会谈不上，但有几点印象比较深刻，希望通过个人的几点回忆，见证国家的发展和富强，也有助于大家更加深刻地体会现在的发展机会来之不易。

下面以个人的经历为主线，对不同阶段的工作进行简要描述，同时也介绍一点自己对工作的认识，希望对大家能有所启迪。

一、本科阶段：山东大学 光学系红外专业学习（1979-1983）

山东大学前身是1901年创办的山东大学堂，被誉为具有中国近代高等教育起源意义的大学。120余年来，山东大学始终秉承“为天下储人才，为国家图富强”的办学宗旨，深入践行“学无止境，气有浩然”的校训精神，踔厉奋发，薪火相传，积淀形成了“崇实求新”的校风，培养了大批德才兼备的优秀人才，为国家和区域经济社会发展作出了重要贡献。

1970年开始组建（军用）光学系，在1979年，有红外、激光两个专业。我于1979年考入山东大学光学系红外光学专业，系统学习了红外光的理论知识和一些光学工程知识。当年学习的工程知识早已忘记，但我的工作最终又和工程研制联系在一起，好像是冥冥之中的注定，令人唏嘘。

回想在大学阶段的学习，和高中阶段有着明显的区别。高中物理注重学习基础知识，强调理解物理概念和培养基本的物理思维能力；而大学物理则更加深入和复杂，注重物理知识的系统性和逻辑性，需要更高层次的数学，如高等数学、线性代数、微分方程等，通过理论知识的学习和实验技能的培养，培养学生独立思考和解决问题的能力、灵活和创新的思维方式，以打牢理性思维的基础。

我大学入学时是16岁，也是第一次在没有家长监督的条件下开始自己把控自己的一个阶段。突然的放松带来的后果就是迷恋打扑克、看小说和踢足球，和现在的大学生具有非常类似的特点：讨厌上课，逃避作业，这也使得我的大学学习基础不好。

本科毕业后被分配到位于哈尔滨的东北林业大学的基础部物理组，主要工作任务是筹办和承担物理实验课程。在这个阶段，自己进行了反思和对未来的思考，确定了从事科学研究的志向。要实现这个志向，第一个现实的目标就是要考取研究生，但学校有规定，工作满五年才准参加研究生考试。实际上，这是帮了我的大忙，由于大学学习没有投入，基础打的不牢，立即参加研究生考试底气不足。正好利用在东北林业大学工作的五年，重新学习了大学的基础课程，开始踏踏实实的考试准备。

每每回忆这段经历，充分感受到学习的过程是缺少不了的，前面不学后面总得补上。古人云：书到用时方恨少是一条至理名言。所以建议大家要抓紧时间，争取一次学好，偷懒的结果就是后续要花费更多的时间来弥补自己的过失。

二、硕士阶段，大连理工大学 开始接触理论物理研究（1988-1991）

1988年考入大连理工大学物理系开始硕士阶段的学习，导师陈方培，专业理论物理，研究方向为引力理论，具体内容为有挠引力。

广义相对论认为，时空是弯曲的，曲率由能动张量密度确定。有挠引力理论认为，空间不仅是弯曲的，而且由于存在自旋密度的影响，还会存在挠率。由于是考虑了更多的影响因素，使得有挠引力理论的图像具有更加的复杂度。陈方培老师治学非常严谨，对学生的要求很严格。印象中每周

的讨论，布置的任务就是某篇文章中公式的推导，得到结论的过程和物理意义等。文献上的公式推导非常复杂，有时推的很痛苦，对物理图像的理解也非常的困难，和师兄一起听陈老师的训导是当时的家常便饭。

但是这段时间的训练对我来说收益很大，学到了陈老师严谨的学风，同时也培养了文献阅读关注细节、过程和物理图像的习惯。19870223，LMC的SN1987A爆发，人类首次探测到了来自系外的中微子，日本科学家小柴昌俊还获得了2002年的诺贝尔物理奖。

表 1 SN 1987 A 的中微子

实验室	中微子到达 时间	中微子能量 范围	中微子数
二月			
勃朗峰	23 ^d 2 ^h 52 ^m	6—10 MeV	5
神冈(日本)	23 ^d 7 ^h 35 ^m	7—35 MeV	11
IMB(美国)	23 ^d 7 ^h 35 ^m	20—40 MeV	8
Baksan(苏联)	23 ^d 7 ^h 35 ^m	12—17 MeV	3

通过分析当时中微子的探测数据，可以发现中微子到达地球的时间并不同时，意大利课题组的数据有很大不同，他们反复确认实验的结果是有效的。这是当时一个很大的问题，我利用有挠引力理论计算了这个问题，认为是不同种类的中微子自旋和空间挠率作用形成的传播效应，比较合理地解释了这个问题。陈老师对这个结果非常高兴，动员我继续研究引力理论。但我在参加张家界举行的“全国引力与相对论天体物理”会议上遇到了彭秋和老师，听取了天体物理的最新进展，这次的会议使我感受到天体而不是时空才是我最终的追求，它具有更加丰富的物理现象，所以我决定要考取南京大学天文系的博士研究生。

三、博士阶段 南京大学 从理论物理转向天体物理（1991-1994）

1991年考入南京大学攻读博士学位，专业是天体物理，导师陆埏院士。由于天文基础非常差，首先恶补天文基础知识，但是还有很多课程没有学好。我记得朱慈盛老师的恒星大气课，指定的参考书是苏联天体物理学家阿姆巴楚米扬的《理论天体物理学》，但复杂的公式理解起来相当吃力，经常被电离理论和辐射转移理论搞的晕头转向。朱老师说：这是天体物理研究的基础课，必须要学好。后续的研究工作一再证实了朱老师的话，所以建议大家一定要坚持花时间学好基础课程。

博士阶段，我的研究方向是脉冲星高能辐射研究，从恒星演化理论开始，到中子星再到脉冲星辐射理论，大量的学习、阅读文献。正是这段的刻苦学习，为以后的研究工作打下了良好的基础。

在南大，陆埏老师给我的影响非常大。陆老师对物理概念理解非常透彻，物理图像非常清晰，非常擅长从物理原理出发、通过物理图像和量纲分析等手段对研究课题进行明确细致的评估。陆老师的报告非常精彩，对涉及的物理概念梳理的非常清晰，物理图像非常明确，事情的发展叙述非常清楚，往往从不同的维度进行对比，这样一是突出了问题，同时也便于听众产生直观的感受，加深对问题的理解，听起来非常享受。陆老师很讲究教育方式，循循善诱，在关键的环节会从原理上、图像上给予指导和总结。

陆埏老师曾经讲过一个故事：玻尔访问原苏联，朗道作翻译。在一所中学里对学生们讲话时，玻尔说“我是不害怕说自己笨蛋的”，朗道翻译成了“我是不害怕说你们笨蛋的”。陆老师说这可能反映了朗道和玻尔在世界观上的差异，可能这也是两人培养学生理念上的差异，也是学生学术成

就不同的深层原因。这个故事牢牢地记在我的心里，一是对陆老师的怀念，同时也是我以后工作中培养学生时刻提醒自己的一个原则。

陆老师非常注重以观测、实验等结果确定工作的出发点，作为后续推理的基础，也非常注重以实验结果验证计算结果等。和陆老师讨论后，选择的研究方向是脉冲星高能辐射研究，根据陆老师的建议，在获得初步理论结果后到高能所利用欧洲COS-B卫星、Compton卫星的数据开展了数据分析研究，验证脉冲星高能辐射计算结果的正确性。

这个经历也为后续从事天文卫星数据分析工作打下了伏笔。

四、博后阶段 从高能天体物理偏理论研究转向数据分析（1994-1996）

博士毕业后到高能所进行博后研究，合作导师李惕碛，研究工作的重点是数据分析方向。数据分析工作需要考虑的是概率分布、误差估计、置信度、假设检验等方面的内容，和理论研究工作有所不同。李老师工作狂热，对数理统计理解深入，物理图像清晰，要求学生深入理解数据，充分利用数据中的信息。李老师经常鼓励大家利用现有数据和结果对新物理、新理论提出挑战，经常鼓励大家不要怕困难，要破除迷信，要敢于创新。我想这些要求在李老师身上有非常明显的反应，无论是直接解调成像方法，还是慧眼卫星科学目标的选择，以及目前正在从事的理论物理探索，都可以发现李老师总是充满着自信和创新。

五、工作阶段 高能所 从研究工作转向卫星工程（1996-至今）

硬X射线调制望远镜HXMT（慧眼）卫星大事记：

1993年夏天，中国天文学会和中国科学院数学学部向全国征集大型天文项目提案，李惕碛、李启斌等提出了硬X射线调制望远镜HXMT卫星提案；

同年11月，HXMT被遴选进入后一轮评审，并获得经费开展预先研究；

2000年，国家重点研发计划“天体高能辐射的空间观测与研究”；

2005年，HXMT作为中国第一颗天文卫星纳入国家“十一五”科学规划；

2011年正式立项，由国家航天局和中科院共同支持；

2017年6月15日于酒泉卫星发射基地发射升空，目前在轨运行良好。

随着硬X射线调制望远镜HXMT卫星立项工作的进展，我的主要工作转向卫星工程研制方面，主要是负责科学应用系统的研制。国际上已发射诸多X射线天文卫星，为适应空间天文观测由用户主导和深度参与的特点，科学数据系统要在充分理解探测器性能和卫星运行特点的基础上，具备数据分析、模拟仿真、软件开发等综合能力，所以各国的天文卫星项目均依托国际著名大学或实验室建立科学应用系统（科学中心）。

在当时，国内虽然有很好的空间平台技术，但探测器研制基础非常薄弱，科学应用系统更是没有经验可以借鉴。在高新所，我们积累了分析国外天文卫星数据的经验，但对于科学应用系统的研制毫无头绪，同时还面临国外的孤立和封锁，根本不知道如何设计系统的功能、流程、接口等工程研制所必须的内容。在首席科学家的领导下，我们从零开始，克服了重重困难，终于建成了我国第一个完整的、符合国际惯例的科学应用系统。在这套系统的支撑下，国内外科学用户可以有效分析慧眼卫星的观测数据，得到准确的科学结果。以这套系统为基础，《我国首个空间天文台科学数据系统的研发和应用》也获得了北京市科技进步二等奖。

六、总结

回想自己的工作内容的多次转向，有兴趣的转移，也有工作的需要。我们这代人见证了我国天文研究的大发展，当然这是国家实力提升的一个侧面。能生活在这样一个时期，深深地感受到我们是幸运的。我们做到了踏实工作，为我国天文研究和国家发展尽了微薄之力，所以，我们这一代人是幸福的。

我国目前的天文研究环境有极大的改善，研究队伍有极大的扩充，研究水平有极大的提升，同时国家规划了很多后续空间探测项目，具有重要的发展机遇。

我相信中国天文具有非常美好的未来，也期待天文取得更大的成功。

古姆星云是否为背景脉冲星的散射屏？

王睿^[1], 闫振^[1*], 沈志强^[1], 李柯伽^[2], 赵融冰^[1], 吴亚军^[1], 黄志鹏^[3], 王啸威^[1], 刘杰^[1]

[1] 中国科学院上海天文台, 中国 上海 200030

[2] 北京大学, 中国 北京 100871

[3] 湖北第二师范学院, 中国 湖北 430205

Email: *yanzhen@shao.ac.cn

古姆星云是一个位于南天的高度弥散的暗弱超新星遗迹, 其在天空中延展尺度大约40度 (而且还在继续膨胀中)。该星云距离我们非常近, 它的最前缘距地球仅约为150 pc (Spilker A., et al., 2022)。作为一个在天空中延展尺度如此巨大的星云, 很可能对云后与云内数十颗 (不少于50颗) 脉冲星的观测产生影响 (如图 1)。1974年, Backer D. C. (1974)首次指出船帆座脉冲星的异常散射现象很可能由古姆星云造成。其后半个多世纪中古姆星云很可能是背后 (及星云内部) 脉冲星散射屏的观点多次被提及。尽管这一假设被多次讨论, 但由于缺乏对散射屏距离、速度的直接测量, 该假设长期未被证实。

脉冲星被誉为星际介质的重要探针, 其信号在穿越湍动的非均匀星际介质过程中会产生十分明显的星际散射和星际闪烁效应(Stinebring D. R., et al. , 1990)。脉冲星星际闪烁现象在观测上表现为射电波段流量密度随时间和频率的准周期调制。该调制不仅和脉冲星、观测者及介质屏的相对位置有关, 还受三者相对运动及星际介质性质等因素的影响(Scheuer P. A. G. , 1968; Rickett B. J. , 1969; Narayan R. , 1992)。因而, 有关脉冲星星际闪烁的研究不仅可以揭示脉冲星自身物理, 还可以反推星际介质特性。我们选择流量较强的背景脉冲星PSR B0740-28 (其在1400 MHz流量 $S_{1400} = 26 \text{ mJy}^1$)作为探针, 利用上海天马望远镜对古姆星云的闪烁作用以及闪烁特性进行了深入研究, 首次给出了其为背景脉冲星闪烁屏的最直接证据。

上海天马射电望远镜是国内一台口径为65 米的全天可动的大型射电望远镜, 它配备了八套高灵敏度制冷接收机以及主动面反射系统, 使其能够在1.2至50 GHz保持非常高的灵敏度(Yan Z., et al. , 2015)。我们充分发挥了该望远镜“一镜双频”的观测优势(Yan Z., et al., 2018), 在2020年11月至2022年9月期间利用天马望远镜对PSR B0740-28星际闪烁现象累计进行了21组双频段 (2.25 GHz和8.60 GHz) 同时观测, 成功在两个频段都探测到PSR B0740-28的星际闪烁现象, 并以二维动态谱直观展现, 还对其进行了自相关和傅里叶分析, 从而进一步量化了星际闪烁参数以及周年调制特征。图2显示了两组有代表性的双频段观测以及分析处理结果。通过分析PSR B0740-28星际闪烁速度的周年变化, 我们成功拟合出散射屏距

¹<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

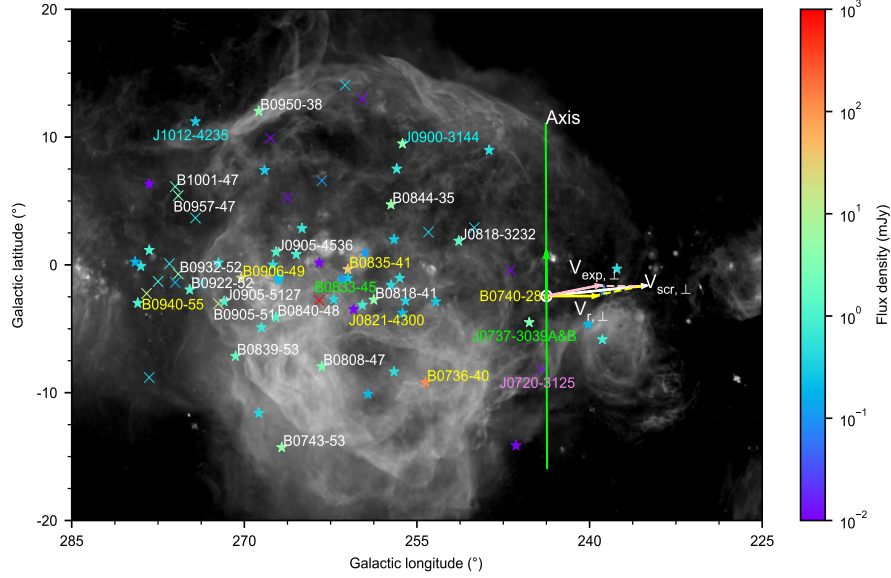


Figure 1: 古姆星云及内部(×)与背景(★)脉冲星投影图: 其中古姆星云由 Southern H-Alpha Sky Survey Atlas项目数据处理获得 (Finkbeiner D. P, 2003; Gaustad J. E, et al., 2000), 脉冲星数据由ATNF Pulsar Catalogue (PSRCAT) (Manchester R. N., et al., 2005)提供, 流量密度由右侧色阶标识。白色箭头表示屏运动速度, 粉色箭头表示星云膨胀速度, 黄色箭头表示银河系自转带来的速度, 绿色实线为闪烁长轴方向。

离、散射屏运动速度, 相关结果用箭头标注于图 1 上。散射屏距地球 245^{+69}_{-72} pc与古姆星云前缘距离(约240 pc)一致, 其运动速度为 $22.4^{+4.1}_{-4.2}$ km/s与古姆星云膨胀速度(10-20 km/s)和银河系较差自转带来的相对速度(约9 km/s) 矢量合成结果亦具有非常好的一致性。因而, 我们研究结果是迄今为止该星云为背景脉冲星散射屏的最直接证据。

我们还在高达8.60 GHz成功探测到了二次谱(动态谱的二维傅里叶变换结果)中的闪烁弧结构, 刷新了闪烁弧的最高探测频率纪录。此外, 我们对闪烁弧曲率的周年调制表明星际介质在PSR B0740-28方向上具有显著的各向异性散射特征, 并且成功拟合给出了散射长轴的方向(见图1)。该方向也比较符合古姆星云的结构, 进一步佐证了古姆星云为背景脉冲星散射屏, 从而结束了半个世纪以来的相关争论。更详细的观测数据及分析过程可见于我们已发表的论文及其参考材料(Wang R., et al. , 2025)。

致谢

该研究获得中华人民共和国科学技术部平方公里阵列射电望远镜(SKA)专项课题(No. 2020SKA0120104)、上海市自然科学基金(No. 20ZR1467600)鼎力支持。

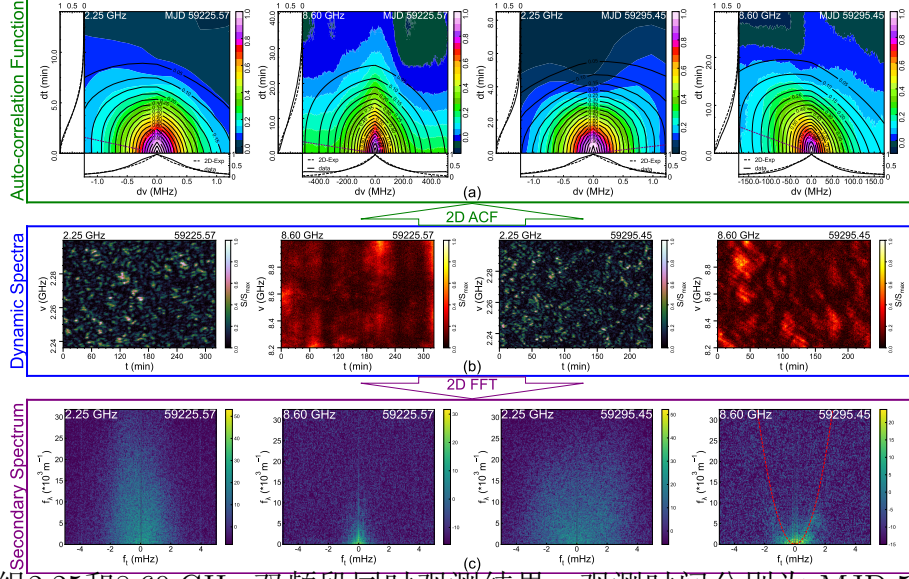


Figure 2: 两组2.25和8.60 GHz 双频段同时观测结果，观测时间分别为 MJD 59225.57和MJD 59295.45. 三部分子图分别为：(a) 二维自相关函数。(b) 动态谱。(c) 二次谱。

References

- Spilker A., Kainulainen, J., & Orkisz, J. 2022, *Astronom. Astrophys.*, 667, A110.
- Finkbeiner D. P. 2003. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 146, 407 – 415.
- Gaustad J. E., Rosing W., McCullough P., van Buren D., 2000, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, 3, 136
- Manchester R. N., Hobbs G. B., Teoh A., Hobbs M., 2005, *AJ*, 129, 1993.
- Backer D. C., 1974, *Astrophys. J.*, 190, 667.
- Stinebring D. R., Condon J. J., 1990, *Astrophys. J.*, 352, 2
- Scheuer P. A. G., 1968, *Nature*, 218, 92
- Rickett B. J., 1969, *Nature*, 221, 15
- Narayan R., 1992, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. Ser. A*, 341, 15
- Yan Z., et al., 2015, *Astrophys. J.*, 814, 5
- Yan Z., Shen Z. Q., Manchester R. N., et al. 2018, *Astrophys. J.*, 856, 55.
- Wang R., Yan Z., Shen Z., Lee K., Wu Y., Zhao R., Huang Z., et al., 2025, *Sci. China Phys. Mech. Astron.*, 68, 239512.

上海天马望远镜的170颗脉冲星8.60 GHz观测

王啸威^[1], 闫振^[1*], 沈志强^[1], 吴亚军^[1], 赵融冰^[1], 黄志鹏^[2], 王睿^[1], 刘杰^[1]

[1] 中国科学院上海天文台, 中国 上海 200030

[2] 湖北第二师范学院, 中国 武汉 430205

*Email: yanzhen@shao.ac.cn

目前ATNF Pulsar Catalogue¹ (v2.6.0)上共收录了3839颗脉冲星, 再加上近期FAST银道面快照巡天新发布的473颗脉冲星(Han et al. 2025), 已知的脉冲星总数突破4300颗。但是现有的脉冲星观测主要集中在L波段(1.4 GHz)及以下, 相比之下仅有90颗左右的脉冲星在8 GHz以上的高频被观测过。究其原因主要是脉冲星的射电频谱通常为陡峭的幂律谱($\alpha \sim -1.6$, Jankowski et al. 2018), 其平均流量密度随频率升高而快速减小, 这对射电望远镜的高频灵敏度有着更高的要求。

上海天马射电望远镜(简称TMRT)在脉冲星高频观测领域已取得显著成果。基于其配备的S波段(2.2–2.3 GHz)和X波段(8.2–9.0 GHz)双频制冷接收机(系统等效流量密度分别为46 Jy和48 Jy), Zhao et al. (2017)与Wang et al. (2024)分别发布了26颗和9颗脉冲星的8.60 GHz观测数据, 其中18颗为首次实现8 GHz以上频率的探测。现在我们基础上进一步突破, 通过应用“双频互校技术”(详见Wang et al. 2024)处理TMRT脉冲星日常监测数据, 我们成功获取170颗脉冲星(含普通脉冲星167颗、毫秒脉冲星3颗)的8.60 GHz积分轮廓(部分示例如图1)。样本中126颗脉冲星为首次实现8 GHz以上频率探测, 使得该频段探测脉冲星数量提升逾一倍。其余44颗脉冲星的8.60 GHz积分轮廓信噪比优于历史同频观测结果。

针对样本中110颗具有可靠2.25和8.60 GHz脉冲宽度(W_{10})测量值的普通脉冲星, 我们发现其中78%的 W_{10} 随观测频率升高而减小, 符合Radio-to-Frequency Mapping (RFM) 理论预期, 但也有16%的脉冲星表现出8.60 GHz轮廓明显宽于2.25 GHz的反常现象。通过计算样本中部分脉冲星的流量调制指数, 我们发现在8.60 GHz的调制指数整体随色散量(DM)呈现先增加后减小的趋势(见图2), 其中DM值位于 ~ 50 – 100 pc cm^{-3} 区间的脉冲星流量调制更加明显。这表明即使在高频($\geq 8 \text{ GHz}$)观测中, 星际闪烁效应对部分脉冲星仍存在不可忽视的影响。此外, 我们还分析了

¹<https://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>

样本中脉冲星的多频轮廓演化、射电频谱指数与不同参数间的相关性等，更多详细内容我们会呈现在未来准备投稿的工作中。

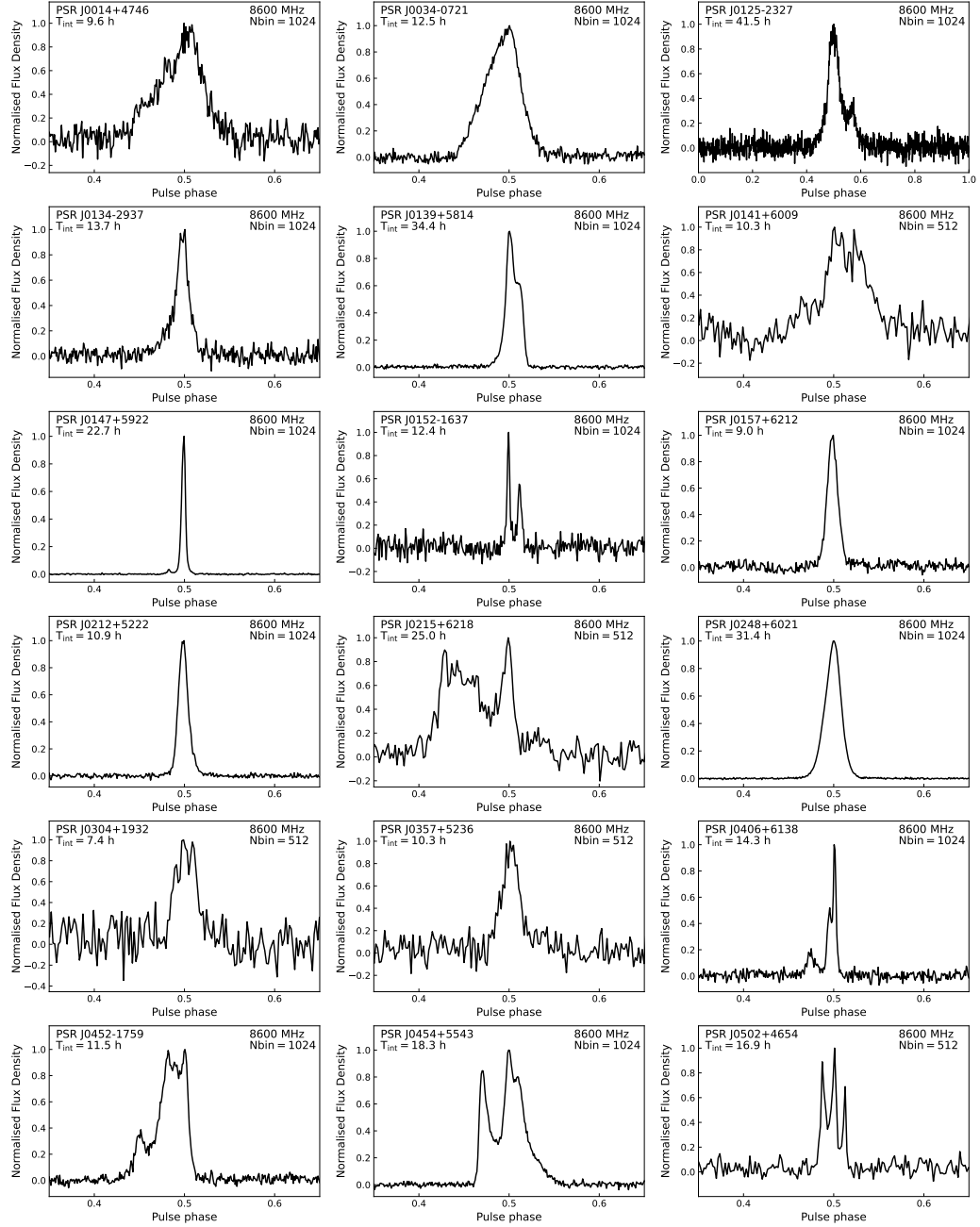


Figure 1: 天马望远镜观测所得部分脉冲星的8.60 GHz积分轮廓。

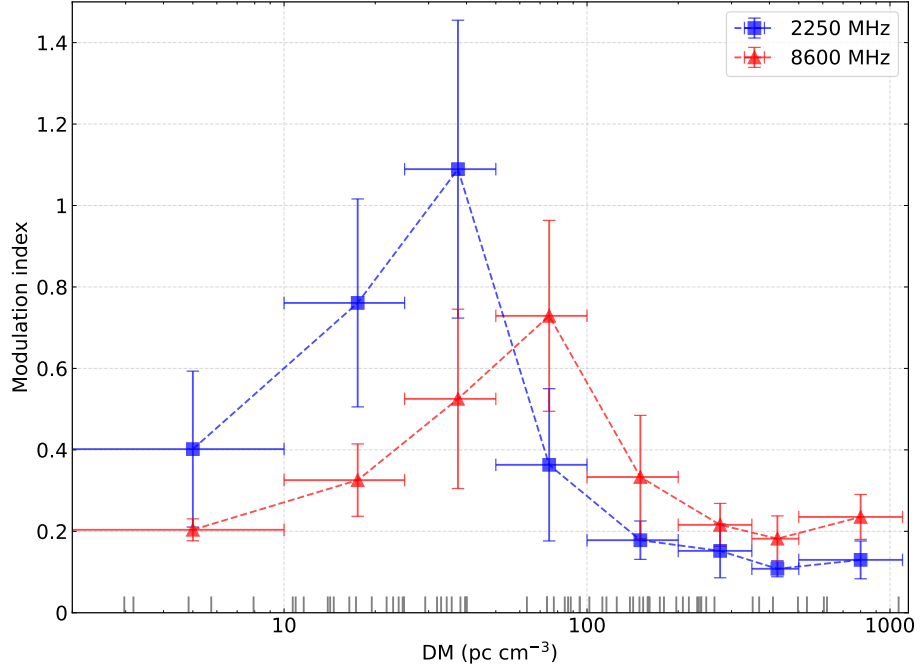


Figure 2: 天马望远镜在2.25和8.60 GHz观测得到的部分脉冲星的流量调制指数与DM的关系。DM区间分别为0–10，10–25，25–50，50–100，100–200，200–350，350–500和500–1100 pc cm^{-3} 。

致谢

该研究受到中华人民共和国科学技术部平方公里阵列射电望远镜（SKA）专项课题NO. 2020SKA0120104、上海市自然科学基金NO. 20ZR1467600支持。

References

- [1] Han, J. L., Zhou D. J., Wang C., et al. 2025, RAA, 25, 1
- [2] Jankowski F., van Straten W., Keane E. F., et al. 2018, MNRAS, 473, 4436
- [3] Zhao, R. S., Wu X. J., Yan Z., et al. 2017, ApJ, 845, 156
- [4] Wang, X. W., Yan Z., Shen Z. Q., et al. 2024, ApJ, 961, 48

An extreme flux event evidenced by pulsar B1929+10

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

We find an extreme flux event of pulsar B1929+10 during the 110 minute radio observation with the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope. As shown in Figure 1, the radio flux decreases by 2–3 orders of magnitude within a rapid timescale of about 20 minutes. Except for the frequencies higher than 1375MHz, the observed flux density at other frequencies shows a significant decrease of 3 orders of magnitude. After dropping to the minimum, the observed flux density then increases, forming a “valley” structure (the blue and navy blue patches) during the range of 5000–6200 s. The timescales of the decrease and increase are almost equal, implying a symmetrical “valley” structure. In addition, in Figure 1(b), one can see that the arrival time of minimum flux density has a significant decrease when the frequency increases, showing a power-law function of $t = 1.36 \times 10^5 f^{-0.46}$. Here t and f are measured in units of seconds and MHz, respectively. These variations in the emission of pulsar B1929+10 evidence an extreme flux event and challenge understanding them.

References

- Wang, Z., Cao, S., Lu, J., et al. 2024, ApJL, 976, L22.
Rickett, B. J. 1990, ARA&A, 28, 561.
Bannister, K. W., Stevens, J., Tuntsov, A. V., et al. 2016, Sci, 351, 354.

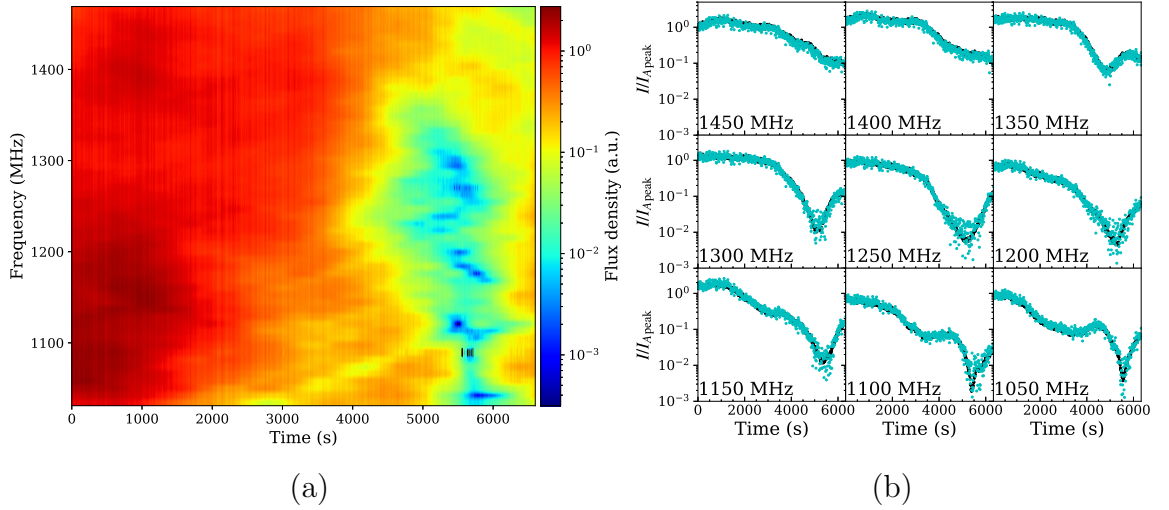


Figure 1: (a) Dynamic spectrum averaged to around 8 MHz frequency resolution for the main pulse of pulsar B1929+10. We choose an integration time of approximately 10 s (45 rotation periods) for each spectrum to minimize the impact of system noise. The flux density has been scaled with the peak radio emission of the averaged pulse. (b) To better reveal variations over the frequencies and the arrival time. We plot the observed flux densities (black dots) for the main pulse as a function of the observation time for nine narrow bands with a bandwidth of 50 MHz. Their corresponding centered frequencies are included in the lower left corner of each subpanel, while the cyan dots denote the flux density of the interpulse. The $I_{A\text{peak}}$ represents the peak radio emission of the average pulse for the main pulse, corresponding to the peak radio emission of the interpulse of the averaged pulse. The integration time of each dot is the same as that of each spectrum.

Interstellar Scintillation of Pulsars and FRBs

吴子为 (*Ziwei Wu*)
中国科学院国家天文台
北京 100101
Email: wuzw@bao.ac.cn

The interstellar medium affects the wavefront from a distant source, which causes propagation effects, including scattering, angular broadening, and scintillation. Given the particular properties of millisecond pulsars, they act as promising sources of detecting low-frequency gravitational waves. Pulsar timing array (PTA) requires extreme timing precision. However, the pulse profiles and the time of arrival of pulsars can be affected by propagation effects. Thus, eliminating the timing noise caused by propagation effects could significantly improve the timing precision. The variations in DM can be measured with current pulsar software. The timing noise caused by scintillation is less studied. One reason is that the interstellar scintillation effect is not that obvious at PTA frequencies, normally 1.4 GHz. This is exactly why we need to do interstellar scintillation at lower observing frequencies, for example, uGMRT and LOFAR. Fast radio bursts (FRBs) are new radio sources with unknown origins. Interstellar scintillation could be a useful tool to study the origin, orbital motion, and nearby environment of FRBs. To do this kind of project, an extremely active FRB is needed, which FAST has a great advantage in given its sensitivity.

We did a pulsar scintillation survey in the frequency range of 120- 180 MHz based on LOFAR[1]. Our results show that most normal pulsars present obvious interstellar scintillation. However, we can not see scintillation from millisecond pulsars, due to the use of extremely high-frequency resolution and then losing the signal-to-ratio. Thus to study the timing noise caused by the interstellar medium, it would be better to go to higher observing frequencies, i.e., 400 MHz. Furthermore, we did a dual-frequency scattering study of PSR J0826+2637 with LOFAR and NenuFAR. Due to the relation between pulse broadening and scintillation, we can only do scintillation at LOFAR frequency and pulse broadening at NenuFAR frequency [2]. Our results show that the frequency-dependent power-law index is due to an inhomogeneity in the scattering region, specifically that the scattering is dominated by a region of transverse size $\sim 40\text{AU}$.

The difficulties of doing FRB interstellar scintillation are the single pulse variations and the high event rate needed. Based on the FAST FRB data set of FRB 20220912A, we discovered the first scintillation arc from FRBs [3]. It provides a new method to understand the origin of FRBs. We checked all the data sets of another FRB 20201124A, which shows annual variation in scintillation velocity [4]. This indicates that the observed scintillation for this particular FRB is caused by our nearby IISM.

Further telescopes with much better sensitivity and ultra-wide frequency coverage would significantly improve our understanding of pulsars, FRBs, and the IISM in our and anther Galaxies.

References

- [1] Wu, Z., Verbiest, J. P. W., Main, R. A., et al. 2022, *Astronomy & Astrophysics*, 663, A116
- [2] Wu, Z., Coles, W. A., Verbiest, J. P. W., et al. 2023, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 520, 5536
- [3] Wu, Z.-W., Main, R. A., Zhu, W.-W., et al. 2024, *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 67, 219512
- [4] Wu, Z., Zhu, W., Zhang, B., et al. 2024, *The Astrophysical Journal Letters*, 969, L23

《奇异物质与奇异星》简介

——致密星研究者的前沿指南

夏铨君 (Cheng-Jun Xia)

扬州大学物理科学与技术学院

扬州 225009

Email: cjxia@yzu.edu.cn

在多信使天文学的今天，包括伽马暴、快速射电暴等在内的暂现源研究备受瞩目，而2024年末北京大学出版社出版的《奇异物质与奇异星》恰逢其时。全书聚焦于当代天体物理最具挑战性的谜题之一：脉冲星类致密天体的本质究竟是传统中子星，还是由奇异物质构成的奇异星？该书从粒子物理标准模型出发，旨在简要介绍各种奇异物质提出的基本背景，并在此基础上探讨奇异星等致密星的结构和性质，最终讨论如何利用各种天文观测来寻找奇异星存在的证据。书中涉及内容属于粒子天体物理范畴，主要面向高年级本科生、研究生及相关的研究人员，以期提供必要的入门简介。

众所周知，极端条件下强相互作用物质的性质是现代物理学研究的重要课题之一，特别是低温高密物质的属性，涉及早期宇宙强子化、致密星组成结构甚至极高能宇宙线等丰富的天体物理现象。在极端密度下，强相互作用物质可能会发生多种相变过程，生成各种新型物质（包括重子物质、夸克物质、奇子物质等）。书中深入介绍了奇异物质的概念，这是一种基于粒子物理标准模型推断的、极端条件下存在的物质状态，可能由解禁闭的夸克或类似原子核中核子但奇异数非零的“奇子”(strangeon)构成，具有独特的物理性质并稳定存在于宇宙中。在微观尺度上，这些物质能够形成块(nugget)，如夸克块(奇异滴或ud夸克块)、奇子块等，构成暗物质，而其中的一部分甚至能够穿越地球表现为极高能宇宙射线。在宇观层次上，它们即为夸克星、奇子星等奇异星，很可能就是观测到的脉冲星类致密天体的本质。

特别地，奇异星(包括夸克星和奇子星)可解释传统中子星模型比较难以调和的观测现象，包括物态硬、典型质量时潮汐形变弱、内含巨大的自由能等特征。在多信使天文学时代，对于奇异星的观测证认包括但不限于：

1. 质量与半径的动力学检验

- 状态方程(EOS)：奇异星由解禁闭夸克或奇子构成，其状态方程在低密度区表现为“自束缚”(压强为零时密度有限)，而中子星

为引力束缚（压强趋零时密度趋零）。这导致奇异星存在极低质量和小半径的可能。

- 质量-半径测量：位于超新星遗迹HESS J1731-347中的中心致密天体以及脉冲星4U 1746-37的质量和半径可能非常小，倾向于奇异星。

2. 奇异星并合事件及引力波

- 潮汐形变能力：通过双中子星并合（如GW170817）的引力波信号可推断潮汐形变量 Λ ，而奇异星的潮汐形变特性与中子星存在差异，但当前观测数据尚不足以明确区分。
- 并合后产物：双奇异星并合可能形成大质量奇异星，其引力波频域特征（主峰频率与密度相关）和电磁对应体（如千新星抛射物成分）有待进一步研究。

3. 射电与X射线观测

- 表面热辐射：裸奇异星缺乏传统中子星的大气层，其X射线谱无原子特征，而X射线暗弱的孤立中子星（XDINS）的光学/紫外超可能跟奇异星表层的稀薄等离子体有关。
- 子脉冲行为：奇异星表面强束缚能允许真空间隙放电，自然解释射电脉冲星的子脉冲和模式变换现象。
- 快速射电暴（FRB）与星震：奇异星的刚性结构可累积弹性能，星震过程中释放能量可驱动重复FRB，其统计特性（如 Gutenberg-Richter幂律和Omori定律）与地震活动相似。

综上所述，当前奇异星观测证认涉及质量-半径关系异常、射电/X射线辐射特征及星震模型，但观测不确定性和理论简并性仍是主要挑战。未来需依托多信使天文学、高精度数值模拟和实验室研究，逐步揭示致密星内部组分，最终确认奇异星的存在及其宇宙学意义。希望《奇异物质与奇异星》书中内容能够对未来的脉冲星相关研究，特别是奇异星的观测证认有所帮助。

漫谈奇子

徐仁新 (Renxin Xu)

北京大学物理学院

北京 100871

Email: r.x.xu@pku.edu.cn

对于质量 M 、半径 R （重子数 $N \sim M/m_u$ ）的负热容系统，其内能 $N\varepsilon$ 跟引力能 $GMNm_u/R$ 相当时才能维持平衡，这里 ε 为平均而言每重子的内能。由此即可粗略示意 $\varepsilon - R$ 关系（图1）。FPS系列关注 $\varepsilon \sim 10^2$ MeV阶段。无疑，强力的非微扰行为主导这个阶段致密物质的属性，相关研究乃多信使天文学时代研究之焦点。

尽管克服低能QCD的挑战是巨大的，但理解宇宙的现实需求也不容耽误。基于物理规律的推测来刻画致密物态因而层出不穷。我们怀疑构成该阶段物质的基本单元为奇子，它类似核子但具有轻味夸克对称性。注意： a ，奇子是猜的，至今还未能依据第一性原理算出； b ，奇子不只是一种多夸克束缚态，其间存在长程吸引、短程排斥(hard core)的属性才是要害。其实，核子间的排斥芯是原子核稳定存在的关键（否则原子核必融合成夸克块，quark nugget），但它的起源却让人劳神。排斥芯体现了QCD的非微扰特性，而众多雄心勃勃的努力正试图理解其本质（arXiv:2202.01105）。

奇异物质符合Landau“巨核”的初心（FPS7文集28页）；排斥芯这一非微扰效应在（ $\varepsilon < \text{GeV}$ ）不显著地体现将更难以理会。说教是需要的，更待数据流“洗脑”（FPS12文集31页）。对于登山爱好者来说，虽不能随时即兴攀登珠峰，但不该一直满足香山游吧。 $\varepsilon \sim 10^2$ MeV的致密星就是当今的“珠峰”。“后浪”们，加油！

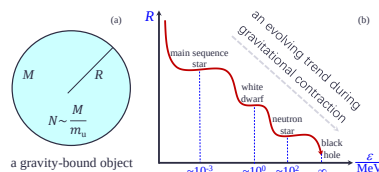


图 1: 质量足够大的球对称物质体系在“迈向”黑洞奇点的征途中会临时逗留于主序星、白矮星、中子星阶段; 残留质量不够大时亦可“半途而废”成白矮星或中子星。（取自：刘荷蕾、徐仁新，“天文教育II：迈向奇点的致密星”，大学物理，2025）

基于等效质量模型研究多重子态、夸克块和致密星

尤浩松 (Hao-Song You)
 扬州大学物理科学与技术学院
 扬州 225009
 Email: 213303128@stu.yzu.edu.cn

量子色动力学(QCD)不仅预言了重子和介子的存在, 而且也不排除存在多重子态、夸克物质块、由夸克物质构成的致密星等的可能性。然而, 由于QCD的非微扰特性和在格点模拟中出现的符号问题, 目前我们必须依靠各种QCD启发的有效模型来研究这些物质的性质。在某种程度上, 由于这些有效模型的参数没有被很好的限制, 所以这些模型对多重子态的预言有较大的不确定性。因此, 用现有的重子和双重子的实验数据对模型的参数进行约束变得尤为重要, 而限制好的参数又可以应用到后续研究ud夸克块、奇异滴等。

Table 1: 用于约束模型参数的八个重子和一个双重子的实验质量谱（最后一列是贝叶斯参数推断用到的标准差）。

	$[f]$	Y	I	J	$\sum S_i $	$M_{\text{exp.}} \text{ (MeV)}$	$\sigma \text{ (MeV)}$
p	[21]	1	1/2	1/2	0	938.232046	3
Λ	[21]	0	0	1/2	1	1115.683	3
Σ^+	[21]	0	1	1/2	1	1189.37	3
Ξ^0	[21]	-1	1/2	1/2	2	1314.86	3
Δ^{++}	[3]	1	3/2	3/2	0	1232	3
Σ^{*+}	[3]	0	1	3/2	1	1382.8	10
Ξ^{*0}	[3]	-1	1/2	3/2	2	1531.8	10
Ω^-	[3]	-2	0	3/2	3	1672.45	10
D_{03}	[33]	2	0	3	0	2357	10

基于考虑禁闭和一阶线性微扰相互作用的等效质量模型, 我们同时着重考虑单胶子交换相互作用的色磁部分去计算重子和双重子的质量谱。在等效质量模型中, 存在三个参数即: f : 跑动夸克质量和夸克流质量的比; C : 微扰强度; D : 禁闭强度。而在考虑单胶子交换相互作用的色磁部分时, 不同夸克间的强相互作用耦合系数 α_s 也是不同的, 可以根据夸克的种类分为三类: 1、非奇异夸克间的强耦合系数 α_s^u , 2、非奇异夸克和奇异夸克间的强耦合系数 α_s^{ls} , 3、奇异夸克间的强耦合系数 α_s^{ss} 。基于Table 1中给出的八个重子和 D_{03} 的实验质量, 构建贝叶斯参

数推断所需的似然函数 $P_M[D(M_{1,2,\dots,9})|Model(p_{1,2,\dots,6})] = \prod_{j=1}^9 \frac{\exp\left[-\frac{(M_{\text{th},j}-M_{\text{exp},j})^2}{2\sigma_j^2}\right]}{\sqrt{2\pi}\sigma_j}$, 随后采用贝叶斯MCMC推断得到模型的6个参数的后验分布。

在图 1中, 由于在我们之前的文章中 [2], 我们已经给出了其他五个参数与微扰强度 C 的关系, 所以在图1中给出的是这五个的参数与之前给出的关系的偏离度。当然可以通过之前的函数关系和偏离度精确的计算出参数具体的值。值得一提的是, 我们在做贝叶斯参数推断的时候并没有用实验给出的标准差, 原因是由于实验测出的不同重子质量标准差之间的差别过大, 在做随机采样时, 马尔科夫链难以收敛。由于我们更注重将较轻的重子和双重子描述好, 所以我们

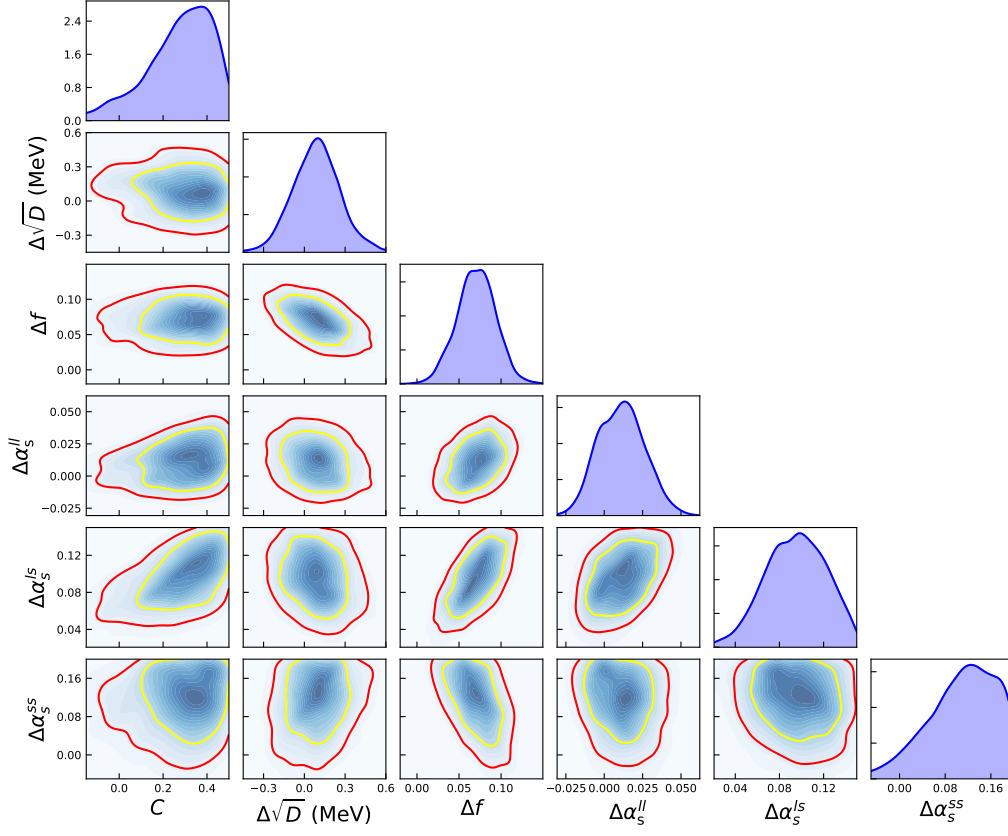


Figure 1: 由重子和 D_{03} 质量数据集的贝叶斯分析推断得出的六个参数的后验概率分布函数（对角线上的子图），以及参数间的相关性（红色（黄色）曲线分别表示90%（68%）的置信区间）。

Table 2: 参数的最可能值和对应68%和90%置信区间。

Parameters	CFL(68%)	CFL(90%)
C	$0.159^{+0.257}_{-0.045}$	$0.159^{+0.304}_{-0.042}$
$\Delta\sqrt{D}$ (MeV)	$0.051^{0.206}_{-0.134}$	$0.051^{0.334}_{-0.248}$
Δf	$0.064^{0.029}_{-0.017}$	$0.064^{0.043}_{-0.033}$
$\Delta\alpha_s^{ll}$	$0.011^{0.015}_{-0.016}$	$0.011^{0.025}_{-0.024}$
$\Delta\alpha_s^{ls}$	$0.079^{0.044}_{-0.012}$	$0.079^{0.058}_{-0.03}$
$\Delta\alpha_s^{ss}$	$0.149^{0.02}_{-0.104}$	$0.149^{0.039}_{-0.153}$

将重子质量小于1.35GeV的态和 D_{03} 的标准差定为3MeV，其他态的标准差定为5MeV。表 2给出了参数的最可能值和68%(90%)置信区间的上限和下限。

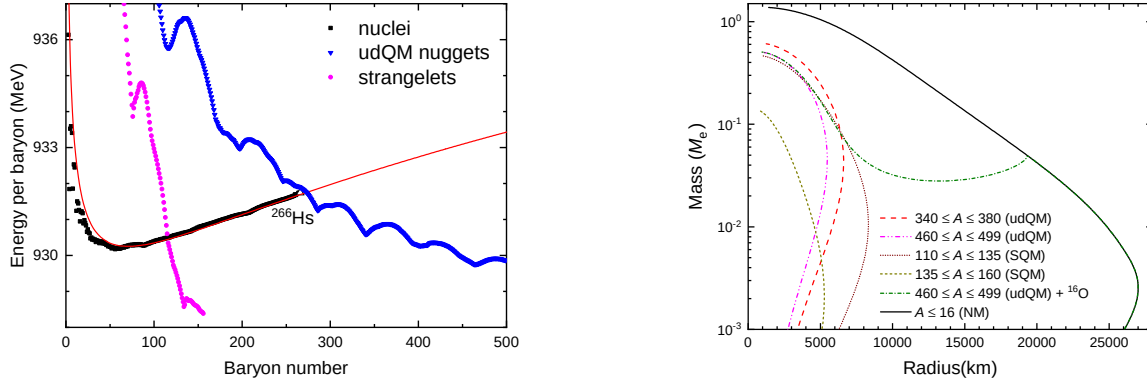


Figure 2: 左图： β 稳定的udQM物质团、奇异滴与原子核的每重子能量随重子数 A 的变化关系。右图：致密矮星的质量-半径关系。

我们得到了参数组的后验分布，还可以预测由 u, d, s 三种夸克占据 $S_{1/2}$ 轨道（即重子数 B 小于6）的多重子态的质量，并给出置信区间。当用重子谱约束模型参数后，仍然有参数空间可以使夸克物质块比原子核更加稳定。若夸克物质块比原子核更加稳定，进一步研究了由这些物体构成的致密矮星（compact dwarfs）的物质组成与结构。这类冷致密矮星物质由奇异滴或udQM物质团构成，它们嵌入均匀电子气体中，形成体心立方晶体。

如图2 [3]（左），我们用等效质量模型计算了 β 平衡的ud夸克块和奇异滴的每重子能量（蓝色的点和粉色的点）。黑色的点为 β 平衡的原子核的每重子能量，红色的线对应用液滴模型拟合的 β 平衡原子核的每重子能量。奇异滴和ud夸克块的每重子能量分别会在 $A \geq 120$ 和 $A \geq 447$ 时小于930MeV，这比 ^{56}Fe 更加稳定。对于 $274 \leq A \leq 446$ 的ud夸克块，可能存在衰变成原子核的过程；然而，由于ud夸克块的表面张力远大于有限核，其内部核子团预形成概率极低，使得这些物质团呈亚稳态。ud夸克块和奇异滴构成的致密矮星的质量-半径关系由图2（右）给出。与普通白矮星相比，udQM矮星和奇异滴矮星具有更致密的结构，其质量与半径明显更小。若包含重子数 A 较小的udQM物质团或奇异滴，致密矮星的质量和半径会增大，但仍小于普通白矮星。出现这种现象的原因是，夸克块的电荷质量比较原子核更加小，同时夸克块的电荷质量比随着重子数 A 的增加而减小。若考虑致密矮星表面覆盖普通白矮星物质（如 ^{16}O 白矮星物质），则夸克矮星与普通白矮星的质量-半径关系可通过此类混合矮星衔接。这些混合矮星可能通过吸积过程形成，但由于库仑势垒的存在，普通原子核转化为ud夸克块或奇异滴的概率极低。

References

- [1] 夏铖君, 高勇, 徐仁新. 奇异物质与奇异星. 北京大学出版社, 2024. 10. (中外物理学精品书系).
- [2] You, Haosong and Xia, Chengjun and Zhu, Xinmei and Chen, Penghui and Xu, Jianfeng and Lu, Zhenyan and Peng, Guangxiong and Xu, Renxin. Baryon Spectra in the Framework of an Equiparticle Model. *Nucl. Phys. Rev.*, 2022, 39(3): 302-310.
- [3] You, Hao-Song and Sun, Hao and Li, Hong-Bo and Xia, Cheng-Jun and Xu, Ren-Xin. Compact dwarfs made of light-quark nuggets. *Phys. Rev. D*, 2024, 110.054041

脉冲星低频频谱反转的探索 and 来自 Gum Nebula 的发现

余婷 (Ting Yu), 张仲莉 (Zhongli Zhang)

中国科学院上海天文台, 南丹路80号, 徐家汇, 上海 200030

Email: yuting@shao.ac.cn

随着对脉冲星在低频射电波段的关注加深, 其频谱特性的复杂性逐渐显露, 尤其是低频频谱的反转现象。标准模型认为脉冲星辐射为单幂律谱, 辐射区域沿磁轴向向外延伸, 脉冲宽度和辐射强度随频率变化。因此, 谱指数与电子密度的关系成为分析基础。然而, 在低频段上, 脉冲星表现出不同的频谱形态, 如低频反转谱和分段幂律谱等 (Jankowski et al. 2017)。Izvekova等人早在1981年首次提出这一现象 (Izvekova et al. 1981)。近年低频阵列巡天 (如LOFAR和MWA) 验证显示, 170-200 MHz内大部分脉冲星的理论流量与观测流量一致, 但低于170 MHz的频率则更为复杂 (Bondonneau et al. 2020; Sanidas et al. 2019; Bhat et al. 2023)。针对这些现象的理论解释虽然有多种模型, 但至今尚无共识。

低频反转现象的成因通常被认为主要受到星际介质影响, 如等离子体折射、星际介质的散射和吸收 (包括同步自吸收和自由-自由吸收) 等。我们利用现有的数据和分析工具 (Swainston et al. 2022), 对具有可靠流量数据的一千多颗脉冲星进行了考察。最终, 初步统计了约200个低频反转源, 发现其反转频率主要分别集中在100 MHz以下、170 MHz和450 MHz附近 (图1)。对于反转谱高频端和低频端的谱指数 α 和 β , 当 α 参数的值为-2时说明频谱较为陡峭, 而当 β 参数为2时, 低频端表现接近自由-自由热吸收效应。我们调查和高密度等离子团块, 如超新星遗迹、脉冲星星风、loop I 和local bubble交界处成协的脉冲星, 发现它们只占反转谱样本的一小部分。值得一提的是, 对于不同频段的三组低频反转源, 我们尚未找到它们与周期、周期变化率、磁场强度等物理参数的显著关联。

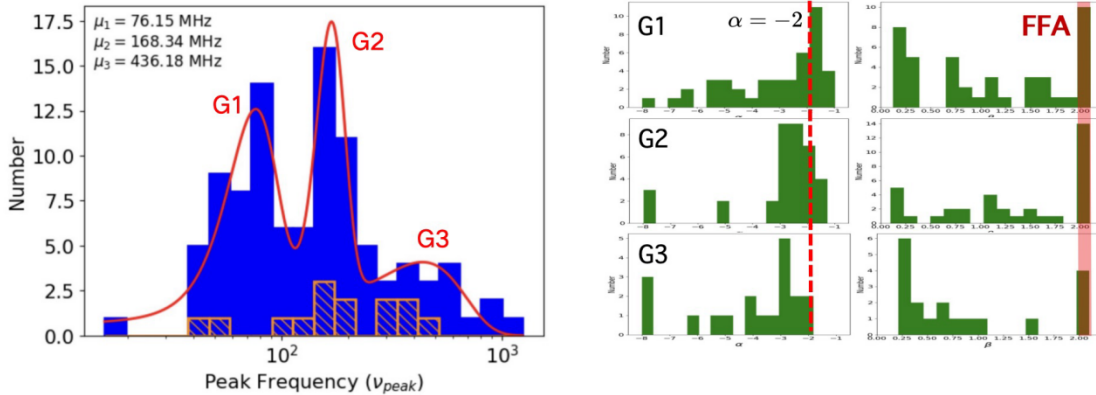


Figure 1: 左图表示反转频率集中于三个峰的位置, G1<100MHz, G2~170MHz, G3~450MHz, 橙色区域是和高密度等离子团块成协的脉冲星统计; 右图表示反转谱拟合的 α 和 β 分布结果。

接下来, 我们针对Gum Nebula中的一些脉冲星进行了更为详细的分析。Gum Nebula是一个靠近我们的巨大等离子团块。在图2的脉冲星分布中, 有三颗处于星云的运动中心, 两颗处在边缘, 一颗在Gum Nebula之外。我们分别使用同步自吸收 (SSA, 公式1) 和自由-自由吸收 (FFA, 公式2) 对Gum Nebula中的脉冲星进行频谱拟合。

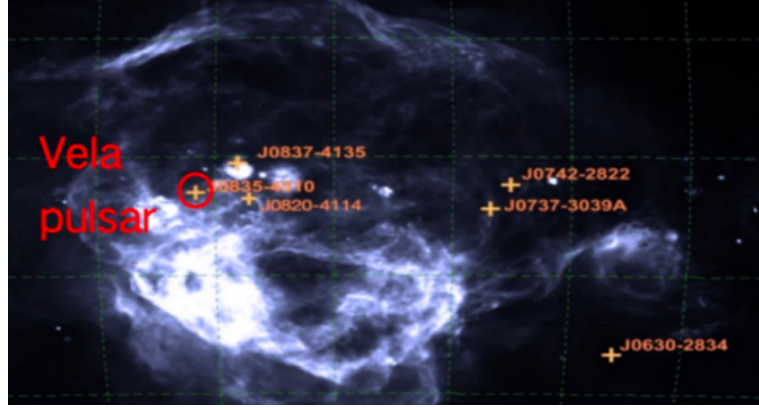


Figure 2: 脉冲星在Gum Nebula中的分布。

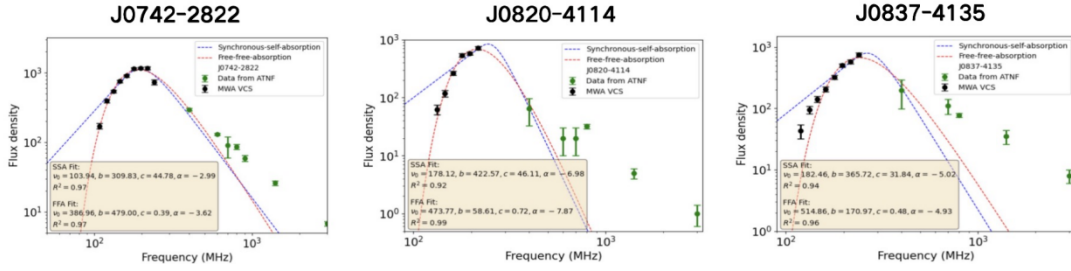


Figure 3: J0742-2822、J0820-4114及J0837-4135的频谱拟合结果。

$$S_{\nu} = b \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{2.5} \left[1 - e^{-c(\nu/\nu_0)^{\alpha-2.5}} \right] \quad (1)$$

$$S(\nu) = b \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)^{\alpha} e^{-B\nu^{-2.1}} \quad (2)$$

我们发现有三颗脉冲星J0742-2822、J0820-4114及J0837-4135，其频谱特征与自由-自由吸收模型最为吻合（图3），由此推断其吸收介质的气体温度分别为2160K、21100K、232000K。这些研究表明，在Gum Nebula范围内，脉冲星的信号深受等离子体团块扰动的影响，这对我们的观测和模型提出更高的挑战，同时也对星际介质的研究提供了机遇。未来的研究需要在更广频率范围和更高数据精度下进行观测，以便更好地揭示这些复杂现象的内在机制。

参考文献

- Bondonneau, L., Grießmeier, J. M., Theureau, G., et al. 2020, A&A, 635, A76
 Bhat, N. D. R., Swainston, N. A., McSweeney, S. J., et al. 2023b, PASA, 40, e020
 Izvekova, V. A., Kuzmin, A. D., Malofeev, V. M., & Shitov, I. P. 1981, Ap&SS, 78, 45
 Jankowski F, van Straten W, Keane E F, et al. MNRAS, 2018, 473(4): 4436-4458
 Sanidas, S., Cooper, S., Bassa, C. G., et al. 2019, A&A, 626, A104
 Swainston, N. A., Lee, C. P., McSweeney, S. J., & Bhat, N. D. R. 2022, PASA, 39, e056

甚高能脉冲星晕的搜索与相似性研究

郑冬 (Dong Zheng)
云南大学物理与天文学学院
云南 650091
Email: zhengdong@mail.ynu.edu.cn

王仲翔 (Zhongxiang Wang)
云南大学物理与天文学学院
云南 650091
中国科学院上海天文台
上海 200030
Email: wangzx20@ynu.edu.cn

甚高能脉冲星晕 (VHE, ≥ 100 GeV) 首次由Milagro伽马射线天文台发现在Geminga和Monogem两颗脉冲星周围并被高海拔水切伦科夫观测站 (HAWC) 所详细研究, 引起学界广泛关注和研究, 被认为是一类新的宇宙线起源天体。其存在于脉冲星周围, 在物理尺寸为几十秒差距的范围内发射甚高能伽马射线, 这个尺寸远大于另一类由脉冲星供能的天体—脉冲星风云; 产生伽马射线的粒子在这个区域内的扩散速度小于粒子在宇宙空间中扩散的平均速度1–2个量级, 被称之为慢扩散。因其特殊的性质, 慢扩散性质, 激发出学者对宇宙线传播扩散机制的进一步研究, 脉冲星晕也成为直接研究扩散机制的理想天体。目前研究指出, 脉冲星晕广泛存在于中年 (特征年龄大于10万年) 脉冲星周围, 但目前证认的仅有几例。基于其所含的重要研究价值, 对其的证认工作成为目前急需的基础研究工作, 我们的系列工作证认出近十例脉冲星晕的候选体, 同时总结了其可能的观测性质。

目前超300个甚高能源被探测到, 其中近1/3为未证认源, 特别是我国高海拔宇宙线观测站 (LHAASO) 的全面运行, 越来越多的甚高能源被发现, 我们的工作基于LHAASO首期甚高能源表展开。LHAASO由水切伦科夫探测阵列 (WCDA, 1–25 TeV) 和平方公里阵列 (KM2A, 25–1000 TeV) 两个探测器组成, 一期源表包含了两个探测器近3年的观测结果共90个源, 其中35个与脉冲星成协。甚高能伽马射线的起源与高能 (≥ 100 MeV) 伽马射线的起源密切相关, 我们基于费米伽马射线空间望远镜数据 (Fermi-LAT, 0.1–500 GeV), 结合多波段观测开展。在高空脉冲星是一类明亮的天体, 其伽马射线起源于脉冲星的脉冲辐射, 明亮的脉冲辐射遮掩了其他成分的辐射 (例如脉冲星风云/晕或超新星遗迹), 通过Timing手段, 我们去除了明亮的脉冲关注其非脉冲部分的辐射发射情况。在脉冲星PSR J0631+1036周围LHAASO和HAWC探测到甚高能辐射发射, 空间位置与脉冲星PSR J0631+1036成协, 在MeV–GeV能段没有显著的非脉冲辐射, 同时多波段观测结果显示在脉冲星周围没有探测到脉冲星风云和超新星遗

迹，并表现出与Geminga脉冲星（晕）相似的性质，由此考虑与J0631成协的甚高能源为由J0631供能的脉冲星晕候选体（见图1）。基于J0631的观测性质，我们在LHAASO源表中选取了与脉冲星成协并且与J0631有相似甚高能伽马射线辐射性质的源。针对这一批目标源，分析其Fermi-LAT数据去除明亮的脉冲辐射，结合多波段观测结果展开证认，近十个源在我们的工作中被证认为脉冲星晕候选体并研究脉冲星晕（候选体）可能的性质（见图2）。我们的研究指出，脉冲星晕在甚高能明亮，在X射线能段没有明显可观测辐射；脉冲星晕完全由脉冲星供能，其能量转换效率为常数且不随时间变化；脉冲星晕的扩展范围随时间缓慢变小。与甚高能脉冲星风云对比，我们发现，在小于25 TeV能段上脉冲星风云较脉冲星晕有更软的能谱，脉冲星晕（候选体）谱指数小于2，脉冲星风云大于2。在未来，这些性质可以为脉冲星晕的证认提供证据。

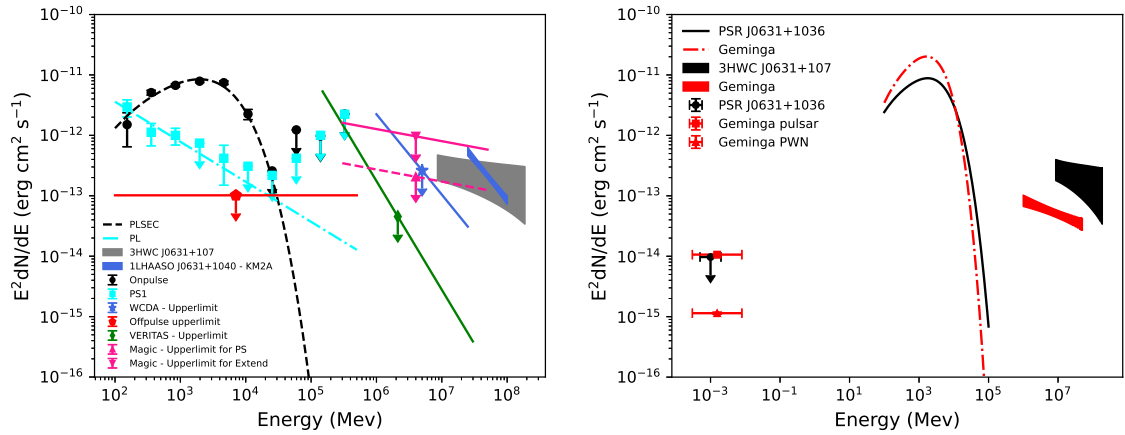


Figure 1: 左图，脉冲星PSR J0631+1036和与之相关的甚高能伽马射线辐射能谱。黑色圆点和虚线表示脉冲辐射，红色五边形表示非脉冲辐射上限值，X轴误差棒表示上限能量范围为0.1–500 GeV，青色方形点和点划线表示邻近脉冲星的高能源能谱，蓝色和灰色阴影范围为LHAASO–KM2A和HAWC测量结果，蓝色星型上限为LHAASO–WCDA测量上限，绿色菱形为VERITAS测量上限，洋红色实线和虚线表示Magic望远镜基于不同形态模型的测量结果。右图，与脉冲星相关的多波段辐射能谱，包括脉冲星（风云）X射线辐射，脉冲星脉冲的高能辐射，脉冲星晕的甚高能辐射，红色表示Geminga脉冲星，黑色表示脉冲星PSR J0631+1036。

随着LHAASO的持续运行，越来越多的甚高能源被发现，在未来更多的脉冲星晕可以被严格证认。目前对其多波段对应体的研究仍没有明确的结果，多波段对应体在未来有助于全面理解其物理过程，同时可以限制与其相关的物理过程，例如慢扩散机制起源等问题。我们在未来针对其多波段对应体展开工作，以期进一步证认，同时检验我们工作中提出的相关性质。

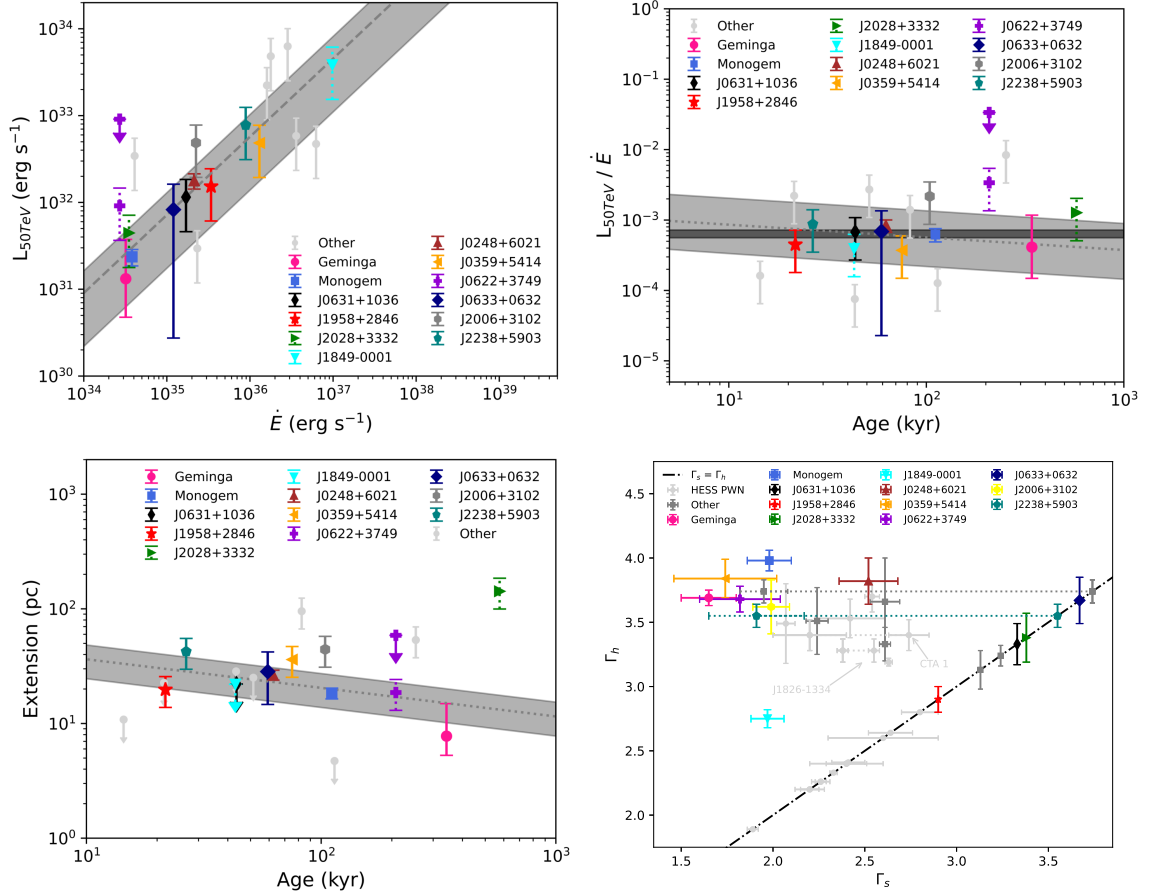


Figure 2: 左上，50 TeV处的微分光度与脉冲星自转能的关系，由幂律谱描述，谱指数约为0.9。右上，能量转换效率和脉冲星年龄的关系，表现为常数。左下，脉冲星晕（候选体）物理尺寸与脉冲星年龄的关系，存在缓慢下降趋势。右下，脉冲星风云/晕能谱指数对比， Γ_s 表示小于25TeV测量结果， Γ_h 为大于25TeV测量结果，点划线表示缺少测量时假设 $\Gamma_s = \Gamma_h$ 。左上，右上，和左下，图中浅灰色圆点表示存疑的候选体，有颜色的不同形状标记表示脉冲星晕与较好的候选体，灰色虚线和阴影部分表示最佳拟合和误差范围，虚线误差棒表示脉冲星距离存疑。右下图，浅灰色圆表示甚高能脉冲星风云，深灰色方形表示存疑的候选体。

Scientific Program of FAST/Future Pulsar Symposium 13

July 14-16, 2024, Yunnan University (YNU), Lianyun Hotel (连云宾馆), Kunming
(Language: English or Chinese; but the presentation is suggested to be written in English)

===== Sunday, July 14 =====

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

(Joint sessions with SPSS'24)

Chair: 徐仁新 (15min = 12+3)

13:58 -- 14:00 仪 式: 升 FPS 会议旗帜

14:00 -- 14:15 蔡沿庆: *The Study of Single Pulses of PSR J0535-0231*

14:15 -- 14:30 陈 瑶: *A DM-free scheme for fast radio burst search in multibeam data based on EfficientNet*

14:30 -- 14:45 戴印丰: *Search for pulsars in globular clusters based on stacking power spectra*

14:45 -- 15:00 付秋阳: 人工智能加速脉冲星搜寻流程

15:00 -- 15:15 高端塬: *Difference between quark stars and neutron stars in universal relations and their effect on gravitational wave*

15:15 -- 15:30 胡宸然: *Effects of observational cutoff in frequency on fast radio bursts*

15:30 -- 15:45 雷鸣宇: *Investigating off-pulse gamma-ray emission from millisecond pulsars*

15:45 -- 16:15 *Group Photograph and Coffee Break*

Chair: 袁业飞 (15min = 12+3)

16:15 -- 16:30 李耀威: *Find new pulsars in Globular Clusters with the Fast Fold Algorithm*

16:30 -- 16:45 李 威: *Observations of Microstructure in Five Interpulse Pulsars with FAST*

16:45 -- 17:00 李保达: *Pulsars in M3*

17:00 -- 17:15 林 杰: *4FGL J1318.2+6754: A Long Orbital-period Redback Candidate*

17:15 -- 17:30 刘 鹏: *Pulse profile variability associated with the glitch of PSR J1048-5832*

17:30 -- 17:45 刘 通: *Measuring Polarization Properties of Pulsars in Globular Clusters with FAST*

17:45 -- 18:00 刘宇堃: *Dark Matter Halo Effects on Pulsar Pulse Profiles*

晚宴 18:00 – 20:00

===== Monday, July 15 =====

Chair: 袁建平 (15min = 12+3)

08:30 -- 08:45 牛佳瑞: FRB2020114A 的周期分析与偏振位置角跳变

08:45 -- 09:00 彭寒龙: *Comprehensive X-Ray view of the Anomalous X-Ray Pulsar 1E 2259+586*

09:00 -- 09:15 祁昊洋: *Detecting Strangeon Nuggets with Acoustic Messenger*

09:15 -- 09:30 虞攸隶: *Discovery of the first anti-glitch event in the rotation-powered pulsar*

09:30 -- 09:45 王正理: *A giant planet or brown dwarf passes through the line of sight to pulsar B1929+10*

09:45 -- 10:00 王啸威: *8.6 GHz observations of 170 pulsars using TMRT*

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

Scientific Program (FPS13, Kunming 2024)

Chair: 闫 振 (15min = 12+3)

10:30 -- 10:45 王 振: *Probing the interstellar medium from scintillation of the swooshing pulsar B0919+06*

10:45 -- 11:00 刘小辉: FRB 统计分析中的选择效应研究

11:00 -- 11:15 吴贤聪: *On the Asymmetry of Pulsar Radio Emission from Both Poles*

11:15 -- 11:30 吴宇梹: *FAST Observation Results on Core-Collapsed Globular Cluster M15*

11:30 -- 11:45 吴子为: *Pulsar and FRB scintillation studeis*

11:45 -- 12:00 徐江伟: CPTA 56 颗毫秒脉冲星的偏振研究

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

Chair: 王洪光 (15min = 12+3)

14:00 -- 14:15 薛子涵: *Search for axion dark matter with FAST*

14:15 -- 14:30 颜 一: 脉冲星辐射多样性的研究

14:30 -- 14:45 叶文韬: PSR B1509-58 宽能段高能辐射特性研究

14:45 -- 15:00 尹德江: *Discovery of new pulsars in Globular Clusters NGC6517, M13 and M92 with FAST*

15:00 -- 15:15 余志祥: *Result of 15yr timing of PSR J0007+7303*

15:15 -- 15:30 余 婷: *Investigating Spectral Turnover in Pulsars: Analysis Below 350 MHz and Insights from the Gum Nebula*

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

Chair: 桑碧平 (15min = 12+3)

16:00 -- 16:15 张 倩: Crab 脉冲星 glitch 恢复机制

16:15 -- 16:30 赵仕乾: *A targeted observation for fast radio bursts from a radio source with likely magnetar origin*

16:30 -- 16:45 郑 冬: 甚高能脉冲星晕的搜寻与相似性研究

16:45 -- 17:00 周禹睿: *Constraints of the maximum mass of quark stars based on post-merger evolutions*

17:00 -- 17:15 周宇凯: 21CMA 脉冲星后端进展

17:15 -- 17:30 黄玉祥: 云南台的 YN40m 快速射电暴观测与研究

Dinner, 18:00 – 19:00

===== Tuesday, July 16 =====

Chair: 宋黎明 (15min = 12+3)

08:30 -- 08:45 王发印: 快速射电暴的起源研究

08:45 -- 09:00 席绍强: *A brief overview of the PWNe detected by LHAASO*

09:00 -- 09:15 周登科: *A discovery of two slow pulsars with FAST: “Ronin” from the globularcluster M15*

09:15 -- 09:30 王惠惠: *An Investigation of state changes of PSR J2021+4026*

09:30 -- 09:45 张振辉: *A magnetospheric coherent radiation model for FRBs*

09:45 -- 10:00 **Announcement of the Crab Prize and the Vela Prizes**

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

Chair: 岳友岭 (15min = 12+3)

10:30 -- 11:00 宋黎明: 谈谈我的几次学术方向改变 (特邀)

11:00 -- 11:15 孙保元: *Nuclear and NS properties from a density-dependent meson-exchange perspective*

11:15 -- 11:30 武旭浩: *Properties of the mixed phase core in maximum mass neutron stars*

11:30 -- 11:45 徐仁新: 我的物质观: 三类物质形态

11:45 -- 12:00 陈文聪: FPS14 介绍, 转交 FPS 会议旗帜

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

=====

NOTE for *talks* (15min = 12+3)

The chair would remind the speaker “2 min” after talking for 10 minutes.

All talks in red is for awards of the Crab/Vela prizes:

Score suggested for the members in ad hoc committee

Crab: 85~95, Vela: 75~85