



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

快速射电暴观测与分析

作者姓名: 张永坤

指导教师: 李 菡 研究员 中国科学院国家天文台

蔡肇伟 研究员 中国科学院国家天文台

学位类别: 理学博士

学科专业: 天体物理

培养单位: 中国科学院国家天文台

2024 年 6 月

Observation and Analysis of Fast Radio Bursts

**A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Astrophysics
By
Zhang Yong-Kun
Supervisor: Professor Li Di & Tsai Chao-Wei**

National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：张永坤

日期：2024年5月28日

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内 容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：张永坤

日期：2024年5月28日

导师签名：秦泽沛

日期：2024年5月28日

摘要

快速射电暴是在遥远宇宙中突然爆发的短暂而强烈的射电信号，其持续时间极短，通常仅数毫秒，却能释放出巨大的能量，与太阳在几个月至一年时间内产生的能量相当。自 2007 年首次发现快速射电暴以来，其起源与性质就成为天体物理学研究的热点之一。对快速射电暴的研究不仅有助于深化我们对宇宙中极端物理条件的认知，还对理解宇宙大尺度结构、物质分布以及测定宇宙学参数具有重要意义。中国的天眼 FAST，作为当前世界上最大的单口径射电望远镜，以其卓越的灵敏度成为研究快速射电暴的理想工具。FAST 的大样本观测有望为我们提供大量的快速射电暴样本，从而使得我们可以对快速射电暴的统计性质进行更加深入的研究。

在 FAST 的观测数据基础上，我们开发了一种新型的基于人工智能的快速射电暴搜索算法 DRAFTS。这一流程利用 CUDA 加速，将原始时间-频率数据高效转换为时间-色散数据。随后，通过训练好的目标检测模型识别出射电暴的到达时间和色散值，进而从原始数据中提取出爆发片段。最后，利用二分类模型对提取的数据进行验证，确保所识别的快速射电暴的真实性。这一方案在效率和灵敏度上都有显著提升，可以在短时间内处理大量数据，同时减少了误报率，解决了传统算法中存在的诸多问题。

应用这一算法，我们从 FAST 观测到的 FRB 20201124A 和 20220912A 数据中，探测到了有记录以来最高的快速射电暴事件率。深入分析这些事件样本，我们发现事件等待时间的分布呈现出明显的双峰特性，其右峰反映了快速射电暴的活跃性。而能量分布的双峰分布则暗示了快速射电暴可能存在的多种辐射机制，结合超高的事件率，对低辐射效率的模型提出挑战。对 FRB 20220912A 的偏振分析揭示了其位于相对干净的环境中，且展现出复杂的圆偏振特性，如高圆偏振度、随时间和频率迅速变化的圆偏振以及圆偏振爆发比例与法拉第旋量之间的负相关性。这些现象暗示了快速射电暴的圆偏振特性可能与其本征的辐射机制相关，例如磁星的磁层内的相干曲率辐射或逆康普顿散射，而复杂的环境则会吸收圆偏振。

通过对 FAST 长期监测到的快速射电暴样本的分析，我们只用 FAST 观测数据也恢复了 FRB 20121102A 的 160 天长周期。另外，在对 FRB 20190417A 的数据分析中我们发现了一个约为 55 天的长周期，然而在随后预期宁静的时期探测到爆发，意味着其长周期是由于采样不足造成的假象。后续对快速射电暴大样本的时间-能量的分析，我们发现快速射电暴短周期缺失的现象可能源于其随机辐射的本质。通过“Pincus Index”和“Lyapunov Exponent”量化爆发事件的随机性和混沌性，并将快速射电暴与其他一些常见的物理现象进行比较，如脉冲星、地震、太阳耀斑，我们发现在随机性-混沌性的相空间中，快速射电暴的位置与其他物理现象有明显的区别，表明出明显的随机性和较小的混沌性，类似随机游

走。暗示了快速射电暴可能是多种辐射机制或者多个辐射位置组合的结果。

总而言之，本研究涵盖了从快速射电暴的搜索、定标到后续分析的完整流程开发，为 FAST 的快速射电暴研究提供了重要的数据处理和分析工具。这些工作不仅为快速射电暴统计特性的研究提供了强有力的数据支持，产生的科学结果也推动我们对 FRB 辐射机制的理解。

关键词：快速射电暴，深度学习，时域分析，数理统计

Abstract

Fast radio bursts (FRBs) are brief yet intense radio signals that erupt suddenly in the distant universe. Lasting only a few milliseconds, they can unleash an immense amount of energy equivalent to what the Sun produces over several months to a year. Since their initial discovery in 2007, the origin and properties of FRBs have become one of the hottest topics in astrophysical research. Studying FRBs not only enhances our comprehension of extreme physical conditions in the universe but also has significant implications for understanding cosmic large structures, matter distribution, and the measurement of cosmological parameters. The Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST) in China, being the largest single-dish radio telescope in the world, is an ideal instrument for FRB research due to its exceptional sensitivity. The FAST telescope is expected to yield a large number of FRB events, allowing for a more comprehensive statistical analysis of their properties.

Based on the observational data from FAST, we have developed a novel artificial intelligence-based fast radio burst search algorithm called DRAFTS. This pipeline, accelerated by CUDA, efficiently converts raw time-frequency data into time-dispersion data. Subsequently, a trained object detection model identifies the arrival times and dispersion measures of bursts, allowing the extraction of the burst segments from the raw data. Finally, a binary classification model validates the extracted data to ensure the authenticity of the identified FRBs. This approach significantly improves efficiency and sensitivity, enabling the processing of voluminous data in a short time while reducing false-positive rates, addressing numerous issues inherent in traditional algorithms.

With this algorithm, we detected the highest event rate of FRBs on record from FAST's observations of FRB 20201124A and FRB 20220912A. Further examination of these events revealed a bimodal distribution in the waiting times, with the right peak reflecting the activity of FRBs. Additionally, the bimodal energy distribution suggests multiple underlying emission mechanisms. Combined with an extraordinarily high event rate, these findings challenge models with low radiative efficiency. The analysis of polarization in FRB 20220912A revealed its presence in a relatively clean environment. The bursts exhibited complex circular polarization characteristics, including high circular polarization degree, rapid changes in circular polarization with time and frequency, and a negative correlation between the proportion of circularly polarized bursts and the Faraday rotation measure. These phenomena suggest that the circular polarization properties of FRBs might be intrinsic to their emission mechanisms, such as coherent curvature radiation or inverse Compton scattering within the magnetosphere of a magnetar, while complex environments could absorb circular polarization.

By analyzing the long-term monitored samples of FRBs with FAST, we were able to reconstruct the 160-day period of FRB 20121102A using only FAST observation data. Furthermore, our data analysis of FRB 20190417A revealed an approximate 55-day cycle. However, the detection of bursts during the subsequent expected quiet period suggests that the long period is an illusion due to undersampling. Further investigation into the time-energy distribution of a large sample of FRBs revealed a phenomenon of lacking short periods, possibly due to the stochastic nature of their emissions. To quantify the randomness and chaos of the burst events, we used the 'Pincus Index' and 'Lyapunov Exponent' and compared FRBs to other physical events such as pulsars, earthquakes, and solar flares. Our analysis reveals that active repeaters congregate with Brownian motion toward highly random, yet less chaotic regions in the stochasticity-chaos phase space. This is distinct from earthquakes and solar flares, both of which are more chaotic but less random than FRBs. The significant stochasticity could originate from a highly entropic single source or a combination of multiple emission mechanisms or sites.

In summary, this research covers the entire development of process flows from the search and calibration of FRBs to their further analysis, yielding critical tools for data processing and analysis in FAST's FRB research. Not only do these contributions offer robust data support for investigating the statistical characteristics of FRBs, but the scientific outcomes also advance our comprehension of the underlying FRB radiation mechanisms.

Key Words: Fast Radio Burst, Deep Learning, Time Domain Analysis, Statistics

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 快速射电暴的发现	2
1.2 快速射电暴的研究进展	6
1.2.1 时间	6
1.2.2 偏振	7
1.2.3 色散	11
1.2.4 能量	12
1.2.5 宽度	13
1.2.6 频率	14
1.2.7 重复性	16
1.3 快速射电暴可能的起源	16
1.4 本章小结	17
第 2 章 基于深度学习的快速射电暴搜索算法	21
2.1 传统搜索方法介绍	21
2.2 搜索快速射电暴的新方法	23
2.3 搜索流程介绍	24
2.4 目标检测介绍	25
2.5 目标检测数据处理与模型训练	25
2.6 分类检测数据处理与模型训练	27
2.7 结果分析与讨论	28
2.8 本章小结	31
第 3 章 两个重复快速射电暴的观测与分析	33
3.1 FRB 20201124A	33
3.1.1 引言	33
3.1.2 观测与数据处理	34
3.1.3 结果	35
3.1.4 讨论	42
3.1.5 结论	45
3.2 FRB 20220912A	47
3.2.1 引言	47
3.2.2 观测与数据处理	48

3.2.3 结果	49
3.2.4 讨论	61
3.2.5 结论	64
3.3 本章小结	65
第 4 章 活跃重复快速射电暴的时域分析	67
4.1 FRB 20121102A 的长周期分析	67
4.2 FRB 20190417A 消失的周期	72
4.3 快速射电暴在时间-能量空间中的随机游走	74
4.3.1 引言	74
4.3.2 数据	74
4.3.3 时间序列分析	74
4.3.4 能量序列分析	79
4.3.5 随机性与混沌性	80
4.3.6 结论	82
4.4 本章小结	84
第 5 章 延伸工作	85
5.1 射电数据音频化	85
5.1.1 一维数据	86
5.1.2 二维数据	91
5.1.3 小结	94
第 6 章 总结与展望	95
6.1 论文总结	95
6.2 未来展望	97
参考文献	101
致谢	117
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果 ..	119

图目录

图 1-1 Lorimer 爆发。(图片来自 Lorimer et al., 2007)	2
图 1-2 Peryton 事件。(图片来自 Burke-Spolaor et al., 2011)	4
图 1-3 来自 J1852-08 的爆发。(图片来自 Keane et al., 2012)	4
图 1-4 VLA 定位 FRB 20121102A。图为 VLA 在 3 GHz 下的图像，空间分辨率是 2"，白色的圆圈是 Arecibo 探测到的 FRB 20121102A 的爆发的位置，白色方框是 VLA 探测到的 FRB 20121102A 的爆发的位置，有一个持续射电源存在。右下角是 Gemini r 波段的光学图像。(图片来自 Chatterjee et al., 2017)	5
图 1-5 FRB 20180916B 爆发的活跃相位随频率的变化。(图片来自 Bethapudi et al., 2023)	7
图 1-6 FRB 20191221A 爆发的瀑布图，脉冲轮廓与准周期拟合残差。(图片来自 Chime/Frb Collaboration et al., 2022)	8
图 1-7 FRB 20121102A 的等待时间分布，红线为对数正态分布拟合。(图片来自 Li et al., 2021b)	9
图 1-8 快速射电暴线偏振度随频率变化，图中曲线是使用 σ_{RM} 拟合的 RM 散射程度。(图片来自 Feng et al., 2022a)	10
图 1-9 多个望远镜探测到 FRB 20121102A 的 RM 随时间的变化。(图片来自 Hilmarsson et al., 2021a)	11
图 1-10 DM 与红移的线性关系。(图片来自 Macquart et al., 2020)	12
图 1-11 FRB 20121102A 的能量分布。(图片来自 Li et al., 2021b)	14
图 1-12 来自快速射电暴的超短爆发。A 是 FRB 20200120E 的爆发，B 是 FRB 20200120E 爆发的亚微秒时间结构，C 是 FRB 20121102A 的微秒爆发（超快脉冲），D 是带有微秒结构的 FRB 20220912A 爆发。(图片来自 Kirsten et al., 2022b; Nimmo et al., 2022a; Snelders et al., 2023; Hewitt et al., 2023)	15
图 1-13 两种常见类型的 FRB 辐射模型的示意图。A 类脉冲星模型。B 类 GRB 模型。(图片来自 Zhang, 2020b)	17
图 1-14 快速射电暴一些重要发现的时间轴。蓝色区域表示累计探测到的 FRB 的数量。(图片来自 Bailes, 2022)	18
图 1-15 中国天眼全景图。(图片来自 我本人 摄于 2021 年)	19
图 2-1 两个快速射电暴爆发的瀑布图。A 是一个强爆发，B 是一个弱爆发。其中 A1/B1 是射电望远镜接收到的原始数据，A2/B2 是消色散后的数据，A3/B3 是消干扰并进行数据增强的后的数据，A4/B4 是对原始数据按照多个 DM 值消色散后形成的时间-色散图。	22
图 2-2 DRAFTS 搜索 FRB 的工作流程。	24

图 2-3 CenterNet 训练数据示例。A 是原始时间-色散数据, B 是随机裁剪后的数据, 绿色的框是数据标记。C 标出了高斯散射后的中心点。 ·	26
图 2-4 ResNet 训练数据示例。A 是原始时间-频率数据, B 是初步信号增强, C 是图像合并与干扰引入。 ·····	27
图 2-5 CenterNet 搜索结果示例。其中绿色的框为 Ground Truth, 红色的框为模型检测结果。 ·····	29
图 2-6 两个在目标检测模型中漏掉的爆发。左侧是爆发的时间-频率图, 右侧是时间-色散图, 其中红线标出了爆发应该在的位置。 ·····	30
图 3-1 FRB 20201124A 的观测与爆发探测情况。A 爆发数量的累积分布。B 每个观测日的爆发数量。灰条为未探测到爆发的观测时段, 红线为爆发数量的指数拟合。C 每次观测的观测时长。 ·····	36
图 3-2 FRB 20201124A 的等待时间分布。黑线和红线表示等待时间的分布和两个对数正态函数的拟合结果。 ·····	38
图 3-3 爆发流量和能量分布。黑色实线为使用观测带宽, 即 $\Delta\nu = 500\text{MHz}$ 计算的结果, 红色虚线为使用爆发带宽计算的结果。 ·····	39
图 3-4 FRB 20201124A 的能量分布。A FRB 20201124A 的累积能量分布(黑线), 红线为使用 Band 函数拟合的结果。B 单幂律函数拟合的指数与能量阈值的关系。C FRB 20201124A 的能量分布与两个对数正态函数拟合。 ·····	41
图 3-5 FRB 20201124A (绿色)、FRB 20190520B (红色) 和 FRB 20121102A (蓝色) 的流量和能量分布。A 是对三个 FRB 的流量的核密度估计(KDE)。B 和 C 是三个 FRB 的累积能量分布和 KDE。虚线为探测阈值。 ·····	43
图 3-6 FRB 20201124A 的爆发示例。 ·····	45
图 3-7 A, 使用 SBD 的 FRB 20201124A 爆发的等待时间分布。红线表示对数正态拟合。B, CBD (黑色实线) 和 SBD (蓝色虚线) 爆发的流量分布。C, 使用 CBD 和 SBD 的爆发的能量分布。D, 使用 CBD 和 SBD 的爆发的累积能量分布, 红线为 Band 函数拟合。 ·····	46
图 3-8 FAST 观测 FRB 20220912A 的观测信息。A, E 分别是爆发的 DM、RM、线偏振度、圆偏振度和能量。每个爆发用一个蓝色点表示, 红色点表示每日的中位数, 浅红色区域表示 1σ 范围。F - 蓝色线表示每次观测的爆发数量, 红色线表示事件率, 黄色条表示观测持续时间。 ·····	50
图 3-9 FRB 20220192A 的等待时间分布。红色实线表示使用两个对数正态函数拟合, 红色虚线表示使用指数函数拟合。 ·····	52

图 3-10 FRB 20220912A 的能量分布。A, 能量函数的累积分布, 蓝线表示累积能量分布, 红色虚线表示的是使用分段幂律函数拟合的结果。B, 能量函数的微分分布, 蓝线表示能量函数的微分分布, 红色虚线表示的是使用两个对数正态函数拟合的结果。C, 爆发能量随时间的变化, 蓝点表示每次爆发的能量, 红点表示每次观测的中位数, 蓝色轮廓表示爆发的二维核密度估计。	54
图 3-11 FRB 20220912A 的合成流量-频率谱。蓝色点表示每个频率通道的平均流量, 红色线表示的是使用幂律函数拟合的结果。	55
图 3-12 FRB 20220912A 爆发带宽拟合的示例。	56
图 3-13 FRB 20220912A 的中心频率 (ν_0) 和带宽 ($\Delta\nu$) 的分布。蓝色的点和线表示的是中心频率在 1 – 1.5 GHz 范围内, 和中心频率低于 1.05 GHz 或者超过 1.45 GHz, 但是拟合带宽超过 100 MHz 的爆发。橙色的点表示的是不满足这些条件的点。A, 中心频率的分布。B, 中心频率和带宽的关系, 白色的轮廓表示的是二维核密度估计, 浅黄色和浅蓝色的背景表示的是有效观测频段 (1 – 1.5 GHz) 和有效观测带宽 (0.5 GHz)。C, 带宽的分布, 使用对数正态函数拟合, 峰值在 181 MHz。	57
图 3-14 $\Delta\nu/\nu_0$ 的分布。A, 累积分布函数。B, 微分概率分布。蓝色的线表示的是高斯拟合标准差的误差小于其本身的爆发, 红色的线表示的是拟合半高全宽完全在 1.05 – 1.45 GHz 范围内的爆发。	58
图 3-15 圆偏振度最高的两个爆发。黑色、红色和蓝色分别表示爆发的总强度、线偏振度和圆偏振度。	60
图 3-16 16 个爆发的圆偏振度动态谱, 这些爆发的圆偏振都表现出随时间或者频率的变化。A, 偏振位置角 (PA)。B, 爆发的偏振轮廓, 黑线、红线和蓝线分别表示总强度、线偏振度和圆偏振度。C, 总强度动态谱。D, 圆偏振动态谱。	62
图 3-17 4 个圆偏振随频率振荡的爆发。A, 偏振度。B, 偏振位置角。 ..	63
图 3-18 重复暴的爆发中圆偏振度大于 10% 的比例与 RM 的关系。红色的误差棒是统计计数的泊松误差。	65
图 4-1 FRB 20121102A 的相位折叠结果。上图为使用不同周期得到的最大空占比, 可以看到在周期为 154.56 天的位置, 空占比最大。下图为使用 154.56 天对爆发进行折叠的结果, FAST-OLD 表示的是 FAST 在 2019 年探测到的 FRB 20121102A 的集中爆发, FAST-NEW 表示的是 2020 年及之后 FAST 探测到的来自 FRB 20121102A 的所有未发表的爆发, 爆发集中在 50% 的相位空间中。	68
图 4-2 FRB 20121102A 的方波周期拟合的参数分布。	69
图 4-3 使用图 4-2 中所示的最佳周期、占空比和相位值做出的方波与实际观测的对比。其中红色点为实际观测, 有爆发的观测值记为 1。	70

- 图 4-4 FRB 20121102A 的长周期示意图。从上到下分别是, A, Lomb-Scargle 周期图, 其中蓝线为只是用探测到的爆发, 红线为加入未探测到爆发的观测数据。B, 相位图, 按照 157 天的周期折叠所有爆发, 其中灰色区间为未探测到爆发的观测。C, 活跃窗口与爆发探测, 展示了从 2012 年开始到 2023 年止, FRB 20121102A 的活跃周期与活跃窗口。D, 周期信号置信度随时间变化, 其中蓝线为只是用探测到的爆发的数据, 红线为加入未探测到爆发的观测数据。…………… 71
- 图 4-5 FRB 20190417A 的观测信息和周期搜索。A, FAST 对 FRB 20190417A 的观测情况。黑色点表示探测到的爆发数量, 红色点表示爆发率。灰色区域表示没有探测到爆发的观测。B, 使用相位折叠法搜索 FRB 20190417A 的周期。黑线表示 FAST 和 CHIME 在 MJD = 59720 之前探测到的爆发, 红线表示使用所有探测到的爆发进行相位折叠。C, 使用 55.2 天的周期折叠所有爆发的相位分布。D, 活跃窗口的分布。黑色和红色点分别表示 MJD = 59720 之前和之后探测到的爆发。…… 73
- 图 4-6 两个快速射电暴爆发的时间和能量序列。A, 蓝色和红色点分别表示 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的爆发的能量和到达时间。蓝色和红色条分别表示 FAST 对 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的探测到爆发的观测。黄色条表示 FAST 对 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的未探测到爆发的观测。B, 两个快速射电暴的能量分布。…………… 75
- 图 4-7 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的周期图。…………… 75
- 图 4-8 地震、太阳耀斑、两个快速射电暴和布朗运动的归一化等待时间分布。A-E, 归一化等待时间分布。彩色线分别表示地震、太阳耀斑、两个快速射电暴和布朗运动的等待时间分布。灰色区域表示等待时间分布的拟合结果。F, FRB 20121102A 的等待时间分布。实线、虚线和虚点线分别表示指数分布、Weibull 分布和对数正态分布的拟合结果。G-I, 不同能量阈值下的等待时间的左峰、右峰和归一化右峰。 77
- 图 4-9 假设“后一个事件的能量低于前一个事件的能量”的概率 P 。A-C, FRB 20121102A、FRB 20190520B 和地震的 P , 虚线代表原始事件序列的 P , 直方图分布代表随机打乱事件序列的 P 。D, 不同地震震级阈值下的 P 的信噪比。…………… 80
- 图 4-10 不同事件序列的 Pincus 指数和 Lyapunov 指数。B-H, 不同事件序列的时间-能量序列。A, 正弦函数 (0.24, 0.06)、脉冲星 (0.40, 0.08)、地震 (0.72, 0.33)、太阳耀斑 (0.81, 0.21)、FRB 20121102A (0.84, 0.09)、FRB 20190520B (0.97, 0.07) 和布朗运动 (0.99, 0.05) 的 Pincus 指数和 Lyapunov 指数。颜色变化从蓝到红, 表示随机性增加。…… 81
- 图 4-11 关于计算 PI 和 $M\mathcal{L}\mathcal{E}$ 的稳健性测试。A, 使用不同 m 计算的 PI 。B-C, 不同能量阈值下的 PI 和 $M\mathcal{L}\mathcal{E}$ 。…………… 83
- 图 5-1 ACE/SWICS 测量的太阳风中电荷丰度。颜色表示丰度, 十字线表示每个离子分布的预期位置和 1σ 宽度。(图片来自 Landi et al., 2012) 86

图 5-2 黑洞的声音视频截图。(图片来自 NASA/CXC/SAO/K.Arcand) ...	87
图 5-3 一个快速射电暴的爆发轮廓。A 是将爆发频率维度塌缩后形成的时间序列, 也即爆发轮廓, 重整为 uint16 中的数值。B 是爆发的动态谱, C 展示了 A 中的爆发轮廓在 int16 中被截断后的形状。D 是 C 中时间序列的短时傅里叶变换, 可以看到在两个截断点的位置产生了全频段的噪声。	89
图 5-4 脉冲轮廓与小提琴的卷积。A, B, C 分别对应原始脉冲轮廓, 小提琴的声音数据和卷积后的数据。第一列是音频数据, 第二列是音频数据的短时傅里叶变换。	90
图 5-5 恒星的声音视频截图。(图片来自 Huppenkothen et al., 2023)	91
图 5-6 快速射电暴的时间-频率数据映射到梅尔刻度上。A 是未消色散的快速射电暴的时间-频率数据, B 是梅尔刻度与线性频率刻度之间的映射关系, C 是将 A 映射到梅尔刻度上的结果。	93
图 5-7 梅尔声谱转换为音频的结果。A, B 分别是 HiFi-GAN 和 GLA 转换后的音频波形, C, D 分别是对应的短时傅里叶变换结果。	94
图 6-1 暂现源在持续时标与亮度的相空间。	97

表目录

表 2-1 目标检测与分类模型训练参数	27
表 2-2 模型性能比较	28
表 3-1 FRB 20201124A 爆发的参数列表	37
表 3-2 三个快速射电暴辐射的能量比较	44
表 3-3 FRB 20220912A 爆发的参数列表	51
表 3-4 四个快速射电暴辐射的能量比较	63
表 4-1 FAST 对 FRB 20121102A 的观测总结	67

第 1 章 绪论

400 多年前，伽利略第一次将望远镜对准了星空，开启了现代天文学的崭新篇章。这个被他称作“望远镜”的“幻镜”解锁了夜空中无数未知的奥秘。通过这片透镜，木星旋绕的卫星首次揭露了自己的面貌，土星环状的辉光也清晰地刻画在了人类的观测历史上。迈向 19 世纪，照相术的发明进一步彰显了观测技术的革新。我们终于可以不再仅仅依靠肉眼和手绘，能够利用照相机去捕捉和保存那些短暂而珍贵的天文现象。随着照片的积累，天体的位置、运动乃至生命周期的各个阶段都被绘制在了时间的轴线上。

到了 20 世纪，天文学领域再次迎来了一次重大的变革。1932 年，卡尔·央斯基用他的喇叭天线探测到了来自银河中心的无线电波 (Jansky, 1933)，这个时刻标志着射电天文学的诞生。这一新的观测窗口，让我们除了可以在可见光波段看到天空，还可以在射电波段“收听”来自天空的信号。

从历史上看，每一次重大的技术革新都伴随着新的天文现象的发现。在空间伽马射线探测器可用之后，伽马射线暴的发现引发了天文学界的轰动 (Klebesadel et al., 1973)，在此之前，人们对天空中可能存在的伽马射线源一无所知。同样的，射电望远镜也为我们带来了诸多重要的发现，比如第一颗脉冲星 (Hewish et al., 1968) 和宇宙微波背景 (Penzias et al., 1965) 等。

现在我们知道，可见光仅是电磁辐射谱中一个狭窄的区域。电磁谱的整个范围横跨自低频的射电波，穿过红外辐射，跨越可见光频段，经由紫外线，至高频的 X 射线以及能量最大的 γ 射线，不同的频段有与之对应的观测手段。

低频观测使用光的波动性，比如射电望远镜，将来自天空的电磁波收集起来，并转换成电压信号进行高速的数字采样，得到的是天空中某一位置，光在某个波段的辐射随时间的变化。因此射电望远镜的时间分辨率完全取决于数字后端的采样速率，目前的采样可以做到 ~ 1 ns 记录一个数字。高频观测使用的是光的粒子性，像光学望远镜使用 CCD 采样。当光子打到 CCD 上时，激发光敏区域产生电荷。经过一段时间的曝光，累积的电荷数量也就代表了接收到了多少光子。因此光学望远镜得到的数据相当于射电望远镜在频率和时间上的积分后的数据，这样时间分辨率就做不到特别高，一般的曝光时间 ~ 30 s。这导致了光学波段的观测对快速变化的天体现象的探测的局限性。

快速射电暴 (Fast Radio Burst, FRB) 的发现，正是观测设备、高速采样与计算能力突破的一个生动例证。这些神秘的高能量天体爆发只持续数毫秒到几秒钟，其发现与记录必须依赖极高的时间分辨能力。自 FRB 被发现以来，全球众多射电天文台致力于提升时间分辨率来捕获更多这类短暂的爆发现象。FRB 的研究不仅令科学界对射电天文学有了新的认识，也对我们理解宇宙的极端物理条件提出了挑战。

1.1 快速射电暴的发现

快速射电暴是一类极短暂但亮度极高的射电脉冲事件。2007年, [Lorimer et al. \(2007\)](#) 报道了第一例快速射电暴。这是 Lorimer 教授和他的合作者在分析 Parkes 望远镜对小麦哲伦云 (SMC) 的脉冲星巡天数据时, 发现的一个仅仅持续了 5 ms, 却异常明亮的信号。爆发使接收器饱和, 因此只能给出一个流量下限为 30Jy。这一事件在发表后很快为人熟知, 被称为“Lorimer Burst”。现在这一事件也被指定为 FRB 20010724, 由这一事件被射电望远镜观测到的日期 (2001年07月24日) 定义。图 1-1展示了这个信号在时间-频率图上的辐射, 这种时间-频率图是射电数据的常见展示形式, 也被称作动态谱或者瀑布图。

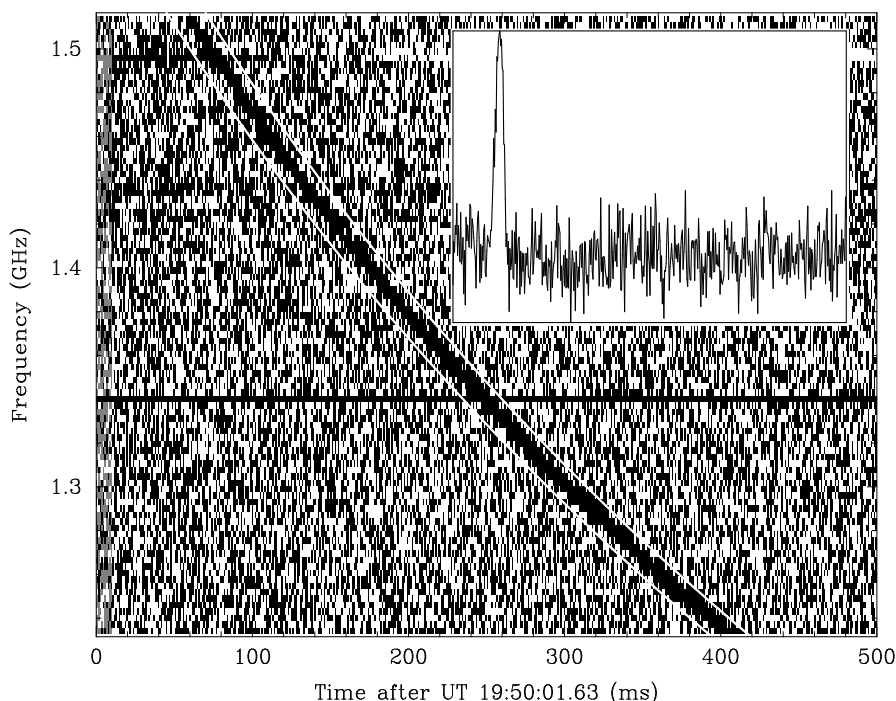


图 1-1 Lorimer 爆发。(图片来自 [Lorimer et al., 2007](#))

从图 1-1中可以看到, 快速射电暴信号表现出不同频率上到达时间的延迟。具体来讲, 就是同一个信号高频部分先到达, 低频部分后到达。这是因为在信号的传播路径上并非空无一物, 而是充斥着各种介质。射电信号在电离的星际介质中传播速度略慢于光在真空中的传播速度, 前者由射电信号频率和自由电子密度决定。频率为 ν_1 和 ν_2 的射电信号到达时间的差值近似如下

$$t_2 - t_1 \approx 4.15 \times \left[\left(\frac{1}{\nu_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{\nu_1} \right)^2 \right] \times DM \text{ ms} \quad (1-1)$$

其中

$$DM = \int_0^d n_e dL \quad (1-2)$$

是自由电子密度 n_e 与射电信号传播路径长度 L 的积分, DM 是以 pc cm^{-3} 表示的色散测量 (dispersion measure, DM)。一个源的 DM 值, 结合自由电子模型, 可以作为银河系内距离 (Cordes et al., 2002; Yao et al., 2017) 和宇宙学距离 (Ioka, 2003) 的粗略估计。这种频率依赖的色散时间延迟也是将来自遥远天体的信号与人类活动信号区分开来的特征。

在星系之间的空隙中, 自由电子密度约为 $\sim 1\text{m}^{-3}$, 意味着每 1pc cm^{-3} 的 DM 值对应着约 1 Mpc 的距离。Lorimer 爆发的 DM 值为 375pc cm^{-3} , 去除银河系贡献的部分, 约为 25pc cm^{-3} (Cordes et al., 2002), 意味着它与我们的距离大约为 350 Mpc。这个距离远远超过了银河系的尺度 (30 kpc), 甚至超过了 SMC 的距离 (约为 60 kpc), 表明这个源可能起源于更遥远的宇宙深处。如果源周围被高密度的等离子体覆盖, 在很短的距离内也可以贡献很大一部分色散值, 从而会导致我们高估它的距离。在不考虑距离估计错误的情况下, Lorimer 爆发的亮度应该是任何已知脉冲星的一万亿倍, 这几乎与太阳在一个月内发出的所有能量相当。

由于当时只有一个事件被发现, 并且这个爆发被定位在一个很大的区域里 (± 7 角分), 无法将其与某一个星系关联起来, 因此很难对这一现象进行进一步的研究, 彼时的大家也没有彻底相信这是一类全新的天体现象。几年后, Parkes 望远镜再次发现了一些类似的事件 (Burke-Spolaor et al., 2011), 如图 1-2 所示。这样的事件被称为 “Peryton”, 并很快就被发现是人造信号。这些信号是由于 Parkes 天文台休息室中的微波炉开门时的电磁泄漏导致的 (Petroff et al., 2015b)。这个事件的发现, 使人们对 Lorimer 爆发本身是否真的是一个来自天空的信号都产生了怀疑。

2012 年, Keane et al. (2012) 报道了另一个在 Parkes 历史数据中找到的爆发 J1852-08, 如图 1-3 所示。这个爆发的色散值为 $746 \pm 1\text{pc cm}^{-3}$, 在 1.4GHz 的频率下的流量密度为 400 mJy, 持续时间为 7.8 ms。由于这个爆发靠近银道面, 所以模型估计的银河系外贡献的 DM 值并不多, 因此不排除这个爆发来自银河系内。

直到 2013 年, Thornton et al. (2013) 报道 Parkes 望远镜又发现了 4 个新的快速射电暴。其中最亮的爆发的 DM 是 $1103.6 \pm 0.7\text{pc cm}^{-3}$, 几乎是 Lorimer 爆发的三倍, 并且这些爆发都没有发生在可能产生 “peryton” 的时间段内。此次发现最终将快速射电暴确立为一类真正的天文现象, Fast Radio Burst 这个名词也是这个时候创造出来的。自此, 快速射电暴的研究进入了一个高速发展的时代。

在探测到 Lorimer 爆发以后, 对爆发所在的位置又进行了 90 个小时的后续观测, 但是没有检测到重复的爆发 (Lorimer et al., 2007)。后来探测到的几个快速射电暴也都是一次性事件。直到 2016 年, Spitler et al. (2016) 首次报道了一个重复产生爆发的快速射电暴源, 即 FRB 20121102A。这个 FRB 最初是在 Arecibo 的脉冲星巡天项目中被探测到 (Spitler et al., 2014), 是迄今为止研究的最多的快速射电暴之一。后续的观测将这个 FRB 定位在一个红移为 0.19 的矮星系中, 并与

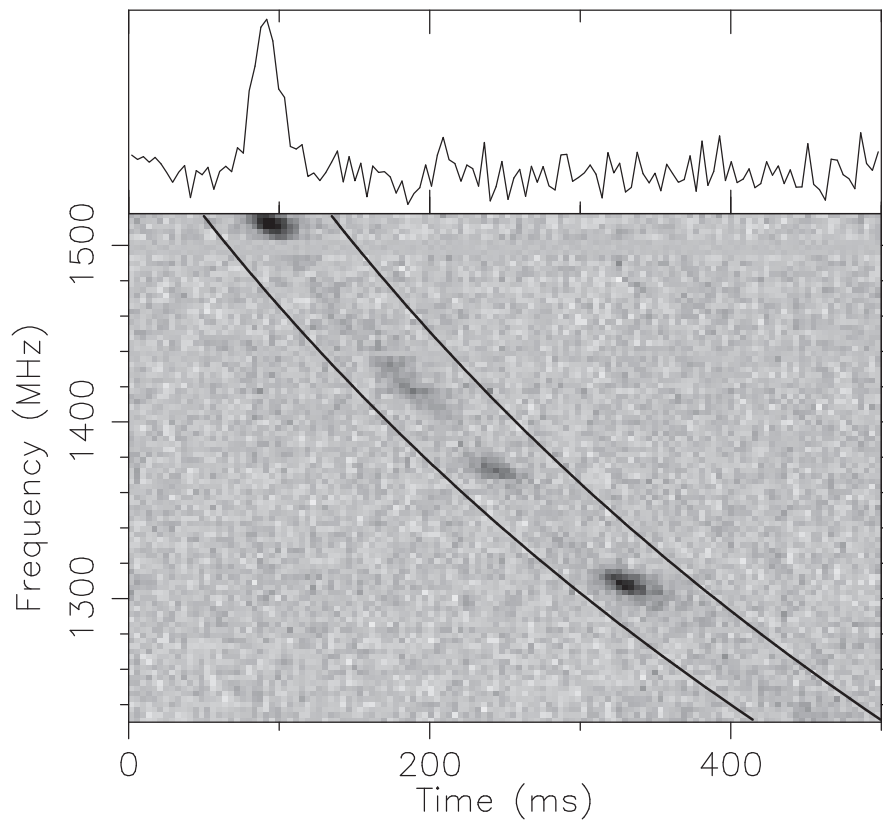


图 1-2 Peryton 事件。(图片来自 [Burke-Spolaor et al., 2011](#))

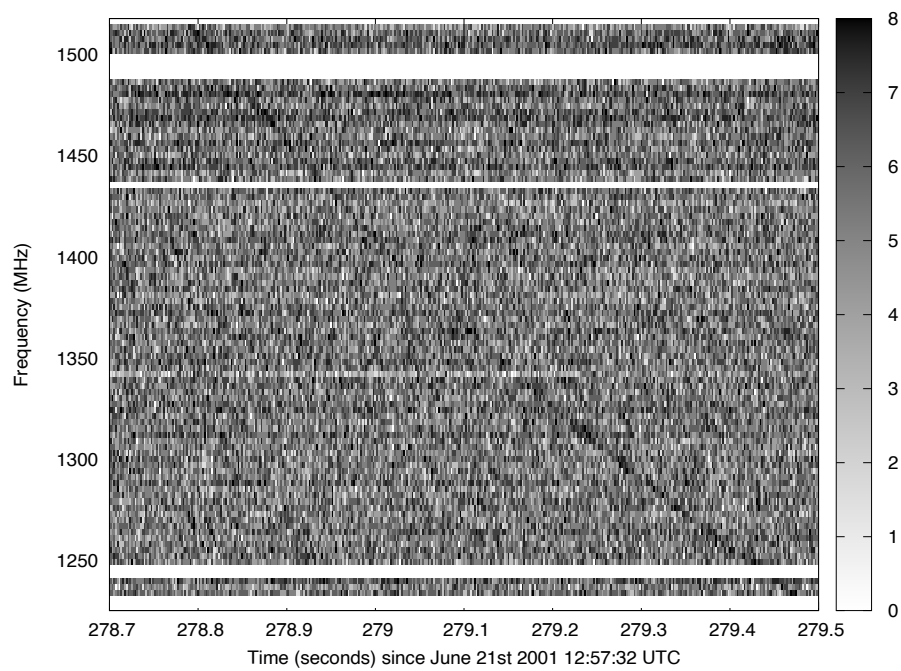


图 1-3 来自 J1852-08 的爆发。(图片来自 [Keane et al., 2012](#))

一个持续射电源相关联 (Chatterjee et al., 2017; Tendulkar et al., 2017; Marcote et al., 2017), 如图 1-4 所示。

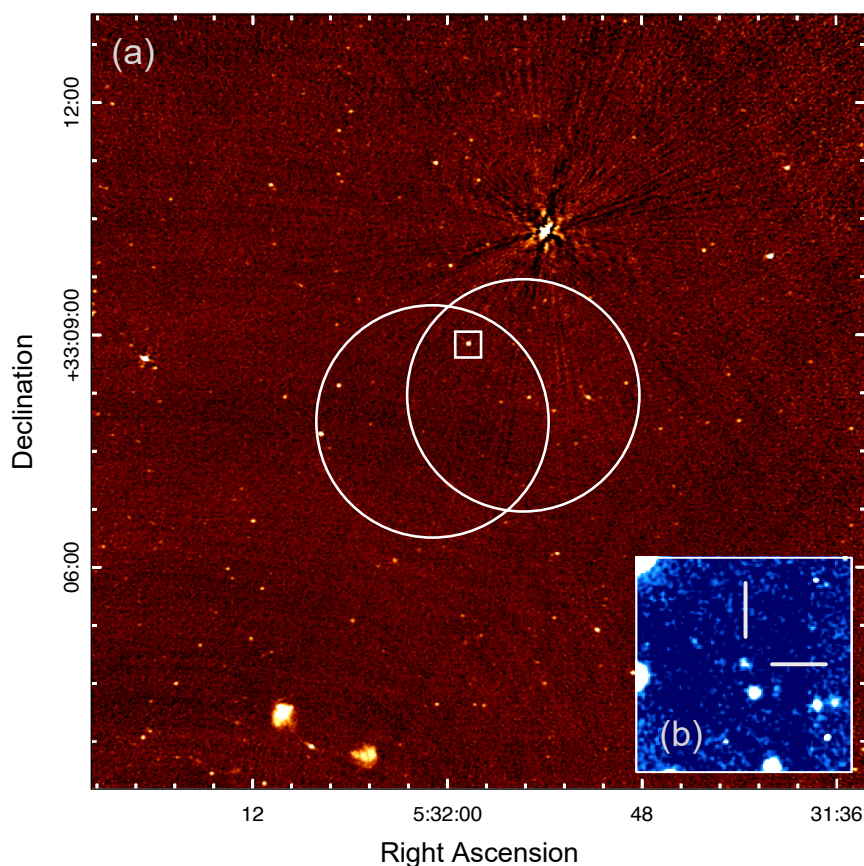


图 1-4 VLA 定位 FRB 20121102A。图为 VLA 在 3 GHz 下的图像，空间分辨率是 $2''$ ，白色的圆圈是 Arecibo 探测到的 FRB 20121102A 的爆发的位置，白色方框是 VLA 探测到的 FRB 20121102A 的爆发的位置，有一个持续射电源存在。右下角是 Gemini r 波段的光学图像。（图片来自 Chatterjee et al., 2017）

在此之后，又有一系列独特的快速射电暴被发现，包括第一个银河系内的快速射电暴 FRB 20200428 (CHIME/FRB Collaboration et al., 2020; Bochenek et al., 2020)，第一个球状星团中的快速射电暴 FRB 20200120E (Bhardwaj et al., 2021; Kirsten et al., 2022b)，第一个发现有长周期的重复快速射电暴 FRB 20180916B (CHIME/FRB Collaboration et al., 2019; Chime/Frb Collaboration et al., 2020)，定位在红移大于 1 的宿主星系中的 FRB 20220610A (Ryder et al., 2023) 等。

随着世界各地的望远镜加入到搜索快速射电暴的行列，包括 the Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP, Macquart et al., 2010)，the Green Bank Telescope (GBT, Surnis et al., 2019)，the Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME, CHIME/FRB Collaboration et al., 2018)，the Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA, Law et al., 2018)，MeerKAT (Sanidas et al., 2018)，the Murchison Widefield Array (MWA, Rowlinson et al., 2016)，the Upgraded Molonglo Observatory Synthesis Telescope (UTMOST, Bailes et al., 2017)，the Deep Synoptic Array (DSA,

Hallinan et al., 2019) 和五百米口径球面射电望远镜 (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST, 中国天眼, Li et al., 2018), 大大加快了快速射电暴的发现速度。到现在, 已经探测到了超过 800 个快速射电暴, 其中几十个会重复产生爆发¹², 被称为重复暴。另一些只爆发一次的快速射电暴被称为非重复暴。

1.2 快速射电暴的研究进展

快速射电暴的爆发有着丰富的观测属性, 包括到达时间、偏振、能量、色散、宽度、频率、散射与闪烁、重复性等。通过对这些参数的深入分析, 我们可以更好地理解快速射电暴的物理本质, 并构建起源和演化的模型。

1.2.1 时间

快速射电暴一次爆发的持续时间非常短, 只有毫秒量级, 这要求其辐射源的尺度 $d \leq cdt$, 其中 c 是光速, dt 是持续时间。对于一个持续了 1 ms 的爆发, 其发射区的大小要小于 300 km。能在如此小的区域辐射出极高的能量, 表明快速射电暴的辐射源可能是某种致密天体, 比如中子星或者黑洞。如果是孤立的致密天体, 我们自然地会想知道其是否存在类似脉冲星的周期性。然而, 到目前为止, 所有尝试找重复快速射电暴短周期的努力都以失败告终, 包括探测到大量爆发的 FRB 20121102A 和 FRB 20201124A 等 (Zhang et al., 2018; Gourdji et al., 2019; Caleb et al., 2020; Cruces et al., 2021; Li et al., 2021b; Xu et al., 2022b; Niu et al., 2022b; Nimmo et al., 2023)。

只有两个重复快速射电暴被发现有可能存在的长周期, 即 FRB 周期性地活跃后消失。其中 FRB 20121102A 的周期为 ~ 157 天 (Rajwade et al., 2020), 而后 Cruces et al. (2021) 使用 Effelsberg 的数据独立验证了这一周期的发现。FAST 也在其预测的活跃窗口中探测到大量爆发, 但是在之后的一些预测的活跃窗口中没有探测到爆发 (Li et al., 2021b)。另一个重复 FRB 20180916B 的周期为 ~ 16 天 (Chime/Frb Collaboration et al., 2020), 后续的观测表明这个源的周期性是频率依赖的 (Pastor-Marazuela et al., 2021; Pleunis et al., 2021a; Bethapudi et al., 2023)。具体来讲, 在高频探测到的爆发要比低频爆发更早活跃, 且活跃窗口更小, 如图 1-5 所示。

另外, CHIME 探测到的非重复暴 FRB 20191221A 有一个 216.8 ms 的准周期, 显著性为 6.5σ (Chime/Frb Collaboration et al., 2022), 如图 1-6 所示。这个爆发持续时间长达 3 s, 比其它任何快速射电暴都要长的多, 因此不排除这一事件与其它快速射电暴有着不同的起源。

对于重复快速射电暴, 它们的等待时间 (Waiting Time) 似乎有着一个共同的特征, 就是都表现出双峰分布 (Li et al., 2021b; Niu et al., 2022a; Xu et al., 2022b;

¹<https://www.wis-tns.org/>

²<https://blinkverse.alkaidos.cn/>

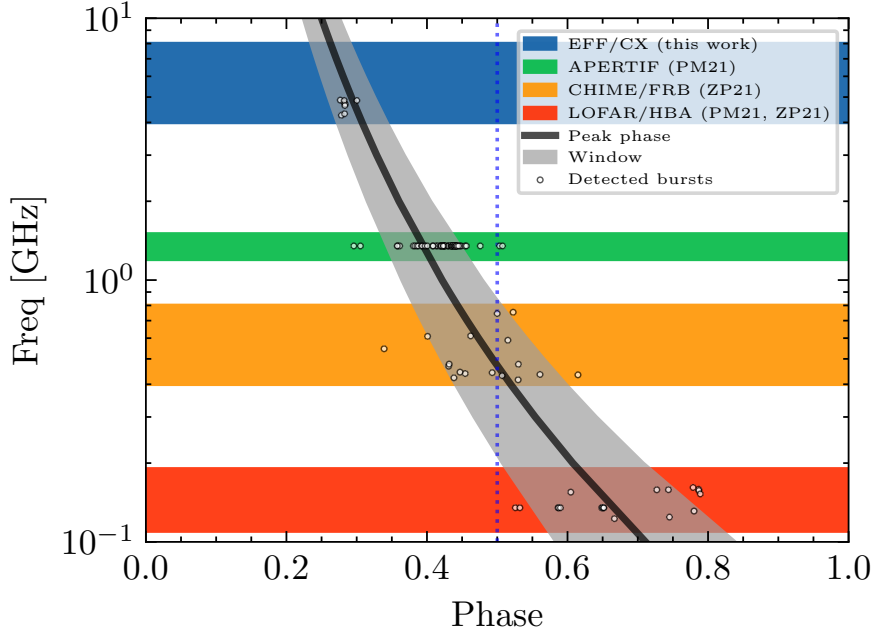


图 1-5 FRB 20180916B 爆发的活跃相位随频率的变化。(图片来自 Bethapudi et al., 2023)

Zhang et al., 2022b, 2023; Wang et al., 2023b; Jahns et al., 2023)。如图 1-7 所示，这是来自 FRB 20121102A 的等待时间分布。一般来说，快速射电暴等待时间的分布中，左峰的峰值对应的时间约为毫秒量级，具体的数值取决于爆发定义。右峰的峰值对应的时间从十几秒到几百秒不等，取决于源的活动水平，也即爆发的事件率。

快速射电暴没有明显的短周期表明重复 FRB 可能不是类似中子星的巨脉冲 (Zhang, 2023)。两个快速射电暴的长周期或许可以解释为双星系统的轨道周期 (Zhang et al., 2020; Sridhar et al., 2021; Zhang, 2020a) 或者磁星进动 (Levin et al., 2020; Tong et al., 2020; Zhang, 2020a) 等。

1.2.2 偏振

作为电磁波的基本属性之一，偏振携带着光源本征的辐射特征以及光线传播环境的关键信息。线偏振的光在磁化介质中传播时，偏振位置角会发生变化，称为法拉第旋转。旋转的程度由法拉第旋量 (Faraday rotation measure, RM) 来描述。

$$\text{RM} \propto \int_0^d n_e B_{\parallel} dL \quad (1-3)$$

其中 B_{\parallel} 为视线方向的磁场强度， n_e 是视线方向介质的数密度。对于射电波段的观测，RM 值可以用来粗略估计介质中的磁场强度以及介质的密度分布。

FRB 20110523A 是第一个探测到 RM 的快速射电暴 (Masui et al., 2015)，其 RM 值为 186 rad m^{-2} 。这一数值大于该方向银河系能贡献的 RM，表明 FRB 周边存在致密磁化等离子体。之后对快速射电暴的观测看到了这类天文现象更加丰富

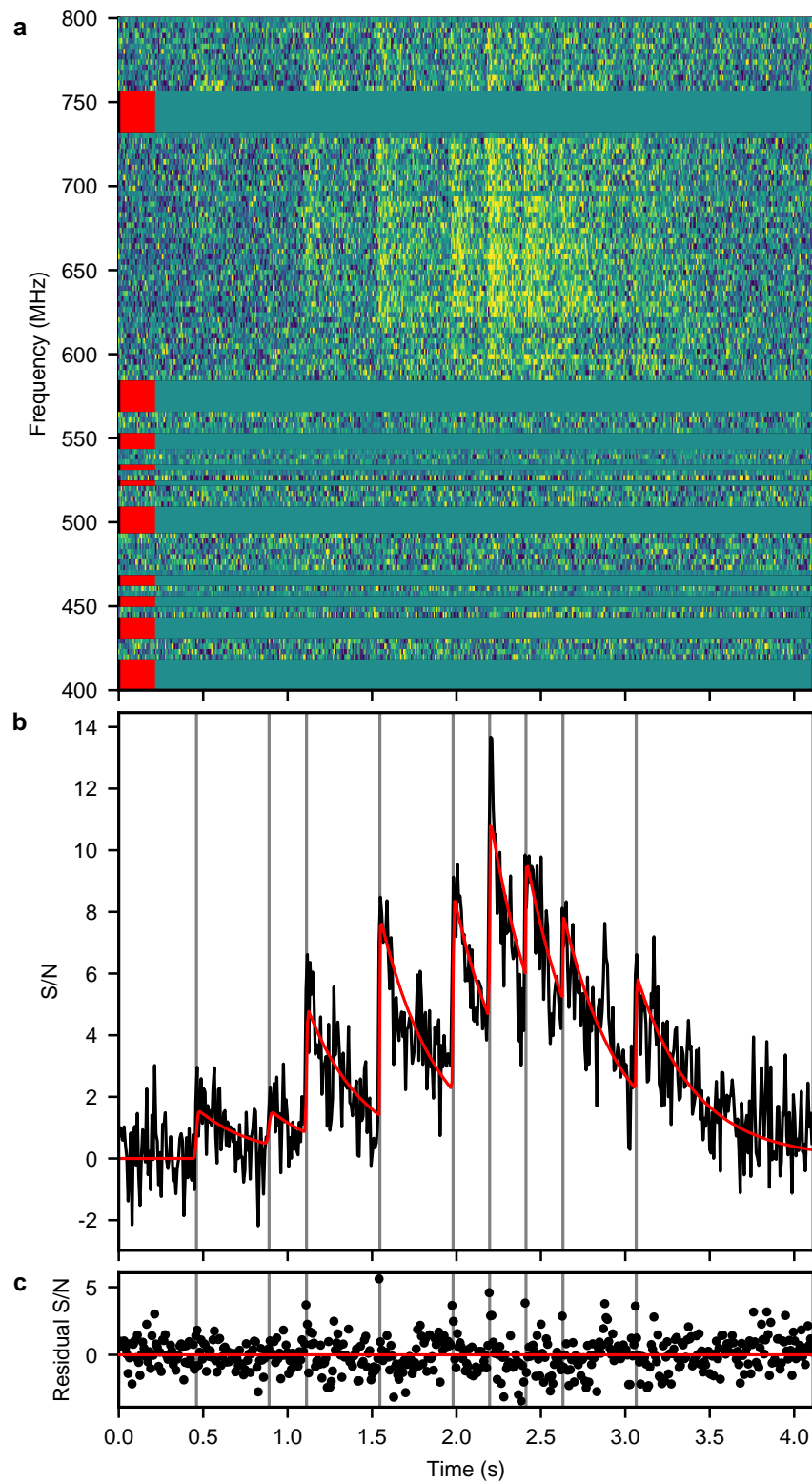


图 1-6 FRB 20191221A 爆发的瀑布图，脉冲轮廓与准周期拟合残差。（图片来自 [Chime/Frb Collaboration et al., 2022](#)）

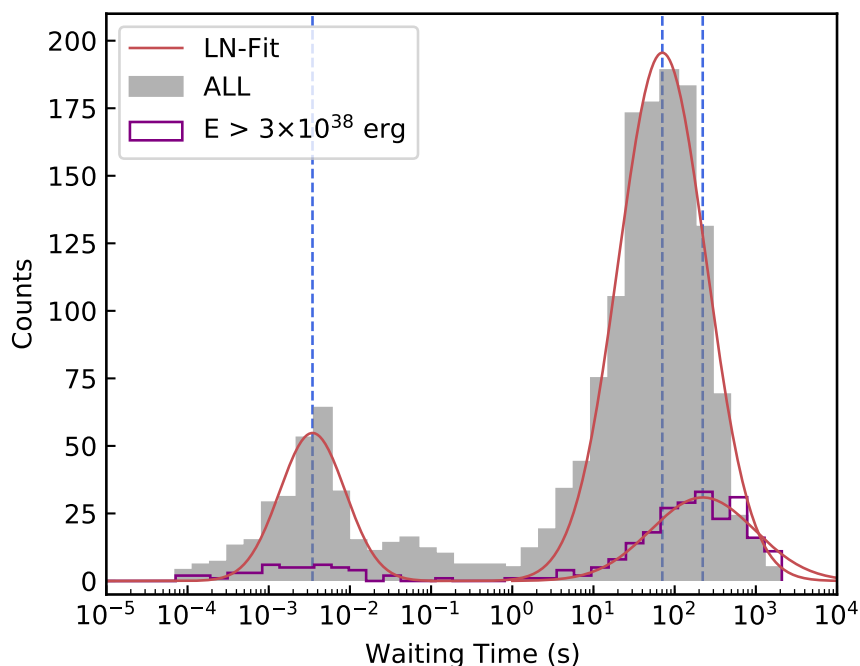


图 1-7 FRB 20121102A 的等待时间分布，红线为对数正态分布拟合。（图片来自 Li et al., 2021b）

的偏振特性，一些爆发表现出平坦的偏振位置角 (PA) (CHIME/FRB Collaboration et al., 2019; Fonseca et al., 2020)，也即偏振位置角在爆发持续期间没有发生改变。还有一些快速射电暴的爆发表现出 PA 的摆动，类似于在银河系中脉冲星看到的情况 (Luo et al., 2020a; Cho et al., 2020)。

最初在重复暴中并没有探测到圆偏振，包括 FRB 20121102A (Gajjar et al., 2018)、20190711A (Kumar et al., 2021) 和 20180916B (Nimmo et al., 2021)，而在一些非重复暴中测量到明显的圆偏振 (Masui et al., 2015; Petroff et al., 2015a, 2017; Ravi et al., 2016; Caleb et al., 2018; Day et al., 2020)。因此是否存在圆偏振一度被认为是重复暴和非重复暴的一个区分标准。然而，最近的观测发现了一些重复暴有着明显的圆偏振，比如 FRB 20201124A (Kumar et al., 2022; Xu et al., 2022b)，作为第一个探测到圆偏振的重复暴，其圆偏振度最高甚至能达到 90% (Jiang et al., 2022)。在此之后，更多的重复暴被探测到有存在圆偏振，如 FRB 20121102A、20190520B (Feng et al., 2022b) 和 20220912A (Zhang et al., 2023) 等。随着越来越多的重复暴探测到有圆偏振的爆发，圆偏振是否存在已经不再能区分重复暴和非重复暴了。

另一方面，在对重复暴多频段的观测中，发现了随着频率消偏振的现象。FRB 20121102A 在 3 – 8 GHz 频率下表现出 100% 的线偏振 (Michilli et al., 2018b)，而在 1 – 1.5 GHz 频率下只能给出 6% 的线偏振度上限 (Feng et al., 2022a)。这种偏振度随频率变化的现象也出现在了其它重复暴中。Feng et al. (2022a) 中提出，爆发信号在等离子体环境中的多路径传播，导致的 RM 散射会使低频处线偏振度降低，消偏振程度可以用下式度量

$$f_{\text{depol}} = 1 - \exp(-2\lambda^4 \sigma_{\text{RM}}^2) \quad (1-4)$$

其中 f_{depol} 是消偏振的程度， λ 是信号波长， σ_{RM} 是 RM 的标准差，用来描述 RM 散射程度。图 1-8 中展示了 7 个重复暴用多个望远镜测量到的不同频率处的线偏振度，可以看到线偏振度随频率变化的趋势是一致的，都是高频线偏振度高，低频线偏振度低。所有这 7 个重复暴都可以用 RM 散射模型很好地描述。

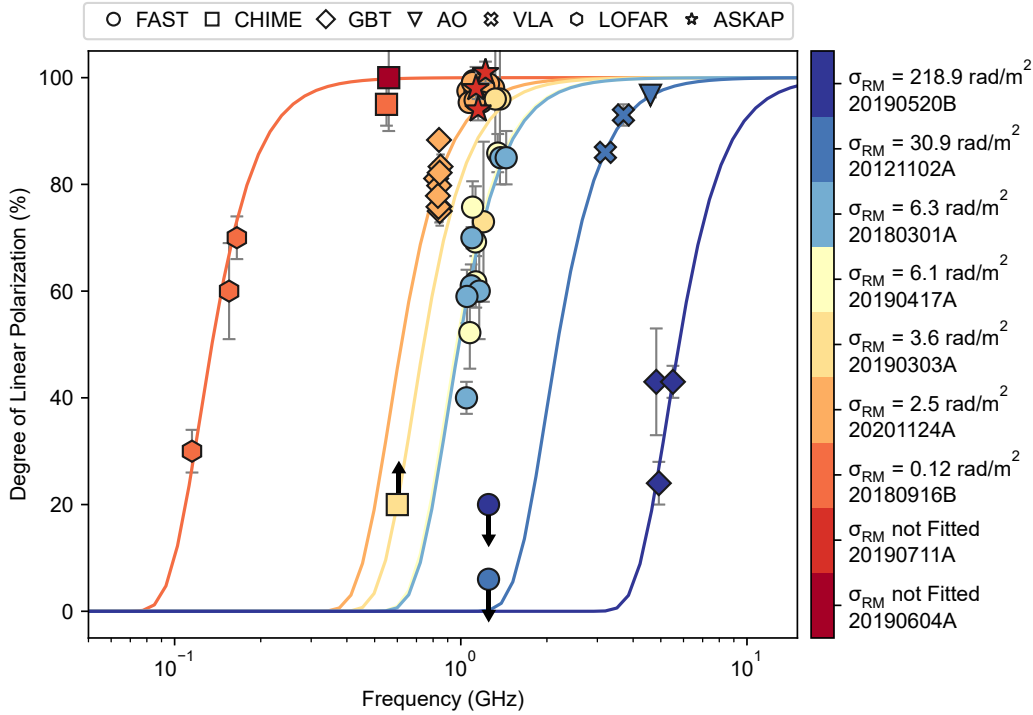


图 1-8 快速射电暴线偏振度随频率变化，图中曲线是使用 σ_{RM} 拟合的 RM 散射程度。（图片来自 Feng et al., 2022a）

大量的重复暴被发现在月量级的时间尺度上表现出显著的 RM 变化。2017 年到 2019 年之间，FRB 20121102A 的 RM 发生了剧烈的变化，变化超过一个数量级，从 $1.46 \times 10^6 \text{ rad m}^{-2}$ 下降到 $9.7 \times 10^4 \text{ rad m}^{-2}$ (Hilmarsson et al., 2021a)，如图 1-9 所示。2023 年的最新探测表明其 RM 进一步下降到 $3.1 \times 10^4 \text{ rad m}^{-2}$ (Feng et al., 2023a)。FRB 20190520B 的 RM 在几个月内发生了将近 $3 \times 10^4 \text{ rad m}^{-2}$ 的变化，并且经历了两次符号反转 (Anna-Thomas et al., 2023)。此外，FRB 20201124A、20180301A、20180916B、20181119A、20190303A、20190417A 在月量级的时间尺度上也发生了几百个单位的 RM 变化 (Xu et al., 2022b; Kumar et al., 2023; Mckinven et al., 2023b)。其中 FRB 20121102A、20190520B 和 20201124A 是三个最活跃的重复暴，同时它们的 RM 变化也是最大的。如此大量的观测证据表明，重复 FRB 似乎存在于一个高度复杂和动态演化的磁等离子体环境中，可能与超新星遗迹 (SNR) 或者脉冲星风星云有关 (Piro et al., 2018; Margalit et al., 2018; Zhao et al., 2021; Katz, 2022)。

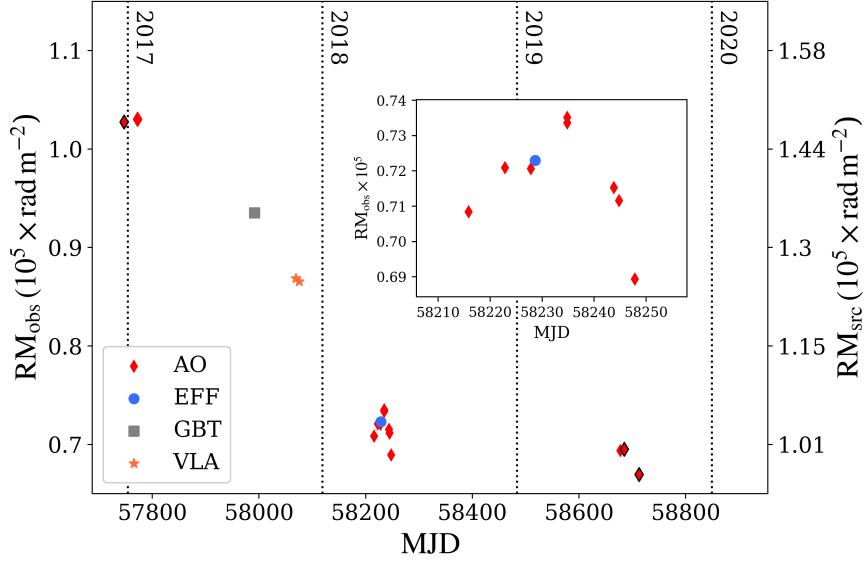


图 1-9 多个望远镜探测到 FRB 20121102A 的 RM 随时间的变化。（图片来自 [Hilmarsson et al., 2021a](#)）

1.2.3 色散

在第 1.1 节中提到，射电信号在等离子体中传播会产生色散，低频信号会晚于高频信号到达。色散时间延迟的大小与 DM 值成正比，观测到的 DM 通常可以分成多项

$$DM = DM_{\text{MW}} + DM_{\text{halo}} + DM_{\text{IGM}} + \frac{DM_{\text{host}} + DM_{\text{src}}}{1+z} \quad (1-5)$$

其中 DM_{MW} 、 DM_{halo} 、 DM_{IGM} 、 DM_{host} 、 DM_{src} 分别来自银河系、银晕、星系间介质（IGM）、宿主星系和源的周边环境。

DM_{IGM} 是红移的函数 ([Deng et al., 2014](#); [Gao et al., 2014](#); [Zhou et al., 2014](#); [Macquart et al., 2020](#))

$$DM_{\text{IGM}} = \frac{3cH_0\Omega_b f_{\text{IGM}}}{8\pi Gm_p} \int_0^z \frac{\chi(z')(1+z')}{E(z')} dz' \quad (1-6)$$

其中 Ω_b 是宇宙学的重子密度， f_{IGM} 是星系间介质中重子的分数。一般情况下，来自河外的快速射电暴的 DM 值远远大于银河系的贡献，主要由 DM_{IGM} 决定。在低红移处，DM-红移关系大致是线性的 ([Ioka, 2003](#); [Inoue, 2004](#))。因此当快速射电暴还没有定位到某一个宿主星系时，可以通过其 DM 值来大致估计它的红移，如图 1-10 所示。对于已经定位在宿主星系中的 FRB，在扣除银河系贡献的 DM 后，FRB 剩余的 DM 与宿主星系红移呈现出大致的线性关系，其最佳拟合结果与 Λ CDM 模型的预测一致 ([Macquart et al., 2020](#))，这一关系现在也叫做 Macquart 关系。

当然也不是所有快速射电暴都符合这样的关系，比如 FRB 20190520B 就是

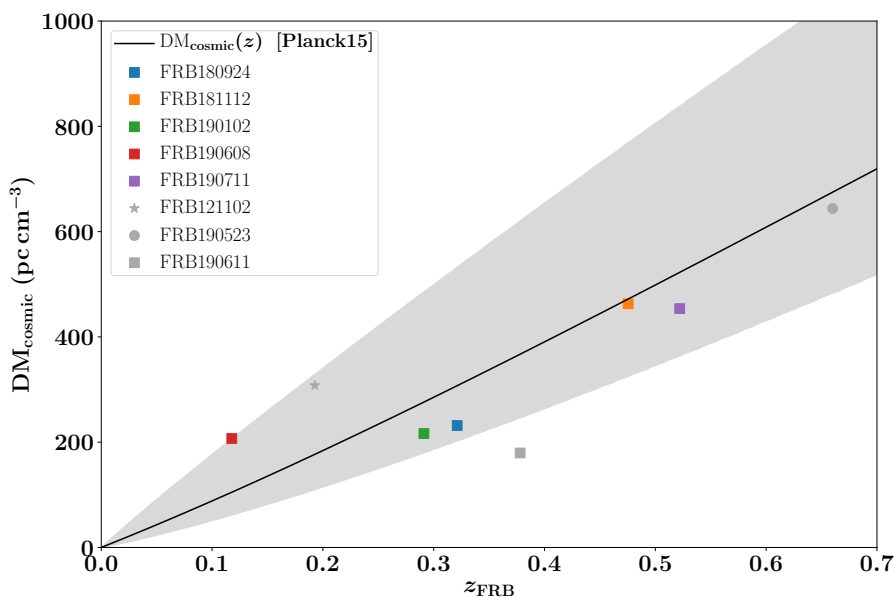


图 1-10 DM 与红移的线性关系。(图片来自 [Macquart et al., 2020](#))

个例外。FRB 20190520B 是在 FAST 的漂移扫描多科学目标同时巡天 (the Commensal Radio Astronomy FAST Survey, CRAFTS, [Li et al., 2019](#)) 项目中发现的第一个重复暴, 发现时的 DM 为 $1204.7 \pm 4.0 \text{ pc cm}^{-3}$, 随后被定位在红移为 0.241 的宿主星系中 ([Niu et al., 2022a](#))。在已知红移的情况下, FRB 20190520B 的 DM 值远远大于 Macquart 关系预测的值, 猜测是源附近有着高密度的介质, 导致了额外的 DM 贡献。

正是因为有着式 1-6 这样的关系, 不管快速射电暴的起源如何, 它们都可以作为探测宇宙的有效工具。在已知快速射电暴红移, 并且正确地消除银河系与快速射电暴宿主星系贡献的 DM 后, 可以用来探测宇宙学参数, 如哈勃常数 ([Hagstotz et al., 2022](#))、星系间介质的重子分数 ([Li et al., 2020](#))、暗能量 ([Kumar et al., 2019](#))、宇宙再电离 ([Beniamini et al., 2021](#))、大尺度结构与湍流 ([Xu et al., 2020, 2021b; Rafiei-Ravandi et al., 2021](#)) 等。现阶段, 已知红移的快速射电暴样本还太少, 并且还存在着类似 FRB 20190520B 这样的异常点。在不久的未来, 随着类似 SKA 或者 DSA-2000 等新一代设备上线, 我们有望探测并定位到更多更远的快速射电暴。更远的快速射电暴意味着更大的红移范围, 更多的样本则可以更好地抑制宿主星系贡献 DM 的不确定度, 从而更精确地估计宇宙学参数。

1.2.4 能量

在已知快速射电暴红移的情况下, 可以估计其能量。快速射电暴的能量可以用下式估计

$$E = \frac{4\pi D_L^2}{1+z} F_\nu \Delta\nu \quad (1-7)$$

其中 D_L 是快速射电暴的光度距离, F_ν 是快速射电暴的流量密度, $\Delta\nu$ 是快速射电暴的带宽。需要注意的是, 如果爆发是窄带的, 则适合使用爆发带宽 $\Delta\nu$ 来估计能量。反之, 如果爆发是宽带的, 且超出了望远镜的观测带宽, 则使用观测波段的中心频率 ν_c 代替带宽更为合适 (Zhang, 2018)。

过往的多项研究中发现, 幂律分布似乎是一个良好描述快速射电暴这一群体的能量分布的模型 (Luo et al., 2018; Lu et al., 2019b; Hashimoto et al., 2020a; Lu et al., 2020; Luo et al., 2020b; Zhang et al., 2021; Hashimoto et al., 2022; Zhang et al., 2022a)。但是幂律的指数并没有得到很好的约束, 不同的研究给出的指数差异很大, 比如 Lu et al. (2019b) 中给出幂律指数为 1.3 – 1.9, Luo et al. (2020b) 中给出幂律指数为 1.5 – 2.1。这种差异可能是由于不同的样本选择、不同的红移范围、不同的流量密度测量方法等因素导致的。在未来, 随着更多的快速射电暴被定位到宿主星系, 我们有望得到更加准确的能量分布。

除了快速射电暴的群体能量分布外, 对于重复暴, 还可以得到单个源的能量分布。中国天眼 FAST 作为目前世界上最灵敏的望远镜, 可以探测到别的望远镜无法探测到的微弱爆发。在 2019 年, FAST 探测到来自 FRB 20121102A 的 1652 次爆发, 超过了当时世界上探测到的快速射电暴事件数量的总和。FAST 探测到的 FRB 20121102A 的能量分布如图 1-11 所示, 可以发现能量分布有两个组成分布, 或许意味着多种辐射机制的存在 (Li et al., 2021b)。其中高能部分与幂律分布一致, 在 $E_0 = 4.8 \times 10^{-37}$ erg 处达到峰值, 低能部分则可以用对数正态函数拟合, 表征了其中存在的某种随机性。别的重复暴, 如 FRB 20201124A (Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2022b)、20190520B (Niu et al., 2022a) 和 20220912A (Zhang et al., 2023) 等, 能量分布与 FRB 20121102A 有所不同, 但都需要比单一幂律更复杂的函数形式来描述。

1.2.5 宽度

一个快速射电暴的爆发宽度, 或者说叫持续时间, 通常是毫秒量级。比如 FRB 20121102A 的宽度从 0.43 ms 到 ~ 40 ms, 符合对数正态 (Log-Normal) 分布 (Li et al., 2021b), FRB 20201124A 的宽度则是从几毫秒到几十毫秒不等 (Xu et al., 2022b)。在 CHIME 公布的第一个快速射电暴目录中, 爆发的宽度也大多在毫秒量级 (Pleunis et al., 2021b)。

更宽的爆发, 例如前文提到过的 FRB 20191221A, 其持续时间长达 ~ 3 s, 如图 1-6 所示, 是目前发现的持续时间最长的一次快速射电暴爆发事件 (Chime/Frb Collaboration et al., 2022)。更窄的爆发, 意味着更小的辐射区域 ($d \leq cdt$)。位于 M81 球状星团中的快速射电暴 FRB 20200120E, 它的单个爆发表现出比其它快速射电暴更窄的宽度, 持续时间短至几十到百微秒 (Kirsten et al., 2022b; Nimmo et al., 2023), 对基带数据的进一步分析发现了数十纳秒的爆发结构 (Nimmo et al., 2022a), 在 FRB 20180916B 中同样发现了类似时间尺度的爆发结构 (Nimmo et al., 2021)。鉴于 FRB 20200120E 位于一个古老的球状星团中, 因此其起源可能与

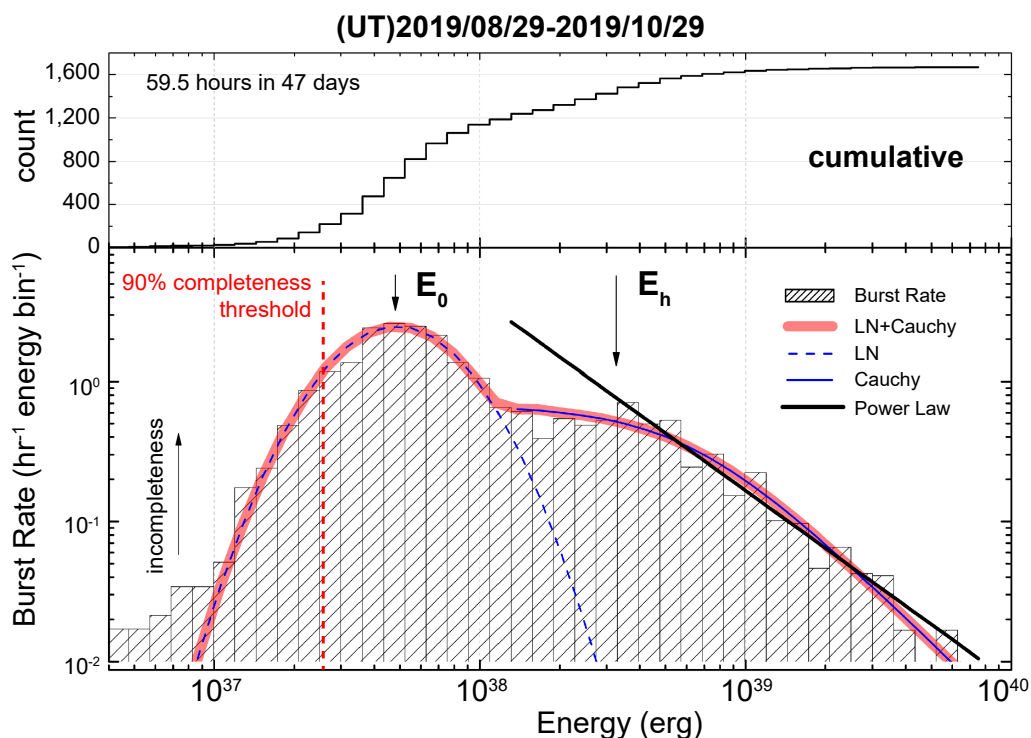


图 1-11 FRB 20121102A 的能量分布。（图片来自 Li et al., 2021b）

合并前阶段紧密轨道运行的白矮星-中子星双星物体之间发生的磁相互作用有关 Kirsten et al. (2022b)。此外，在 FRB 20121102A 中也发现了微秒宽度的爆发 (Snelders et al., 2023)。在对 FRB 20220912A 的观察中，也发现了叠加在更宽结构上的微秒结构 (Hewitt et al., 2023)。最近 CHIME 对其探测到的一些非重复暴的基带数据分析中，也发现了大量微秒量级的爆发结构 (Faber et al., 2023)。这种微秒级的爆发结构，与蟹状星云脉冲星的“nanoshot”相当 (Heiles et al., 1970; Staelin, 1970; Hankins et al., 2003)，但是能量要高得多。图 1-12 展示了这些短时标的爆发或者结构。

长期以来，射电望远镜研究的光变时标主要集中在毫秒到秒的时间尺度上。最近这些独特的射电变源的发现，在不同的快速射电暴中发现的微秒爆发或者结构，表明这种类型的爆发可能比之前想象的更为常见。此外，宇宙中可能存在更短时标的光变现象，接近相应波长的不确定性原理极限。对这种超短时标光变现象的研究，可能有助于我们对基础物理的研究与突破。

1.2.6 频率

第一个发现的快速射电暴发生在 L 波段（1 – 2 GHz）(Lorimer et al., 2007)，之后的观测发现了更多的快速射电暴，它们的频率分布在 110 MHz (Pleunis et al., 2021a) 到 8 GHz (Gajjar et al., 2018) 之间。在更高频没有探测到快速射电暴，这可能是因为在高频的观测灵敏度不够 (Law et al., 2017)。另外，高频处色散导致的时间延迟很少，会使信号很难跟射频干扰（Radio Frequency Interference, RFI）区

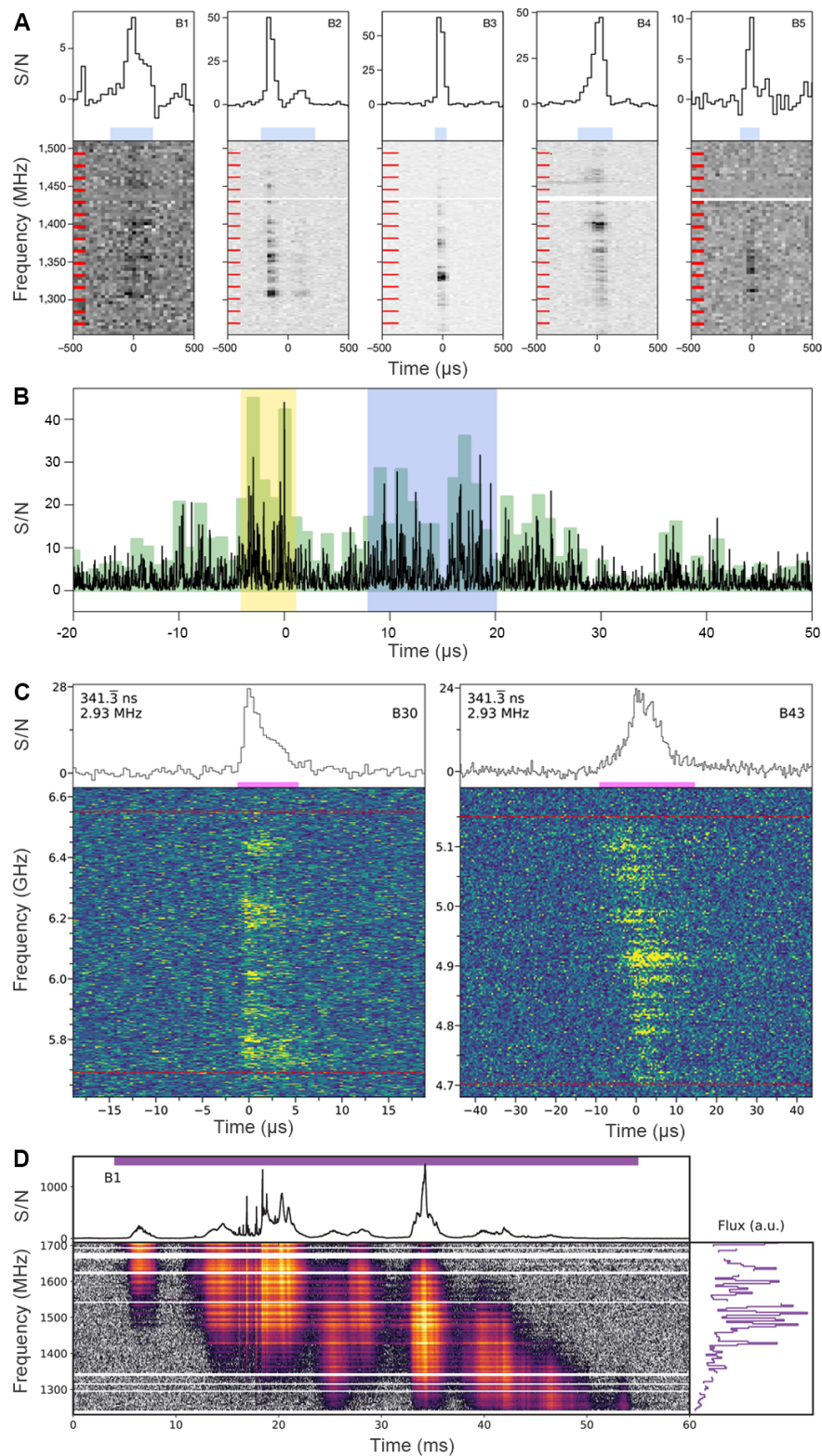


图 1-12 来自快速射电暴的超短爆发。A 是 FRB 20200120E 的爆发，B 是 FRB 20200120E 爆发的亚微秒时间结构，C 是 FRB 20121102A 的微秒爆发（超快脉冲），D 是带有微秒结构的 FRB 20220912A 爆发。（图片来自 [Kirsten et al., 2022b](#); [Nimmo et al., 2022a](#); [Snelders et al., 2023](#); [Hewitt et al., 2023](#)）

分。在更低频没有探测到快速射电暴，可能是由于等离子体吸收导致的信号衰减 (Karastergiou et al., 2015)。

一般认为，脉冲星在不同频率处的能量分布都是幂律谱 (Sieber, 1973)。如果用幂律分布拟合快速射电暴的频谱形状，会发现幂律指数在不同快速射电暴之间以及同一个快速射电暴的不同爆发之间都有很大的差异 (Lorimer et al., 2007; Masui et al., 2015; Spitler et al., 2016)。Law et al. (2017) 首次使用多个望远镜同时探测到 FRB 20121102A 的爆发，发现其爆发频谱无法用幂律拟合，而更像一个 ~ 500 MHz 包括的高斯型状。事实上，随着探测的逐渐增加，我们从快速射电暴的动态谱中可以看到，这些爆发往往只在某一段频率范围内出现，并不是简单的幂律函数。对 FAST 探测到来自 FRB 20201124A 和 20220912A 的爆发研究表明，大多数爆发都是窄谱辐射 (Zhang et al., 2023)。FRB 20190711A 的一次爆发的中心频率为 1.4 GHz，半高全宽仅为 65 MHz，并且在 Parkes 超宽带接收机中，没有在其频段发现这个爆发的辐射，意味着其相对频谱宽度 $\Delta\nu/\nu_0 \sim 0.05$ ，是一个极端的窄谱辐射 (Kumar et al., 2021)。

1.2.7 重复性

经验上按照快速射电暴是否会重复产生爆发，将快速射电暴分为两类，重复暴和非重复暴。是否所有的快速射电暴都会重复产生爆发，这是快速射电暴领域一个非常关键的问题，目前还没有定论。每当从同一个源探测到第二次爆发事件时，这个源就会被认定为重复快速射电暴。Yamasaki et al. (2024) 报道发现，随着 CHIME 运行时间的增加，明显非重复快速射电暴的探测率明显下降。因此基本上不可能确切地证明一个快速射电暴是非重复的。

不过，在之前的研究中，人们似乎注意到重复暴和非重复暴之间可能存在的一些差异。Pleunis et al. (2021b) 使用 CHIME/FRB 的第一个快速射电暴目录进行的统计发现，重复暴往往有着比非重复暴更长的持续时间（宽度）和更窄的带宽。使用机器学习的方法应用在同样的快速射电暴目录上，发现亮温度和带宽是区分重复暴和非重复暴的两个主要特征 (Luo et al., 2023; Zhu-Ge et al., 2023)。之前有研究认为偏振位置角变化或者存在圆偏振可能是非重复暴的特征 (Cho et al., 2020; Day et al., 2020)，然而后来的观测表明在重复暴中也存在这样的特征 (Luo et al., 2020a; Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2023)。因此这两个偏振特征无法用来区分重复暴和非重复暴。

1.3 快速射电暴可能的起源

自快速射电暴发现之初，其起源一直是一个备受关注的问题。当时的人们提出了数十种可能的天体起源和辐射机制³，理论模型的数量一度超过了探测到的快速射电暴的数量 (Platts et al., 2019)。这些模型大致可以分为两大类。

³<https://frbtheorycat.org/>

在其中一类中，快速射电暴辐射源发生了一些灾难性的事件，释放出大量的能量，其中一部分转化为相干射电爆发。这类模型包括了双中子星并合 (Totani, 2013)、超新星爆炸 (Falcke et al., 2014) 等。这种灾难性的事件显然不能满足重复暴的辐射需求，因此另一类模型是非灾难性的，允许重复发射快速射电暴。这类模型包括脉冲星的巨脉冲 (Cordes et al., 2016)、磁星的磁层不稳定性导致的相干辐射 (Wadiasingh et al., 2019) 等。

近年来数据的快速积累，促进了我们对快速射电暴物理机制的理解，过去的一些模型也很快发现并不适用于解释新的观测数据。图 1-13 展示了现在两种常见类型的 FRB 辐射模型的示意图。一种是类似脉冲星的模型，通过调用致密天体的磁层释放能量产生快速射电暴 (Lu et al., 2020)，另一种是类似伽马射线暴的模型，利用相对论性激波产生快速射电暴 (Metzger et al., 2019)。

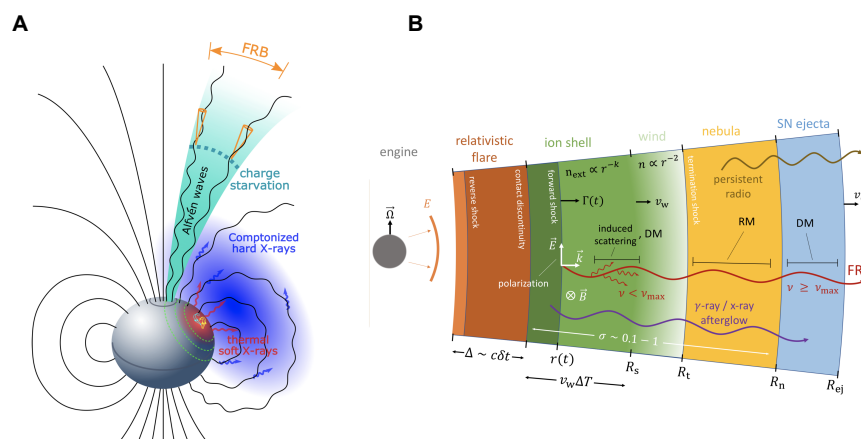


图 1-13 两种常见类型的 FRB 辐射模型的示意图。A 类脉冲星模型。B 类 GRB 模型。(图片来自 Zhang, 2020b)

确认快速射电暴起源更为有效而直接的方式，就是能够在更近的地方（比如银河系内部）探测到快速射电暴。第一个在银河系内发现的快速射电暴 FRB 20200428 被发现来自于银河系内磁星 SGR1935+2154 (Li et al., 2021a; Mereghetti et al., 2020; Ridnaia et al., 2021)。这一发现表明了磁星可以发射类似快速射电暴的辐射，至少是一部分的快速射电暴。对诸多模型的进一步详细的总结和讨论，有兴趣的读者可以参考 Zhang (2023)。

1.4 本章小结

当我们面对一个未知的事物时，我们总会从三个问题“是什么，为什么，怎么办”出发展开探索。快速射电暴也不例外，这三个问题也分别对应着快速射电暴的定义、起源与应用。在前面几个章节，我们通过介绍快速射电暴的发现历史，爆发特性以及一些新的研究进展，对快速射电暴的定义已经有了基本的了解。对它的研究除了可以帮助我们了解一种全新的天体物理现象的本质，增添我们对宇宙的认识以外，搞清楚它极端的辐射机制也有助于我们对基础物理的突破。

在过去几年中，几乎每年都会有让我们对快速射电暴的理解产生质的飞跃的事件发现。图 1-14展示了自快速射电暴发现以来，一些重要发现的时间轴。目前，对快速射电暴的观测限制了它的起源模型，但是还没有“确凿的证据”，一锤定音地支持某种理论。

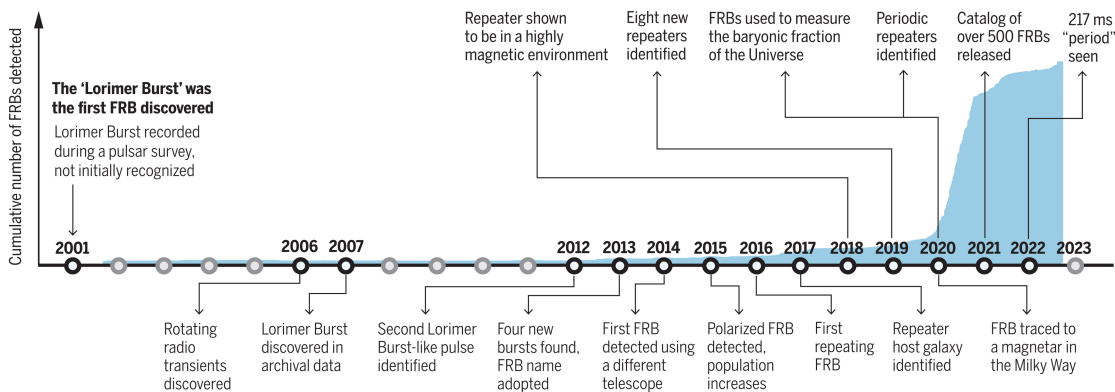


图 1-14 快速射电暴一些重要发现的时间轴。蓝色区域表示累计探测到的 FRB 的数量。（图片来自 Bailes, 2022）

中国天眼 FAST (Nan et al., 2011) 是目前全世界最大的单口径射电望远镜，坐落于中国贵州省平塘县的自然洼地之中，如图 1-15 所示。FAST 的口径达到了 500 米，观测时球形镜面会被拉伸成等效口径 300 米的抛物面。尽管牺牲了一些口径带来的灵敏度提升，但是保持了光路的简洁与稳定。这种设计使得 FAST 的灵敏度和角分辨率能够高精度地捕捉到来自宇宙深处的微弱信号，对于探索宇宙现象、寻找脉冲星以及外星文明等具有重要的科学价值 (Li et al., 2018)。自 2016 年完工投入使用以来，FAST 已经在脉冲星 (Qian et al., 2019)、引力波 (Xu et al., 2023)、中性氢 (Xu et al., 2022a)、星际磁场 (Ching et al., 2022) 等多个方面中取得了显著成果。

当前 FAST 可用的是 L 波段 19 波束接收机，工作在 1000 – 1500 MHz 频率范围内，其波束大小在 1420 MHz 处约为 $2.9'$ 。受波束大小的限制，FAST 并不是一个快速射电暴巡天搜索的最佳设备，因为巡天需要的是更大的天空覆盖和更快的巡天速度。尽管如此，截止到 2023 年底，FAST 还是有 5 个新的快速射电暴探测被报道出来 (Zhu et al., 2020; Niu et al., 2021, 2022a)，其中一个重复暴 (Niu et al., 2022a)。FAST 的超高灵敏度使得它能够探测到别的望远镜无法探测到的微弱爆发。加之其优秀的偏振响应，使得 FAST 成为了对重复快速射电暴进行后随观测的理想设备。在对已知的重复快速射电暴的观测中，FAST 也取得了一些重要的成果。比如在对第一个重复暴 FRB 20121102A 的观测中，借助超高灵敏度探测到了来自这个 FRB 的 1652 次爆发，超过了当时世界上其它望远镜探测到的快速射电暴爆发数量的总和，并首次揭示了快速射电暴的双模型能量分布 (Li et al., 2021b)。探测到来自 FRB 20180301A 和 FRB 20201124A 丰富的偏振特性，暗示了快速射电暴可能的磁层起源 (Luo et al., 2020a; Xu et al., 2022b)。发现的重复暴 FRB 20190520B 有着远超预期的宿主星系色散贡献 (Niu et al., 2022a)，在后



图 1-15 中国天眼全景图。(图片来自 我本人 摄于 2021 年)

来的观测中表现出极端的磁场反转 (Anna-Thomas et al., 2023), 表明其处于复杂的等离子体环境中, 并直接推动了统一快速射电暴偏振的频率演化的工作产出 (Feng et al., 2022a)。

在未来, 随着世界各地设备的加入以及一些新设备的上线, 我们可以通过更高的时间分辨率, 更宽的带宽, 更高的灵敏度, 更准确的定位对快速射电暴这一神秘的天体现象进行更长时间的监测, 获得更大更丰富的爆发样本和宿主星系定位, 有望最终揭开快速射电暴的起源、演化、环境等方面的谜题。

本文的重点是基于 FAST 的观测, 通过开发新的快速射电暴搜索算法, 探测更多更丰富的快速射电暴样本, 并研究它们的时间、能量、偏振等特性, 将它们和爆发源周边环境联系起来, 以此来进一步了解快速射电暴的起源和演化。在第 2 章中, 介绍了我们基于深度学习新开发的快速射电暴搜索算法。在第 3 章中, 介绍了我们基于这一搜索算法对两个活跃重复快速射电暴的观测与分析。在第 4 章中, 介绍了我们结合 FAST 探测到的快速射电暴大样本进行的时域分析。在第 5 章中, 介绍了其它一些工作。并在第 6 章中, 对本文的工作进行了总结。

第 2 章 基于深度学习的快速射电暴搜索算法

快速射电暴是射电天文领域一个新的研究热点，它们是一种持续时间极短的射电脉冲现象。快速射电暴对于探测宇宙物质分布及演化，乃至基础物理的研究都具有重要意义。到目前为止，已经报道了超过 800 个快速射电暴事件，但是它们的物理机制仍然不清楚。随着世界各地望远镜的加入以及一些新设备的上线，可以预期未来会发现数以万计的快速射电暴。随之而来的挑战是如何从海量的射电数据中寻找这种短时标的光变现象。因此，开发一种高效的快速射电暴搜索算法是非常重要且必要的。

2.1 传统搜索方法介绍

快速射电暴的搜索主要有两个难点，一个是色散，一个是射频干扰（RFI）。色散是由于射电信号在星际介质中传播时，不同频率的信号传播速度不同，导致原本持续几个毫秒的信号被拉长至千倍。相应的，原本集中的能量也被分散到几秒的数据中，使得信号难以探测。时间延迟与频率之间的关系是一个二次函数，也即抛物线的形式，可以由下式计算得到：

$$t_2 - t_1 \approx 4.15 \times \left[\left(\frac{1}{\nu_2} \right)^2 - \left(\frac{1}{\nu_1} \right)^2 \right] \times \text{DM ms} \quad (2-1)$$

其中 DM 为衡量信号传播路径上等离子体含量的参数，因此来自宇宙不同位置的射电信号会有不同的 DM 值，也就会产生不同的时间延迟。

图 2-1 展示了两个快速射电暴的瀑布图，A1 和 B1 是射电望远镜接收到的原始数据，横坐标是时间，纵坐标是频率。在 A1 中我们可以辨认出强信号的存在，可以看到信号在不同频率处的时间延迟是类似抛物线的形式。来自宇宙不同位置的爆发，在这样的数据中就表现为不同曲率的抛物线。

RFI 存在多种来源，包括手机、输电线路、人造卫星、闪电等，是世界上所有射电望远镜普遍存在的问题。RFI 根据可变性和频率范围可以分为随时间变化的 RFI/随频率变化的 RFI、窄带干扰和宽带干扰。由于干扰信号距离望远镜要比天体信号更近，因此其强度通常比天体信号高几个数量级，从而会掩盖天体信号。在图 2-1 中，A1 和 B1 中的数据中都存在射频干扰，比如那些在 1200 – 1300 MHz 附近一直存在的信号。

因此，在传统搜索算法中，一般包含下面几个步骤 (Cordes et al., 2003)。根据阈值判断消除 RFI，设定一系列 DM 网格，对数据进行消色散处理后，沿频率方向进行积分，得到该 DM 值下的时间序列。使用不同宽度的方波滤波器对时间序列进行匹配，计算信号信噪比。最后挑选出高于信噪比阈值的信号作为

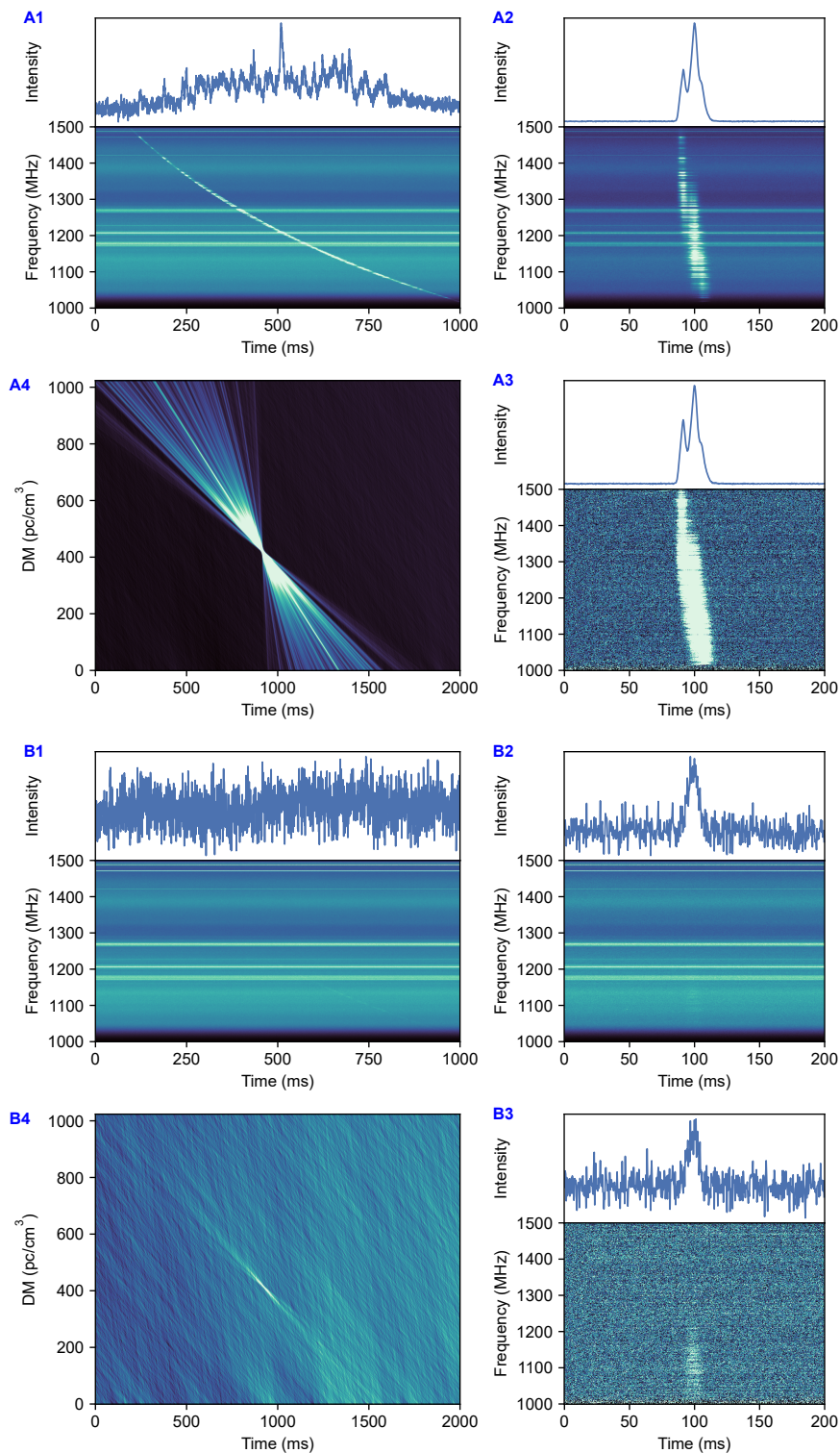


图 2-1 两个快速射电暴爆发的瀑布图。A 是一个强爆发，B 是一个弱爆发。其中 A1/B1 是射电望远镜接收到的原始数据，A2/B2 是消色散后的数据，A3/B3 是消干扰并进行数据增强后的数据，A4/B4 是对原始数据按照多个 DM 值消色散后形成的时间-色散图。

候选信号。目前大量工具是基于这套流程开发的，如 Presto¹ (Ransom, 2001)、Heimdall² (Barsdell et al., 2012)、bonsai (CHIME/FRB Collaboration et al., 2018)、TransientX³ (Men et al., 2024)、L-SPS⁴ (Michilli et al., 2018a) 等，这也是现在各大望远镜主流的快速射电暴搜索方法。

这种方法的非常直观，符合我们处理数据的直观体验。但是这种方法强烈依赖消干扰的算法以及参数选择，在数据处理过程中，极有可能有消除不掉的干扰信号，以及由于消干扰过程产生的新的人造数据干扰。另外，这种方法的计算复杂度非常高，有大量的重复计算，并且在不同 DM 值上会重复检测到同一个信号，运行效率低下。最终导致结果的不完备，以及产生大量的假信号，需要人工参与数据处理流程，并最终从大量假信号中挑选出真信号。因此，这种方法无法满足未来的大数据需求。

2.2 搜索快速射电暴的新方法

随着近几年机器学习尤其是深度学习的发展，越来越多的研究中使用深度学习方法来解决传统方法中的问题。在射电天文学中，深度学习方法已经被广泛应用于射电星系的分类 (Brand et al., 2023)、射电干扰的消除 (Akeret et al., 2017)、射电图像的重构 (Dabbech et al., 2023) 等问题。像我们这种从二维数据中搜索某个特定形状的问题，可以用作为一个计算机视觉的问题来解决。

由于传统搜索方法会产生大量的假信号，因此有研究者尝试使用深度学习方法来对找到的候选信号进行真假分类 (Connor et al., 2018; Agarwal et al., 2020)。这些方法减少了一些人工判断信号真假的工作量，在一定程度上提高了搜索的效率，但是并没有解决传统搜索算法中其它的一系列问题，尤其是搜索不完备的问题。

另外，也有工作试图使用深度学习模型，直接判断原始数据中是否存在如图 2-1 A1 中的“抛物线”型信号 (Zhang et al., 2018; Liu et al., 2022)。然而，这种方法存在两个问题。一个是如图 2-1 B1 中所示，弱信号由于在时间上被拉长，导致在图像中并不显著，因此这种搜索方法很容易漏掉这些弱信号。另一个问题就是，不同的快速射电暴信号在图像中的形态是不同的，色散不同会导致不同的抛物线曲率，因而无法确定输入数据的长度。如果输入数据没有覆盖完整的爆发，那么模型依然有可能漏掉信号。并且，这样找到的信号也只是找到了其在数据中的到达时间，并没有给出色散值，还需要进一步的处理。

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

²<http://sourceforge.net/projects/heimdall-astro>

³<http://github.com/yymen/TransientX>

⁴<http://github.com/danielemichilli/LSPs>

2.3 搜索流程介绍

因此,我们提出了一种基于深度学习的射电暂现源搜索流程 DRAFTS⁵ (Deep learning-based RAdio Fast Transient Search pipeline)。这一流程将传统搜索方法和深度学习方法相结合,从数据中找到信号的到达时间和色散值,解决传统方法不完备、运行效率低下和依赖人工检查大量假信号的问题。另外,我们的方法全部使用 python 实现,易于安装和使用。我们的搜索流程如图 2-2 所示。

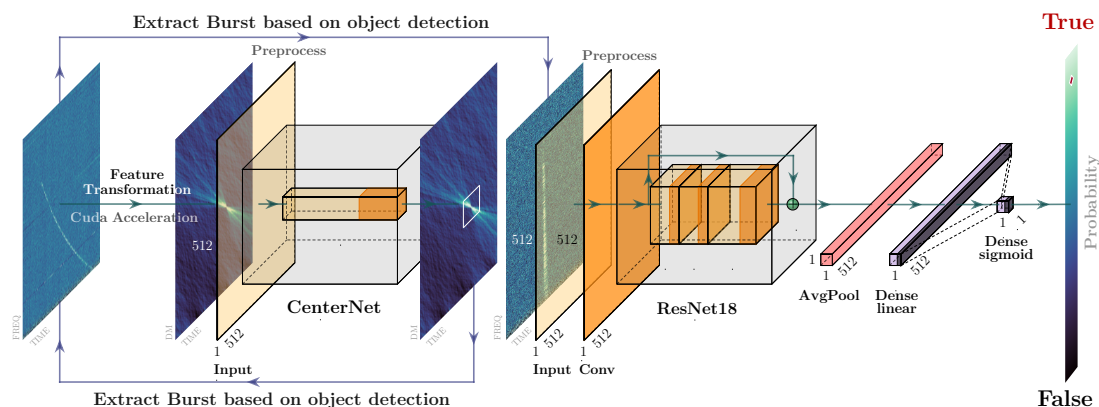


图 2-2 DRAFTS 搜索 FRB 的工作流程。

注意到在图 2-1 A3/B3 中,当我们使用正确的 DM 值对数据进行消色散处理时,得到的信号信噪比最高且宽度最窄。而当 DM 值偏离了最佳值时,信号的信噪比会降低,且信号的宽度会变宽。因此在时间-色散图中,快速射电暴都会表现出如图 2-1 A4/B4 所示的“领结”形。“领结”中心的纵横坐标对应的就是这个爆发的到达时间和色散值。

因此在这个流程中,我们使用一系列的 DM 值对数据进行消色散处理,将原始时间-频率数据转换为时间-色散数据。在这个过程中,我们使用 `numba.cuda`⁶ 进行加速。经过测试,同样的数据在 RTX 2070S 上,与 Intel i7-10700K 相比,`numba.cuda` 可以将消色散处理的时间缩短至原来的 1/1000。在此之后,将时间-色散数据输入训练好的目标检测模型(这里是 CenterNet)进行检测,找到信号的到达时间和色散值。在这一步中,我们并非将数据画成图像再读取送入模型进行检测,而是直接输入数据流,因此节省了读写的时间。根据目标检测找到的到达时间和色散值,从原始数据中提取信号,并使用训练好的分类模型(这里是 ResNet)对信号进行真假判断。目标检测的使用使这样的流程不会重复检测到同一个信号,假信号极少。即使有假信号检出,也会在后面的分类模型中进行二次判断,因此几乎不依赖人工检查,大大提高了搜索效率。

值得一提的是,对于那些已知色散的 FRB 的后随观测,也可以只用分类模型进行检测。对于已知色散的 FRB 的后随观测,我们可以先按照其特定的 DM

⁵<https://github.com/SukiYume/DRAFTS>

⁶<https://numba.pydata.org/>

值对观测数据进行统一的消色散处理，而后将数据切片，由分类模型直接判断数据片段中是否存在类似图 2-1A3/B3 的信号。

接下来我们将分别介绍目标检测和分类检测的部分。

2.4 目标检测介绍

目标检测 (Object Detection) 是计算机视觉领域最重要的分支之一，在日常生活中有着广泛的应用，比如视频监控、无人驾驶等。它旨在理解数字图像或视频中的视觉内容。目标检测不仅要识别图像中物体的类别，还要定位出它们在图像中的位置。近年来，随着深度学习网络的快速发展，目标检测器的性能得到了极大提升 (Jiao et al., 2019)。

在深度学习的目标检测方法中，可以大致分为两种类型：基于锚点 (anchor-based) 和无锚点 (anchor-free) 方法。Anchor-based 方法，如 RCNN 系列 (Girshick et al., 2014; Girshick, 2015; Ren et al., 2015; He et al., 2017)、YOLO 系列 (Redmon et al., 2016; Redmon et al., 2018; Bochkovskiy et al., 2020; Ge et al., 2021; Li et al., 2022; Wang et al., 2022a; Jocher et al., 2023; Wang et al., 2024) 等，运作机制是在图像中预设一系列固定的框 (称为锚点)，然后基于这些锚点预测物体的位置和类别。这种方法虽然性能很高，但存在一些局限性。比如检测性能对于 anchor 的大小、数量和长宽比非常敏感，固定大小的 anchor 导致对于小尺度的物体检测性能不高。另外，为了匹配真实的物体框，需要枚举所有目标可能出现的位置以及尺寸，导致样本不均衡以及大量的计算浪费。

相比之下，anchor-free 方法摒弃了预设 anchor 的做法，直接预测物体的关键点信息来确定物体的位置。这类方法简化了模型结构，减少了计算量，能提供更高的检测速度。CenterNet 是一个典型的 anchor-free 目标检测模型 (Duan et al., 2019)。它通过检测图像中每个物体的中心点，从中心点出发回归到目标的尺寸，来定位和识别物体。CenterNet 不需要复杂的锚点框设置，并且不依赖于复杂的候选区域生成步骤，这使得模型结构更加简洁，大大减少了训练和推理时的计算成本。此外，CenterNet 对于小目标和密集目标的检测具有更好的稳健性。而且我们需要的其实就是目标中心点，正中 CenterNet 的强项。因此在这里，我们选择使用 CenterNet 作为我们目标检测阶段的模型。

2.5 目标检测数据处理与模型训练

我们使用 FAST 探测到的来自 FRB 20121102A 的 1652 个爆发 (Li et al., 2021b) 做为训练数据集来进行模型训练。这些数据对应的原始数据的时间分辨率是 $98.304 \mu\text{s}$ ，共 4096 个频率通道。我们首先使用色散从 1 pc cm^{-3} 到 1024 pc cm^{-3} ，步长为 1 pc cm^{-3} ，共计 1024 个 DM 值对原始数据进行消色散处理，将数据分段后进行人工标记。在训练时，我们将图像统一变换到 512×512 大小。由于样本数量少，因此我们通过对数据进行随机的裁剪来增加数据的多样性，如图 2-3 所

示。

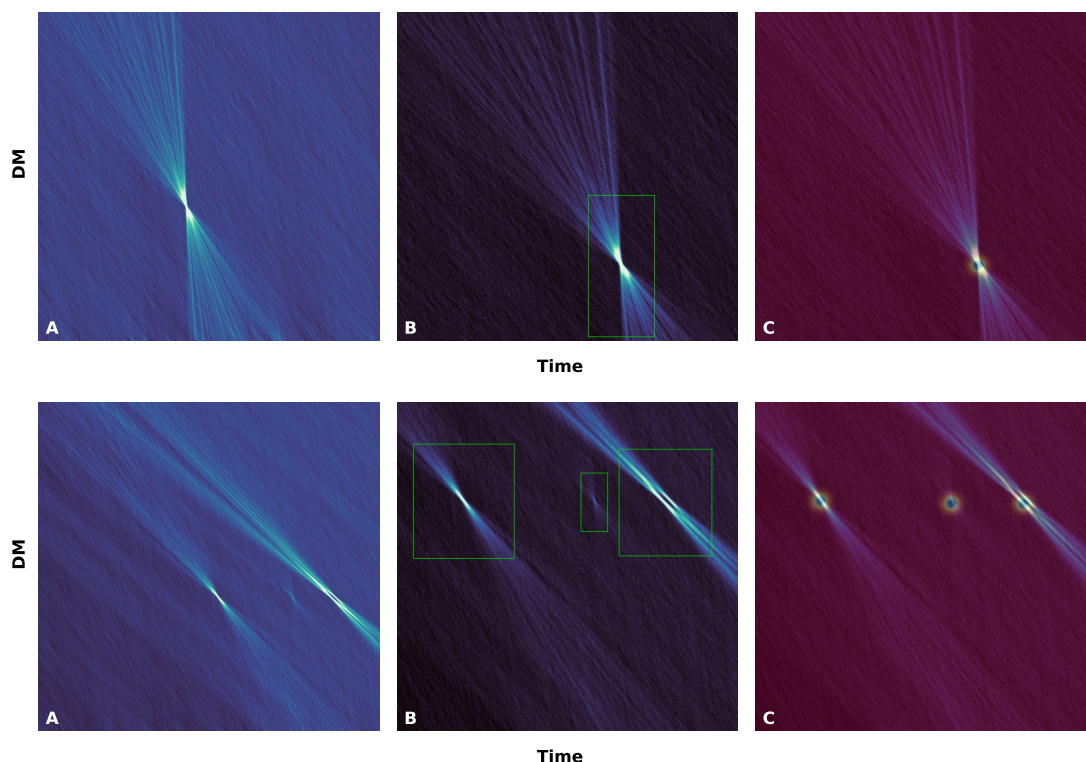


图 2-3 CenterNet 训练数据示例。A 是原始时间-色散数据，B 是随机裁剪后的数据，绿色的框是数据标记。C 标出了高斯散射后的中心点。

我们基于 pytorch 构建了 CenterNet 的最小实现。输入是 512×512 的灰度图像，骨干网络（backbone）选择了最简单的 ResNet18，并使用 ResNet50 作为对比，输出是 $5 \times 128 \times 128$ 的数组，其中第一个通道是中心点，后面两个通道是宽和高，最后两个通道是中心点的偏移度。CenterNet 的损失函数也因此由这三部分组成。

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{center}} + \lambda_{\text{size}} \mathcal{L}_{\text{size}} + \lambda_{\text{offset}} \mathcal{L}_{\text{offset}} \quad (2-2)$$

由于我们对中心点的位置要求非常高，因此我们将与中心点关联较小的预测框宽高的权重 λ_{size} 设为 0.1， λ_{offset} 设为 1.0。我们使用了 Adam 优化器和 cosine 学习率衰减策略。训练参数如表 2-1 所示。

表 2-1 目标检测与分类模型训练参数

参数	值
batch size	4 (CenterNet) 32 (ResNet)
learning rate	1e-3
epochs	100
warmup epochs	5
initial warmup lr	1e-5
minimum lr	1e-5

2.6 分类检测数据处理与模型训练

在这一部分，我们同样使用前述爆发进行训练，但此时使用的是消色散后的时间-频率数据。我们统一使用色散值 565 pc cm^{-3} 对原始数据进行消色散处理，并将有爆发存在的数据片段分离出来用于训练。

图 2-4展示了我们数据增强的过程，我们共进行了四步操作

- (1) 将数据每一个频率通道都除以其均值，然后将数据的数值限定在其 10% – 90% 的动态范围内，以尽可能提升信号信噪比。
- (2) 随机将 1-6 张图片合并为一张图片，以增强模型的稳健性和泛化性能。图 2-4展示的是三张图合并的情况，如果是 4 张图，则随机横向、纵向或者使用 2×2 的形式合并图像，其余情况都是随机横向或者纵向拼接图像。
- (3) 使用随机数在数据中添加一些人为的干扰，避免有限数据集无法覆盖尽可能多的 RFI 形态，导致模型无法泛化到新的数据或者其他望远镜的数据。这里我们加入的干扰包括 DM 为 0 pc cm^{-3} 的宽带干扰，随时间变化或者不随时间变化的窄带干扰，以及随机的一些散点。
- (4) 随机旋转和翻转图片。

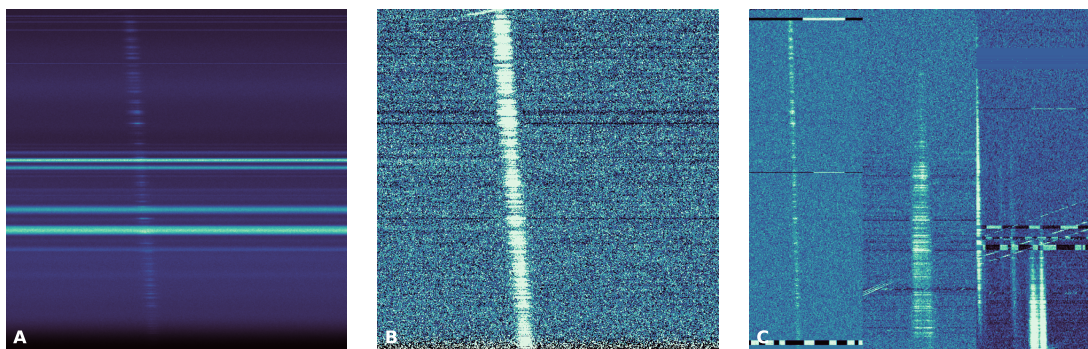


图 2-4 ResNet 训练数据示例。A 是原始时间-频率数据，B 是初步信号增强，C 是图像合并与干扰引入。

我们使用 ResNet18 作为分类模型，并使用 ResNet50 作为对比。模型输入是 512×512 的数组，输出是经过 sigmoid 函数激活的 0 – 1 概率。损失函数是

BCELoss, 使用 Adam 优化器和 cosine 学习率衰减策略。训练参数除了 batch size 是 32 以外, 其它参数与 CenterNet 的训练相同, 如表 2-1 所示。

2.7 结果分析与讨论

图 2-5 展示了 CenterNet 在验证集上的部分测试效果。图中绿色的框为 Ground Truth, 红色的框为模型检测结果。可以看到, 我们的模型能够准确地找到爆发, 并且几乎没有假信号。

我们使用 FAST dataset for Fast Radio bursts EXploration (FAST-FREX)⁷ 这一独立数据集来测试我们模型的性能。这一数据集中包含了来自三个 FRB 共 600 个爆发样本, 以及 1000 个无爆发的干扰片段 (Guo et al., 2024)。测试结果如表 2-2 所示, 所有的指标都是在 50% 的置信度下计算的。

表 2-2 模型性能比较

模型	TP	FP	准确率	召回率	F1 Score
CenterNet-18	579	53	91.6%	96.5%	0.940
CenterNet-50	581	51	91.9%	96.8%	0.943
ResNet-18	600	18	97.1%	100%	0.985
ResNet-50	600	13	97.9%	100%	0.989

其中 TP (True Positive) 是指模型正确地将正类样本识别为正类的情况数。FP (False Positive) 则是指模型错误地将负类样本识别为正类的情况数。

召回率 (Recall) 衡量了模型识别正类样本的能力。它是模型预测的 TP 样本数与实际正类样本总数的比例。

$$\text{Recall} = \frac{\text{TP}}{\text{P}} \quad (2-3)$$

准确率 (Precision) 衡量了模型在预测正类样本时的准确性。它是模型预测的 TP 样本数与模型预测为正类样本总数 (TP 加上 FP) 的比例。

$$\text{Precision} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FP}} \quad (2-4)$$

F1 score 是召回率和准确率的调和平均数, 它是一个综合性能指标, 其值越高, 说明模型越稳健。

$$\text{F1} = 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (2-5)$$

可以看到, 目标检测模型和分类模型都能做到近乎 100% 的召回率, 并同时保持着极高的准确率, 反映了我们模型有着非常好的性能。另外可以看到, 在目

⁷<https://doi.org/10.57760/sciencedb.15070>

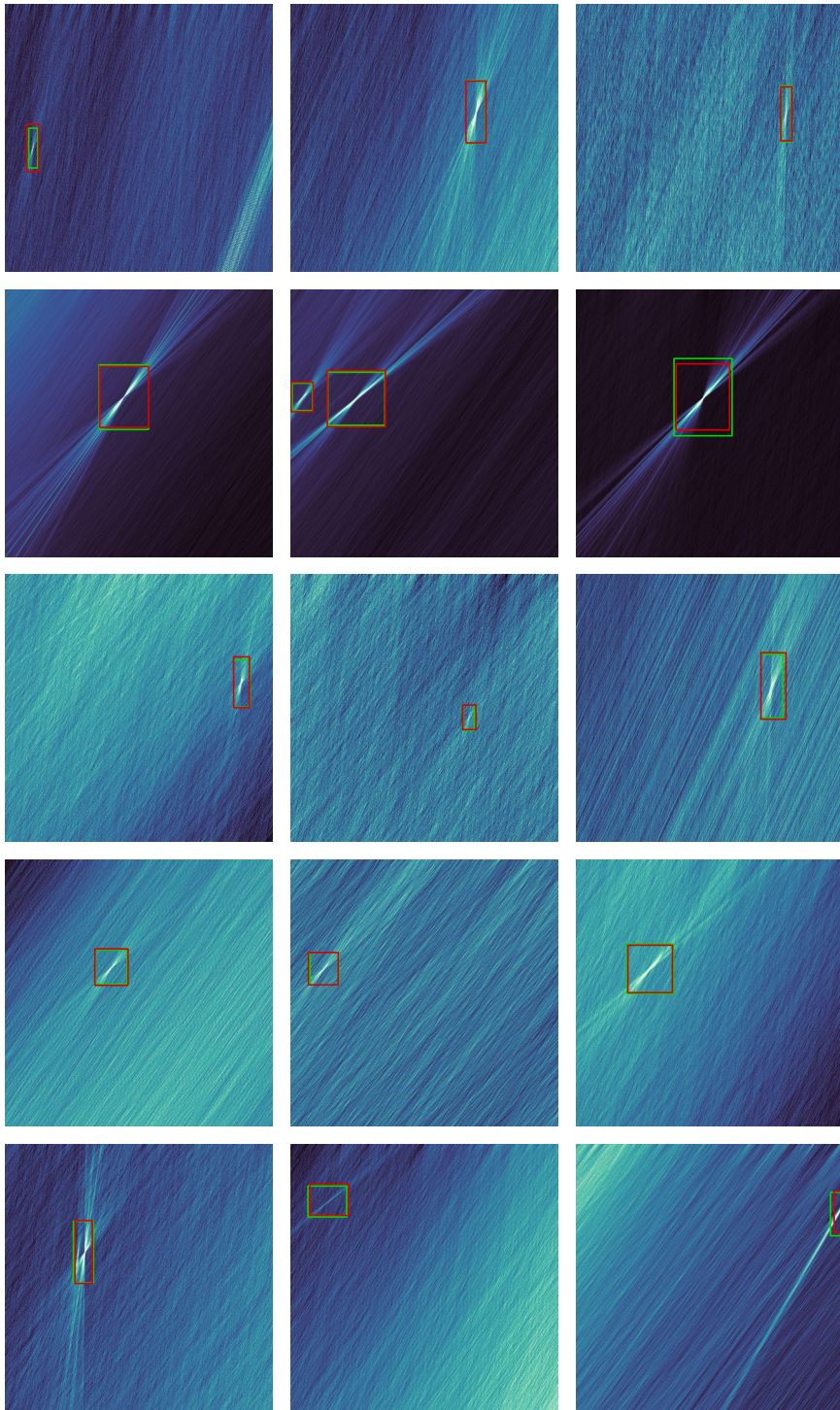


图 2-5 CenterNet 搜索结果示例。其中绿色的框为 Ground Truth，红色的框为模型检测结果。

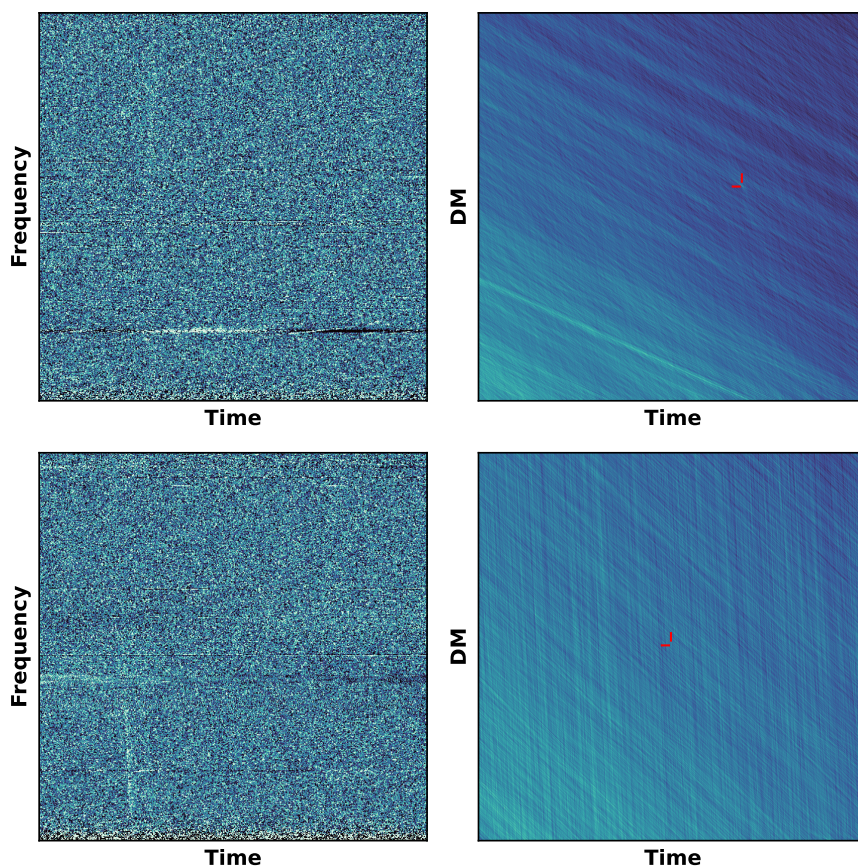


图 2-6 两个在目标检测模型中漏掉的爆发。左侧是爆发的时间-频率图，右侧是时间-色散图，其中红线标出了爆发应该在的位置。

标检测和分类模型中，使用 ResNet-50 相比 ResNet-18 有了一些提升，但是提升并不明显。因此，在综合考虑计算效率和模型性能的情况下，我们最终选择使用 ResNet-18 作为 CenterNet 的骨干网络和分类模型。

值得注意的是，分类模型可以做到 100% 的召回率，而 CenterNet 的召回率略低于 100%。图 2-6 展示了其中两个爆发的时间-频率图和时间-色散图，这两个爆发都是在分类模型中找到而在目标检测模型中漏掉的。可以看到，这两个爆发的信号都非常弱，且在时间-色散图中的“领结”非常模糊，人眼都看不到，因此在目标检测模型中漏掉是可以理解的。这也需要我优化进时间-频率图像到时间-色散图的转换方法，提升弱信号在时间-色散图中的可见度。

尽管如此，在实际生产环境中，我们的模型已经表现出优于传统搜索算法的性能。我们的模型能够在 FAST 观测数据上取得非常好的效果 (Zhang et al., 2022b, 2023)，并且在不进行任何微调的情况下，我们的模型也能够直接泛化到 GBT 望远镜的观测数据上，并且在存在强烈干扰的情况下依然能保持好于 presto 的完备性 (Feng et al., 2023b)。因此，我们的模型在保证准确率的情况下依然有着非常高的完备性，表现出了极高的性能。加之其运行效率远高于传统搜索方法，我们相信，这样一个模型在未来的大数据环境下会有着非常广泛的应用前景。

2.8 本章小结

在这一章中，我们详细介绍并评估了我们所提出的基于深度学习的射电暂现源搜索流程，命名为 DRAFTS (Deep learning-based RAdio Fast Transient Search pipeline)。DRAFTS 是一个创新的工具，该流程致力于提高射电暂现源探测的准确性与效率，是在传统搜索方法的基础上融合了深度学习技术的产物。

相比之前的方法，DRAFTS 能够更完备地探测到有效信号。这一点已经在之前的一系列工作中得到证实，包括在 FAST 数据中探测到当时已知的 FRB 的最高事件率 (Zhang et al., 2022b)。另外，我们的模型也可以稳健地迁移到别的望远镜上，比如在 GBT 望远镜的观测数据中，我们的模型也能够取得非常好的效果 (Feng et al., 2023b)。

另外，DRAFTS 显著降低了人工干预的需求，通过自动化的方式有效过滤掉大量的假信号，使我们能够更加专注于信号的分析 and 解释。这一点对于加速科学发现尤为重要，在射电天文学的快速发展背景下，能够及时处理并解析来自各个角落的宇宙信号至关重要。DRAFTS 流程的实施不仅提高了信号探测的准确率，还大幅度提升了处理速度，从而解决了之前方法中存在的效率瓶颈。

总的来说，DRAFTS 提供了一个高效且可靠的新方案，这对观测项目来说极具价值。通过这一流程的应用，我们期望能够加速射电暂现源的探测工作，进而促进对这些极端宇宙事件背后物理机制的理解。DRAFTS 的成功实施预示着深度学习与天文学研究深度融合的未来，为探索宇宙的未知领域提供了强大的动力和工具。

第 3 章 两个重复快速射电暴的观测与分析

基于第 2 章中构建的 FRB 搜索算法，我们对诸多 FRB 的观测数据进行了搜索，找到大量的爆发。我们发现，FRB 20201124A 和 FRB 20220912A 是到目前为止最活跃的两个 FRB。接下来我们分别介绍对这两个 FRB 的观测与分析。

3.1 FRB 20201124A

3.1.1 引言

FRB 20201124A 是由 CHIME/FRB 项目在 2020 年 11 月 24 日发现的一个重复快速射电暴 (CHIME/FRB Collaboration, 2021)，并在 2021 年 3 月进入一个非常活跃的爆发阶段。当时有多个射电望远镜对其进行了观测，探测到数百个爆发 (Hilmarsson et al., 2021b; Marthi et al., 2021; Lanman et al., 2022; Kumar et al., 2022; Law et al., 2021; Xu et al., 2021a)。特别是，FAST 在 2021 年 3 月至 4 月期间对其进行了连续观测，探测到了 1863 个爆发，并且发现其 RM 在短时间内发生剧烈的变化 (Xu et al., 2022b)。后续射电干涉阵的独立观测，将这个快速射电暴定位在红移为 $z = 0.0979$ 的宿主星系中，当使用 Λ CDM 宇宙学以及对应参数 $h = 0.7$, $\Omega_\Lambda = 0.7$ 和 $\Omega_m = 0.3$ 时，估计其光度距离为 $D_L = 451$ Mpc (Fong et al., 2021; Ravi et al., 2022; Piro et al., 2021; Nimmo et al., 2022b)。利用凯克光学望远镜进行的后续观测发现，宿主星系是一个类似银河系的，富含金属的旋涡星系，FRB 源位于这个星系低恒星密度的旋臂间区域，偏离星系中心 (Xu et al., 2022b)。这个快速射电暴的爆发也有着丰富的特征，比如极高的亮度和复杂的爆发结构 (Kumar et al., 2022; Marthi et al., 2021)、高度的圆偏振度和偏振位置角的变化 (Hilmarsson et al., 2021b; Kumar et al., 2022; Xu et al., 2022b)，以及明显的闪烁 (Main et al., 2021) 等。

CHIME/FRB 项目在 2021 年 9 月 21 日报道了来自 FRB 20201124A 的一次新爆发¹。受这一事件触发，我们从 2021 年 9 月 25 日开始使用 FAST 对 FRB 20201124A 进行了连续观测。观测持续到 10 月 17 日，总共观测了 17 次。我们在前四天的观测中探测到 800 多次爆发。在这一章中，我们主要集中在 FRB 20201124A 的能量分析中。关于这些爆发的形态学、偏振和周期搜索可以在另外几篇文章中找到 (Zhou et al., 2022; Jiang et al., 2022; Niu et al., 2022b)。

能量是快速射电暴的基本属性之一。对于快速射电暴群体，通常假定其光度函数 (dN/dL) 是一个有指数截断的幂律函数 (也叫 Schechter 函数, Schechter, 1976)。在过往研究中，Schechter 光度函数的指数 α 被不同的研究小组使用不同的数据约束在 -1.5 到 -2.2 之间 (Lu et al., 2016, 2019a; Luo et al., 2018; Bhandari et al., 2018; Macquart et al., 2018; Golpayegani et al., 2019; Luo et al., 2020b; Zhang et al., 2021; Hashimoto et al., 2022)。Lu et al. (2020) 的研究中表明， ~ -1.8 的指数

¹<https://www.chime-frb.ca/repeaters>

可以覆盖到最亮的快速射电暴到银河系中的快速射电暴 FRB 20200428 的亮度, 因为 FRB 20200428 比一般的快速射电暴要暗三到四个数量级。

观测到的快速射电暴是光度函数和其红移分布的卷积。对于在欧几里得空间中的常数密度分布的源, 观测到的光度分布应该遵循指数为 -1.5 的幂律分布 (Vedantham et al., 2016)。作为宇宙学起源的天体物理现象, 快速射电暴的空间分布偏离了这样一个简单的幂律函数, 可能是由于其未知的红移分布, 导致对观测产生了影响。如果快速射电暴起源于年轻天体, 那么在红移小于 2 的位置, 快速射电暴的数密度应该与宇宙恒星形成历史一致 (Madau et al., 2014; Nicholl et al., 2017)。然而, 最近的一些研究表明, 快速射电暴的空间分布也偏离了宇宙恒星形成历史 (Cao et al., 2018; Hashimoto et al., 2020a; Zhang et al., 2021; Arcus et al., 2021; James et al., 2022)。当使用 CHIME 的第一个快速射电暴目录进行统计时, 发现快速射电暴的红移分布似乎延迟于恒星形成历史 (Zhang et al., 2022a; Hashimoto et al., 2022)。无论如何, 各种研究都证实, 无论假设红移分布如何, 得出的快速射电暴的光度/能量函数都是类似的 (Lu et al., 2016, 2019a; Luo et al., 2018; Bhandari et al., 2018; Macquart et al., 2018; Golpayegani et al., 2019; Luo et al., 2020b; Zhang et al., 2021, 2022a; Hashimoto et al., 2022)。

对于重复快速射电暴, 由于其爆发数量很多, 因此可以对单个快速射电暴源的光度/能量函数进行细致的研究。需要注意的是, 单个快速射电暴的光度函数反映的是单一源的辐射特征, 这与前述快速射电暴作为一个群体的整体光度函数关注的是不同的特征, 后者与快速射电暴的辐射特征以及其空间分布都有关。对 FRB 20121102A 和 FRB 20180916B 的光度函数的研究表明, 它们的光度函数可以用幂律函数很好地拟合。其中高能端的幂律指数从 -2.8 到 -1.7 不等 (Law et al., 2017; Wang et al., 2019; Gourdji et al., 2019; Cruces et al., 2021; Aggarwal et al., 2021a; Chime/Frb Collaboration et al., 2020)。这样的结果可能意味着这两个快速射电暴在能量辐射上存在一些差异 (Hashimoto et al., 2020b)。借助 FAST 的超高灵敏度 (Nan et al., 2011), Li et al. (2021b) 用 1600 多个爆发, 展示了来自 FRB 20121102 的爆发的高动态范围的能量函数。发现这样的能量函数不能用单一的幂律函数拟合, 其中高能端可以近似用幂律函数拟合, 低能端则需要一个对数正态函数来描述, 特征能量在 $\sim 4.8 \times 10^{37}$ erg。在当时还不清楚这种双峰分布是否普遍存在于重复快速射电暴中。

在接下来的几节中, 我们将分别叙述此次对 FRB 20201124A 的观测的数据处理、爆发特征与能量分布, 以及对这些结果的讨论。

3.1.2 观测与数据处理

对 FRB 20201124A 的观测使用 FAST 的 19 波束 L 波段接收机 (FLAN, Li et al., 2018; Jiang et al., 2020) 进行。观测的中心频率为 1.25 GHz, 覆盖频率范围 1 – 1.5 GHz。观测从 2021 年 9 月 25 日持续到 10 月 17 日, 共计进行了 19 个小时的观测。

3.1.2.1 爆发探测

FAST 使用 FITS 格式记录数据，观测数据中有 4096 个频率通道，时间分辨率是 $49.152 \mu\text{s}$ 。我们将原始数据按照 413 pc cm^{-3} 的色散值进行统一的消色散。然后使用 DRAFTS 中的分类模型进行搜索，判断消色散后的数据片段是否包含有快速射电暴信号。我们还使用 presto 程序 (Ransom, 2001) 对同样的数据进行了搜索，以验证 DRAFTS 的搜索结果。最终，我们得到了 800 多个爆发。

3.1.2.2 色散优化

由于色散值 DM 是沿传播路径的电子密度的积分，因此我们假定 DM 在一小时内不会发生显著变化。我们首先使用 DM 值为 413 pc cm^{-3} 对数据进行统一的消色散处理，而后从中切除爆发存在的数据片段。然后，我们使用 -5 pc cm^{-3} 到 5 pc cm^{-3} 的 DM 值，对当天所有的信噪比 (S/N) 高于 10 的爆发进行统一的微调，使得爆发的结构最丰富。并将这一 DM 值重新应用到当天的所有爆发。

3.1.2.3 流量校准

对每个爆发，我们使用辐射计公式来估计其峰值流量

$$S_v = \frac{S/N \times T_{\text{sys}}}{G \sqrt{n_p} \times \text{BW} \times t_{\text{samp}}} \quad (3-1)$$

其中 T_{sys} 是系统温度， G 是天线增益。天线增益 G 在 FAST 中式天顶角和观测频率的函数 (Jiang et al., 2020)。 $n_p = 2$ 是偏振数量， t_{samp} 是时间采样率，BW 是用于流量定标的带宽。

与非重复的快速射电暴相比，重复的快速射电暴的发射带宽往往要窄一些 (Pleunis et al., 2021b)。对于这些窄带的爆发，通常使用观测带宽定义的流量乘以观测带宽来计算能量。或者，也可以使用爆发带宽的窄带流量乘以爆发带宽来计算能量。我们将 FAST 的整个观测频段分成每 50 MHz 的子带，并判断其中是否存在爆发，从而粗略地估计每个爆发的发射带宽。如果计算正确，那么两种方法得到的能量应该是一样的。为了验证这一点，我们使用两种方法计算 S_v 。第一种方法是假设爆发的能量分布在望远镜的观测带宽 500 MHz 中，第二种方法是使用每个爆发的真实带宽。当使用不同的带宽时，爆发的噪声水平和 S/N 都会发生变化。因此，在使用爆发带宽进行流量校准时，我们重新计算了 S/N 以及相应频率带宽的 T_{sys} 和 G 。

3.1.3 结果

3.1.3.1 事件率与等待时间

在 17 天的观测活动中，我们只在前四天（即 2021 年 9 月 25 日到 28 日）探测到来自 FRB 20201124A 的爆发，探测到的爆发数量分别是 35、72、232 和 542 个，共计 881 个爆发。爆发定义与 Li et al. (2021b) 等大部分工作相同，即根据噪

声水平定义，当两个爆发之间的信号在噪声 3σ 以内时，我们认为这两个爆发是独立的。这些爆发的属性列在表 3-1 中。

图 3-1 中展示了我们观测以及爆发探测的情况。在图中，我们可以看到爆发的累计数量在线性-对数比例中几乎是一条直线，表明爆发的数量随时间呈指数增长。有趣的是，这些爆发在达到最高事件率后的第二天突然消失了。第三天和第四天的峰值爆发率分别达到了 232 hr^{-1} 和 542 hr^{-1} ，超过了之前报道的该 FRB 和其他重复 FRB 的所有爆发率，包括 FRB 20121102A 的 122 hr^{-1} (Li et al., 2021b) 和 218 hr^{-1} (Jahns et al., 2023)，FRB 20190520B 的 4.5 hr^{-1} (Niu et al., 2022a)，以及 FRB 20201124A 本身在上一个活跃期的 45.8 hr^{-1} (Xu et al., 2022b)。

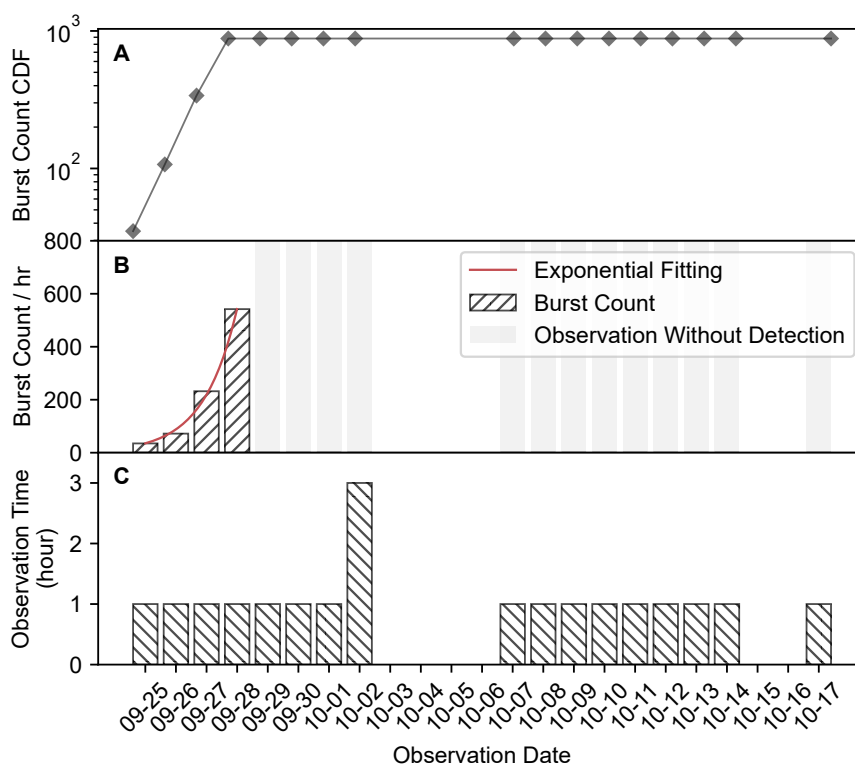


图 3-1 FRB 20201124A 的观测与爆发探测情况。A 爆发数量的累积分布。B 每个观测日的爆发数量。灰条为未探测到爆发的观测时段，红线为爆发数量的指数拟合。C 每次观测的观测时长。

等待时间是相邻两个爆发到达时间的的时间差。所有的等待时间都是在同一个观测时段内计算的，以避免约 23 小时的观测间隔。FRB 20201124A 的等待时间分布如图 3-2 所示，可以用两个对数正态函数很好地拟合，两个峰值对应的的时间分别是 10.05 s 和 51.22 ms。值得注意的是，FRB 20201124A 在前一个活跃期的等待时间分布也是双峰分布，但是右峰对应的等待时间是 135 s (Xu et al., 2022b)。我们的观察结果表明，等待时间右峰分布在同一个源内也不是统一的，而是取决于当时源的活动水平。多个望远镜探测到的 FRB 20121102A 的爆发的等待时间也是双峰分布 (Aggarwal et al., 2021a; Li et al., 2021b; Jahns et al., 2023)。然而不同望远镜的灵敏度不同，右峰对应的等待时间也有很大的不同，往往是灵敏度更高

表 3-1 FRB 20201124A 爆发的参数列表

Burst ID	ObsDate	MJD ¹ Barycentric	DM (pc cm ⁻³)	Width ² Full Band (ms)	PeakFlux Full Band (mJy)	Fluence Full Band (Jy ms)	Energy _c ³ Full Band (erg)	Energy _{at} ⁴ Full Band (erg)	BandWidth (MHz)	Width ² Limited Band (ms)	PeakFlux Limited Band (mJy)	Fluence Limited Band (Jy ms)	Energy _{at} ³ Limited Band (erg)
02	20210925	59482.946731974	412.97	3.78	28.61±0.05	0.108±0.001	3.023(28)E+37	1.209(1)E+37	150	3.55	79.38±0.36	0.281±0.003	1.038(10)E+37
03	20210925	59482.947007613	412.97	4.34	5.99±0.07	0.026±0.001	7.278(1)E+36	2.911(1)E+36	50	5.18	32.52±0.22	0.168±0.002	2.071(22)E+36
04	20210925	59482.947121260	412.97	2.70	7.41±0.09	0.020±0.001	5.598(1)E+36	2.239(1)E+36	100	3.54	20.05±0.42	0.071±0.001	1.747(22)E+36
05	20210925	59482.947355910	412.97	4.47	9.61±0.1	0.043±0.001	1.204(1)E+37	4.814(1)E+36	100	4.00	38.02±0.22	0.152±0.002	3.740(45)E+36
06	20210925	59482.947576756	412.97	2.85	10.89±1.93	0.031±0.005	8.677(1)E+36	3.471(1)E+36	150	3.17	22.96±4.26	0.073±0.001	2.687(34)E+36
07	20210925	59482.947690227	412.97	8.46	211.11±1.1	1.787±0.009	5.002(45)E+38	2.001(18)E+38	300	7.82	462.35±2.39	3.617±0.034	2.668(25)E+38
08	20210925	59482.950048429	412.97	5.77	68.47±0.64	0.395±0.004	1.106(11)E+38	4.422(45)E+37	450	5.26	75.19±0.71	0.395±0.004	4.373(40)E+37
09	20210925	59482.952261654	412.97	4.83	29.58±0.28	0.143±0.001	4.003(28)E+37	1.601(11)E+37	200	4.79	67.06±0.66	0.322±0.003	1.581(13)E+37
10	20210925	59482.953261568	412.97	5.96	38.59±0.37	0.230±0.002	6.438(56)E+37	2.575(22)E+37	150	5.30	104.79±1.05	0.556±0.005	2.049(20)E+37
11	20210925	59482.953261777	412.97	5.88	62.74±0.56	0.369±0.003	1.033(8)E+38	4.131(34)E+37	350	4.09	123.75±1.18	0.507±0.005	4.360(40)E+37
12	20210925	59482.953545641	412.97	4.81	6.24±0.61	0.030±0.003	8.397(1)E+36	3.359(1)E+36	100	2.97	31.24±0.87	0.093±0.001	2.284(22)E+36
13	20210925	59482.953787567	412.97	3.12	6.40±0.06	0.020±0.001	5.598(1)E+36	2.239(1)E+36	100	1.73	26.89±0.37	0.046±0.001	1.142(22)E+36
14	20210925	59482.955691648	412.97	3.71	30.70±0.06	0.114±0.001	3.191(28)E+37	1.276(11)E+37	300	3.42	49.37±0.32	0.169±0.002	1.249(13)E+37
15	20210925	59482.959269256	412.97	6.77	227.02±0.3	1.537±0.002	4.302(45)E+38	1.721(18)E+38	400	6.10	290.64±0.5	1.773±0.018	1.744(18)E+38
16	20210925	59482.961554168	412.97	14.39	375.59±2.33	5.403±0.034	1.512(16)E+39	6.049(64)E+38	350	12.42	584.60±2.99	7.262±0.076	6.249(66)E+38
17	20210925	59482.961568878	412.97	2.70	8.13±3.83	0.022±0.01	6.158(1)E+36	2.463(1)E+36	150	2.82	22.93±6.0	0.065±0.001	2.385(34)E+36
18	20210925	59482.962379029	412.97	8.69	14.73±3.94	0.128±0.034	3.583(28)E+37	1.433(11)E+37	250	7.76	28.63±5.76	0.222±0.003	1.366(17)E+37
19	20210925	59482.963114767	412.97	6.23	10.11±2.38	0.063±0.015	1.763(28)E+37	7.054(112)E+36	150	5.42	26.20±3.85	0.142±0.002	5.240(67)E+36
20	20210925	59482.965566529	412.97	3.83	113.65±0.08	0.435±0.001	1.218(14)E+38	4.870(56)E+37	200	3.40	269.33±0.25	0.915±0.01	4.501(49)E+37

¹ 以 1.5GHz 为参考频率的爆发到达时间

² 等效宽度

³ 使用中心频率计算的能量

⁴ 使用带宽计算的能量

完整表格可在 ISM/CRAFTS 网站 <http://groups.bao.ac.cn/ism/CRAFTS/FRB20201124A/> 和 ScienceDB <https://doi.org/10.57760/sciencedb.06762> 上找到。

的望远镜（探测到更多的爆发）的等待时间更短。

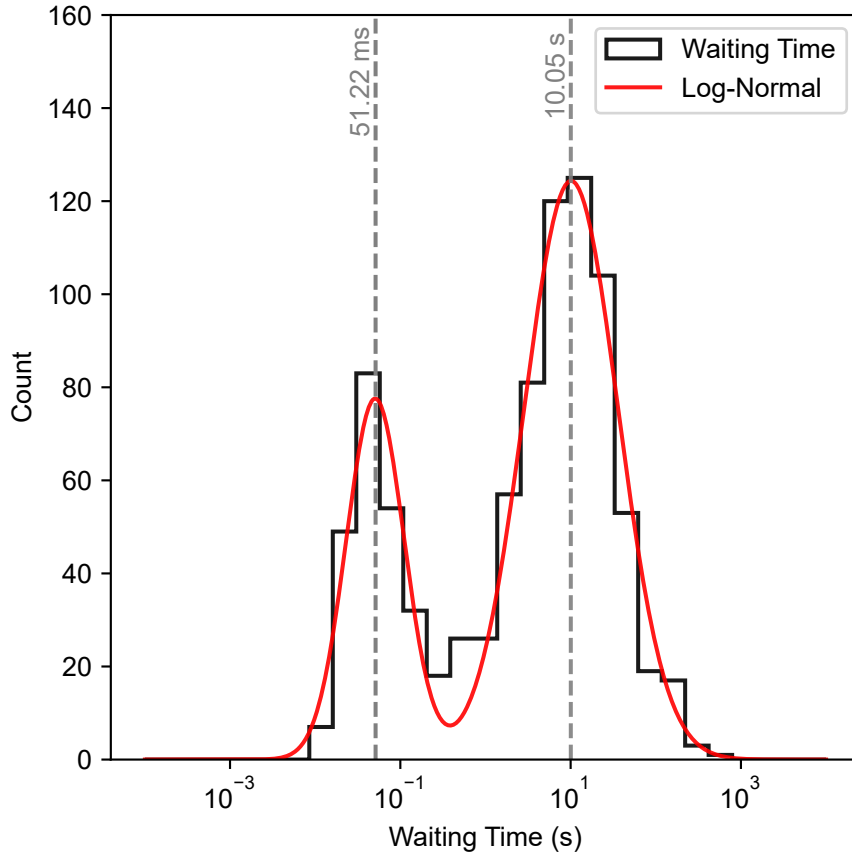


图 3-2 FRB 20201124A 的等待时间分布。黑线和红线表示等待时间的分布和两个对数正态函数的拟合结果。

3.1.3.2 能量计算

我们按照下面的公式计算 FRB 20201124A 的爆发等效各向同性能量 (Zhang, 2018)

$$E = 10^{39} \text{erg} \frac{4\pi}{1+z} \left(\frac{D_L}{10^{28} \text{cm}} \right)^2 \left(\frac{F_\nu}{\text{Jy} \cdot \text{ms}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\text{GHz}} \right), \quad (3-2)$$

其中 $D_L = 453.3 \text{ Mpc}$ 是 FRB 20201124A 的光度距离 (Xu et al., 2022b), $F_\nu = S_\nu \times W_{eq}$ 是爆发流量, S_ν 是峰值流量密度, $\Delta\nu$ 是每个爆发的带宽。如第 3.1.2.3 节中所述, 我们使用爆发带宽和观测带宽两种方法来计算 S_ν , 并比较得到的能量。

图 3-3A 展示了使用这两种带宽计算的流量分布。可以看到, 使用爆发带宽得到的流量要大于使用观测带宽计算的流量。这是很正常的, 因为流量 F_ν 是能量沿着频率的平均值。由于爆发的能量在数据中是固定的, 因此使用更窄的爆发带宽来计算流量 F_ν , 就会得到比观测带宽更高的流量值。图 3-3B 展示的是使用两种带宽计算的能量分布。由于能量正比于流量乘对应的带宽, 因此不论使用哪种带宽, 能量的分布都是差不多的。我们也使用了 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检

验来验证这一点，得到的 p 值为 0.35，不能拒绝两种能量分布相互一致的假设。因此，我们得出结论，带宽选择对能量计算的影响不大，采用全带宽计算能量的方法是可靠的。

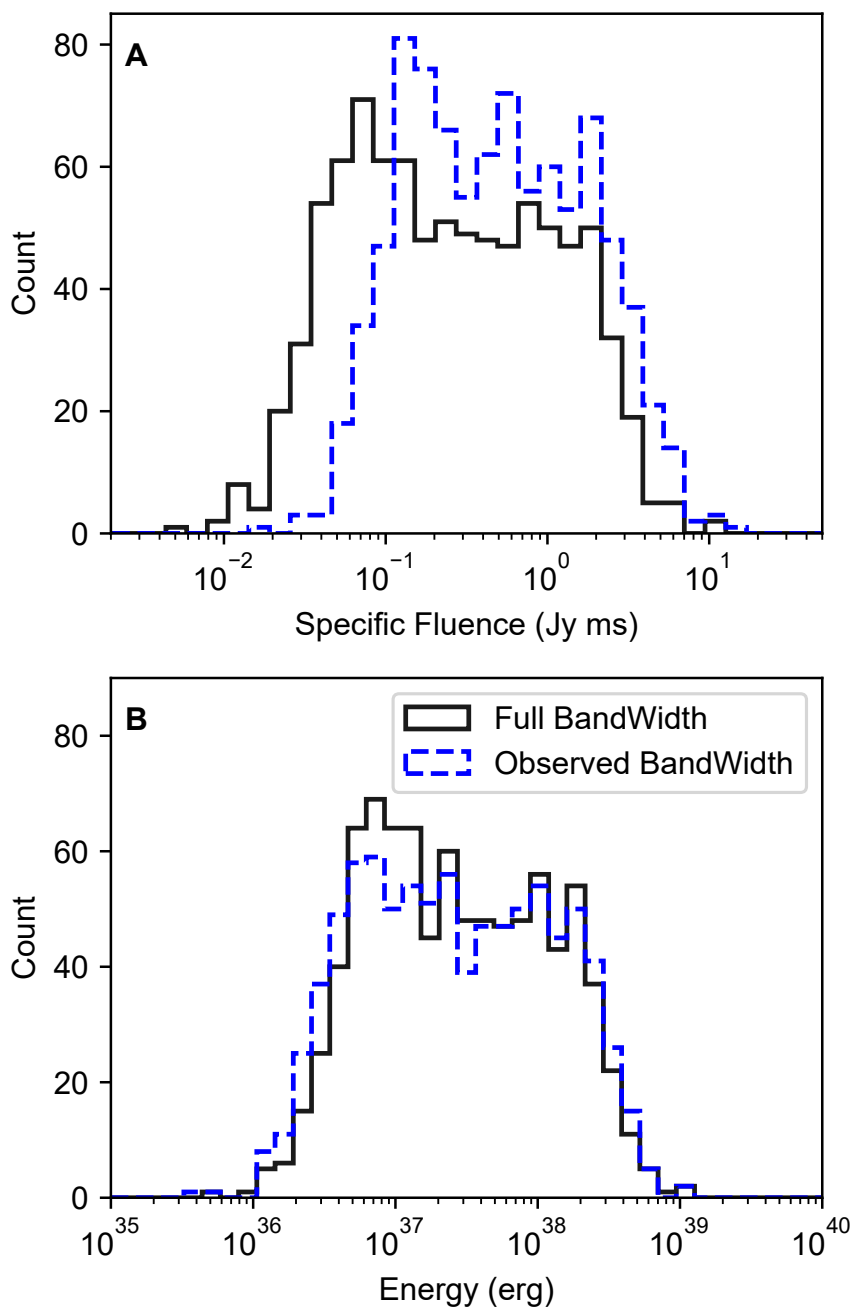


图 3-3 爆发流量和能量分布。黑色实线为使用观测带宽，即 $\Delta\nu = 500\text{MHz}$ 计算的结果，红色虚线为使用爆发带宽计算的结果。

Li et al. (2021b) 中介绍了使用 FAST 探测到来自 FRB 20121102A 的 1652 个爆发的情况，并发现了这些爆发的能量分布是双峰分布。其中能量计算使用的公式与我们这里的公式 3-2 相同，区别只是他们使用了中心频率 ν_c 来计算能量，这会导致能量的计算结果与我们的结果相差一个常数 $\nu_c/\Delta\nu$ 。Aggarwal (2021b) 中

声称，他们使用了 Li et al. (2021b) 中提供的爆发的流量和爆发带宽重新计算了能量，结果没有发现明显的双峰分布。我们在图 3-3 中展示了，爆发的流量会随着带宽变化。因此在计算能量时，如果使用了观测带宽计算的流量，那么能量也应该乘以观测带宽。我们认为 Aggarwal (2021b) 的计算结果是不正确的，因为他们只是用观测到的单个爆发的爆发带宽代替了中心频率 ν_c ，相当于使用观测带宽下流量乘以爆发带宽。观测带宽下的流量小于爆发带宽下的流量，而爆发带宽又小于观测带宽，这样乘出来的结果往往要比实际的能量小得多，因此得到的能量分布也是不可靠的。

3.1.3.3 能量分布

能量或者光度函数蕴含着有关快速射电暴源辐射机制的重要线索。我们在上一节中已经证明，带宽选择并不改变能量分布。因此，在下面的分析中，我们统一使用观测带宽来计算流量和能量。

如图 3-4C 所示，FRB 20201124A 的能量分布表现出明显的双峰分布，可以用两个对数正态函数很好地拟合，两个峰值能量分别是 2.27×10^{37} erg 和 2.28×10^{38} erg。这可能表明产生 FRB 的发射机制不止一种。FRB 20121102A 的能量分布也可以用类似的双对数正态分布来拟合 (Li et al., 2021b 的扩展数据图 5)，但两个 FRB 的峰值能量并不相同。

对于幂律形式的光度函数 $dN/dE = AE^\alpha$ ，累积能量分布的计算公式为

$$\begin{aligned} N(> E) &= \int_E^{E_{\max}} dN = \int_E^{E_{\max}} AE^\alpha dE \\ &= \frac{A}{-\alpha - 1} [E^{\alpha+1} - E_{\max}^{\alpha+1}] = \frac{A}{-\hat{\alpha}} [E^{\hat{\alpha}} - E_{\max}^{\hat{\alpha}}], \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中 E_{\max} 是样本的最高能量， $\hat{\alpha} = \alpha + 1$ 是积分后的幂律指数。可以看到，累积能量分布也是幂律函数的形式，指数为 $\hat{\alpha}$ 。不同类型的天体源有不同的 $\hat{\alpha}$ 值。例如，太阳耀斑事件的 $-0.9 < \hat{\alpha} < -0.5$ (Maehara et al., 2015)，Crab 脉冲星的巨脉冲的 $\hat{\alpha}$ 值在 $-2.8 < \hat{\alpha} < -1.1$ (Mickaliger et al., 2012; Lyu et al., 2021)。不同的重复快速射电暴也有不同的 $\hat{\alpha}$ 值，例如 FRB 20121102A 的 $-1.8 < \hat{\alpha} < -0.7$ (Law et al., 2017; Cruces et al., 2021; Gourdjji et al., 2019)，FRB 20180916B 的 $\hat{\alpha} \sim -1.3$ (Chime/Frb Collaboration et al., 2020)。对于 FRB 20201124A，使用 uGMRT 探测到的爆发得到的指数为 $\hat{\alpha} \sim -1.2$ (Marthi et al., 2021)，使用 CHIME 探测到的爆发得到的指数为 $\hat{\alpha} \sim -3.6$ (Lanman et al., 2022)。

也有一些工作使用分段幂律函数来拟合累积能量分布。FRB 20121102A 使用分段幂律函数拟合的指数分别是 $\hat{\alpha} = -1.4$ 和 $\hat{\alpha} = -1.8$ ，拐点在 2.3×10^{37} erg (Hewitt et al., 2022; Aggarwal et al., 2021a)。在这里，我们的 FAST 样本似乎也需要分段幂律函数来进行拟合，但是拐点并不明显。因此，我们采用了一个指数连接的分段幂律函数，这一函数又称为 Band 函数，是在 Band et al. (1993) 中提出的用于描述伽马射线暴能谱的函数，函数形式为

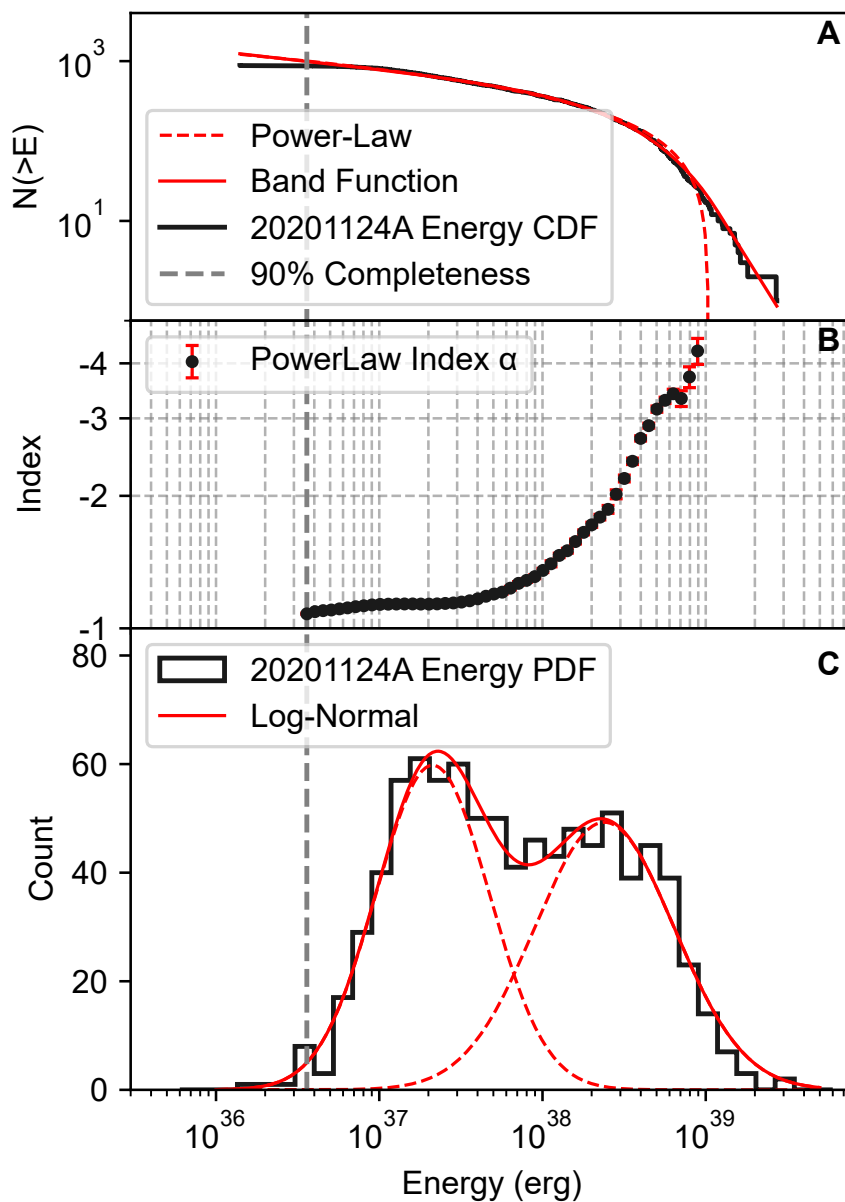


图 3-4 FRB 20201124A 的能量分布。A FRB 20201124A 的累积能量分布（黑线），红线为使用 Band 函数拟合的结果。B 单幂律函数拟合的指数与能量阈值的关系。C FRB 20201124A 的能量分布与两个对数正态函数拟合。

$$N(> E) = \begin{cases} AE^{\hat{\alpha}} e^{-E/E_0} & E \leq (\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0 \\ AE^{\hat{\beta}} \left[\frac{(\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0}{e} \right]^{\hat{\alpha} - \hat{\beta}} & E \geq (\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0 \end{cases} \quad (3-4)$$

其中 $\hat{\alpha} = \alpha + 1$ 和 $\hat{\beta} = \beta + 1$ 是累积能量分布高能端和低能端的幂律指数， E_0 是一个特征能量。需要注意的是，两个对数正态函数的累积能量分布应该具有复杂的形状。简单的幂律函数是不够的。因此我们只是用 Band 函数来拟合累积能量分布。如图 3-4A 所示，这个函数拟合得很好。考虑到灵敏度阈值附近可能存在的选择效应（这将弥补数据中低能爆发的不足），我们认为 Band 函数对累积分布函数的描述是合理的。

在拟合过程中，我们排除了那些能量低于 90% 探测阈值 ($E_{\text{th}} = 3.6 \times 10^{36}$ erg) 的爆发，这些爆发的数量只占了总样本的 1%。然后，我们随机抽取样本中 90% 的爆发，得到累积能量分布。我们重复这一过程 1000 次，并用幂律函数和 Band 函数拟合这 1000 个累积能量分布。中心极限定理使得拟合参数趋近于高斯分布。我们使用高斯分布的平均值和标准差作为拟合参数的标准值和误差。图 3-4A 是累积能量分布的拟合结果。单一幂律函数拟合的指数为 $\hat{\alpha} = -0.08 \pm 0.01$ 。Band 函数拟合的指数分别为 $\hat{\alpha} = -0.22 \pm 0.01$ 和 $\hat{\beta} = -3.27 \pm 0.34$ ，拐点为 $(1.1 \pm 0.2) \times 10^{39}$ erg。考虑到拟合的误差以及样本的选择效应，高能端的指数与 CHIME 的结果是不矛盾的。

另外，我们也设置了一系列的能量阈值，然后用单一幂律函数拟合累积能量分布。如图 3-4B 所示，随着能量阈值的增加，单一幂律函数的指数也在增加，而并非收敛到某个值。这再次表明，单一幂律函数不足以描述这个快速射电暴的能量分布。

3.1.4 讨论

3.1.4.1 与其它重复暴的比较

FRB 20121102A、FRB 20190520B 和 FRB 20201124A 是被 FAST 探测到大量爆发并被仔细研究过的三个重复快速射电暴。FRB 20121102A 是第一个已知的重复快速射电暴 (Spitler et al., 2014, 2016)。FRB 20190520B 是在 FAST 的漂移扫描多科学目标同时巡天项目中发现的一个重复快速射电暴 (Li et al., 2019; Niu et al., 2022a)。这两个快速射电暴都被发现在空间位置上与持续射电源 (PRS) 有关 (Chatterjee et al., 2017; Marcote et al., 2017; Niu et al., 2022a)。FRB 20201124A 也与持续射电源有关，但是它不是一个点源，而是在空间上延展的 (Ravi et al., 2022; Piro et al., 2021)。

这三个快速射电暴的能量分布可以使用 FAST 的数据集直接相互比较，以减少使用不同望远镜系统可能造成的选择偏差。图 3-5 以概率密度分布和累积密度分布的形式展示了这三个快速射电暴的能量分布。概率密度分布和累积密度分布都表明，这三个快速射电暴的能量分布并不一致。

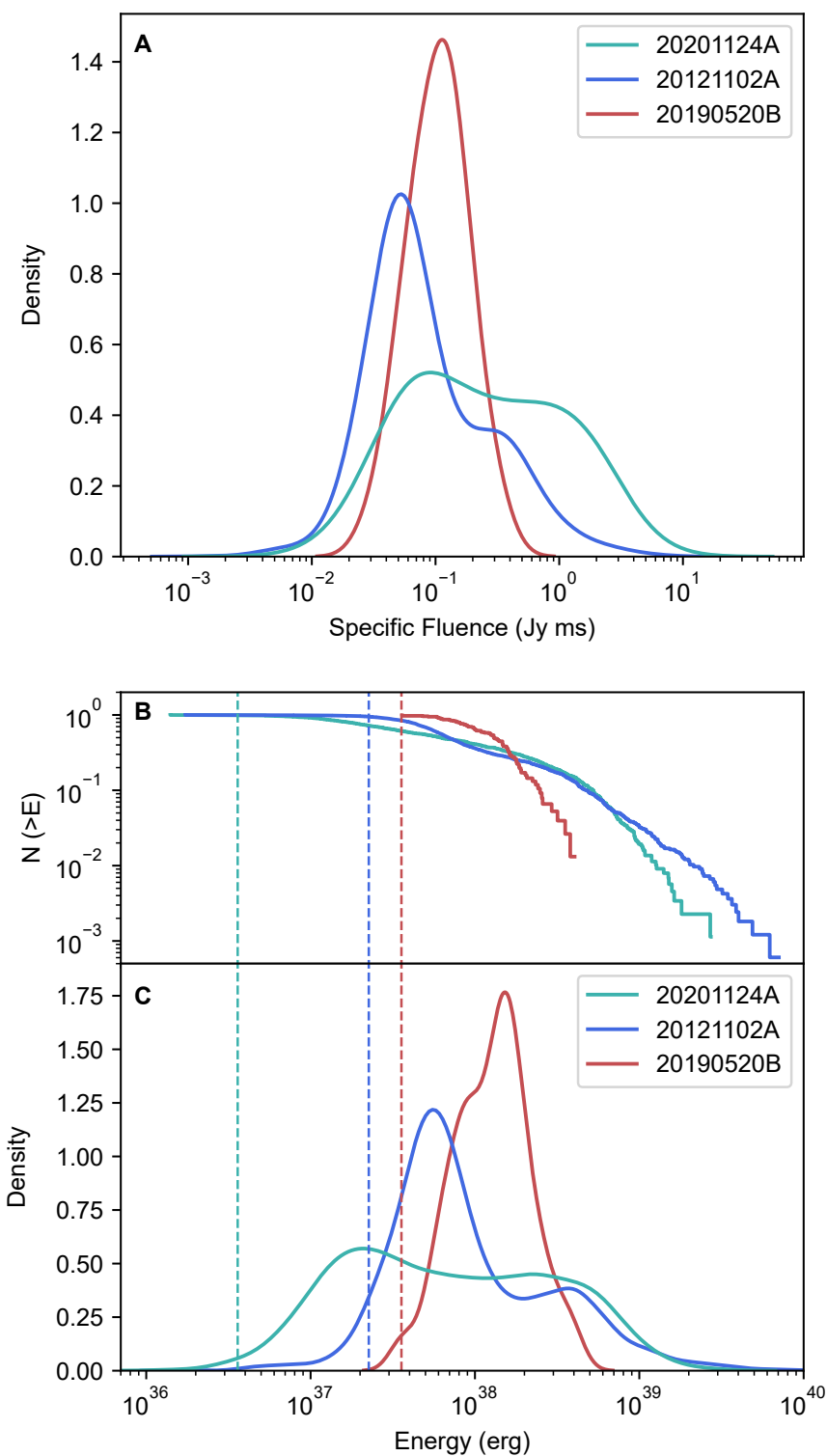


图 3-5 FRB 20201124A (绿色)、FRB 20190520B (红色) 和 FRB 20121102A (蓝色) 的流量和能量分布。A 是对三个 FRB 的流量的核密度估计 (KDE)。B 和 C 是三个 FRB 的累积能量分布和 KDE。虚线为探测阈值。

表 3-2展示了三个重复快速射电暴的爆发能量。观测到的总能量 E_{radio} 是在射电波段观测到的所有爆发能量的总和，通过公式3-5修正为爆发期间释放的总能量。

$$E_{\text{bursts}} = E_{\text{radio}} \times F_b \times \eta^{-1} \times \zeta^{-1}, \quad (3-5)$$

其中， E_{bursts} 是 FRB 源在爆发期间发射的总能量， F_b 是 beam 因子， η 是辐射效率，归一化为 $\sim 10^{-5}$ （与 FRB 20200428 的量级类似）， ζ 是观测占空比。例如，这次对 FRB 20201124A 的观测是在 4 天内分 4 次进行的，每次观测 1 小时。因此，占比空 ζ 估计为 $(4 \times 1 \text{ hour}) / (4 \times 24 \text{ hours}) = 1/24$ 。

表 3-2 三个快速射电暴辐射的能量比较

Name	ObDays (day)	ObTimes T_{obs} (hour)	Total Observed Energy ¹ E_{radio} (erg)	Averaged Energy ² \bar{L}_{radio} (erg/s)	Total Energy ³ E_{bursts} (erg)
FRB 20201124A	4	4	1.60×10^{41}	1.11×10^{37}	3.85×10^{46}
FRB 20201124A-0928	1	1	1.02×10^{41}	2.84×10^{37}	2.46×10^{46}
FRB 20121102A	47	59.5	3.41×10^{41}	1.59×10^{36}	6.47×10^{46}
FRB 20190520B	11	18.5	1.10×10^{40}	1.65×10^{35}	1.56×10^{45}

¹ 观测到的所有爆发的各向同性射电能量之和。

² $E_{\text{radio}}/T_{\text{obs}}$

³ $E_{\text{bursts}} = E_{\text{radio}} \times [(\zeta = \text{ObTimes}/\text{ObDays})^{-1} \times (\eta = 10^{-5})^{-1} \times (F_b = 0.1)]$

与其它重复快速射电暴相比，在相同时间内，FRB 20201124A 辐射的平均能量最多，尤其是在 2021 年 9 月 28 日这天。取 $\eta = 10^{-5}$ 和 $F_b = 0.1$ ，9 月 28 日释放的总爆发能量达到了 $(2.46 \times 10^{46} \text{ erg})\eta_{-5}^{-1}F_{b,-1}$ 。与磁星的总磁能 $E_{\text{mag}} = (1/6)B_p^2 R^3 \sim (1.7 \times 10^{47} \text{ erg})B_{p,15}^2 R_6^3$ 相比，这一天发射的爆发能量已经超过了磁星总能量的 14.3% $\eta_{-5}^{-1}F_{b,-1}$ 。这样的辐射效率甚至比 FRB 20121102A 还要高 (Li et al., 2021b)。这就要求磁星模型有着相当高的射电发射效率，否则磁星驱动快速射电暴辐射的模型就不适用了。对于磁星模型来说，由于同步辐射效率很低，因此我们的结果更倾向于 FRB 的磁层模型，正如在射电脉冲星 (Kumar et al., 2017; Yang et al., 2018; Lu et al., 2020; Zhang, 2022) 中观测到的那样，磁层模型可以有更高的效率。如果中心天体不是磁星，而是一个吸积黑洞系统 (Sridhar et al., 2021)，那么同步辐射模型可能仍然适用，因为它的总能量不受磁星总磁能的限制。

3.1.4.2 与另一种爆发定义比较

由于快速射电暴有着复杂的形态，因此到目前为止，还没有一个好的、明确的“一个爆发”的定义。这里我们考虑了两种定义方式。第一种定义是基于爆发流量，将高于探测流量阈值的脉冲轮廓视为独立的爆发。考虑到望远镜实际灵敏度的复杂变化，比如爆发的带宽限制和射频干扰等，出于保守考虑，我们使用噪声水平 3σ 作为探测流量阈值。这个定义也是之前工作中使用较多的定义，与

FRB 20121102A (Li et al., 2021b) 和 FRB 20190520B (Niu et al., 2022a) 使用的爆发定义一致。在下文中，我们称这种定义为组合爆发定义 (CBD)。

另一种定义方法是根据爆发在时间-频率图中的形态特征来区分爆发，即把在时频图中可以区分的脉冲作为不同的爆发来处理。我们称这种定义为分离爆发定义 (SBD)。因此，图 3-6 中的事件在 SBD 下包含两个爆发，而在 CBD 下只包含一个爆发。我们手动将所有爆发按照 SBD 进行分离，并独立进行流量校准。

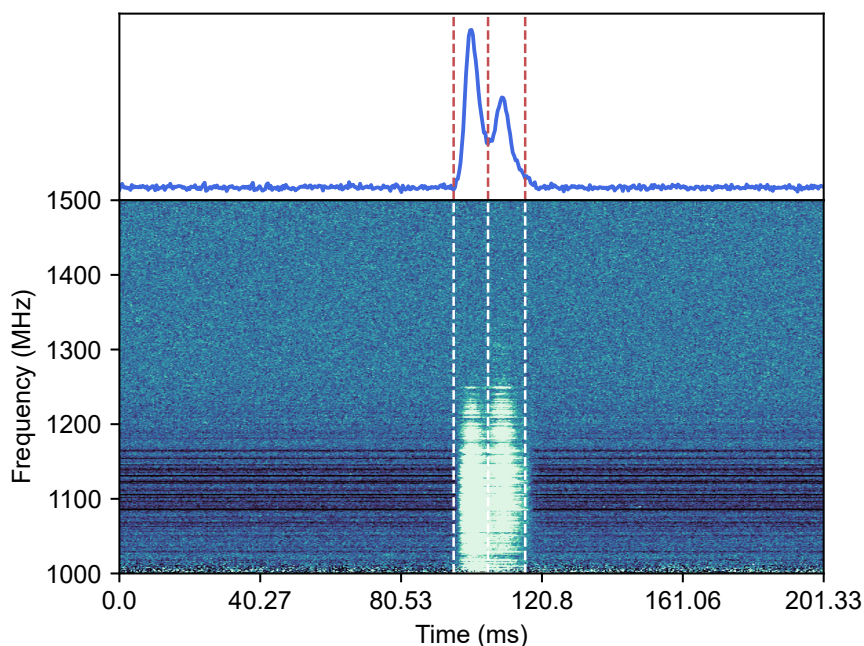


图 3-6 FRB 20201124A 的爆发示例。

图 3-6 展示了 SBD 下爆发的等待时间分布，它仍然是一个双峰分布，可以用两个对数正态函数拟合，峰值对应的等待时间分别是 13.56 ms 和 10.05 ms。右峰的峰值时间与 CBD 下的等待时间一致。但是左峰的等值时间明显缩短。另外，在两种爆发定义下，流量和能量表现出不同的分布。我们使用 K-S 检验来检查两种爆发定义下的能量分布是否属于同一分布，得到的 p 值为 0.2%，这意味着我们可以排除它们来自同一分布的假设。我们还使用 Band 函数拟合了 SBD 下的累积能量分布。拟合结果如图 3-7D 所示，指数分别为 $\hat{\alpha} = -0.18 \pm 0.01$ 和 $\hat{\beta} = -3.27 \pm 0.16$ ，拐点为 $(6.4 \pm 0.1) \times 10^{38}$ erg。这些结果与 CBD 下的拟合结果相比，指数在高端是一致的，但是在低能端有所不同。这表明，不同的爆发定义可能会导致不同的分析结果。因此，在研究 FRB 的能量分布时，需要指定一个爆发定义方案。

3.1.5 结论

FRB 20201124A 是由 CHIME 发现的一个重复快速射电暴 (CHIME/FRB Collaboration, 2021)。FAST 已经对该源进行了多次监测。除了早期的观测活动外，我们在本系列论文中研究了 2021 年 9 月 25-28 日非常活跃的 4 天发射活动，主要

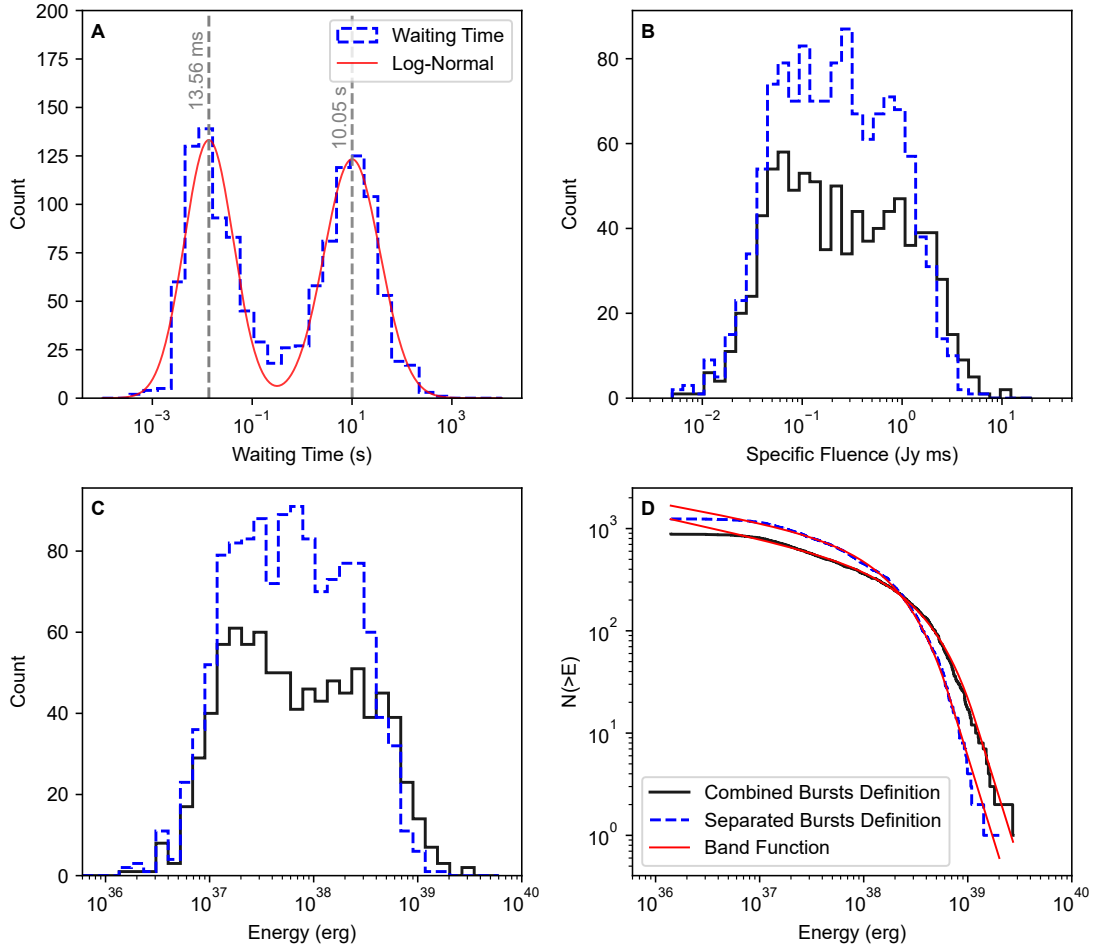


图 3-7 A, 使用 SBD 的 FRB 20201124A 爆发的等待时间分布。红线表示对数正态拟合。B, CBD (黑色实线) 和 SBD (蓝色虚线) 爆发的流量分布。C, 使用 CBD 和 SBD 的爆发的能量分布。D, 使用 CBD 和 SBD 的爆发的累积能量分布, 红线为 Band 函数拟合。

结论如下。

(1) 使用我们的 CBD 定义方法, 在 9 月 25 日至 9 月 28 日期间共探测到 881 个爆发。

(2) 事件率在 4 天内呈指数增长, 9 月 29 日之后下降为零。

(3) FRB 20201124A 的等待时间呈现双峰结构, 可以用两个对数正态函数很好地拟合。较长的等待时间在 10 秒左右达到峰值, 并且这一峰值对爆发定义不敏感。它比上一次活跃期的等待时间要短得多 (Xu et al., 2022b), 这表明它与源的活跃程度有关。

(4) 较短的等待时间在 51 ms 或 14 ms 附近达到峰值, 这取决于爆发的定义。

(5) 在这 4 天内的最高事件率达到了 542 次/小时, 超过了过去探测到的所有 FRB, 包括 122 次/小时的 FRB 20121102A (Li et al., 2021b) 和 FRB 20201124A 本身, 后者在上一个活跃期的最高事件率为 45.8 次/小时 (Xu et al., 2022b)。在这一时期释放的爆发总能量是磁星总能量的很大一部分, 这对同步辐射机制和甚至磁星源模型提出了挑战。

(6) 能量分布不能用单一幂律函数来描述。能量的累积分布可以用一个指数连接的分段幂律函数 (Band 函数) 很好地拟合。低能段和高能段的斜率分别为 $\hat{\alpha} = -0.22 \pm 0.01$ 和 $\hat{\beta} = -3.27 \pm 0.23$ 。

(7) 三个活跃的重复快速射电暴, 即 FRB 20121102A、FRB 20190520B 和 FRB 20201124A 的能量分布并不相同。这表明重复快速射电暴可能具有多样的辐射特性。

3.2 FRB 20220912A

3.2.1 引言

FRB 20220912A 是由 CHIME/FRB 合作组在 2022 年 9 月 12 日发现的一个新的重复快速射电暴 (McKinven et al., 2022)。在三天内, CHIME 探测到了九次爆发, 这表明这个源可能是一个高度活跃的重复快速射电暴。根据 McKinven et al. (2022) 的报道, FRB 20220912A 的色散值为 $\sim 220 \text{ pc cm}^{-3}$, 法拉第旋量 (RM) 值为 0.6 rad m^{-2} 。这个源的高活跃度使得 DSA-110 合作组能够进行快速定位, 发现了这个源的宿主星系 (Ravi et al., 2023)。根据 Ravi et al. (2023) 的报道, FRB 20220912A 的宿主星系的红移为 0.077。考虑到银河系贡献的色散值为 125 pc cm^{-3} (Cordes et al., 2002) 或 122 pc cm^{-3} (Yao et al., 2017), 以及银晕的贡献为 10 pc cm^{-3} (Keating et al., 2020), 猜测这个源的宿主星系对于 DM 的贡献小于 50 pc cm^{-3} 。这与另外两个活跃的重复快速射电暴不同, FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的的宿主星系贡献了它们色散值的绝大部分 (Chatterjee et al., 2017; Niu et al., 2022a)。自从 FRB 20220912A 发现以来, 许多望远镜和望远镜阵列都探测到了这个源的爆发 (Herrmann, 2022; Ravi, 2022; Pellicciari et al., 2022; Fedorova et al., 2022; Feng et al., 2023b; Kirsten et al., 2022a; Zhang et al., 2022c; Perera et al.,

2022; Sheikh et al., 2022; Yu et al., 2022; Rajwade et al., 2022; Bhusare et al., 2022; Ould-Boukattine et al., 2022), 证实了它的高亮度和活跃度。

为了进一步了解快速射电暴的起源和辐射机制,对大量爆发样本进行统计分析和特性研究至关重要。从经验上来讲,快速射电暴可以分为两类,非重复快速射电暴和重复快速射电暴,后者只占整个快速射电暴群体的一小部分。只有极少数的重复快速射电暴表现出每小时几十到几百次的事件率,如 FRB 20121102A (Li et al., 2021b; Jahns et al., 2023), FRB 20200120E (Nimmo et al., 2023) 和 FRB 20201124A (Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2022b)。对快速射电暴的偏振的研究可以揭示快速射电暴周边环境的复杂性。FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 都显示出异常高且多变的法拉第旋量 (Michilli et al., 2018b; Hilmarsson et al., 2021a; Anna-Thomas et al., 2023), 而 FRB 20201124A 则显示出短时间不规则的 RM 震荡 (Xu et al., 2022b)。FRB 20180916B 的 RM 变化也超过了 40% (Mckinven et al., 2023a)。最近, CHIME 报告了对 12 个重复快速射电暴的偏振测量,发现相当一部分快速射电暴在几个月内经历了几十到几百的 RM 变化 (Mckinven et al., 2023b)。这些事实表明,大多数快速射电暴可能位于一个复杂的、动态演化的磁化环境中,如超新星遗迹、脉冲星风星云或带有大质量伴星的双星系统 (Feng et al., 2022a; Wang et al., 2022b; Zhao et al., 2023; Yang et al., 2023)。

在这里,我们报告了 FAST 对 FRB 20220912A 的观测结果。FAST 是世界上最大的单口径射电望远镜,它的高灵敏度和高时间分辨率使得它成为研究快速射电暴的理想工具。FAST 的观测结果将有助于我们更好地理解 FRB 20220912A 的辐射特性和起源机制。

3.2.2 观测与数据处理

FAST 对 FRB 20220912A 的观测是从 2022 年 9 月 28 日开始的。使用 19 波束接收机的中心波束指向了 $RA=23^{\text{h}}09^{\text{m}}04.9^{\text{s}}$, $Dec=+48^{\circ}42'25.4''$ (Ravi et al., 2023)。在 2022 年,一共进行了 17 次观测,总曝光时间为 8.67 小时。在每次观测的最开始,我们注入了高频率的定标信号,以进行后续的流程和偏振校准。观测数据以 $49.152 \mu\text{s}$ 的时间分辨率记录,覆盖了 1 – 1.5 GHz 的频率带宽,共有 4096 个频率通道。

我们使用了与 Zhang et al. (2022b) 相同的数据处理流程来进行爆发搜索。根据 CHIME 的报告,FRB 20220912A 的 DM 值约为 220 pc cm^{-3} 。我们使用这个 DM 值对数据进行消色散处理,并通过二分类模型²来确定数据段中是否存在爆发。此外,我们还使用 presto (Ransom, 2001) 来交叉验证搜索结果。一共探测到了 1076 次爆发。

我们使用辐射计公式来估计每个爆发的流量,其中的系统温度 T_{sys} 和望远镜增益 G 都是作为天顶角和观测频率的函数来进行估计的 (Jiang et al., 2020)。爆发的轮廓是通过对整个观测频率带宽进行平均得到的。爆发的峰值流量 S_{peak} 是

²<https://github.com/SukiYume/DRAFTS>

爆发轮廓的最大值。爆发的流量 F 是通过将爆发轮廓沿着时间进行积分得到的。等效宽度是通过将爆发的流量除以峰值流量得到的。能量是通过公式3-6来计算的，其中的 $\Delta\nu = 500 \text{ MHz}$ 是观测带宽。快速射电暴各向同性能量的计算取决于爆发的频谱形状 (Zhang, 2023)。如果频谱很宽（类似幂律函数），使用中心频率而不是带宽来估算能量更为合适。如果频谱很窄，尤其是在望远镜观测带宽范围内有可测量的爆发宽度，那么在计算中使用带宽更为合适。重复暴通常频谱较窄，因此使用宽度而非中心频率进行计算更为合适。

$$E = 10^{39} \text{ erg} \frac{4\pi}{1+z} \left(\frac{D_L}{10^{28} \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{F}{\text{Jy} \cdot \text{ms}} \right) \left(\frac{\Delta\nu}{\text{GHz}} \right), \quad (3-6)$$

其中 $D_L = 360.86 \text{ Mpc}$ 是 FRB 20220912A 的光度距离，对应的红移为 $z = 0.0771$ (Ravi et al., 2023)，采用标准的 Planck 宇宙学模型 (Planck Collaboration et al., 2016)。

偏振定标是使用 PSRCHIVE³，根据两路偏振注入的人造噪声校准两路偏振的增益和相位差来实现的。

3.2.3 结果

3.2.3.1 事件率与事件序列分析

图 3-8F 显示了每次观测的持续时间，以及探测到的爆发数量和事件率。在 17 次观测中，我们一共探测到了 1076 次爆发，详细信息见表 3-3。其中有 8 次观测的事件率超过了 100 hr^{-1} ，最高的事件率为 390 hr^{-1} ，出现在第一次观测中，仅次于 FRB 20201124A 的 542 hr^{-1} (Zhang et al., 2022b)，这表明 FRB 20220912A 是一个高度活跃的重叠快速射电暴。

我们在每次观测中计算了爆发的等待时间。类似于 FRB 20121102A 和 FRB 20201124A，FRB 20220912A 也表现出了明显的双峰等待时间分布（图 3-9）。我们使用两个对数正态函数来拟合等待时间分布，峰值分别位于 18 s 和 51 ms。

泊松过程的等待时间是指数分布的。在这里，我们也使用了指数函数来拟合 FRB 20220912A 的等待时间。使用 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验来评估对数正态和指数拟合的优劣，得到的 p 值分别为 0.969 和 0.963，这意味着这两种函数都可以很好地描述等待时间分布。指数函数的事件率为 $0.041 \pm 0.002 \text{ s}^{-1}$ ，或者 $147 \pm 7 \text{ hr}^{-1}$ ，这与观测到的平均事件率 $1076/8.67 \sim 124 \text{ hr}^{-1}$ 非常接近。因此，指数函数的事件率可以被认为是 FRB 源的活跃度，等待时间分布的右峰代表了 FRB 源在统计周期内的活跃度。左峰对应的等待时间约为 51 ms，这与 FRB 20201124A 的等待时间分布非常相似 (Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2022b)。FRB 20121102A 的左峰等待时间约为 3 ms (Li et al., 2021b)，与 FRB 20220912A 有着显著的不同。然而，FRB 20121102A 似乎在 51 ms 附近有一个较弱的次峰 (Li et al., 2021b 图 3)。51 ms 的特征等待时间可能与快速射电暴辐射机制有关。

³<https://psrchive.sourceforge.net/>

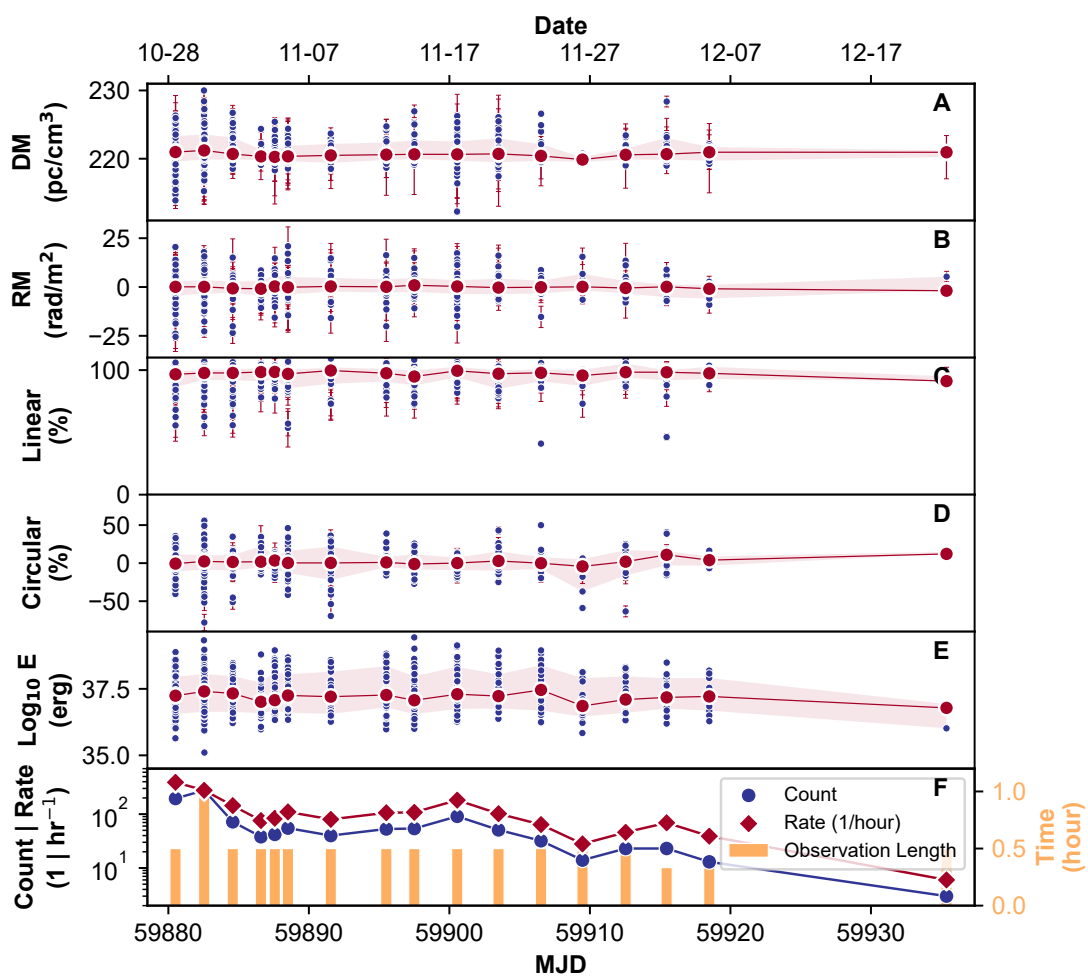


图 3-8 FAST 观测 FRB 20220912A 的观测信息。A, E 分别是爆发的 DM、RM、线偏振度、圆偏振度和能量。每个爆发用一个蓝色点表示，红色点表示每日的中位数，浅红色区域表示 1σ 范围。F - 蓝色线表示每次观测的爆发数量，红色线表示事件率，黄色条表示观测持续时间。

表 3-3 FRB 20220912A 爆发的参数列表

Burst ID	MJD ¹	DM (pc cm ⁻³)	PeakFlux ² (mJy)	Width ³ (ms)	PeakFrequency ⁴ (MHz)	BandWidth ⁵ (MHz)	Fluence ² (Jy ms)	Energy (erg)	RM (rad m ⁻²)	Linear (%)	Circular (%)
01	59880.497624400	220.24±1.76	117.4±1.4	4.70	1479.5±5.4	122.4±9.3	0.552±0.007	3.979(49)e+37	-4.3 ^{+2.1} _{-1.9}	95.0±1.4	5.3±1.0
02	59880.497624673	217.82±2.9	115.5±1.4	3.72	1366.2±4.3	231.4±15.0	0.429±0.005	3.097(38)e+37	-0.3 ^{+0.8} _{-0.8}	98.5±1.8	-16.9±1.3
03	59880.497684224	221.87±0.06	242.8±3.0	4.09	1300.0±13.7	735.7±896.2	0.993±0.012	7.161(88)e+37	1.1 ^{+0.2} _{-0.2}	97.7±1.0	3.3±0.7
04	59880.497945389	220.88±3.78	174.6±2.1	3.54	1381.0±6.8	321.4±28.0	0.619±0.008	4.463(55)e+37	0.5 ^{+0.3} _{-0.3}	98.6±1.4	-6.7±1.0
05	59880.497991706	220.91±0.24	32.1±0.4	4.06	1095.7±11.2	251.7±34.6	0.130±0.002	9.398(115)e+36	-3.1 ^{+1.5} _{-1.8}	94.5±6.7	-16.1±4.9
06	59880.498128495	219.64±5.08	95.2±1.2	4.89	1564.0±56.7	338.4±65.8	0.465±0.006	3.355(41)e+37	2.1 ^{+1.2} _{-1.2}	90.6±1.6	7.2±1.2
07	59880.498199601	223.30±0.17	138.2±1.7	8.97	1449.5±26.3	332.1±63.9	1.240±0.015	8.942(109)e+37	0.1 ^{+0.4} _{-0.3}	97.2±0.9	14.8±0.6
08	59880.498605364	222.98±1.36	96.5±1.2	8.65	1399.0±15.2	374.2±61.9	0.834±0.01	6.019(73)e+37	3.1 ^{+0.6} _{-0.6}	97.8±1.5	-2.7±1.0
09	59880.498635029	220.22±0.24	34.5±0.4	0.64	1004.4±22.4	110.3±34.3	0.022±0.0	1.592(19)e+36	-	-	-
10	59880.498915641	221.35±0.21	77.7±0.9	8.74	1083.0±5.5	256.5±16.1	0.679±0.008	4.898(59)e+37	1.9 ^{+0.6} _{-0.6}	98.7±2.2	-3.8±1.6

¹ 以 1.5GHz 为参考频率的爆发到达时间

² 使用 500MHz 带宽计算

³ 等效宽度

⁴ 从高斯拟合中获得

⁵ 高斯拟合的半高全宽

完整表格可在 ScienceDB <https://doi.org/10.57760/sciencedb.08058> 上找到。

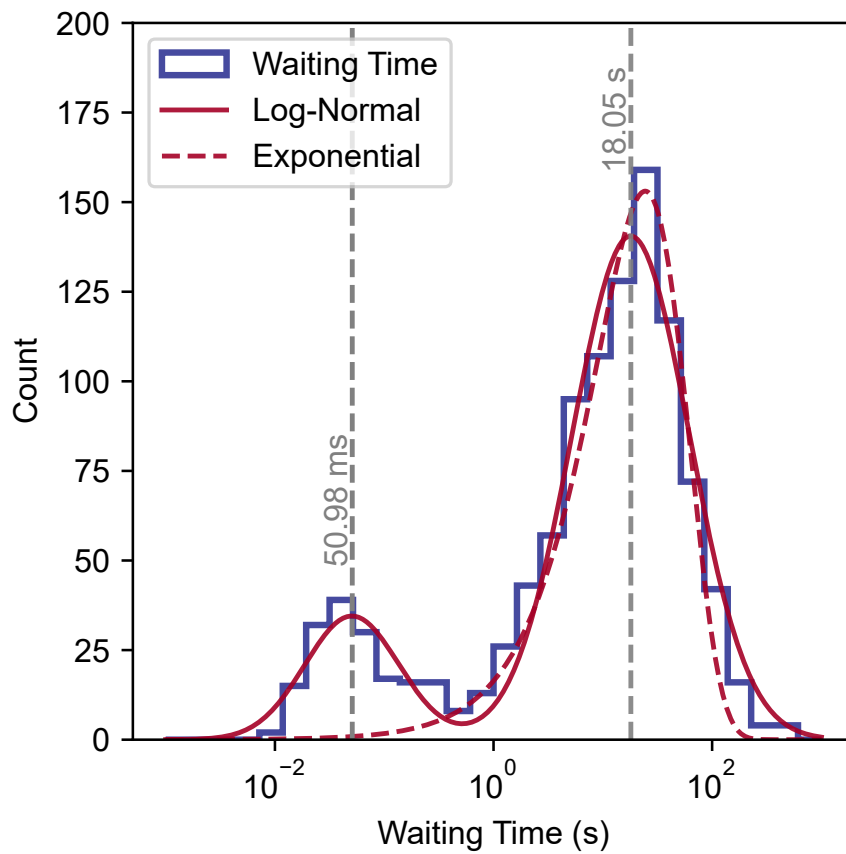


图 3-9 FRB 20220192A 的等待时间分布。红色实线表示使用两个对数正态函数拟合，红色虚线表示使用指数函数拟合。

周期搜索是快速射电暴研究的一个活跃领域。已经发现了三个非重复快速射电暴具有毫秒级别的准周期性 (Chime/Frb Collaboration et al., 2022)。对于重复快速射电暴, 没有发现短周期的报告 (Zhang et al., 2018; Li et al., 2021b; Niu et al., 2022a; Xu et al., 2022b)。在这里, 我们也对 FRB 20220912A 进行了周期搜索。我们使用了 Lomb-Scargle 周期图和相位折叠两种方法。Lomb-Scargle 周期图方法已经被广泛应用于非均匀采样的时间序列 (Lomb, 1976; Scargle, 1982), 因此适用于快速射电暴到达时间序列的周期搜索。相位折叠是一种简单而基础的周期搜索方法。我们假设 MJD-59880 为初始相位, 并计算了每个爆发的相位, 统计了在预设周期下最长的连续没有爆发的相位空间长度, 即空占比。我们在 1 ms 到 1000 s 的周期范围内进行了搜索, 计算了这些周期下的空占比。空占比越大, 意味着爆发在相位空间中的分布越集中, 对应的周期越可靠。这种方法类似于 Rajwade et al. (2020) 中使用的统计方法, 不同的是我们直接计算了爆发的相位, 使得这种方法更为高效和准确。然而, 这两种方法都没有找到爆发到达时间的有效周期。

只有 FRB 20121102A 和 FRB 20180916B 被发现具有潜在的长周期, 前者约为 157 天 (Rajwade et al., 2020; Cruces et al., 2021), 后者约为 16 天 (Chime/Frb Collaboration et al., 2020)。每个周期由活跃和宁静两个阶段组成 (类似于方波), 并且并非所有的活跃阶段都有爆发探测。在 2022 年对 FRB 20220912A 的观测中, 每次观测都有爆发被探测到, 因此我们无法从中探测到这种活跃-宁静交替的周期性。另外, 我们可以定义时间上的事件率变化为“光变曲线”, 来寻找可能的活跃度周期性。考虑到 FAST 观测的持续时间为 54 天, 我们只能搜索 2 天到 27 天的周期性。为了避免 1 天周期的观测干扰, 我们从 2 天周期开始搜索。使用 Lomb-Scargle 周期图, 我们没有找到 2 天到 27 天范围内的可靠周期性。

3.2.3.2 能量与带宽

能量是快速射电暴的基本特性之一, 它是一个可以直接反映快速射电暴辐射机制的物理量。快速射电暴的能量函数通常被认为是一个幂律函数, 在高端有一个截断 (Luo et al., 2018, 2020b; Lu et al., 2020; Zhang et al., 2021)。Li et al. (2021b) 对 FRB 20121102A 的低能爆发的探测揭示了快速射电暴可能具有多种辐射机制。图 3-10 显示了 FRB 20220912A 的能量函数, 以及随时间的变化。由于观测时长的不同, 能量函数是根据观测时长加权的。类似于 FRB 20121102A 和 FRB 20201124A (Li et al., 2021b; Aggarwal et al., 2021a; Jahns et al., 2023; Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2022b), FRB 20220912A 的能量函数不能用一个单一的函数来解释。我们使用两个对数正态函数来拟合能量函数, 对应的特征能量分别为 5.29×10^{36} erg 和 4.13×10^{37} erg。累积能量分布也不能用一个单一的幂律函数来拟合。我们使用两段幂律函数来拟合, 对应的幂律指数分别为 -0.38 ± 0.02 和 -2.07 ± 0.07 。图 3-10C 显示了能量随时间的分布, 能量似乎在时间上有演化的特征, 后期观测到的高能爆发数量减少。

在对时间-频率数据进行流量校准后, 我们计算了每个爆发在不同频率通道

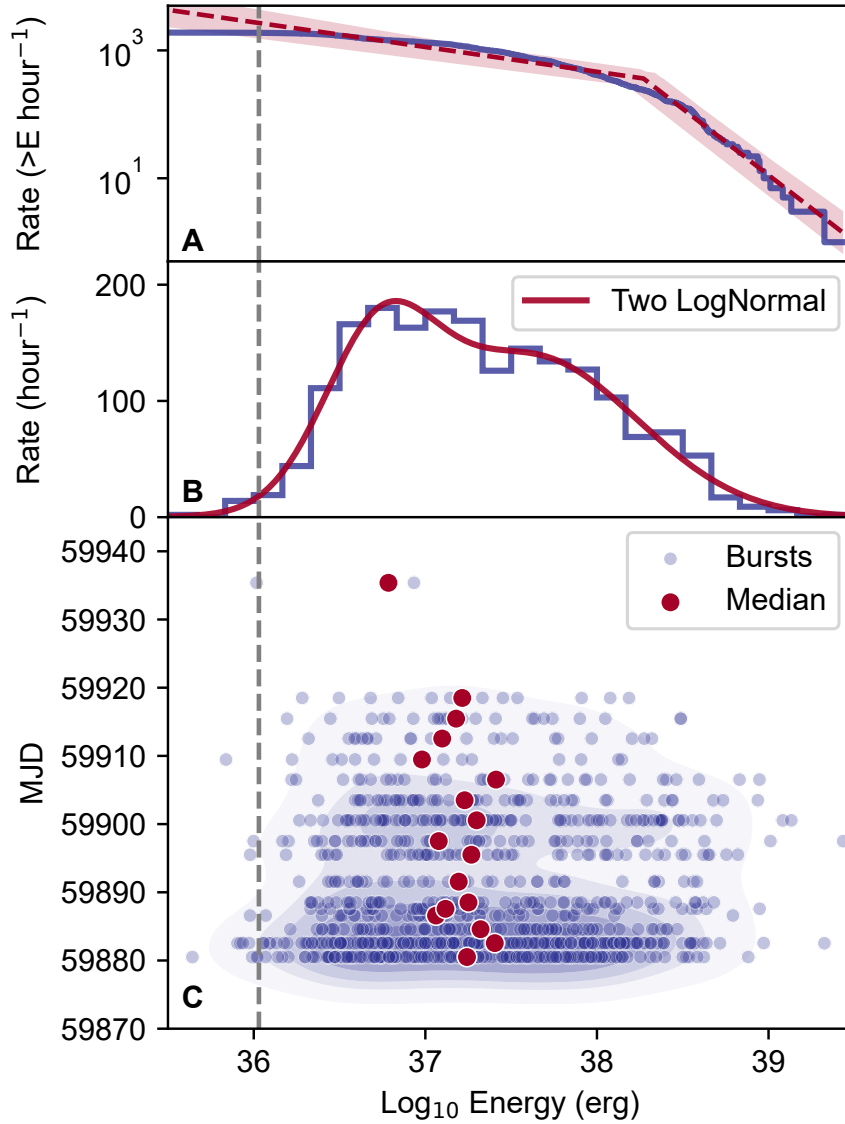


图 3-10 FRB 20220912A 的能量分布。A，能量函数的累积分布，蓝线表示累积能量分布，红色虚线表示的是使用分段幂律函数拟合的结果。B，能量函数的微分分布，蓝线表示能量函数的微分分布，红色虚线表示的是使用两个对数正态函数拟合的结果。C，爆发能量随时间的变化，蓝点表示每次爆发的能量，红点表示每次观测的中位数，蓝色轮廓表示爆发的二维核密度估计。

的积分流量。然后我们对所有爆发的流量进行平均，得到了 FRB 20220912A 的合成流量-频率谱。由于这些爆发的不同频率通道可能被标记为 RFI 通道，因此不同频率通道上用于平均流量的爆发数量是不同的。我们使用泊松计数误差作为统计误差，并使用一个简单的幂律函数来拟合合成谱的谱指数。

$$I = A \times F^\alpha + C \quad (3-7)$$

在图 3-11 中，我们展示了 FRB 20220912A 的合成流量-频率谱。可以看到在 1000 MHz 和 1200 MHz 附近有较大的误差，这是由于频繁的 RFI 干扰导致的，使得有效数据点较少。对于拟合，我们随机选择了 90% 的数据点进行 1000 次拟合，得到了 FRB 20220912A 的谱指数为 $\alpha = -2.60 \pm 0.21$ 。这是第一次对 FRB 的合成谱进行的测量。这样的谱可以用来测试快速射电暴的辐射机制（例如曲率辐射，[Yang et al., 2018](#)）。

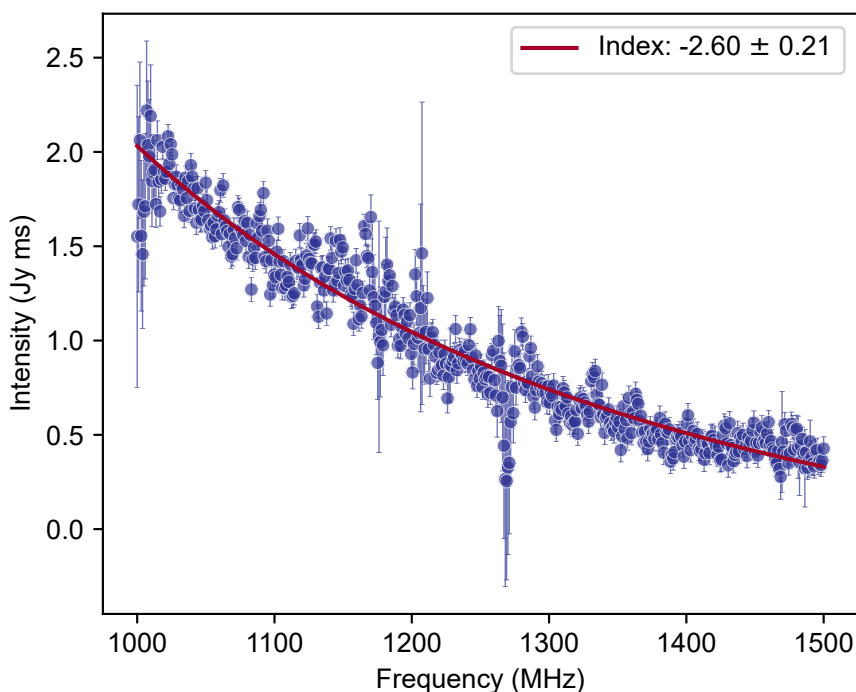


图 3-11 FRB 20220912A 的合成流量-频率谱。蓝色点表示每个频率通道的平均流量，红色线表示的是使用幂律函数拟合的结果。

尽管合成所有爆发后得到的合成谱符合幂律分布，但是很难用幂律模型来描述单个爆发的相对窄的带宽。基于当前的经验证据，高斯函数可能是描述单个爆发的频谱的一个可行的模型。之前的研究使用高斯模型来研究 FRB 20121102A 的频谱，拟合残差表明高斯分布可能作为快速射电暴频谱的有效模型（[Aggarwal et al., 2021a](#) 图 5）。类似地，[Zhou et al. \(2022\)](#) 使用高斯函数拟合了 FRB 20201124A 的频谱，并发现了中心频率的双峰分布。在这里，我们也尝试使用高斯函数来拟合单个爆发的频谱。

$$I = A \times \exp \left[-\frac{(F - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (3-8)$$

其中我们使用拟合的 μ 作为中心频率 ν_0 , 使用拟合的半高全宽 $\text{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma$ 作为带宽 $\Delta\nu$ 。由于 FAST 的带宽有限, 一些爆发可能在 FAST 的带宽范围之外有辐射, 因此没有完全记录。这会给带宽拟合结果带来额外的不确定性。图 3-12 中展示了九个爆发的带宽拟合结果。

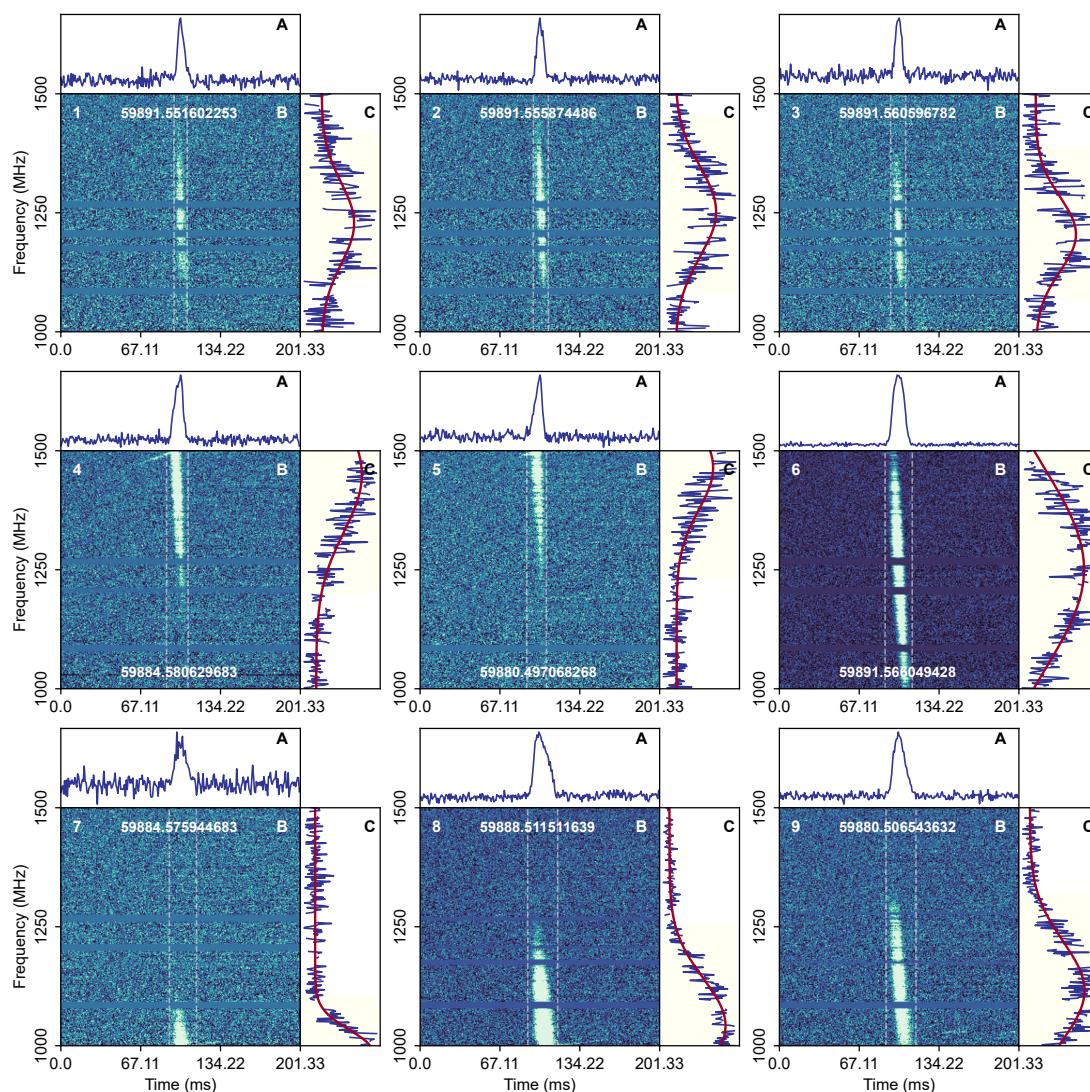


图 3-12 FRB 20220912A 爆发带宽拟合的示例。

图 3-13 展示了中心频率 (ν_0) 和带宽 ($\Delta\nu$) 的分布。为了尽可能减少观测带宽的影响, 我们排除了中心频率在 1 – 1.5 GHz 范围外, 和中心频率在观测带宽边缘 (1 GHz 和 1.5 GHz) 附近 50 MHz 以内并且拟合带宽小于 100 MHz 的爆发, 因为这些爆发的拟合不确定度很高。我们分析了剩下的爆发的中心频率和带宽的分布。FRB 20220912A 的爆发的中心频率主要集中在低频范围, 高频和低频的分布极不均匀。我们使用单个对数正态函数来拟合带宽分布。对数正态函数的峰

值位于 181 MHz，这表明 FRB 20220912A 的爆发具有非常窄的频谱。此外，我们没有发现中心频率和带宽之间的显著相关性。这与 Kumar et al. (2023) 从 Parkes 超宽带低频接收机探测到的 FRB 20180301A 的爆发中发现的趋势不同，这可能意味着实际观测带宽对这种分析有影响。

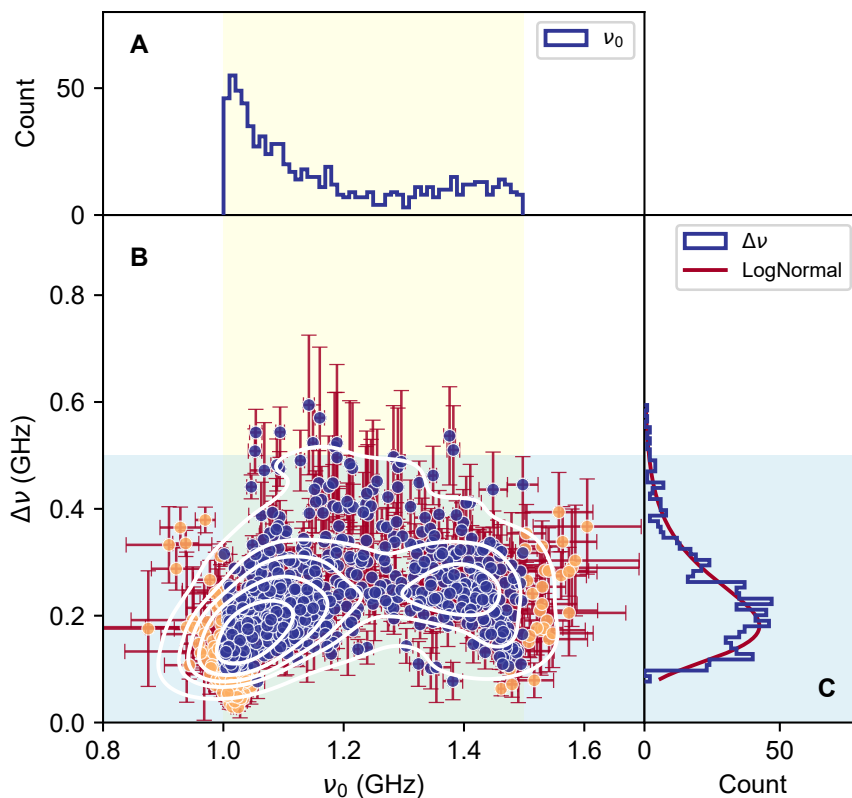


图 3-13 FRB 20220912A 的中心频率 (ν_0) 和带宽 ($\Delta\nu$) 的分布。蓝色的点和线表示的是中心频率在 1 – 1.5 GHz 范围内，和中心频率低于 1.05 GHz 或者超过 1.45 GHz，但是拟合带宽超过 100 MHz 的爆发。橙色的点表示的是不满足这些条件的点。A，中心频率的分布。B，中心频率和带宽的关系，白色的轮廓表示的是二维核密度估计，浅黄色和浅蓝色的背景表示的是有效观测频段 (1 – 1.5 GHz) 和有效观测带宽 (0.5 GHz)。C，带宽的分布，使用对数正态函数拟合，峰值在 181 MHz。

$\Delta\nu/\nu_0$ 是描述快速射电暴频谱窄度的一个更相关的参数。我们对 $\Delta\nu/\nu_0$ 的分布进行了更详细的分析。由于许多爆发在 FAST 的带宽范围之外有辐射 (1-1.5 GHz)，因此在我们的分析中只保留了在完全在 FAST 带宽范围内的爆发，以避免带宽选择效应。我们根据两个严格的标准选择爆发，即高斯拟合标准差的误差 $\delta\sigma$ 小于其本身，和爆发的半高全宽完全在 1.05 – 1.45 GHz 范围内，这两个标准。图 3-14 显示了这些爆发的 $\delta\nu/\nu_0$ 的分布。我们使用对数正态函数拟合了直方图分布，得到了 $\mu = -1.812 \pm 0.001$ 和 $\sigma = 0.475 \pm 0.002$ (第一个标准筛选出来的爆发，蓝线)，以及 $\mu = -1.718 \pm 0.002$ 和 $\sigma = 0.217 \pm 0.003$ (第二个标准筛选出来的爆发，红线)。从拟合结果中我们得到了它们的峰值 $e^{\mu-\sigma^2}$ 分别位于 0.13 和 0.17。我们还使用幂律函数拟合了累积 $\Delta\nu/\nu_0$ 分布，发现拟合并不理想，有较大的拟合误差。

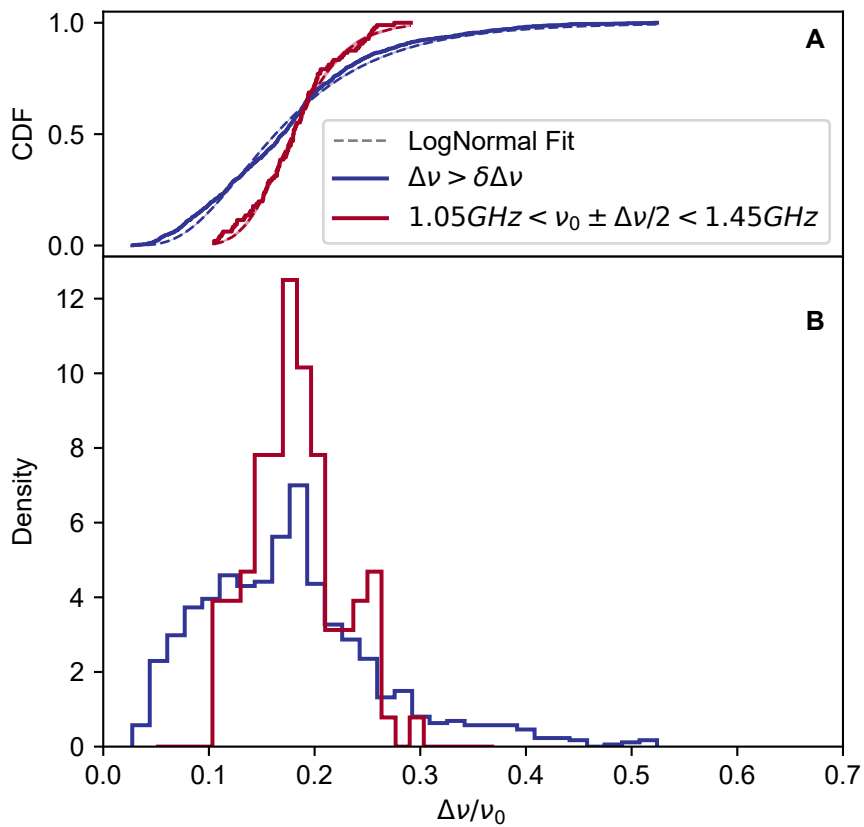


图 3-14 $\Delta\nu/\nu_0$ 的分布。A，累积分布函数。B，微分概率分布。蓝色的线表示的是高斯拟合标准差的误差小于其本身的爆发，红色的线表示的是拟合半高全宽完全在 1.05–1.45 GHz 范围内的爆发。

3.2.3.3 色散与偏振

爆发的色散值是使用 DM_Phase^4 计算的。我们得到的 DM 的中位数为 $220.70 \text{ pc cm}^{-3}$ ，标准差为 1.83 pc cm^{-3} ，这与 CHIME 的测量值 $\sim 220 \text{ pc cm}^{-3}$ (McKinven et al., 2022) 一致。线性拟合的斜率为 $d DM/d t < 8 \times 10^{-3} \text{ pc cm}^{-3} \text{ day}^{-1}$ ，表明 DM 并没有随时间变化的趋势。

由于法拉第效应，FRB 信号的偏振面在传播过程中会发生旋转。我们使用 RM 合成方法来拟合爆发的 RM，使用公式 3-9

$$\begin{pmatrix} I \\ Q' \\ U' \\ V \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{pmatrix} \quad (3-9)$$

其中 $\theta = RM\lambda^2$ 。我们选择了 RM 误差小于 10 rad m^{-2} 的爆发（共 881 个）进行展示。

RM 的中位数为 -0.08 rad m^{-2} ，接近 0 rad m^{-2} ，说明 FRB 20220912A 宿主星系贡献的 RM 和银河系贡献的 RM 相当，都是 16 rad m^{-2} (Hutschenreuter et al., 2022)。这么低的 RM 值意味着 FRB 20220912A 的周边环境可能非常干净。线性拟合的斜率为 $d RM/d t = 0.017 \pm 0.018 \text{ day}^{-1}$ ，表明 RM 也没有随时间变化的趋势。然而，其它几个活跃的重复快速射电暴，如 FRB 20121102A (Hilmars-son et al., 2021a)、20201124A (Xu et al., 2022b)、20190520B (Anna-Thomas et al., 2023)、20180916B (McKinven et al., 2023a) 和其它几个快速射电暴（20181030A, 20181119A, 20190117A, 20190208A, 20190303A, 20190417A, McKinven et al. 2023b）的 RM 值都很大，并且 RM 在月量级的时间尺度上会发生明显的变化。这些 RM 值很大的重复快速射电暴的观测表明，重复快速射电暴可能都与一些同步辐射持续射电源（超新星残骸、磁星风星云或小型活动星系核）有关，这些射电源的环境密度和磁化程度都很高 (Feng et al., 2022a)。与这些重复暴相反，FRB 20220912A 的偏振数据表明，大而变化的 RM 并不是产生活跃重复暴的必要条件。

如果存在噪声，测量到的线偏振度可能会被高估。因此，我们采用了经过去偏的频率平均总线偏振度 (Everett et al., 2001)

$$L_{\text{de-bias}} = \begin{cases} \sigma_I \sqrt{\left(\frac{L_i}{\sigma_I}\right)^2 - 1} & \frac{L_i}{\sigma_I} > 1.57 \\ 0 & \frac{L_i}{\sigma_I} \leq 1.57 \end{cases} \quad (3-10)$$

其中 σ_I 是 Stokes I 的离峰标准差， L_i 是时间采样点 i 的平均线偏振度。线偏振度和圆偏振度的计算公式为

⁴https://github.com/danielemichilli/DM_phase

$$L = \frac{\sum_i L_{\text{de-bias},i}}{\sum_i I_i} \quad \text{and} \quad V = \frac{\sum_i V_i}{\sum_i I_i} \quad (3-11)$$

其中 V_i 的定义与 L_i 类似。线偏振度和圆偏振度的不确定度的计算公式为

$$\sigma = \frac{\sigma_I}{I} \sqrt{N + N(\rho^2/I^2)} \quad (3-12)$$

其中 N 是爆发采样点的数量, ρ 是 $\sum_i L_{\text{de-bias},i}$ 或 $\sum_i V_i$, 取决于我们是计算线偏振度还是圆偏振度。

FRB 20220912A 的大部分爆发都表现出几乎 100% 的线偏振度, 有一部分爆发表现出明显的圆偏振度。图 3-15 显示了两个圆偏振度最大的爆发, 分别为 $-78.0 \pm 10.8\%$ 和 $-69.4 \pm 1.4\%$ 。

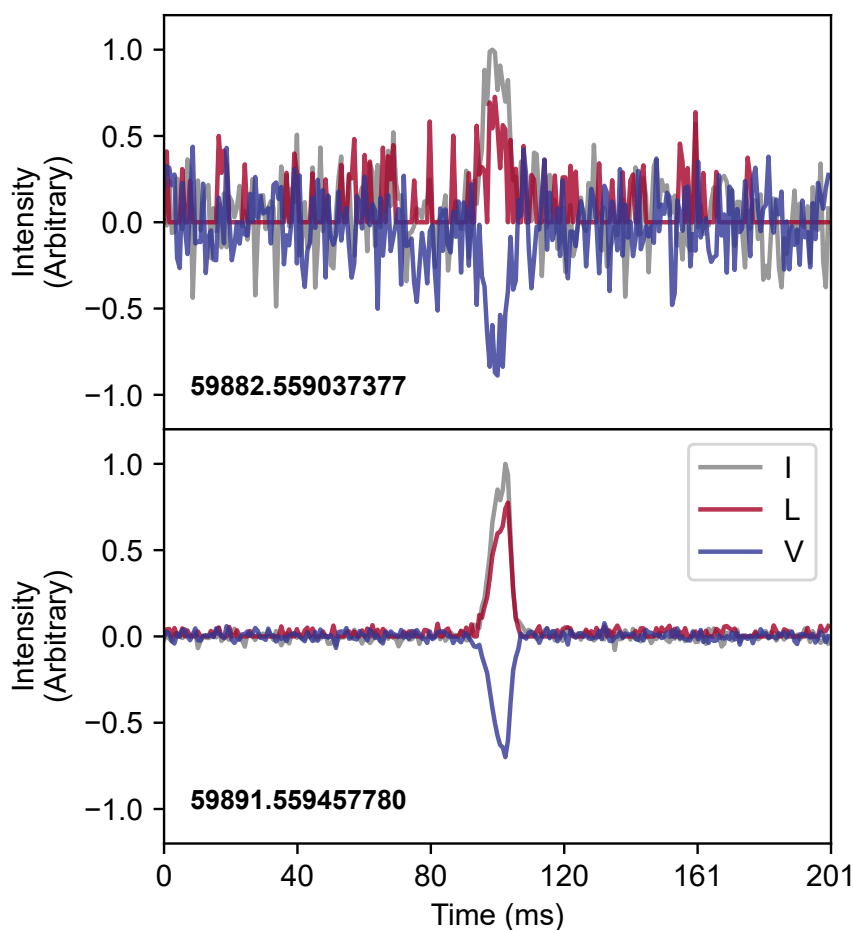


图 3-15 圆偏振度最高的两个爆发。黑色、红色和蓝色分别表示爆发的总强度、线偏振度和圆偏振度。

另一方面, FRB 20220912A 的圆偏振度的动态谱表现出多种形态。图 3-16 展示了 16 个爆发的圆偏振动态谱。可以看到一些在总强度动态谱中无法区分的爆发在圆偏振动态谱中表现为多个爆发, 例如爆发 1、2、7、11 和 16。那些在一个爆发中发生圆偏振变号的爆发, 在动态谱中可以看到子结构, 因此圆偏振变号

有可能是两个不同时间的子脉冲的圆偏振模式叠加导致的。关于快速射电暴圆偏振产生的机制目前还在广泛地讨论，还没有得出明确的结论 (Qu et al., 2023a)。曲率辐射机制预测，当视线在带电粒子束辐射张角之外时，曲率辐射可以是圆偏振的 (Wang et al., 2022d)。如果带电粒子束辐射的张角不是远大于洛伦兹因子 $1/\gamma$ ，那就可以看到圆偏振的变号，并且曲率辐射的平均圆偏振度小于 55% (Wang et al., 2022c)。另一种圆偏振的辐射机制是通过带电粒子束的相干逆康普顿散射产生 (Zhang, 2022; Qu et al., 2023b)。被逆康普顿散射的波可以通过不同相位和偏振角的线偏振波相加而形成圆偏振波，并且最大圆偏振度可以超过曲率辐射能产生最大圆偏振度 (Qu et al., 2023a)。FRB 20220912A 的圆偏振辐射特征可能是这两种辐射机制的组合。

一些爆发的圆偏振表现出随频率的变化 (图 3-17)。圆偏振随频率的变化可能是法拉第转换的迹象 (Xu et al., 2022b; Qu et al., 2023a)。然而，FRB 20220912A 的圆偏振度在频率上的振荡并没有明显的特征振荡频率，不像 FRB 20201124A (Xu et al., 2022b)。此外，法拉第转换通常需要严格的条件 (Qu et al., 2023a)，例如在一个双星系统中 (Wang et al., 2022b) 或者在一个超新星遗迹中 (Yang et al., 2023)。这样的环境与 FRB 20220912A 的小而不变的 RM 不符。

3.2.4 讨论

3.2.4.1 总能量预算

利用每个爆发的各向同性能量，可以对快速射电暴的总辐射能量施加限制，这可以用来限制快速射电暴的起源模型。在根据每个爆发的能量推导源辐射的总能量时，必须考虑各种因素，包括射电辐射效率 η_r 、波束因子 f_b 和观测占空比 ζ (Zhang, 2023)。

假设快速射电暴爆发的辐射是各向同性的，使用公式 3-6 计算爆发的能量。由于相干辐射的立体角 $\delta\Omega$ 通常很小，因此真正的爆发能量应该是各向同性爆发能量的 $\delta\Omega/4\pi$ 。此外，爆发可能存在于不可观测的方向。假设全局辐射波束为 $\Delta\Omega$ ，我们可以得到全局波束因子 $f_b = \Delta\Omega/4\pi$ 。

由于观测窗口的限制，我们无法观测到 FRB 源在观测期间发出的所有爆发。例如，我们对 FRB 20220912A 的观测持续了 17 天，总观测时间为 8.67 小时，这并不意味着在其他时间没有活动。因此，为了估计观测期间源的总能量，我们可以使用占空比缩放来补偿未观测到的 FRB 辐射能量。如果观测到的爆发的总射电能量为 E_b ，那么源的总能量应该是 $E_b \times f_b \times \eta_r^{-1} \times \zeta^{-1}$ 。

表 3-4 列出了我们对 FRB 20121102A (Li et al., 2021b)、FRB 20190520B (Niu et al., 2022a)、FRB 20201124A (Xu et al., 2022b; Zhang et al., 2022b) 和 FRB 20220912A (本文) 的总能量的估计，这些估计都是基于 FAST 的观测。在我们的计算中，我们假设了 η_r 和 f_b 的典型值分别为 10^{-4} 和 0.1。需要注意的是，文献中报告的 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的爆发能量是使用中心频率 1.25 GHz 而不是带宽 $\Delta\nu$ 计算的。因此，我们将这两个 FRB 的总能量除以 2.5，以便与其他 FRB

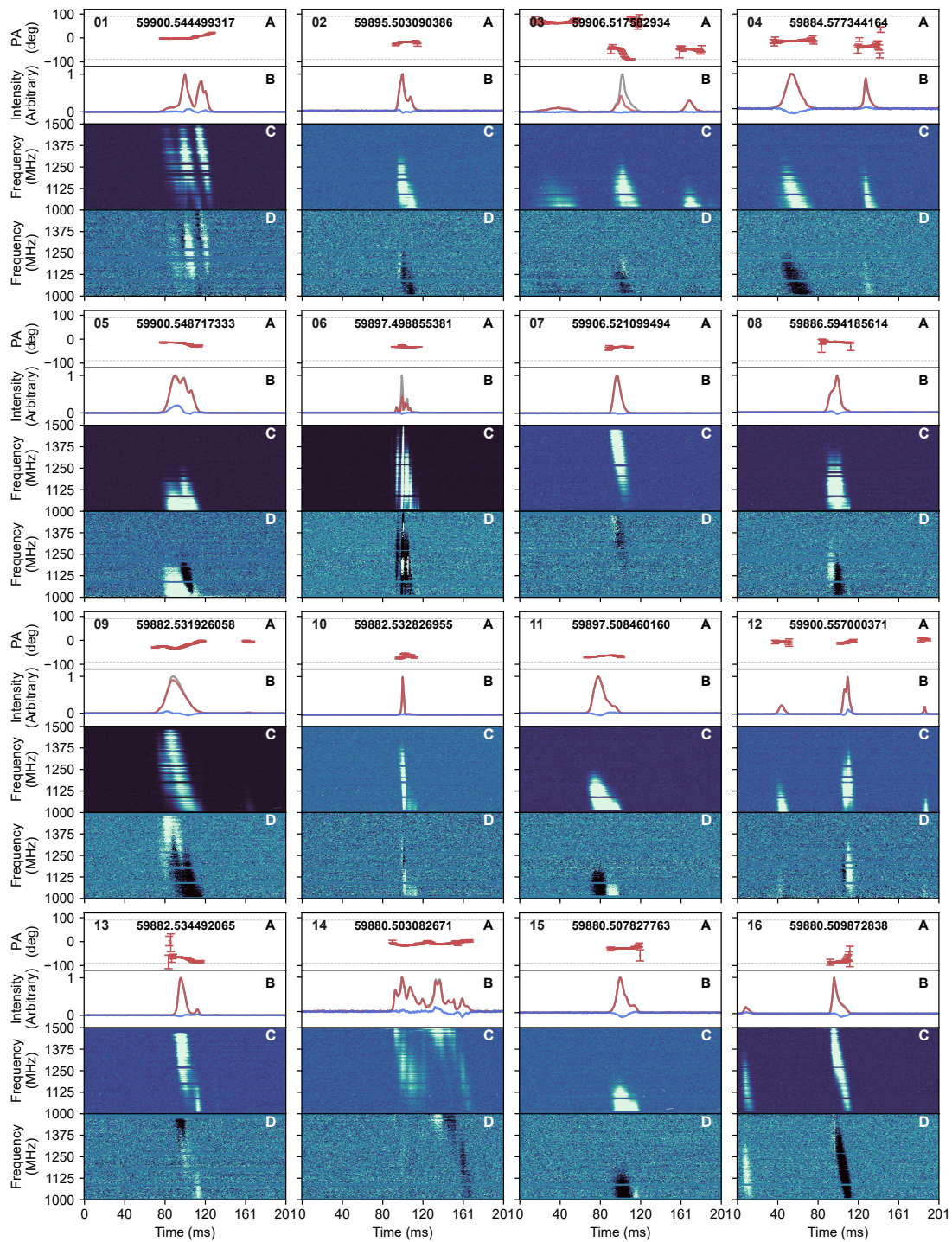


图 3-16 16 个爆发的圆偏振度动态谱，这些爆发的圆偏振都表现出随时间或者频率的变化。
 A，偏振位置角 (PA)。B，爆发的偏振轮廓，黑线、红线和蓝线分别表示总强度、线偏振度和圆偏振度。C，总强度动态谱。D，圆偏振动态谱。

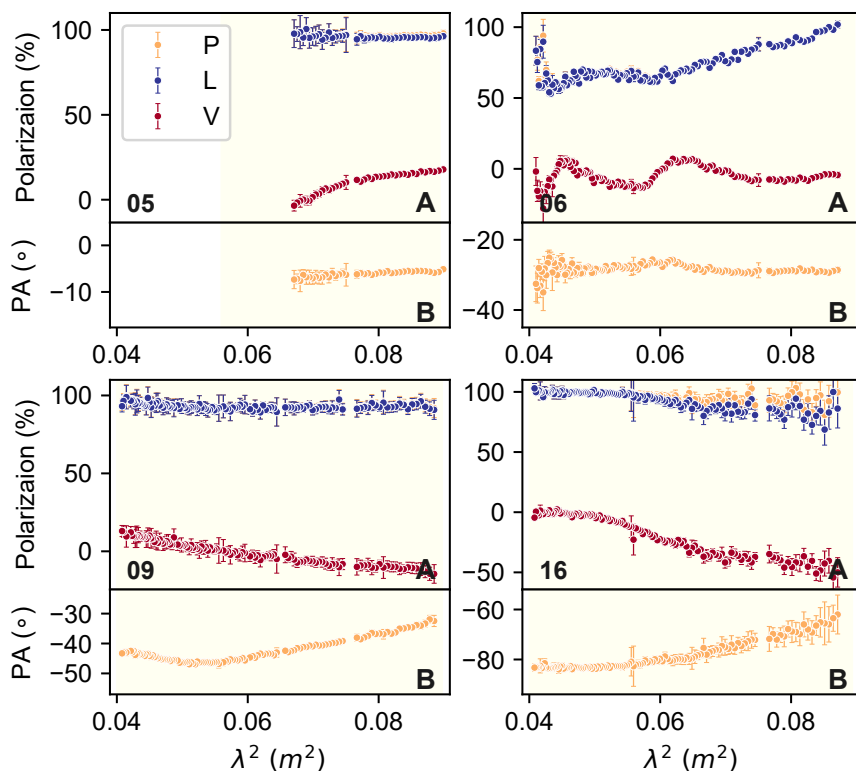


图 3-17 4 个圆偏振随频率振荡的爆发。A, 偏振度。B, 偏振位置角。

进行比较。FRB 20220912A 在 17 天内释放了 3.49×10^{45} erg 的能量，这超过了一个磁星的总磁能 ($E_B \sim 1.7 \times 10^{47}$ erg) 的 2%。这意味着如果射电效率确实如 10^{-4} ，那么磁星的磁能将在 850 天内完全耗尽。因此某些磁星模型（例如一些涉及相对论性激波的低效率模型）将面临能量预算问题。

表 3-4 四个快速射电暴辐射的能量比较

FRB Name	Duty Cycle ¹ ζ	Radio E ² (erg)	Averaged E ³ (erg hr ⁻¹)	Source E ⁴ ($\eta_{r,-4}^{-1} f_{b,-1}$ erg) ⁵
20121102A	0.053	1.36×10^{41}	2.29×10^{39}	2.59×10^{45}
20190520B	0.070	4.39×10^{39}	2.37×10^{38}	6.26×10^{43}
20201124A ⁶	0.063	1.65×10^{41}	2.01×10^{39}	2.60×10^{45}
20201124A ⁷	0.042	6.42×10^{40}	1.60×10^{40}	1.54×10^{45}
20220912A	0.021	7.42×10^{40}	8.55×10^{39}	3.49×10^{45}

¹ 观测的占空比，例如 FRB 20220912A 的观测占空比为 8.67 小时/17 天。

² 所有爆发的各向同性射电能量之和。

³ 总射电能量除以观测时间，例如 FRB 20220912A 的平均能量是 7.42×10^{40} erg / 8.67 小时。

⁴ 源的总辐射能量。

⁵ 源的总辐射能量计算使用 $\eta_r = 10^{-4}$ 和 $f_b = 0.1$ 。

⁶ 2021 年 4 月 FAST 观测的 FRB 20201124A (Xu et al., 2022b)。

⁷ 2021 年 9 月 FAST 观测的 FRB 20201124A (Zhang et al., 2022b)。

3.2.4.2 圆偏振与环境

FRB 20201124A 是第一个发现有圆偏振的重复快速射电暴 (Hilmarsson et al., 2021b)。在此之前, 只有一些非重复的快速射电暴被发现有显著的圆偏振 (Cho et al., 2020; Day et al., 2020; Feng et al., 2022a)。最近, FAST 探测到了 FRB 20201102A 和 FRB 20190520B, 只有很少的爆发表现出圆偏振 (Feng et al., 2022b)。在这里, 我们展示了 FRB 20220912A 有大量的爆发表现出圆偏振, 这表明圆偏振的存在可能是重复快速射电暴的一个普遍特征。

所有上述提到的四个重复快速射电暴都有大量的爆发被 FAST 探测到。我们统计了这四个重复快速射电暴中表现出显著圆偏振 (圆偏振度 $> 10\%$) 的爆发的比例。FRB 20121102A 有 12 个爆发中有显著的圆偏振 (Feng et al., 2022b; Li et al., 2021b)。类似地, FRB 20190520B 有 3 个爆发中有显著的圆偏振 (Feng et al., 2022b; Niu et al., 2022a)。FRB 20201124A 的 1863 个爆发中有 302 个爆发中有显著的圆偏振 (Xu et al., 2022b)。FRB 20220912A 有 1076 个爆发中有 303 个爆发中有显著的圆偏振 (本文)。

图 3-18 展示了圆偏振度 $> 10\%$ 的爆发占总爆发数量的比例与 RM 的关系。图中的趋势表明 RM 和含圆偏振爆发比例之间似乎存在一种负相关的关系, 即 RM 的绝对值越大, 圆偏振度 $> 10\%$ 的爆发占总爆发数量的比例越小。FRB 20220912A 周边环境非常干净, 暗示其圆偏振的起源可能更多地与固有辐射机制有关, 而不是环境效应。根据 Qu et al. (2023a), 磁层辐射机制, 例如相干曲率辐射或逆康普顿散射, 可以产生显著的圆偏振。而相对论性激波模型通常会产生几乎 100% 的线偏振 (Plotnikov et al., 2019; Metzger et al., 2019; Qu et al., 2023a)。所有四个重复暴都在爆发中发现了圆偏振, 这一事实支持了圆偏振的磁层起源。

3.2.5 结论

我们报道了 FAST 在 2022 年对 FRB 20220912A 的观测。

(1) 总共探测到 1076 个爆发, 最高的事件率为 390 小时⁻¹。在 1 ms 到 1000 s 和 2 到 27 天的时间尺度上没有探测到周期性。

(2) FRB 20220912A 的能量分布不能用一个单一的函数描述。微分能量分布使用两个对数正态函数描述, 特征能量分别为 5.29×10^{36} erg 和 4.13×10^{37} erg。累积能量分布使用分段幂律函数描述, 指数分别为 -0.38 ± 0.02 和 -2.07 ± 0.07 。

(3) 我们首次报道了 FRB 20220912A 的合成谱。它可以用一个谱指数为 -2.6 的幂律函数拟合。

(4) FRB 20220912A 的 RM 接近 0 rad cm^{-2} , 在两个月的观测期间没有显示出变化, 表明银河系和宿主星系对 RM 的贡献是相当的。银河系的贡献估计为 -16 rad m^{-2} , 暗示 FRB 20220912A 位于一个相对干净的环境中。这表明高且变化的 RM 并不是活跃重复快速射电暴的必要条件。

(5) FRB 20220912A 的大部分爆发在 L 波段表现出几乎 100% 的线偏振度,

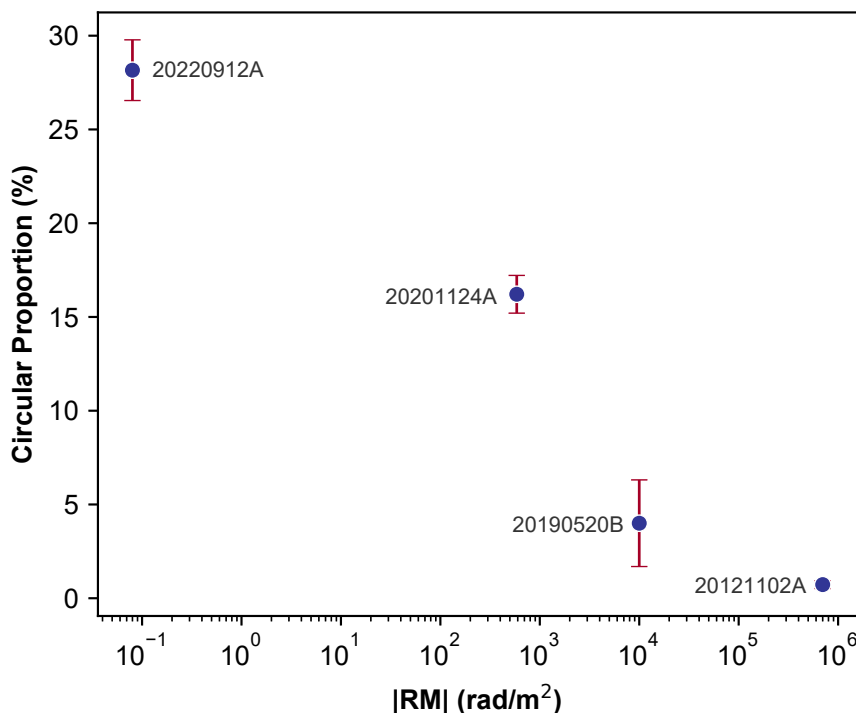


图 3-18 重复暴的爆发中圆偏振度大于 10% 的比例与 RM 的关系。红色的误差棒是统计计数的泊松误差。

有很大一部分爆发表现出圆偏振度，最大的圆偏振度为 70%。一些爆发的圆偏振度随时间或频率发生变化。爆发的高圆偏振度可能与固有辐射机制有关，例如磁层曲率辐射和逆康普顿散射。

(6) 我们发现了快速射电暴含圆偏振爆发的比例和 RM 之间的反相关关系，即 $|RM|$ 越大，有圆偏振的爆发的比例越小。如果这种反相关关系是真实的，可能意味着在磁化的环境中会有更多的圆偏振被吸收。

多波段观测对于理解快速射电暴的起源和环境至关重要。FRB 20220912A 位于一个红移 $z \sim 0.077$ 的宿主星系，是继 FRB 20200120E (Kirsten et al., 2022b) 和 FRB 20180916B (Marcote et al., 2020) 之后第三个最近的重复快速射电暴。其近距离意味着多波段观测将更加高效。此外，FRB 20220912A 是一个非常活跃的重复快速射电暴，这使得它成为多波段观测的理想目标。我们鼓励对 FRB 20220912A 进行更多的多波段观测，以揭开快速射电暴的谜团。

3.3 本章小结

在这一章中，我们介绍了 FAST 对两个活跃重复快速射电暴的观测，即 FRB 20201124A 和 FRB 20220912A。通过上一章中介绍的快速射电暴搜索流程 DRAFTS 的处理，我们探测到这两个快速射电暴的大量爆发，并探测到了至今报道过的第一高和第二高的快速射电暴事件率。

我们对这两个快速射电暴的爆发进行了详细的分析，包括时间、能量分布、

频谱、色散、偏振等的研究。在两个快速射电暴中都没有找到明显的短周期和长周期。等待时间也都是双峰分布，右峰与源的活跃性直接相关，左峰可能更多地与源本征的辐射机制相关。两个快速射电暴的能量分布也都不能用单一的函数描述，表明其可能存在不止一种辐射机制。

对 FRB 20201124A 的能量分析表明，计算能量时的带宽选择并不影响最终的能量分布，而不同的爆发定义会导致能量分布的不同。在 FRB 20220912A 的观测数据分析中，我们首次得到了一个快速射电暴的合成谱，并且可以描述为指数-2.6 的幂律分布。FRB 20220912A 的 RM 接近 0 rad cm^{-2} ，在两个月的观测期间没有显示出变化，表明其周边环境非常干净。另外，FRB 20220912A 爆发的高圆偏振度、圆偏振随时间和频率变号、以及含圆偏振爆发的比例和 RM 之间的反相关关系，都表明圆偏振的起源可能与固有辐射机制有关，而复杂的环境可能会吸收更多的圆偏振。

这一章中的两个快速射电暴的观测结果，为我们更好地理解快速射电暴的起源和环境提供了重要的信息。

第 4 章 活跃重复快速射电暴的时域分析

FAST 对重复快速射电暴长时间的观测，为研究快速射电暴的时域特性提供了丰富的数据。本章将利用 FAST 的观测数据，对快速射电暴的时域特性进行分析。我们将对 FRB 20121102A 和 FRB 20190417A 的长周期进行分析，探讨快速射电暴长周期的特征。此外，我们还联系快速射电暴的能量特征，探讨快速射电暴在时间-能量空间中的表现，并与一些常见的物理现象进行比较。

4.1 FRB 20121102A 的长周期分析

FRB 20121102A 是第一个已知的重复快速射电暴，并且有研究表明其可能存在 ~ 160 天的长周期 (Rajwade et al., 2020; Cruces et al., 2021)。这种长周期通常被解释为轨道周期 (Ioka et al., 2020; Lyutikov et al., 2020; Zhang, 2020b)，或者天体进动 (Levin et al., 2020; Zanazzi et al., 2020)。

FAST 对 FRB 20121102A 进行了长时间的观测，我们利用 FAST 的观测数据，对 FRB 20121102A 的长周期进行分析。FAST 对 FRB 20121102A 的观测从 2019 年 8 月 30 日开始，截止到 2023 年年底，历时约 1600 天。FRB 20121102A 的周期也约为 160 天，因此 FAST 的观测覆盖超过了 10 个周期。在这 1600 天中，共进行了 170 次观测，共计 8920 分钟，约 149 个小时。其中 75 次观测探测到爆发，探测到爆发的观测的总时长为 4200 分钟，95 次观测没有探测到爆发，共计 4720 分钟。关于 FAST 对 FRB 20121102A 的观测信息总结在表 4-1 中。

表 4-1 FAST 对 FRB 20121102A 的观测总结

观测次数	观测时长	覆盖周期	有探测的观测	无探测的观测	爆发数量
170	8920 分钟	7/11 ¹	75 次/4200 分钟	95 次/4720 分钟	1652 + 586 ²

¹ 有爆发探测到的周期/FAST 观测总覆盖的周期。

² 2019 年 FAST 探测到的爆发数量 + 之后探测到的爆发总数量

Rajwade et al. (2020) 中发现 FRB 20121102A 的周期时，使用了从 2012 年到 2019 年来自多个望远镜的观测数据，总共覆盖了约 17 个周期。FAST 的观测现在也覆盖了 11 个周期，因此我们尝试着只用 FAST 数据看能不能找到类似的周期。

找周期的方法一般可以分为四类：傅里叶方法、相位折叠法、直接拟合法和贝叶斯法。傅里叶方法是最常用的方法，但是对于非均匀采样的数据，傅里叶方法有其本征的局限性。这里，我们使用相位折叠法来搜索 2 天到 365 天之内的周期。对每一个测试周期，我们以 MJD 为 0 的日期为参考日期，计算所有爆发相对于这一天的相位，然后计算 0 到 1 相位空间中，连续最长没有爆发存在的相位

长度占比，也即“空占比”。这个比例越大，说明爆发在相位空间中越集中，反映这个周期越可能是真实的周期。由于计算所有爆发相对于参考日期的相位是相互独立的，因此这个方法对于非均匀采样的数据也是适用的。我们使用这个方法对 FAST 的观测数据进行了周期搜索，结果如图4-1所示。

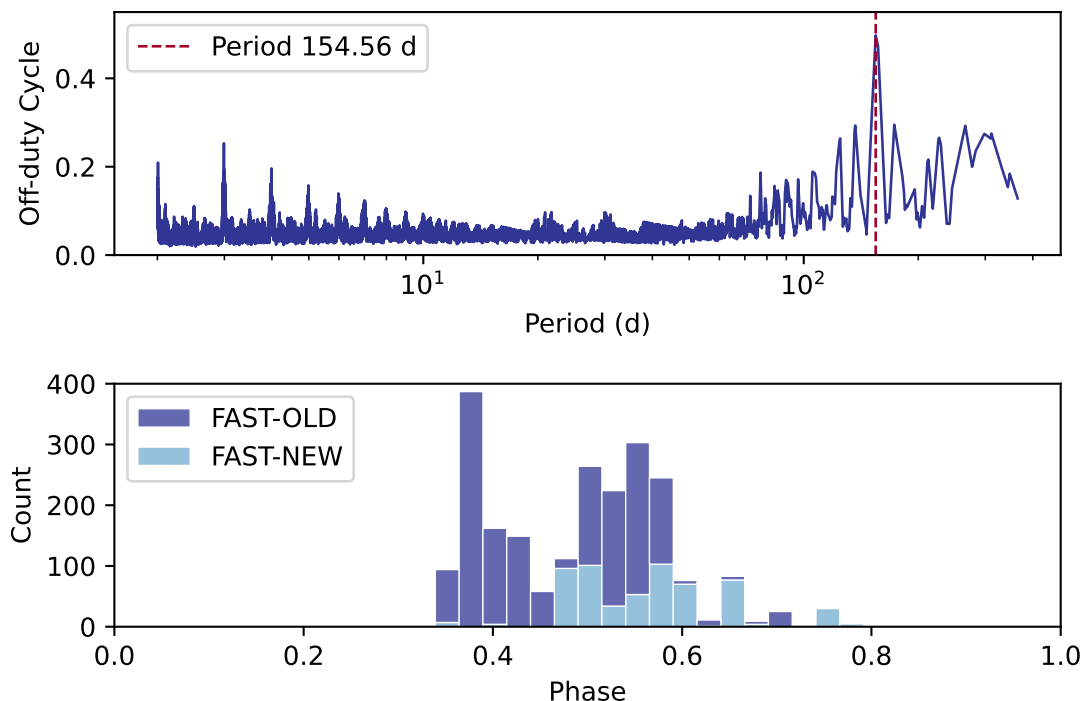


图 4-1 FRB 20121102A 的相位折叠结果。上图为使用不同周期得到的最大空占比，可以看到在周期为 154.56 天的位置，空占比最大。下图为使用 154.56 天对爆发进行折叠的结果，FAST-OLD 表示的是 FAST 在 2019 年探测到的 FRB 20121102A 的集中爆发，FAST-NEW 表示的是 2020 年及之后 FAST 探测到的来自 FRB 20121102A 的所有未发表的爆发，爆发集中在 50% 的相位空间中。

可以看到，只用 FAST 数据也能找到类似的周期。当前两个被发现存在长周期的快速射电暴的周期，都是类似方波的活跃-宁静交替的周期。在 FAST 的观测中，也有超过一半的观测中是没有探测到爆发的。因此，我们可以假设一个方波形式的周期，以观测的时间和观测是否有爆发为光变曲线，用直接拟合加上贝叶斯的方法来拟合这个周期。

$$f(x) = \begin{cases} 1 & [(x - \phi) \bmod P] < T \times P \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4-1)$$

其中 ϕ 为方波函数相位， P 为周期， T 为方波函数占空比，是在 0–1 之间的值。根据上面的方波函数，我们定义似然函数如下

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \quad (4-2)$$

其中 x_i 为每次观测的 MJD, y_i 为此次观测是否有爆发, 有爆发时 $y_i = 1$, 没有爆发时 $y_i = 0$ 。拟合的自由参数包括相位 ϕ 、周期 P 和占空比 T 。我们使用 `emcee` 对这三个参数进行拟合, 结果如图 4-2 所示。

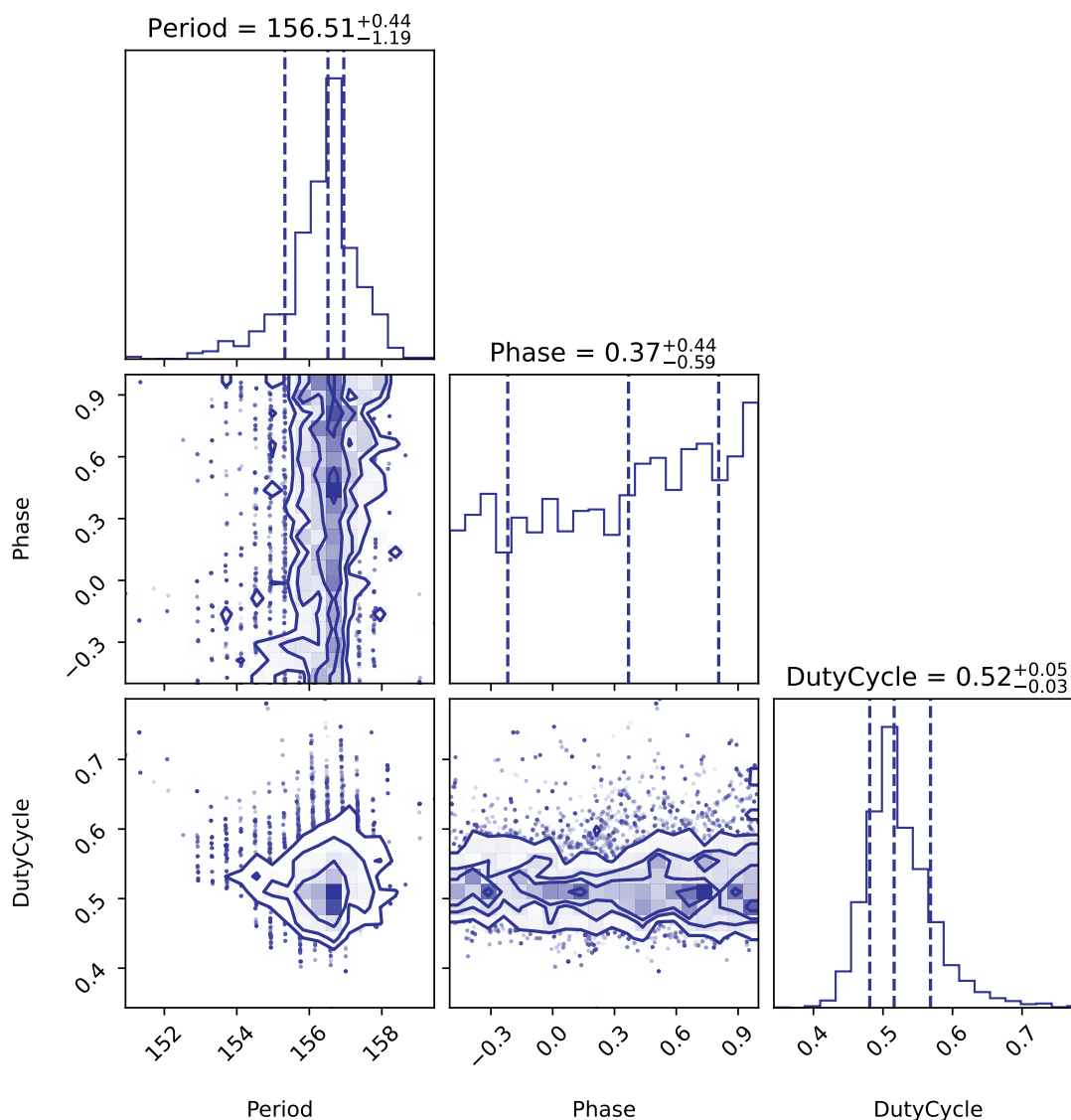


图 4-2 FRB 20121102A 的方波周期拟合的参数分布。

与相位折叠类似的, 我们也可以拟合出接近 160 天的周期, 以及接近 50% 的占空比, 但是结果对于相位的限制并不好, 这是因为我们很多次在预期活跃时的观测没有探测到爆发导致的, 如图 4-3 所示。

在过往研究中, 往往只使用探测到的爆发进行周期搜索, 而忽略掉没有探测到爆发的观测。如果快速射电暴的周期的确是像方波的形式活跃-宁静交替, 那么当加入没有探测到爆发的观测时, 我们的对周期的置信度应该会有所提高。因为在方波函数中, 宁静期与活跃期是有着相同的周期的。考虑到 FAST 的多次观测在预期活跃时却没有探测到爆发, 因此我们进一步研究了 FRB 20121102A 这一周期性的置信度随时间的变化, 以及置信度在引入没有探测到爆发的观测的

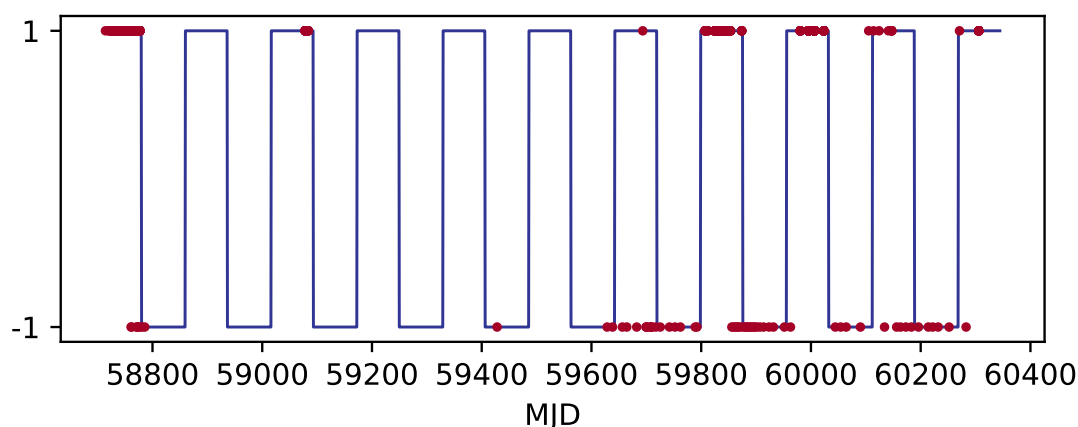


图 4-3 使用图 4-2 中所示的最佳周期、占空比和相位值做出的方波与实际观测的对比。其中红色点为实际观测，有爆发的观测值记为 1。

数据后的变化。

我们之前在相位折叠法中使用的空占比无法用于活跃期和宁静期同时存在的光变曲线，因此我们这里采用 Lomb-Scargle 周期图 (LSP, Lomb, 1976; Scargle, 1982) 来计算周期，这是在天文领域广泛应用于非均匀采样数据的周期搜索方法，尤其是在变星周期分析中。同时，我们定义光变曲线为观测时间以及此次观测是否有爆发探测到。

我们首先需要定义一个周期置信度的指标。对于一条光变曲线 $t_i | y_{i=1 \dots N}$ ，我们先用 LSP 计算其在不同周期处的一个功率值。然后固定 y_i ，在光变曲线开始时间和结束时间内随机生成 N 个点，再用 LSP 计算其在不同周期处的功率值。重复这个过程 1000 次，我们可以得到一个功率值的分布。我们定义某个周期的置信度为，原始光变曲线的功率值超过随机生成的功率值的 95% 分位数的概率 (类似虚警概率的反定义, False Alarm Probabilities)。这个概率越大，说明这个周期越可能是真实的周期。

在 FAST 覆盖的 11 个周期中，有 7 个周期探测到爆发，我们就以此 7 个周期作为时间节点，加上 FAST 观测之前一个时间节点，共 8 个时间节点，计算每个时间节点的周期置信度。结果如图 4-4 所示。

图 4-4C 展示了自 2012 年首次探测到来自 FRB 20121102A 的爆发以来，所有探测到的爆发的时间分布，可以看到，似乎 160 天的周期一直稳定存在，尽管其中一些预期活跃的周期中并没有爆发被探测到。图 4-4D 展示了周期信号的置信度随时间的变化，可以看到，随着时间的推移，并且在预期活跃的时期探测到爆发的次数增加，周期信号的置信度也在增加。然而，当加入未探测到爆发的观测数据后，周期信号的置信度普遍低于只使用探测到的爆发的数据。因此，目前还无法对 FRB 20121102A 的周期性做出明确的结论，需要更多的观测数据来验证。

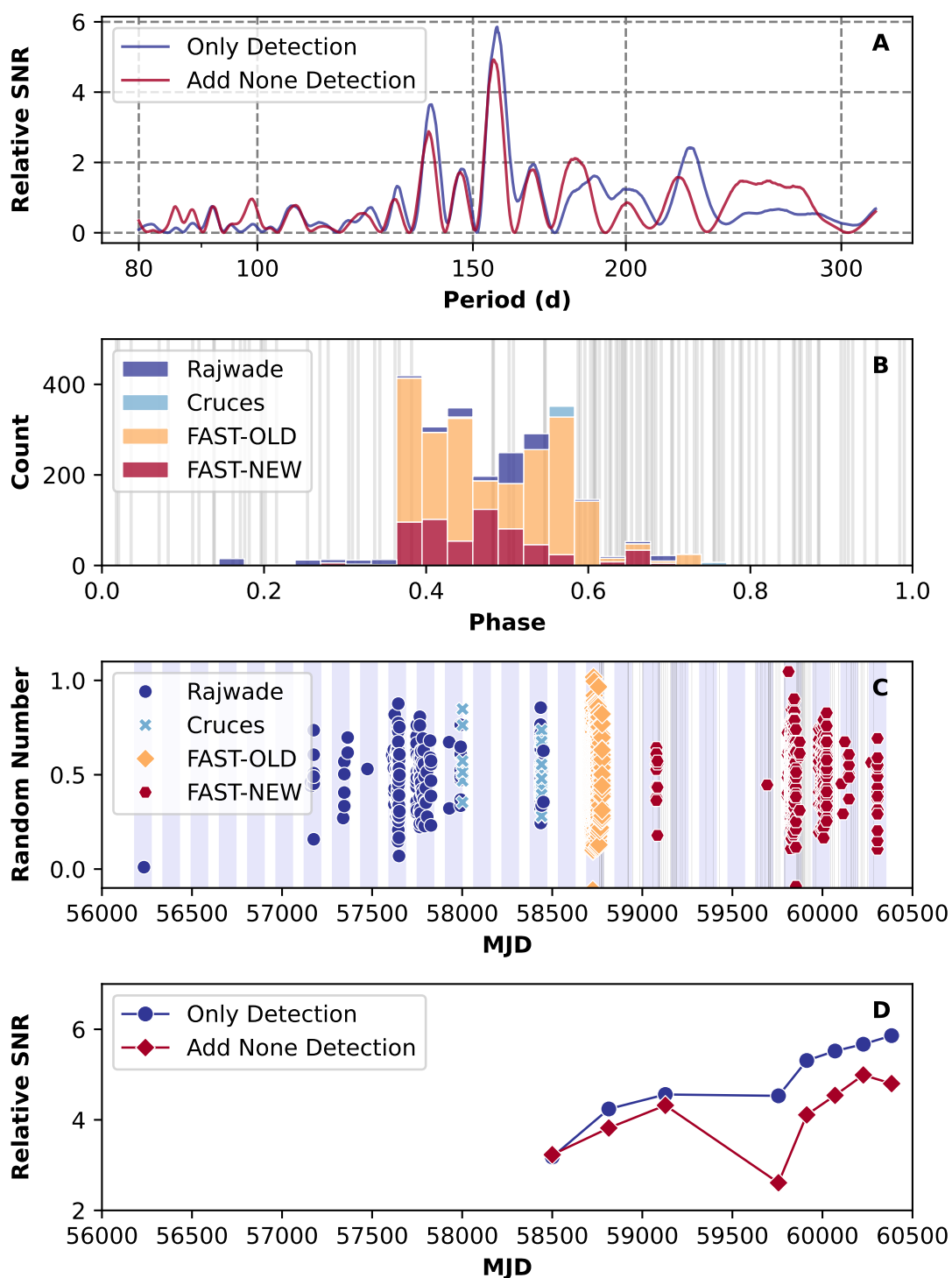


图 4-4 FRB 20121102A 的长周期示意图。从上到下分别是，A, Lomb-Scargle 周期图，其中蓝线为只是用探测到的爆发，红线为加入未探测到爆发的观测数据。B, 相位图，按照 157 天的周期折叠所有爆发，其中灰色区间为未探测到爆发的观测。C, 活跃窗口与爆发探测，展示了从 2012 年开始到 2023 年止，FRB 20121102A 的活跃周期与活跃窗口。D, 周期信号置信度随时间变化，其中蓝线为只是用探测到的爆发的数据，红线为加入未探测到爆发的观测数据。

4.2 FRB 20190417A 消失的周期

FRB 20190417A 是由 CHIME 在 2019 年 4 月 17 日探测到的一个重复快速射电暴 (Fonseca et al., 2020), 并被 CHIME 探测到其多次爆发¹。FAST 也曾探测到来自 FRB 20190417A 的多个爆发 (Feng et al., 2022a)。

在 2022 年 5 月, 我们结合 FAST 的观测和 CHIME 的观测, 使用相位折叠的方法, 发现了 FRB 20190417A 似乎存在一个 55.2 天的周期, 占空比低于 50%, 如图 4-5 所示。

为了验证这一周期信号的置信度, 并减少观测选择效应的影响, 我们根据观测次数随机抽取了 MJD 从 58590 到 59714 之间的时间, 计算新的时间序列在 55.2 天周期下的空占比。这一过程重复了 1000 次, 得到了空占比的分布。结果显示, FRB 20190417A 的真实时间序列的空占比显著超过了随机采样的分布, 置信度高达 9σ , 表明这一周期信号极有可能是真实存在的。基于这一周期, 我们预测 FRB 20220912A 将在 MJD 59179 到 59748 之间保持宁静, 之后在 MJD 59748 到 59774 之间再次活跃。

为了进一步验证这一周期的可靠性, 我们增加了对 FRB 20190417A 的观测频率。然而, 在预期的宁静期间, 我们仍然探测到了爆发, 如图 4-5D 中的红色点所示。随后的观测显示, 55.2 天周期的空占比降低到小于 0.2, 标志着这一周期信号的消失。

因此, 就目前的情况而言, 对于快速射电暴的长周期结果, 我们应该慎之又慎。长的周期可能是快速射电暴的真实周期, 也有可能是由于观测选择效应导致的。

¹<https://www.chime-frb.ca/repeaters/FRB20190417A>

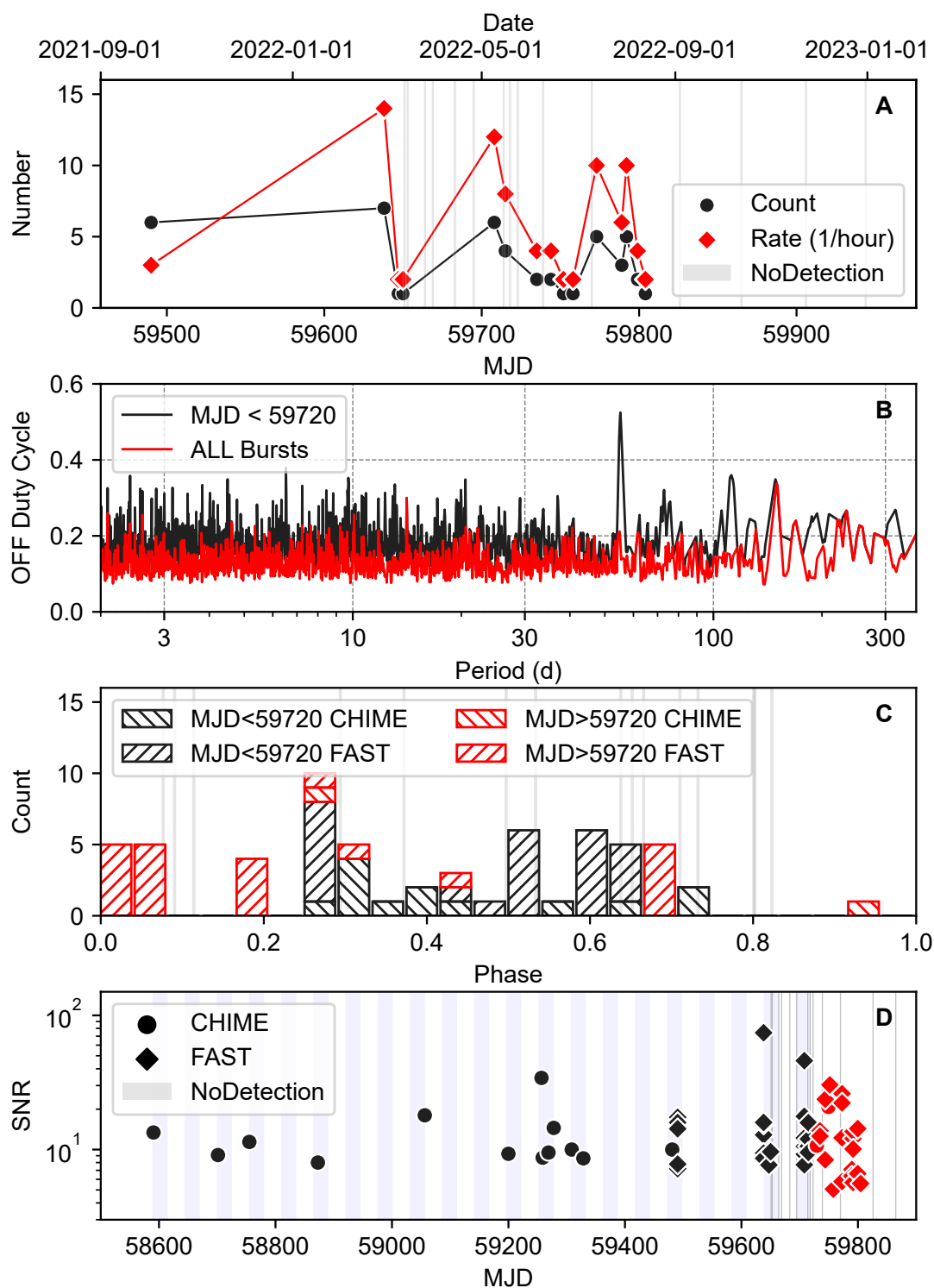


图 4-5 FRB 20190417A 的观测信息和周期搜索。A, FAST 对 FRB 20190417A 的观测情况。黑色点表示探测到的爆发数量, 红色点表示爆发率。灰色区域表示没有探测到爆发的观测。B, 使用相位折叠法搜索 FRB 20190417A 的周期。黑线表示 FAST 和 CHIME 在 MJD = 59720 之前探测到的爆发, 红线表示使用所有探测到的爆发进行相位折叠。C, 使用 55.2 天的周期折叠所有爆发的相位分布。D, 活跃窗口的分布。黑色和红色点分别表示 MJD = 59720 之前和之后探测到的爆发。

4.3 快速射电暴在时间-能量空间中的随机游走

4.3.1 引言

快速射电暴有着丰富的观测属性，包括到达时间、能量、持续时间、带宽、偏振、色散、闪烁、散射等，这些参数携带着关于快速射电暴辐射起源和传播路径中的关键信息。最近关于快速射电暴偏振的研究表明，快速射电暴位于复杂的磁化等离子体环境中 (Beniamini et al., 2022; Feng et al., 2022a; Xu et al., 2022b; Anna-Thomas et al., 2023)。这些研究展示的是关于快速射电暴传播路径的信息。时间和能量是与快速射电暴辐射性质直接相关的两个观测参数。FAST 首次观测到 FRB 20121102A 的观测结果揭示了 FRB 能量的双峰分布，表明 FRB 可能存在不同的辐射机制 (Li et al., 2021b; Yang et al., 2021)。

研究快速射电暴的时间和能量序列，可以帮助我们更好地理解快速射电暴的辐射机制。这里，我们使用两个活跃的重复快速射电暴作为分析对象。这两个重复快速射电暴，即 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B，是目前仅有的两个与致密持续射电源相关联的快速射电暴 (Chatterjee et al., 2017; Marcote et al., 2017; Niu et al., 2022a)。这两个快速射电暴经历了高度活跃的阶段，覆盖了从毫秒到月的时间尺度 (Li et al., 2021b; Niu et al., 2022a)。由于 FAST 对这两个快速射电暴的高灵敏度和高采样率的观测，我们可以获得比其他望远镜更完整的事件序列。我们在这里首次系统地研究了快速射电暴在时间-能量双变量空间中的行为。

4.3.2 数据

FRB 20121102A 是第一个已知的重复快速射电暴，并被准确定位到一个矮星系中 (Spitler et al., 2016; Chatterjee et al., 2017; Tendulkar et al., 2017)。在 2019 年，FRB 20121102A 表现出极端的活跃性，FAST 探测到了 1652 次爆发 (Li et al., 2021b)。在 2020 年，FAST 又探测到了 12 次爆发 (Wang et al., 2020)。FRB 20190520B 是 FAST 在 CRAFTS 巡天项目中发现的第一个重复快速射电暴 (Li et al., 2019; Niu et al., 2022a)。FAST 和 Parkes 共同探测到了超过 200 次爆发 (Niu et al., 2022a; Anna-Thomas et al., 2023)。图 4-6 展示了这两个快速射电暴的时间和能量序列。

4.3.3 时间序列分析

我们使用了 Lomb-Scargle 周期图 (LSP, Lomb, 1976; Scargle, 1982) 来搜索 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的时间序列中的周期性。然而，我们并没有发现这两个快速射电暴在 1 ms 到 1000 s 之间的周期性。为了量化不同周期下的信号的显著性 (信噪比, S/N)，我们比较了随机生成的时间序列和快速射电暴爆发的时间序列在 LSP 中的功率差异。对于 FRB 20121102A，我们从均匀分布中生成了 100 个与 FRB 20121102A 的爆发数量相同的时间序列，这个时间序列中所有的时间点都在 FRB 20121102A 的第一个爆发和最后一个爆发之间。然后，我们对这 100 个时间序列分别计算了 LSP 的功率，得到了在不同周期下的功率

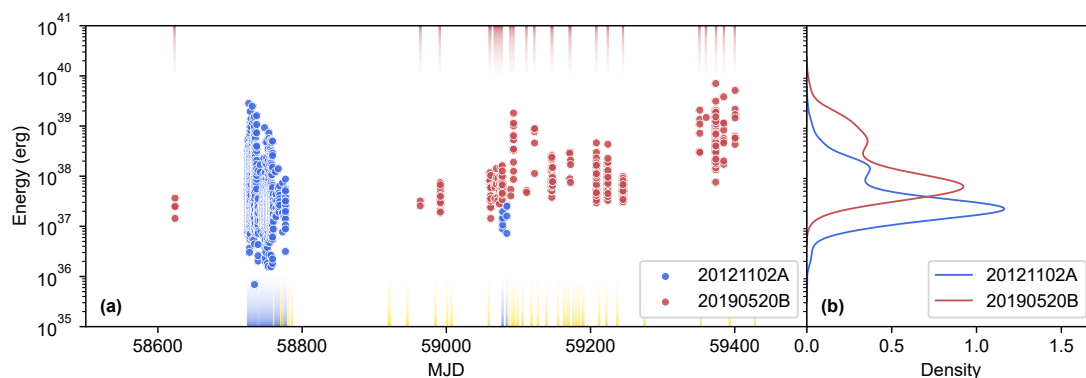


图 4-6 两个快速射电暴爆发的时间和能量序列。A，蓝色和红色点分别表示 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的爆发的能量和到达时间。蓝色和红色条分别表示 FAST 对 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的探测到爆发的观测。黄色条表示 FAST 对 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的未探测到爆发的观测。B，两个快速射电暴的能量分布。

分布，并与原始序列的 LSP 功率进行比较。对于 FRB 20190520B，我们也进行了类似的分析。结果如图 4-7 所示。两个快速射电暴都没有超过随机生成的时间序列的 5σ 的显著性。因此，我们极大地限制了周期信号存在的可能性。一些可能的发射效应，如爆发在不同高度或者不同位置产生，可能会使从快速射电暴爆发的到达时间推断磁星的自旋周期变得复杂 (Cordes et al., 2022)。还有一种可能性是，产生快速射电暴的磁星的周期比银河系内磁星长的多，因此快速射电暴的爆发中不存在短时标的周期性 (Beniamini et al., 2020)。无论具体是什么原因，没有检测到短周期信号依然强调了快速射电暴的辐射的固有随机性。

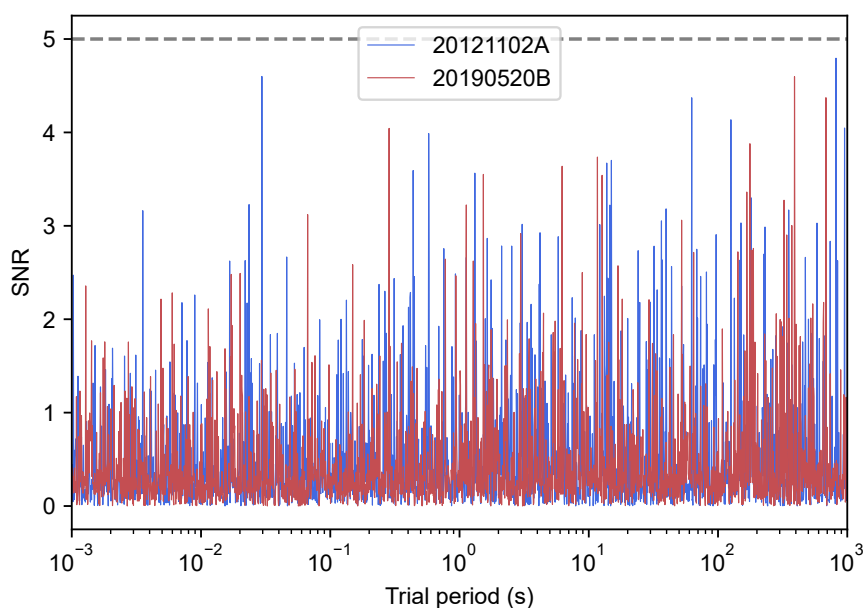


图 4-7 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的周期图。

接下来，我们关注快速射电暴的等待时间，这是反映快速射电暴时域特征的

一个更基础的方面。两个事件之间的等待时间为 $\delta = t_{i+1} - t_i$ ，其中 t_{i+1} 和 t_i 分别是 $(i+1)_{th}$ 和 i_{th} 事件的到达时间。

自 FRB 20200428 的发现以来,快速射电暴起源于磁星的说法逐渐流行 (CHIME/FRB Collaboration et al., 2020; Bochenek et al., 2020; Li et al., 2021a)。磁星作为快速射电暴的可能的起源模型,其产生快速射电暴依赖于一些触发机制 (Zhang, 2023),比如中子星表面的壳层破裂 (Wadiasingh et al., 2019; Wang et al., 2018; Yang et al., 2021),磁层中的磁重联事件 (Popov et al., 2007),或者外部事件的触发 (Dai, 2020; Zhang, 2017)。受此启发,我们将快速射电暴地震和太阳耀斑进行了比较,这两者都是由类似但不完全相同的机制产生的。

地震数据来自南加州地震数据中心 (Southern California Earthquake Data Center, Hutton et al., 2010),其中包含了自 1932 年以来南加州地震的信息,包括地震发生时间、纬度、经度和震级。我们选择了一个 $2^\circ \times 2^\circ$ 的区域内的地震作为连续发生的地震,并使用 Båth (1966) 中的经验公式将所有地震的震级都被转换成了能量 (erg)。太阳耀斑数据来自日本的“Hinode”卫星 (Hinode Flare Catalogue, Watanabe et al., 2012)。另外,我们还模拟了一个 100 步的布朗运动 (随机漫步)。在数学上,布朗运动是由维纳过程 (Wiener process) 描述的随机过程, $W(t)$ 是一个关于时间 t 的随机过程。根据布朗运动的定义,对于时间 t 和 s ,布朗运动的增量 $W(t) - W(s)$ 服从正态分布 $\mathcal{N}(0, t - s)$ 。因此,我们的模拟过程如下:首先,我们从指数分布 $P(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 中采样每一步布朗运动的等待时间 δt ,其中 $\lambda = 1$,对应着一个事件率为 1 的泊松过程。然后,根据每一步的等待时间,我们从正态分布 $\mathcal{N}(0, dt)$ 中采样步长。

这些现象的等待时间分布如图 4-8a-e 所示。我们定义平均时间为 $\bar{T} = \sum T_i / \sum N_i$,其中 T_i 和 N_i 分别是观测的长度和事件计数。所有等待时间都使用 \bar{T} 进行归一化。对于等待时间分布的拟合,我们使用了 emcee 包对拟合参数进行最大似然估计。我们定义了似然函数为

$$L(\theta|t) = \sum_i \log f(t, \theta) \quad (4-3)$$

其中 t 是等待时间, $f(t, \theta)$ 是等待时间分布的模型, θ 是模型的自由参数。 $f(t, \theta)$ 可以是

- 韦伯分布

$$f(t, \theta) = f(t, k, \lambda) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{t}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(t/\lambda)^k} \quad (4-4)$$

其中 θ 代表形状因子 k 和缩放因子 λ 。

- 对数正态分布

$$f(t, \theta) = f(t, \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4-5)$$

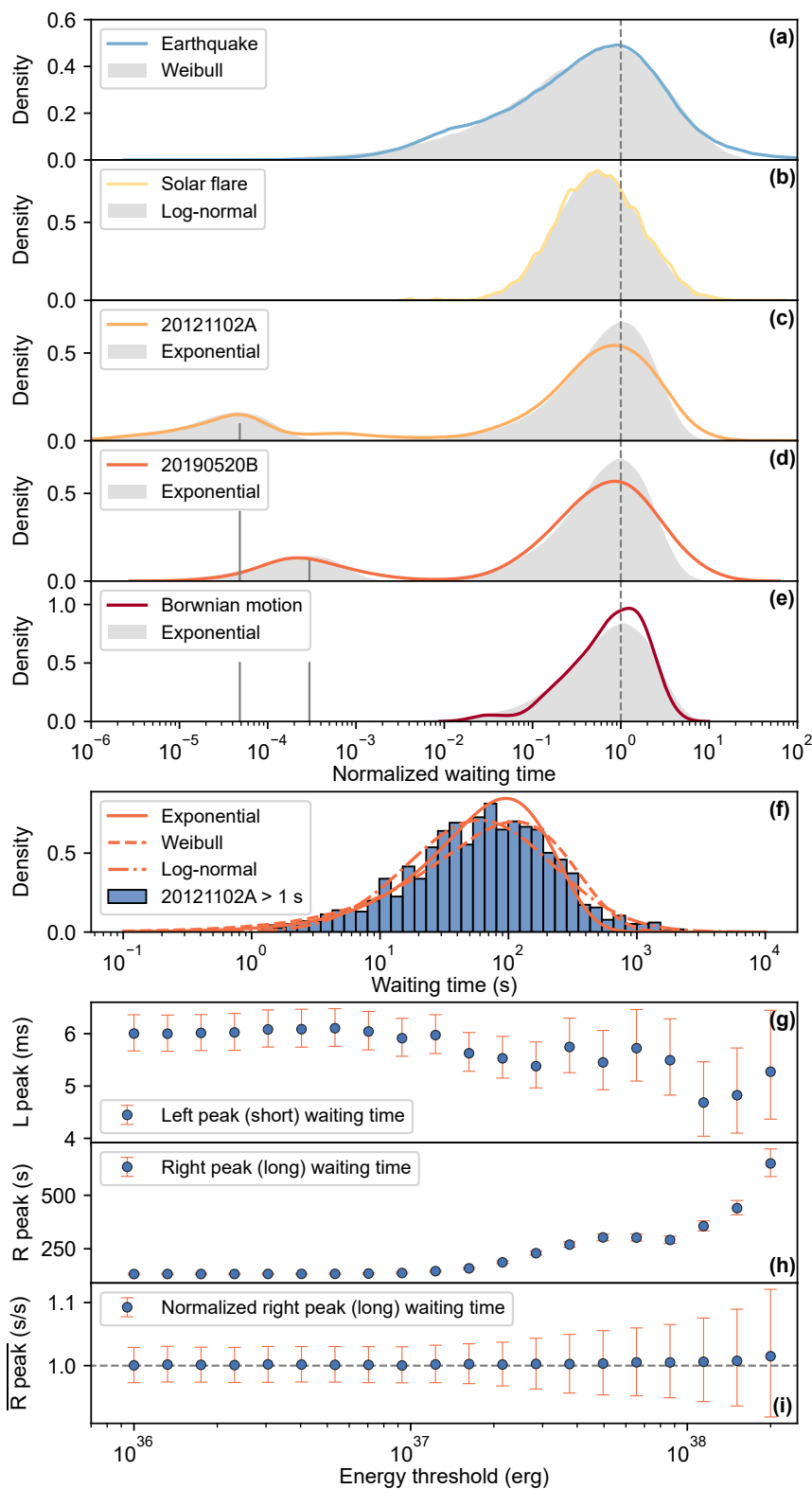


图 4-8 地震、太阳耀斑、两个快速射电暴和布朗运动的归一化等待时间分布。A-E，归一化等待时间分布。彩色线分别表示地震、太阳耀斑、两个快速射电暴和布朗运动的等待时间分布。灰色区域表示等待时间分布的拟合结果。F，FRB 20121102A 的等待时间分布。实线、虚线和虚点线分别表示指数分布、Weibull 分布和对数正态分布的拟合结果。G-I，不同能量阈值下的等待时间的左峰、右峰和归一化右峰。

其中 θ 代表变量对数值的期望值 μ 和标准差 σ 。

- 指数分布

$$f(t, \theta) = f(t, \lambda) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (4-6)$$

其中 θ 代表事件率 λ 。

- 双指数分布

$$f(t, \theta) = f(t, \lambda_1, \lambda_2, p) = p e^{-\lambda_1 t} + (1 - p/\lambda_1) \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} \quad (4-7)$$

其中 θ 代表两个事件率 $\lambda_{1,2}$ 和一个比例系数 p 。

泊松过程的等待时间分布是指数分布。地震的等待时间分布偏离了指数分布，可以用 Weibull 分布更好地描述。这意味着等待时间较短的地震事件的发生频率要高于简单泊松过程的预期，即在时间上成团出现。太阳耀斑的等待时间分布可以用对数正态分布来拟合，这意味着太阳耀斑的事件率是随机变化的。

关于快速射电暴的等待时间，早期的一些假设认为其是非稳态泊松过程 (Wang et al., 2017) 或者是 Weibull 分布 (Oppermann et al., 2018)，然而这一时期的假设会受到早期爆发稀疏采样的影响。后来也有很多函数形式用来描述快速射电暴的等待时间分布，包括对数正态分布 (Hewitt et al., 2022)、Weibull 分布 (Cruces et al., 2021) 和时间依赖的泊松过程 (Jahns et al., 2023; Wang et al., 2023a) 等。

图 4-8 展示的两个快速射电暴的双峰等待时间分布显然不同于单一的 Weibull 分布。为了进行比较分析，我们以 FRB 20121102A 为例，选择了超过 1 秒的等待时间。使用指数函数（对应泊松过程）、Weibull 函数和对数正态函数进行拟合。使用修正 R^2 值进行拟合效果的评估，修正 R^2 值是对模型拟合效果的一个更精细的评估，它考虑了使用的自由变量的数量。指数函数、Weibull 函数和对数正态函数的参数数量分别是 1、2 和 2。计算得到的修正 R^2 值分别是 0.920、0.917 和 0.906。虽然所有三个函数都能很好地拟合快速射电暴的等待时间，但我们倾向于选择最简单的模型，即指数函数（对应泊松过程）。时间依赖的泊松过程是多个泊松过程的和，它有更多的参数，显然在拟合残差方面优于参数更少的模型。然而，在最简单的情况下，我们的结果表明单个泊松过程是有效的。因此，在这种情况下，我们选择使用两个泊松过程来拟合整个快速射电暴的等待时间分布。

我们同样探索了在不同能量阈值下的等待时间分布。同样以 FRB 20121102A 作为例子，我们设定了一系列能量阈值，计算了在不同能量阈值下的等待时间，使用指数函数来拟合等待时间的两个峰值。对于指数分布的等待时间， $P(t) = \lambda e^{-\lambda t} dt = \lambda e^{-\lambda t} t d \log t$ ，峰值对应于导数为零的位置 $P'(t) = 0 \Rightarrow t = 1/\lambda$ 。因此，指数分布提供了峰值对应的典型等待时间。图 4-8g-h 展示了在不同能量阈值下的两个峰值对应的特征时间。左峰（短时间尺度的等待时间）对能量阈值不敏感，这意味着它与快速射电暴本征的辐射机制相关。右峰（长时间尺度的等待时间）对能量阈值或探测到的事件数量非常敏感。随着能量阈值的增加，探测到的

爆发数量减少，导致等待时间变长。在图 4-8h 中，两个拐点对应于能量分布中的两个峰值。在不同能量阈值下，等待时间的归一化右峰都在 1 附近，这表明右峰是一个依赖于采样（事件率）的随机过程。当快速射电暴的等待时间可以用随机过程来描述时，进一步排除了快速射电暴中（准）周期性的可能性。

等待时间分布的差异显示了快速射电暴的发射与地震事件不同。最近有研究提出快速射电暴有着类似地震的余震的特征 (Totani et al., 2023)。然而，这样的相似性来自于地震和快速射电暴的等待时间都偏离单一的指数分布，在短时标上有多于指数分布的事件发生。在这里，我们表明，尽管地震和快速射电暴的等待时间分布都偏离了泊松过程，但是偏离的方式不同。因此，很难得出快速射电暴有着类似余震的表现的结论，我们接下来对能量的分析进一步证实了这一点。

4.3.4 能量序列分析

普遍的观点认为地震事件的发生是随机不可预测的，然而一些研究表明，地震在时间和能量上是有成团性的 (Omori, 1895; Kagan et al., 1980; Lippiello et al., 2008)。这样偏离完全随机的成团性来自于其非线性动力学系统中的能量释放 (Omori, 1895; Saichev et al., 2007)。假设在一个事件序列中，后一个事件的能量低于前一个事件的能量的概率为 P 。在随机打乱事件序列后，这个概率会减小。基于这样的事实，我们使用了 Lippiello et al. (2008) 中用于地震的分析方法。

考虑条件概率

$$P(\Delta m_i < m_0 | \Delta t_i < t_0) = \frac{N(\Delta m_i < m_0, \Delta t_i < t_0)}{N(\Delta t_i < t_0)} \quad (4-8)$$

其中 $\Delta t_i = t_{i+1} - t_i$ 和 $\Delta m_i = m_{i+1} - m_i$ 是连续事件之间的时间差和能量差， $N(\dots)$ 是满足括号中条件的事件对的数量。

选取 $m_0 = 0$ 和 $t_0 = \bar{T}$ （前文中提到的平均时间），计算了在随机打乱事件序列后的条件概率 $P(\Delta m_i^* < m_0 | \Delta t_i < t_0)$ ，其中 $\Delta m_i^* = m_{i+1}^* - m_i^*$ 是随机打乱事件序列后连续事件之间的能量差。我们使用 `numpy.random.shuffle` 来重新排列我们的事件序列，这是基于 Fisher-Yates shuffle 算法的，可以产生无偏的排列。中心极限定理使得 $P(\Delta m_i^* < m_0 | \Delta t_i < t_0)$ 是一个均值为 $\mu(m_0, t_0)$ 和标准差为 $\sigma(m_0, t_0)$ 的高斯分布。对于地震、FRB 20121102A 和 FRB 20190520B， $\mu(m_0, t_0)$ 和 $P(\Delta m_i < m_0 | \Delta t_i < t_0)$ 之间的偏差分别是 5.65σ 、 0.79σ 和 0.40σ （图 4-9a-c）。

一般来说，地震的探测是比快速射电暴更完备的。这里，我们进行了一个关于地震能量阈值的测试。对于 FRB 20121102A，能量最高的爆发与能量最低的爆发相差 4000 倍，对于 FRB 20190520B，这个因子是 500。在地震数据中，最高的震级是 7.5。逐渐增加能量阈值，使得最低能量的地震事件达到最高能量事件的 1/500。在整个过程中，我们计算了假设“后一个事件的能量低于前一个事件的能量”的概率的信噪比。在图 4-9d 中，我们可以看到，即使将地震能量的动态范围压缩到 1/500，S/N 仍然超过 2，远远超过两个快速射电暴。这表明快速射电暴爆发的能量没有成团性，也即，在一个明亮的爆发之后，并没有出现过多的爆发，而在一个大地震发生之后，余震的数量往往要多于地震前事件的数量。

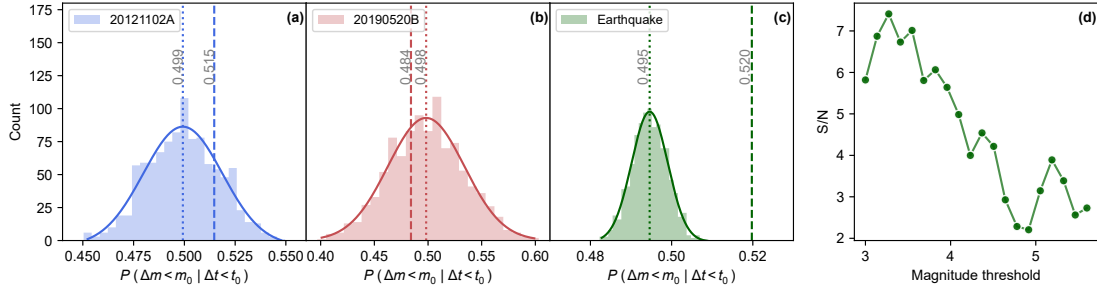


图 4-9 假设“后一个事件的能量低于前一个事件的能量”的概率 P 。A-C, FRB 20121102A、FRB 20190520B 和地震的 P , 虚线代表原始事件序列的 P , 直方图分布代表随机打乱事件序列的 P 。D, 不同地震震级阈值下的 P 的信噪比。

4.3.5 随机性与混沌性

在动力学研究中, 混沌和随机是两个不同的概念。在混沌系统中, 系统的不可预测性随时间指数增长, 而在随机系统中, 系统的不同预测性随时间保持稳定。我们使用“Pincus Index” (PI) 和“Maximum Lyapunov exponent” (\mathcal{MLE}) 来量化事件序列的随机性和混沌性。

PI 是基于最大近似熵 (\mathcal{MAE} , Pincus, 1991; Delgado-Bonal, 2019) 的, 通过测量序列在随机化前后的信息熵的变化来描述随机性程度的。对于一个事件序列 $\{e_i\}_{i=1, \dots, N}$, \mathcal{MAE} 定义为

$$\mathcal{MAE} = \max_r \left(-\frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \log \frac{\sum_{j=1}^{N-m} \text{dist}(x_j, x_i) < r}{N-m} \right) \quad (4-9)$$

其中 $X = \{x_i\}_{i=1, \dots, N-m} = \{\{e_1, \dots, e_{1+m}\}, \dots, \{e_{N-m}, \dots, e_N\}\}$ 是初始事件序列的重新组织序列, N 是初始事件序列的长度, $\text{dist}(x_j, x_i)$ 是重新组织序列 X 中每对的距离, r 是距离阈值。 \mathcal{MAE} 量化了长度为 m 和 $m+1$ 的片段之间信息的最大差异, 需要通过改变不同的阈值 r 来获得重新组织序列的最大熵。为了使 \mathcal{MAE} 在序列之间可比, PI 被定义为

$$PI = \frac{\mathcal{MAE}_{\text{initial}}}{\mathcal{MAE}_{\text{shuffled}}} \quad (4-10)$$

在对初始事件序列计算 \mathcal{MAE} ($\mathcal{MAE}_{\text{initial}}$) 后, 我们随机地重新排列序列 100 次, 并分别计算了 100 次 \mathcal{MAE} 。中位数值是 $\mathcal{MAE}_{\text{shuffled}}$, 标准差值被用来定义 PI 的误差。在计算 PI 时, 使用的距离度量是欧氏距离。为了尽可能地保留原始序列信息并最小化人为偏差的引入, 我们简单地将时间和能量序列线性映射到 0 到 1 的范围内。

Lyapunov 指数是描述动力学系统的混沌性的一个重要指标。对于一个动力学系统, \mathcal{MLE} 是系统中所有 Lyapunov 指数的最大值, 它是一个数值特征, 用来识别非线性系统中的混沌行为 (Cencini et al., 2010)。 \mathcal{MLE} 小于 0 对应于周期运

动或者在时间-能量空间中静止的稳定系统。 MLE 大于 0 表示混沌性的存在。我们使用 `nolds`² (Schölzel, 2019) 中的方法来计算 MLE 。由于 MLE 是 Lyapunov 指数谱中的最大值，因此很难定义一个误差。

PI 和 MLE 的值如图 4-10a 所示。其中的脉冲星是 CRAFTS 巡天项目中发现的一个脉冲星 J1840+2843³。可以看到，其中正弦函数是最规则的运动， PI 和 MLE 都很小。脉冲星的 $PI \sim 0.4$ 和 $MLE \sim 0.08$ 。地震是混沌性最高的， $MLE \sim 0.33$ 。太阳耀斑比地震更随机。快速射电暴比太阳耀斑更随机， $PI \sim 0.84-0.97$ ， $MLE \sim 0.07-0.09$ 。这些结果表明，快速射电暴更接近于布朗运动，在时间-能量空间中随机游走。

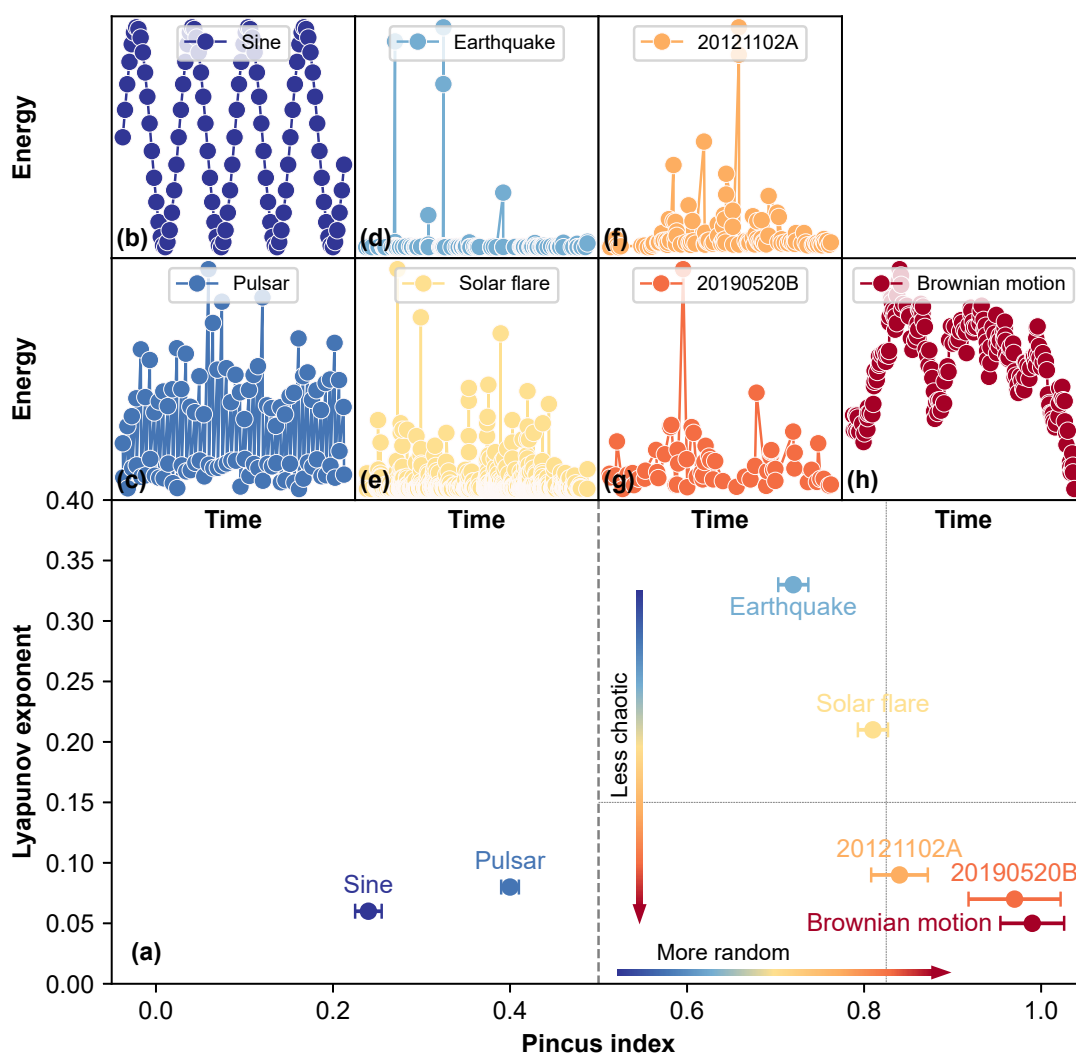


图 4-10 不同事件序列的 Pincus 指数和 Lyapunov 指数。B-H，不同事件序列的时间-能量序列。A，正弦函数 (0.24, 0.06)、脉冲星 (0.40, 0.08)、地震 (0.72, 0.33)、太阳耀斑 (0.81, 0.21)、FRB 20121102A (0.84, 0.09)、FRB 20190520B (0.97, 0.07) 和布朗运动 (0.99, 0.05) 的 Pincus 指数和 Lyapunov 指数。颜色变化从蓝到红，表示随机性增加。

²<https://github.com/CSchoel/nolds>

³http://groups.bao.ac.cn/ism/CRAFTS/202203/t20220310_683697.html

为了确认我们计算的稳健性，我们进行了两种类型的测试。在计算 PI 时，只有参数 m 保持为自由变量。我们选择了 $m \in \{2, 3, 4, 5\}$ 进行了测试。如图 4-11a 所示， PI 的偏差在不同的 m 下都没有超过 0.1。即使 PI 有席位的变化，在选择相同的 m 时，不同物理现象之间的相对关系也没有改变。此外，由于对这些物理现象的探测不可能是完备的，我们进一步检验了序列完整性对 PI 和 MCE 计算结果的影响。通过调整能量阈值，我们保留了不同比例的事件（从 100% 到 50%），并分别计算了每种情况下的 PI 和 MCE 。从保留 100% 的事件到只保留能量最高的 50% 的事件， PI 和 MCE 都表现出了显著的稳定性（图 4-11b-c），证实了我们计算的可靠。

我们的分析表明，活跃的重复快速射电暴的等待时间表现出类似泊松过程的特征，当我们引入快速射电暴的爆发能量这一维度，发现其在时间-能量二维空间中的移动与布朗运动相似，在随机性-混沌性相空间中向高度随机但不混沌的区域聚集（图 4-10A）。这与地震和太阳耀斑不同，后两者都更混沌但不如快速射电暴随机。此外，正如前文所分析的，地震表现出时间和能量的成团性（图 3-9 和图 4-9），而快速射电暴则没有这样的成团性。快速射电暴在时间-能量空间中的随机游走倾向于基于复杂过程的起源模型。

4.3.6 结论

总之，使用 PI 和 MCE 来量化事件序列的随机性和混沌性可能是一种直观地展示不同物理过程之间相似性和差异性的有效方法。具体来说，我们在随机性-混沌性相空间中比较了快速射电暴、脉冲星、太阳耀斑、地震和布朗运动。活跃的重复快速射电暴的强随机性，以及越来越多的多变行为，如它们的双峰能量分布 (Li et al., 2021b; Yang et al., 2021; Zhang et al., 2022b, 2023)，可能是由高信息熵的单一源或多种辐射机制或发射位置的组合产生的。无论如何，活跃的重复快速射电暴不太可能来自于一个干净的环境中，稳定自旋的致密天体。

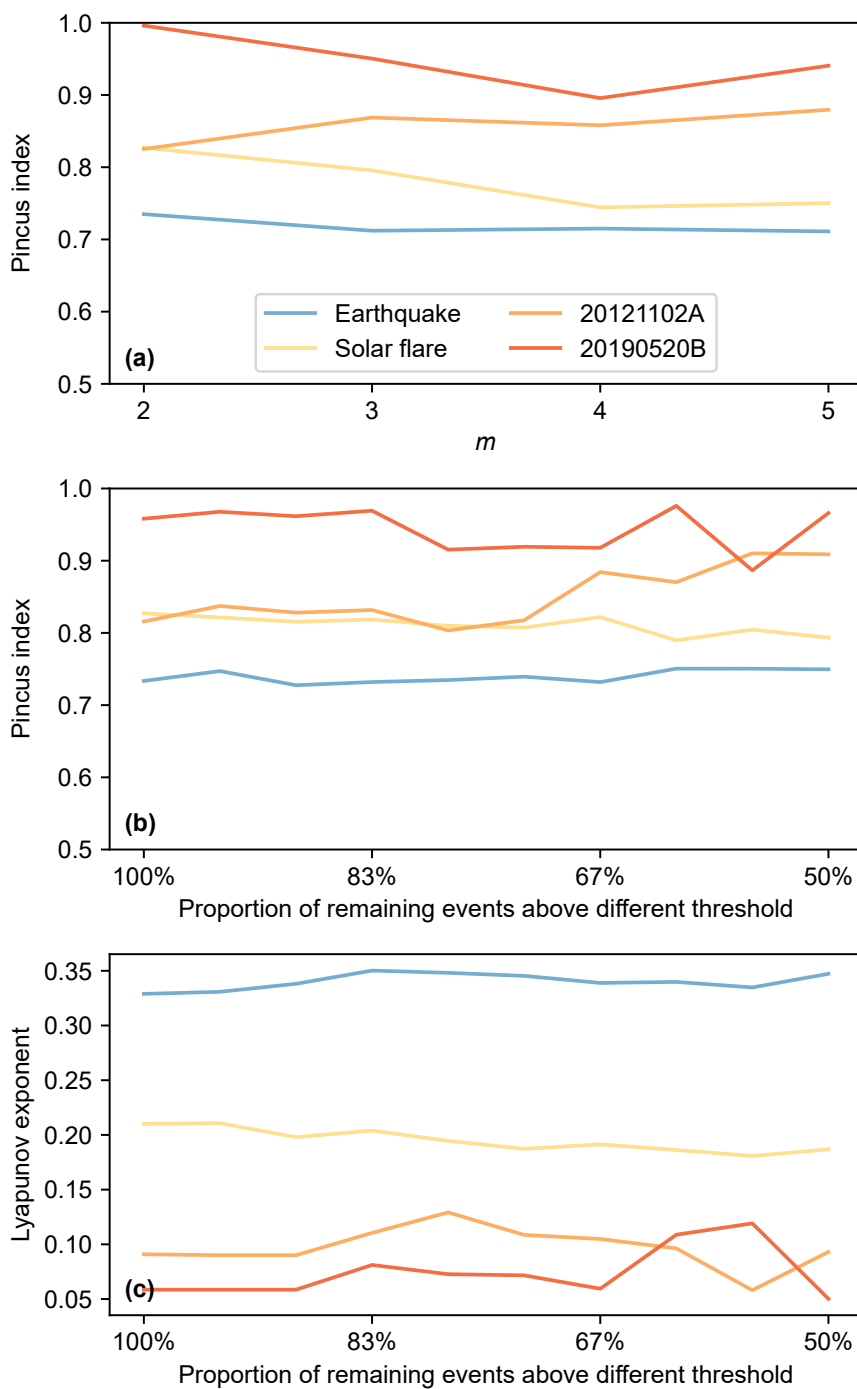


图 4-11 关于计算 PI 和 MLE 的稳健性测试。A, 使用不同 m 计算的 PI 。B-C, 不同能量阈值下的 PI 和 MLE 。

4.4 本章小结

在这一章中，我们使用 FAST 对重复快速射电暴长期观测的数据，对 FRB 20121102A 和 FRB 20190417A 的长周期进行了分析。

对 FRB 20121102A 的长周期分析表明，只使用 FAST 数据时，我们也同样能够恢复之前报道过的其约 160 天的周期。并且，随着 FAST 在越来越多的预期活跃时探测到爆发，这一周期信号的信噪比逐渐提高。然而，FAST 也有超过一半的观测没有探测到爆发，当计算周期信噪比时，如果考虑这些观测，会降低周期信号的信噪比。这说明快速射电暴的活跃周期并非如方波一样稳定，而是在不同的时间尺度上有着不同的活跃度。

对 FRB 20190417A 的长周期分析，我们发现了一个 55.2 天的周期，在这一周期上，FRB 20190417A 自首次发现以来，已经活跃了 11 个周期。蒙特卡洛模拟表明这一周期信号的显著程度已经超过 9σ 。然而，我们在发现这一周期信号后迅速跟进了多次观测，很快发现在预期宁静的时期也探测到了爆发，55.2 天的周期也随之消失。FRB 20121102A 的 160 天周期看似稳定存在，然而从 2020 年首次报道这一周期以来，FRB 20121102A 的占空比已经从 57% 增长到 63%。这提醒我们，对于快速射电暴的长周期信号，需要谨慎对待。目前发现的长周期信号可能是由于观测的不完备性导致的。

对快速射电暴短周期的研究也由来已久。快速射电暴辐射的特征持续时标是毫秒量级，这要求其发射区 $d \leq cdt$ 约百公里的量级，因此猜测其可能是某种致密天体。而如果是类似中子星的致密天体，那么其爆发序列中可能包含了中子星的自转周期。然而，迄今为止，我们并没有发现快速射电暴的任何显著的短周期。

在 FAST 大样本数据的加持下，我们同样没有探测到快速射电暴的短周期。如果周期不存在，可能是某些因素掩盖了周期，或者爆发本身就是随机的。我们进一步的分析表明，加上与地震和太阳耀斑等进行比较，我们发现快速射电暴的等待时间可以用两个泊松过程描述，爆发能量之间也没有关联。这与地震不同，地震表现出在时间和能量上的成团性，也即在一次主震发生后，会集中地产生一些余震，并且余震倾向于比主震弱。

最后，我们使用 Pincus 指数和 Lyapunov 指数来量化事件序列的随机性和混沌性，发现快速射电暴有着高随机性、低混沌性，在随机性-混沌性空间中也明显区别于地震，后者表现出更高的混沌性。这些结果表明，快速射电暴可能是多种辐射机制或者辐射位置混合的结果，而不太可能是来自于一个干净的环境中，稳定自旋的致密天体。另外，我们也相信这样一种分析方法可以用于其他天体物理现象的研究中，以便更好地理解它们的物理机制。

第 5 章 延伸工作

本章介绍了一些与本文研究内容相关的延伸工作。

5.1 射电数据音频化

图像和表格是目前天文学研究中用来检查数据和展示分析结果的标准方法。数据可视化也是用来向公众传达科学研究成果的重要工具。不过，可视化也有其局限性。因为我们生活在三维空间中，因此理解三维图像几乎已经是人类的本能。然而，对于更高维度的数据，人类的理解能力就会受到限制。因此，数据可视化往往需要将高维数据转换为人类可以理解的低维数据。这种转换不可避免地会导致信息丢失。

在人类的感官中，除了视觉，听觉也是一种多维的感知方式。因为声音本质上是多维的，比如音高、响度、节奏、音色等。另外，我们也可以并行地感知多个声音，这使得声音成为一种理解高维数据的潜在方式。耳朵实际上擅长从噪声中感知细微的信号特征，比如我们总是可以感知到有人在叫我们的名字，即便周边环境非常嘈杂。这使得声音成为一种发现数据中隐藏模式的潜在方式，可以用来帮助我们直观地探索大型、复杂、多维的天文大数据 (Hermann et al., 2011; Sawe et al., 2020)。

在科学领域中，盖格计数器就是一个用声音描述数据的很好的例子。盖格计数器是一种用来检测辐射的仪器，它会发出声音来告诉用户辐射的强度。这种声音化的方法可以帮助用户更好地理解辐射的强度，因为与视觉相比，耳朵更善于感知模式随时间的变化 (Guttman et al., 2005; Walker et al., 2011)。Cooke et al. (2017) 也希望利用这一点，将光变曲线转换成声音，来检测那些快速变化的天体。光学波段对天体光变曲线的研究是时域天文中的一个非常活跃的领域，近年来也有很多关于光变曲线的声音化研究 (Griffin, 2019; Diaz Merced, 2013)。Tucker Brown et al. (2022) 中提出了名为 Astronify¹ 的工具，用于将光变曲线的光度映射为频率。Guiotto Nai Fovino et al. (2024) 中利用这一工具将光变曲线映射为声音，让天文学家和非天文学家来找凌星，尽管在结果中，视觉仍然要优于听觉。

也有一些数据声音化带来发现的成功案例。比如 Scarf et al. (1982) 中描述旅行者 2 号在穿越土星环时“听到的声音”，判断是土星环上的粒子撞击旅行者 2 号产生的。Landi et al. (2012) 中将太阳风的数据映射到音频，识别出在 137.5Hz 处的“嗡嗡声”，据此判断太阳风中不同碳离子的丰度比，如图 5-1 所示。

除了在科学研究中可能的应用以外，声音化数据还可以帮助视力受损的人群参与理解和数据分析。在科学普及传播工作中，声音化的数据也可以提供一个新的感官体验，让公众更好地理解科学研究成果。Zanella et al. (2022) 中整理

¹<https://astronify.readthedocs.io/>

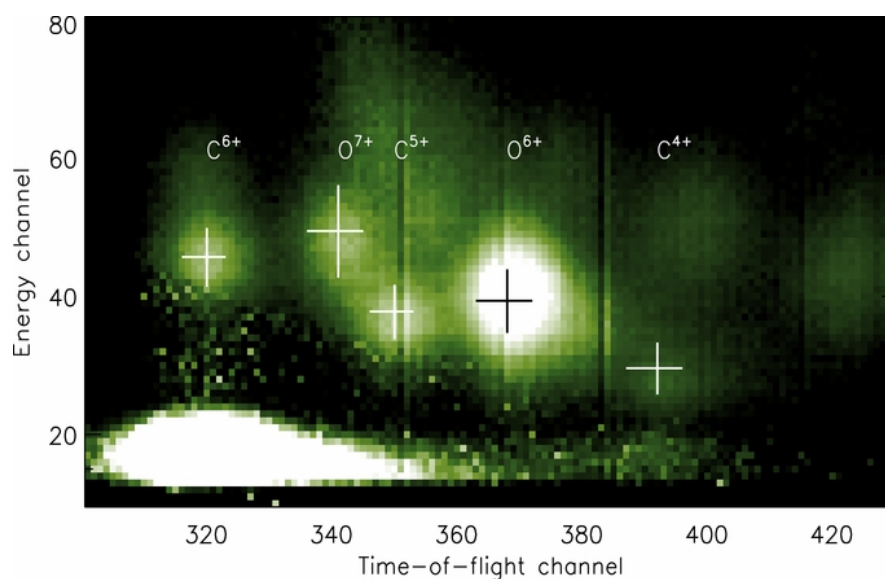


图 5-1 ACE/SWICS 测量的太阳风中电荷丰度。颜色表示丰度，十字线表示每个离子分布的预期位置和 1σ 宽度。（图片来自 Landi et al., 2012）

了 98 个天文学领域中声音化数据的案例，并将这些例子存放在 Data Sonification Archive²中，包括引力波事件的声音化³、钱德拉捕捉到的黑洞 X 射线数据的声音化⁴等。图 5-2 展示了黑洞声音的视频截图⁵。除此之外，Data Sonification Archive 中还保存了其它领域的声音化案例，比如气象、生物、地质、建筑、计算机科学等领域。

射电天文是探索天空中随时间变化的信号的一个重要领域。射电望远镜可以将电磁场数字化采样并记录下来，而产生的数据与音频数据具有非常相似的结构。接下来我们就简单讨论将射电数据转换为音频数据的方法。

5.1.1 一维数据

对于一般的音频文件，如果我们从数据的角度来看，它们实际上就是一个一维的时间序列，每个时间点上都有一个振幅值。常见的音频文件的采样率是 44100 Hz 或者 48000 Hz，也即 1 秒钟有 44100 或者 48000 个采样点，每个采样点是一个 16 位的整数，数值从 -32768 到 32767。射电望远镜的电压数据，或者说基带数据，也是一个一维的时间序列，我们似乎可以直接把这样的数据写入 wave 文件中，形成一个音频文件。但是射电望远镜接收信号的频率往往不在人耳听力范围内，比如 FAST 观测频段是 1 – 1.5 GHz，远远高出人耳的听力范围 20 – 20000 Hz，需要将原始数据混频，降频到可听的频段才行。另外，这样的原始数据非常占用存储，一般望远镜也不会大规模记录这样的数据。通常是对数据进行短时傅立叶变换，转换到时间-频率空间，并且丢掉相位信息。这样可以节

²<https://sonification.design/>

³<https://www.system-sounds.com/gravitational-waves/>

⁴<https://chandra.si.edu/photo/2022/sonify5/animations.html>

⁵https://chandra.si.edu/photo/2022/sonify5/sonify5_perseus.mp4

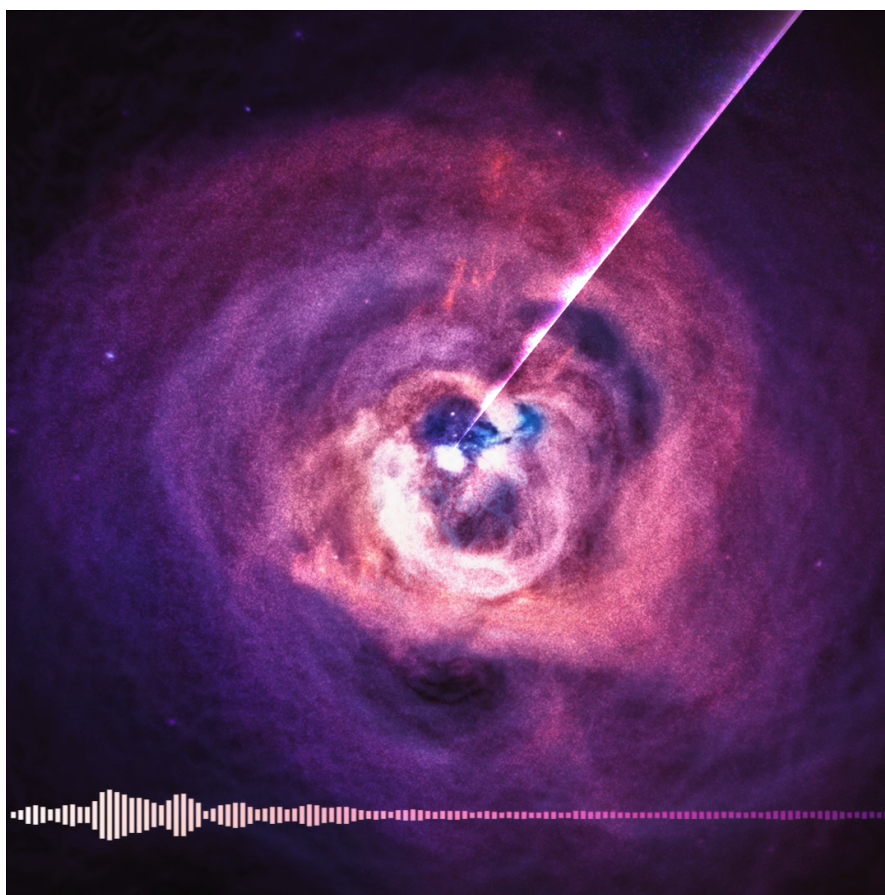


图 5-2 黑洞的声音视频截图。(图片来自 NASA/CXC/SAO/K.Arcand)

省大量的存储空间。

所谓的直接写成音频文件，也是非常简单的一件事情。比如我们要生成 2 秒的音频文件，采样率使用 48000 Hz，那么就可以准备一个长度为 48000×2 的数组 `wave_array`，数组中每个值都是 16 位的有符号整型，也即 `int16`。然后使用 `scipy` 中的 `scipy.io.wavfile.write` 函数⁶ 就可以将这个数组写入一个 `wave` 文件中。

```
1 from scipy.io import wavfile
2 wavfile.write('audio.wav', rate=48000, wave_array)
```

在射电天文常用的一维数据还有脉冲星或者快速射电暴的爆发轮廓，图 5-3 展示了一个快速射电暴的爆发轮廓。对于脉冲星的脉冲轮廓，则相当于图中爆发轮廓按照一定的周期重复出现。对于毫秒脉冲星来讲，当正确地将脉冲轮廓转换为音频文件时，我们能够听到的最明显的特征就是它的自转周期。比如一个 1 毫秒的周期脉冲星的数据，我们就能从中听到一个稳定存在的 1000 Hz 的声音。由于脉冲轮廓并非是一个简单的正弦波，因此我们在听到的声音中还会有 1 kHz 的诸多谐频。

对于普通脉冲星，其周期为秒量级，这意味着脉冲轮廓的声音集中在 1 Hz 的频率上，这样的音高不在我们能够听到的频率范围内。在国科大 2020 年新生入学礼物《来自宇宙深处的声音》⁷ 中，里面用到了很多脉冲星的数据，大多数的脉冲星数据在音色上并没有太大的区别，都是一种“咚咚”的声音，区别只在于周期不同带来的“咚咚”声音出现的快慢不同。这个声音实际上来自一个“美丽的错误”。我们前面提到过，一个一般的音频文件是有符号的 16 位整型，对应的数值范围是 -32768 到 32767。然而，当时将脉冲星数据写入音频文件时，是将数据转换成了 16 位的无符号整型，也即 `uint16`，对应的数值范围是 0 到 65535。这就会导致数值高于 32767 的数据被截断，变成了负数，如图 5-3C 所示。在截断的位置，数据不再连续，傅里叶变换在这个断点就会产生一个全频段的噪声（如图 5-3D 所示），这就是我们听到的“咚咚”声音。如果我们按照正确的方式将脉冲星数据写入音频文件，我们反而听不到任何声音。

我们可以通过卷积的操作来给脉冲轮廓加上一些音色。音色是由乐器产生的声音在频域中的特征所决定的。比如都是 C5（中央 C 音符的第五个八度的音高）的小提琴和钢琴的声音，理论频率是一样的，然而我们却能够很容易地区分出两者的声音。是因为除了基本频率外，乐器声音中还包含了许多谐波和共振频率，它们的相对强度和分布情况会导致不同乐器产生独特的音色。在傅里叶变换的操作下，时域的卷积对应的就是频域的乘积。我们前面生成脉冲轮廓的音频在全波段都有声音，当与其它乐器的声音进行卷积时，乐器发声的声音频率就会被加强，因此卷积操作可以让我们给脉冲轮廓赋予乐器的声音。图 5-4 展示了一个示例过程。这里我们选择了小提琴在 C5（中央 C 音符的第五个八度的音高）的

⁶<https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.io.wavfile.write.html>

⁷<https://www.bilibili.com/video/BV1o64y1F7Ri/>

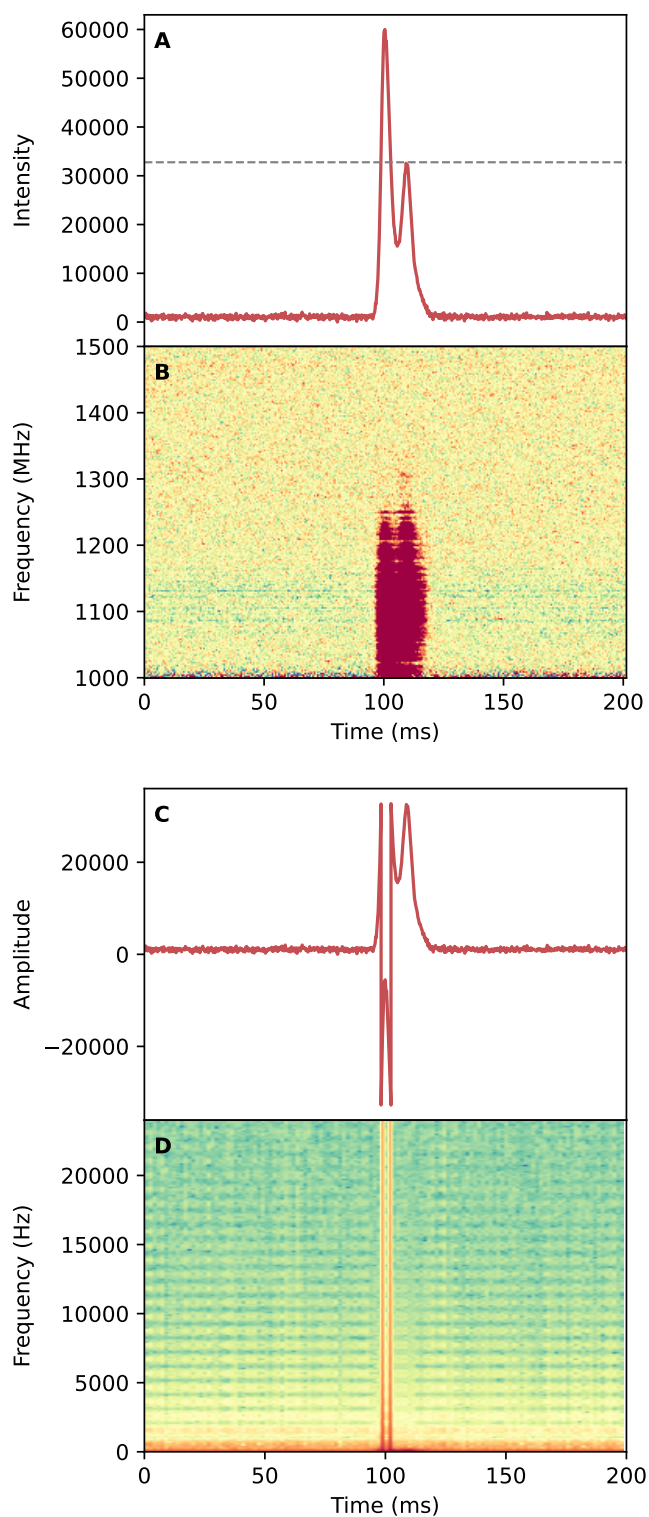


图 5-3 一个快速射电暴的爆发轮廓。A 是将爆发频率维度塌缩后形成的时间序列，也即爆发轮廓，重整为 uint16 中的数值。B 是爆发的动态谱，C 展示了 A 中的爆发轮廓在 int16 中被截断后的形状。D 是 C 中时间序列的短时傅里叶变换，可以看到在两个截断点的位置产生了全频段的噪声。

声音数据，其基频在大约是 523.25 Hz。将其与图 5-3A 中的脉冲轮廓进行卷积，得到的数据如图 5-4C 所示。可以看到，卷积后的数据在频域上有了一些小提琴的音色特征，在小提琴发声频率的位置有明显的增强。

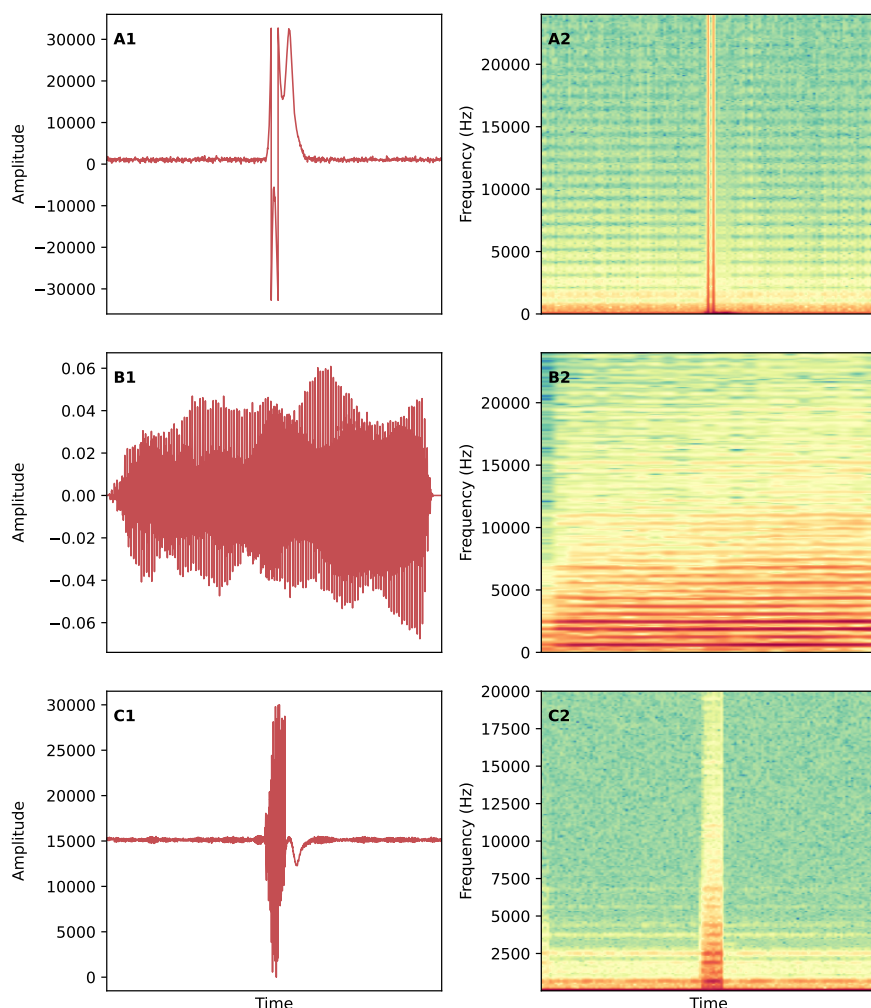


图 5-4 脉冲轮廓与小提琴的卷积。A, B, C 分别对应原始脉冲轮廓，小提琴的声音数据和卷积后的数据。第一列是音频数据，第二列是音频数据的短时傅里叶变换。

除了射电数据外，也有将光学波段恒星的光变曲线直接写为音频文件的做法。比如 Huppenkothen et al. (2023) 中将恒星的光变曲线直接写为音频文件，并将恒星点在赫罗图上，试图将恒星的色、星等以及时变特征联系起来，如图 5-5 所示⁸。这样的做法固然能够最大程度地保留真实的数据，然而在听觉上可能并不是很友好。比如在 Huppenkothen et al. (2023) 合成的恒星音频中，有很多完全是刺耳的噪声。

我们还可以通过映射的方式将数据转换为音频文件。声音是有多个维度特征的，比如音高、音量、音色等，这也使得我们可以将一维数据映射到其中某一个维度特征上。我们考虑一个最简单的情况，对于一个正弦函数 $A \times \sin(\omega \times t)$ ，其中 A 和 ω 分别对应着振幅和频率，在音频中对应着音量和音高。

⁸<https://starsounder.space/>

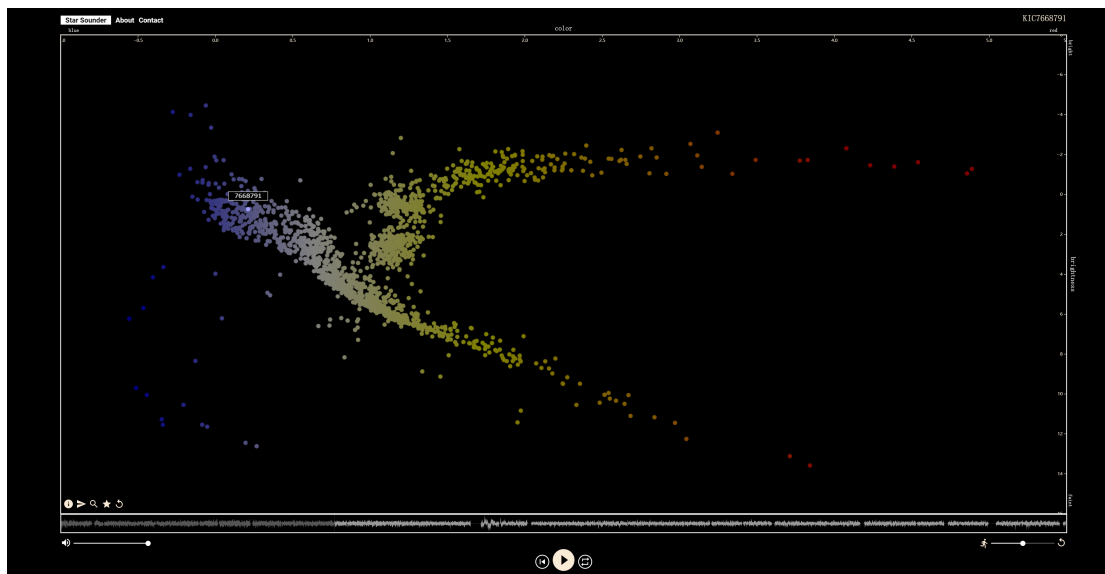


图 5-5 恒星的声音视频截图。（图片来自 [Huppenkothen et al., 2023](#)）

如果我们选择将数据映射到音高，就需要固定一个振幅值 A ，将数据的幅值作为频率 ω 代入。我们可以选择映射后的频率范围 f_{\min} 和 f_{\max} ，这两个频率需要在人耳的听力范围内，也即 $20 - 20000$ Hz 之间。然后将数据归一化到 $0 - 1$ 之间，再使用正弦函数生成音频信号

$$\text{audio}(t) = A \times \sin \left[2\pi \times (\text{data}(t) \times (f_{\max} - f_{\min}) + f_{\min}) \right] \quad (5-1)$$

将生成的数字序列写入文件，就可以得到一个音高不断变化的声音。当脉冲逐渐变强时，音高也逐渐升高，脉冲变弱时，音高也逐渐降低。另外，如果我们要把脉冲轮廓映射到响度上时，就可以固定一个频率值 ω ，将脉冲轮廓的幅值作为振幅 A 代入正弦函数，就可以得到一个音量不断变化的声音。当脉冲逐渐变强时，音量也逐渐升高，反之亦然。具体的代码实现和示例可以在 [SukiYume/MSP](#) 项目中找到。

5.1.2 二维数据

[Harrison et al. \(2022\)](#) 中，将未消色散的快速射电暴的时间-频率数据，按照每个时间点上不同频率的强度映射到不同的音高。形成的音频文件中听到的就是从高频到低频连续变化的声音。需要这样做数据映射的本质原因还是因为我们没有望远镜傅里叶变换后的相位谱，因此无法做逆傅里叶变换将数据转换为一维的时间序列。

从短时傅里叶变换的无相位测量中重构信号的相位是一个普遍的挑战，直到今天也依然是个活跃的研究课题。这个挑战也成为“相位恢复”问题（[phase retrieval problem](#)），出现在大量的应用领域，其中最突出的包括音频处理 ([Jaganathan et al., 2016](#); [Bedoui et al., 2022](#))，光学成像 ([Shechtman et al., 2014](#)) 等。

Griffin-Lim 算法（GLA）是一种在信号处理领域广泛应用的相位重建方法

(Griffin et al., 1984), 它的核心思想是通过迭代过程恢复信号的相位信息。该算法最初是为了解决声学领域的相位检索问题而设计的, 但其应用范围已经扩展到了工程和应用物理的多个领域。下面的伪代码展示了 GLA 的一般工作流程

算法 1 Griffin-Lim 算法

```

procedure GRIFFINLIM( $|S|$ ,  $n$ )
  给定待重建的幅度谱  $|S|$ 
  初始化一个随机的相位  $\theta_1$ 
  构建初始的复数谱图  $S_1 = |S|e^{i\theta_1}$ 
  for  $i \leftarrow 1$  to  $n$  do
    根据复数谱图重建信号  $x_i \leftarrow \text{ISTFT}(S_i)$ 
    对重建信号做短时傅里叶变换  $Y \leftarrow \text{STFT}(x_i)$ 
    结合初始幅度谱  $|S|$  和  $Y$  中的相位部分  $\theta_{i+1}$  构建新的复数谱图  $S_{i+1} \leftarrow |S|e^{i\theta_{i+1}}$ 
  end for
  迭代结束, 重建信号  $x \leftarrow \text{ISTFT}(S)$ 
  return  $x$ 
end procedure

```

首先给定一个待重建的幅度谱, 然后初始化一个随机的相位并根据这个相位构建初始的复数谱图。然后, 该算法进入一个迭代循环, 每一次迭代都涉及通过逆短时傅里叶变换 (ISTFT) 将复数谱图转换为时间域信号, 再通过短时傅里叶变换 (STFT) 将信号转换回频域, 并将得到的频域信号的相位与原始的幅度谱图结合, 形成新的复数谱图用于下一次迭代。该过程多次重复执行, 直到重建信号的幅度谱与初始幅度谱之间的差值小于某一设定阈值或迭代达到次数限制, 最后, 使用 ISTFT 将最终迭代的复数谱图转换为时域信号, 从而完成相位的恢复和信号的重建。

人耳对于不同音高的感知是非线性的, 一般来说, 人耳对于低频的感知更加敏感。比如我们可以轻松分辨出 500 Hz 和 1000 Hz 的区别, 但是却很难分辨出 5000 Hz 和 5500 Hz 的区别, 尽管这两对频率的差值都是 500 Hz。粗略来讲, 在 1000 Hz 以下, 人耳的感知与频率成线性关系, 而在 1000 Hz 以上, 人耳的感知与频率成对数关系。为了更准确地反映人类听觉系统对声波频率变化的感知能力, 尤其是在音乐和语音处理领域中对音高的识别和分析, Stevens (1937) 提出了一种基于人听觉感知的心理声学刻度, 即梅尔刻度 (Mel scale, 取自 meology)。梅尔刻度与线性频率之间的转换关系可以近似为下式

$$m = 2595 \log_{10} \left(1 + \frac{f}{700} \right) \quad (5-2)$$

图 5-6 展示了我们将快速射电暴的时间-频率数据映射到梅尔刻度上的结果。其中图 5-6A 展示的是未消色散的快速射电暴信号, 我们期待它的声音应该是从

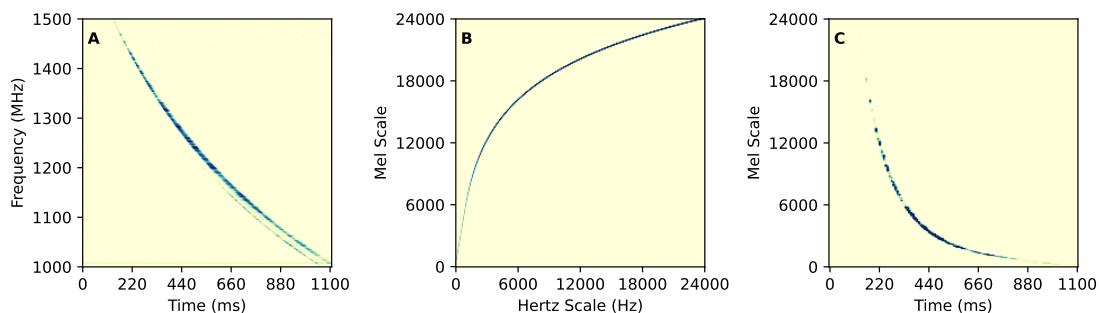


图 5-6 快速射电暴的时间-频率数据映射到梅尔刻度上。A 是未消色散的快速射电暴的时间-频率数据，B 是梅尔刻度与线性频率刻度之间的映射关系，C 是将 A 映射到梅尔刻度上的结果。

高频到低频逐渐变化的。由于我们对高频声音感知较差，因此在映射到梅尔刻度上时，高频信号要更快地降到低频，这样出来的声音才符合我们的期待。否则我们会感觉声音一直维持在高频，并在后期很快降到低频。将短时傅里叶变换后的频谱映射到梅尔刻度上，形成的频谱称为梅尔声谱（Mel spectrogram），这种频谱在语音识别和音乐信息检索等领域有着广泛的应用。像 GLA 这种，在音频信号处理中将梅尔声谱转换为语音的工具，也被称为声码器（Vocoder）。

除了 GLA 这类基于迭代的方法，随着近来人工智能的发展，也有一些基于深度学习的声码器被提出来。这些声码器广泛应用于文本到语音合成（TTS）。传统的 TTS 系统由前端和后端组成。前端负责文本的语言解析和处理，包括文本规范化、分词、词性预测、音素转换和韵律预测等步骤，形成音频特征（如梅尔声谱），后端则负责将处理好的音频特征合成最终的语音，也即声码器发挥作用的步骤（Tan et al., 2021）。WaveNet（Oord et al., 2018）是第一个基于神经网络的声码器，它证明了基于神经网络的方法在生成语音的质量上有着超越传统方法的能力。在此之后，一系列基于深度学习的声码器被提出，比如 WaveGlow（Prenger et al., 2019）、MelGAN（Kumar et al., 2019）、HiFi-GAN（Kong et al., 2020）等。

HiFi-GAN 是一种基于生成对抗网络（GAN）（Goodfellow et al., 2014）的高保真语音合成模型。它结合了一个生成网络和两个判别网络以生成高品质的语音波形。生成网络负责从梅尔声谱直接产生原始音频波形，而两个判别网络则在不同的尺度和周期上评价生成的音频质量，确保合成的语音接近真实人声的自然度和细节。HiFi-GAN 的设计允许它在生成高保真度语音的同时，保持高效的计算性能，使其在需要音频高品质合成的场景下，如虚拟助手、自动语音回应系统和游戏角色语音生成等，都具有实际应用价值。HiFi-GAN 目前已经被广泛应用于音频合成领域，取得了很好的效果。比如之前的“AI 孙燕姿”，使用 VITS（Variational Inference with adversarial learning for end-to-end Text-to-Speech）（Kim et al., 2021）将孙燕姿的音色迁移到新的歌曲上，其模型的后端就是 HiFi-GAN。

HiFi-GAN 公布的预训练模型⁹可以直接用于音频合成。鉴于其预训练模型是

⁹<https://github.com/jik876/hifi-gan>

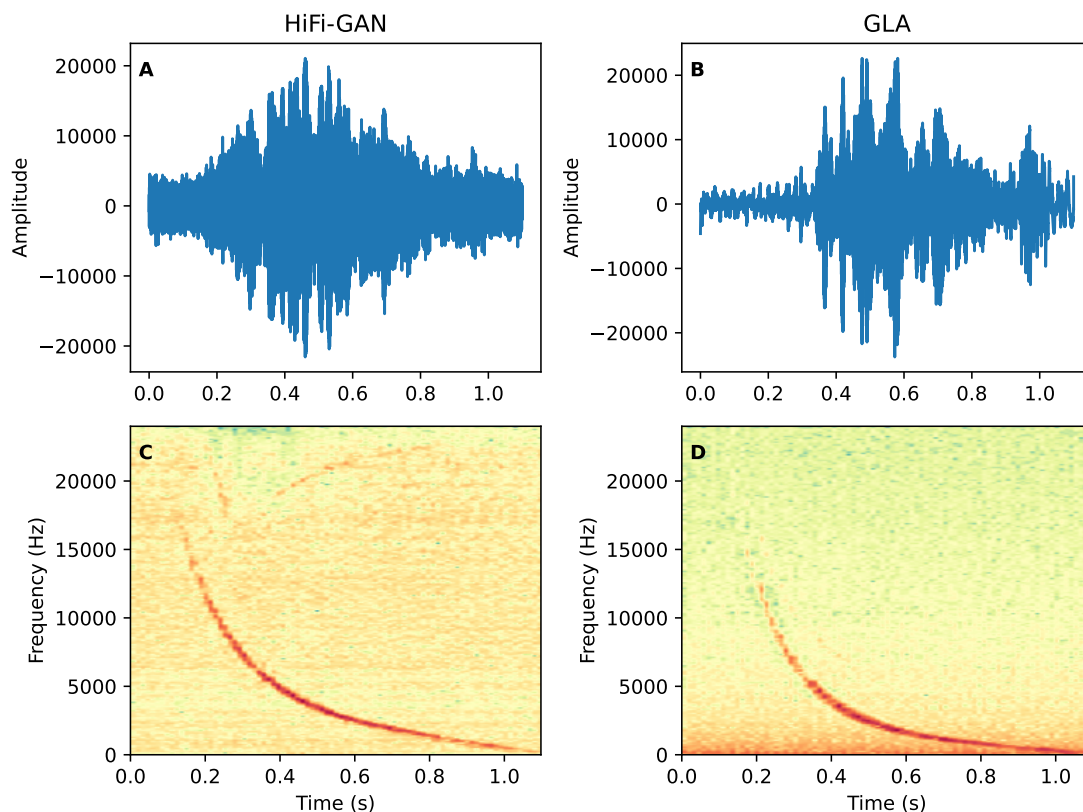


图 5-7 梅尔声谱转换为音频的结果。A, B 分别是 HiFi-GAN 和 GLA 转换后的音频波形, C, D 分别是对应的短时傅里叶变换结果。

基于对话数据集 LJSpeech (Ito et al., 2017) 训练的, 而射电数据中并没有人类说话的特征。因此我们在其预训练模型的基础上, 使用 500 首交响乐曲对模型进行微调, 继续训练了 500k 步, 训练好的模型放在 [SukiYume/MSP/HiFiGAN/model](#) 中。我们分别使用这个模型和传统的 GLA 算法将图 5-6C 的梅尔声谱转换为音频。图 5-7 中展示了两种算法转换后的音频波形与短时傅里叶变换的结果。从频谱上看, HiFi-GAN 要比 GLA 更自然一些, GLA 在发声频率左右有明显低下去的振幅。听感上 HiFi-GAN 也要比 GLA 生成的音频少一些奇怪的杂音。

5.1.3 小结

在这一章中, 我们简单介绍了将射电数据转换为音频的几种方法, 以及结合现代深度学习的相关工具进行相位重建与音色迁移的尝试。相关代码以及音频示例可以在 [SukiYume/MSP](#) 上找到。这些方法可以帮助我们更好地理解射电数据, 也可以为科学普及与传播工作提供新的角度。

第6章 总结与展望

科技进步与新现象的发现之间的相互作用，为天文学带来了前所未有的盛况。我们期待着技术的下一个飞跃，它将带领我们前往未知的领域，继续这场宇宙的探索之旅。

6.1 论文总结

在第1章中，我们对快速射电暴的发现历程做了简单的回顾，并从快速射电暴的观测特性出发，包括时间、偏振、色散、能量、宽度、频率、重复性，详细介绍了自快速射电暴发现以来的研究进展。在这期间，几乎每年都会让我们对快速射电暴的理解产生质的飞跃的发现。包括第一个快速射电暴的发现 (Lorimer et al., 2007)、第一个重复性快速射电暴的发现 (Spitler et al., 2016)、第一个快速射电暴的定位 (Chatterjee et al., 2017)、第一个有周期的快速射电暴的发现 (Chime/Frb Collaboration et al., 2020)、第一个球状星团中的快速射电暴的发现 (Kirsten et al., 2022b)、第一个河内快速射电暴的发现 (CHIME/FRB Collaboration et al., 2020)、第一个有毫秒量级准周期的快速射电暴的发现 (Chime/Frb Collaboration et al., 2022)、以及快速射电暴的偏振分析暗示其周边环境的复杂性等等 (Hilmarsson et al., 2021b; Xu et al., 2022b; Feng et al., 2022a; Anna-Thomas et al., 2023)。对快速射电暴这种极端能量释放事件的研究，除了可以帮助我们理解一类新的天文现象的本质外，还能助力探索宇宙的大尺度结构与物质分布，对宇宙学、宇宙参数的测定甚至基础物理的突破都有重要的作用。诸多观测极大地丰富了我们对于快速射电暴的认识，同时也限制了它的起源模型。然而到目前为止，快速射电暴的起源依然成谜，这也需要我们使用更先进的设备进行更多的观测来进行研究。

在第2章中，我们提出了一种基于深度学习的快速射电暴搜索流程，名为 DRAFTS。现在常用搜索算法一般包含消除射频干扰、使用一系列色散网格对数据进行消色散处理、使用不同宽度的方波滤波器对消色散后的时间序列进行匹配并计算信噪比，最后根据某个阈值挑选出候选信号。这种方法普遍存在着重复计算、计算效率低、误报率高和结果不完备等问题。比如，在 Arecibo 望远镜对 FRB 20121102A 观测的一批数据中，不同的人使用不同的算法找到的信号从几十个变化到几百个，有着数量级的差距 (Gourdji et al., 2019; Aggarwal et al., 2021a)。因此开发一个搜索新算法非常必要。在 DRAFTS 中，我们使用 CUDA 加速将原始时间-频率数据转换为时间-色散数据，然后使用训练好的目标检测模型找出爆发的到达时间和色散值，并据此从原始数据中裁出爆发的数据片段，最后使用一个二分类的模型判断是否为真实的快速射电暴。这一方案在效率和灵敏度上都有显著提升，可以在短时间内处理大量数据，同时减少了误报率，解决了传统算法中存在的诸多问题。

在第3章中，我们介绍了对两个重复快速射电暴的观测与统计。我们报道了使用中国天眼 FAST 对 FRB 20201124A 在 2021 年 9 月-10 月之间的观测，并着重研究了其能量分布。在这为期 17 天、历时 19 小时的观测中，我们在前 4 天探测到 881 次爆发，事件率呈指数增长的趋势，但是在第 4 天后的 24 小时内，这个快速射电暴源的活动停止了。在第 4 天一个小时内，我们探测到 542 次爆发，这是到目前为止从单一快速射电暴源探测到的最高事件率。这些爆发在时间-频率空间中具有复杂的结构。我们发现爆发的等待时间呈双峰分布，可以用两个峰值分别为 51.22 ms 和 10.05 s 的对数正态函数拟合。与 FAST 检测到这个快速射电暴上一次活跃期相比，本次等待时间的第二个峰值时间较小，表明这个峰值是由源的活跃程度决定的。我们使用爆发带宽和观测带宽计算了爆发的各向同性能量，发现能量分布没有明显变化。对于能量分布，我们使用一个由指数函数连接的断幂函数来进行拟合，低能端和高能端的幂律指数分别是 -1.22 ± 0.01 和 -4.27 ± 0.23 。假设射电辐射效率为 $\eta_r = 10^{-4}$ ，那么这个快速射电暴在 4 天活跃期内释放的各向同性总能量已经达到了 3.9×10^{46} erg，超过了磁星磁能的 $\sim 23\%$ ，这就对低辐射效率的磁星模型提出了挑战。

我们报道了中国天眼 FAST 对 FRB 20220912A 的观测。在 2022 年 10 月-12 月，我们进行了 17 次观测，总时长 8.67 小时，共探测到 1076 次爆发。最高的爆发事件率达到了 390 个每小时。累计能量分布可以用分段幂律函数来进行拟合，低能端和高能端的幂律指数分别是 -0.38 ± 0.02 和 -2.07 ± 0.07 。我们也首次报道了对单一快速射电暴在 L 波段的合成频谱，并发现这一合成频谱是一个非常好的幂律函数，谱指数为 -2.6 ± 0.21 。平均的法拉第旋量 RM 值为 $-0.08 \pm 5.39 \text{ rad m}^{-2}$ ，接近于 0 rad m^{-2} ，并且在两个月内相对稳定。大多数爆发具有近 100% 的线偏振度。约 45% 的爆发具有 $S/N > 3$ 的圆偏振，最高的圆偏振度可以达到 70%。我们的观测表明 FRB 20220912A 位于一个相对干净的环境中，具有复杂的圆偏振特性。这些不同的行为暗示了快速射电暴的圆偏振机制可能源于内在的辐射机制，例如磁星的磁层内的相干曲率辐射或逆康普顿散射。

在第4章中，我们介绍了利用 FAST 对快速射电暴长时间观测的样本展开的时域分析。我们发现，现在只用 FAST 的观测数据，也能找到 FRB 20121102A 接近 160 天的周期。通过量化这一周期性的显著程度，我们发现随着在更多的活跃期探测到爆发，这一周期性的显著性逐渐增加，然而当考虑到那些没有探测到爆发的观测时，这一周期信号的显著程度下降了。另外，在对 FRB 20190417A 的数据分析中我们也发现了一个长周期约为 55 天，并且周期的显著程度超过了 9σ 。然而，随着后续观测的进行，我们在预测的宁静期也探测到了爆发，这表明这个周期性现象可能是由于采样不足造成的假象。通过对 FRB 20121102A 和 FRB 20190520B 的深入分析，我们没有找到其显著的短周期，这可能源于快速射电暴随机辐射的本质。我们使用“Pincus Index”和“Lyapunov Exponent”来量化快速射电暴的随机性和混沌性，并将快速射电暴与脉冲星、地震、太阳耀斑等常见物理现象进行比较。我们发现，快速射电暴和地震以及太阳耀斑有着明显的区别，

表现出更强的随机性和较小的混沌性。另外，我们发现快速射电暴爆发之间的等待时间和能量没有成团性。以上结果表明快速射电暴可能是来自于高熵的单一来源，或者是来自于不同的发射机制/地点的组合。这些涉及的数学和物理方法本身也具有广泛的应用潜力，可能会在天文学之外的其他领域发挥重要作用。

在第5章中，我们介绍了一些与本文研究内容相关的延伸工作。我们讨论了射电数据音频化的一些方法。在第6章中对全文内容进行总结，并对未来的工作进行展望。

我们的工作涵盖了从快速射电暴的搜索、定标到后续分析的完整流程开发，为FAST的快速射电暴研究提供了重要的数据处理和分析工具，产出的科学结果推动了我们对于FRB辐射机制的理解。随着我们技术能力的提升和理论知识的深入，未来有望解开更多宇宙之谜。

6.2 未来展望

在很长时间以来，射电望远镜观测的暂现源主要是类似脉冲星、快速射电暴的，从毫秒量级到秒量级的光变源。那些有着微秒量级的暂现源和有着分钟量级的暂现源在观测中相对较少。图6-1展示了一些典型暂现源的持续时间与其亮度的相空间，可以看到，在极短时标和中等时标处，还有这很大的空白区域有待探索。

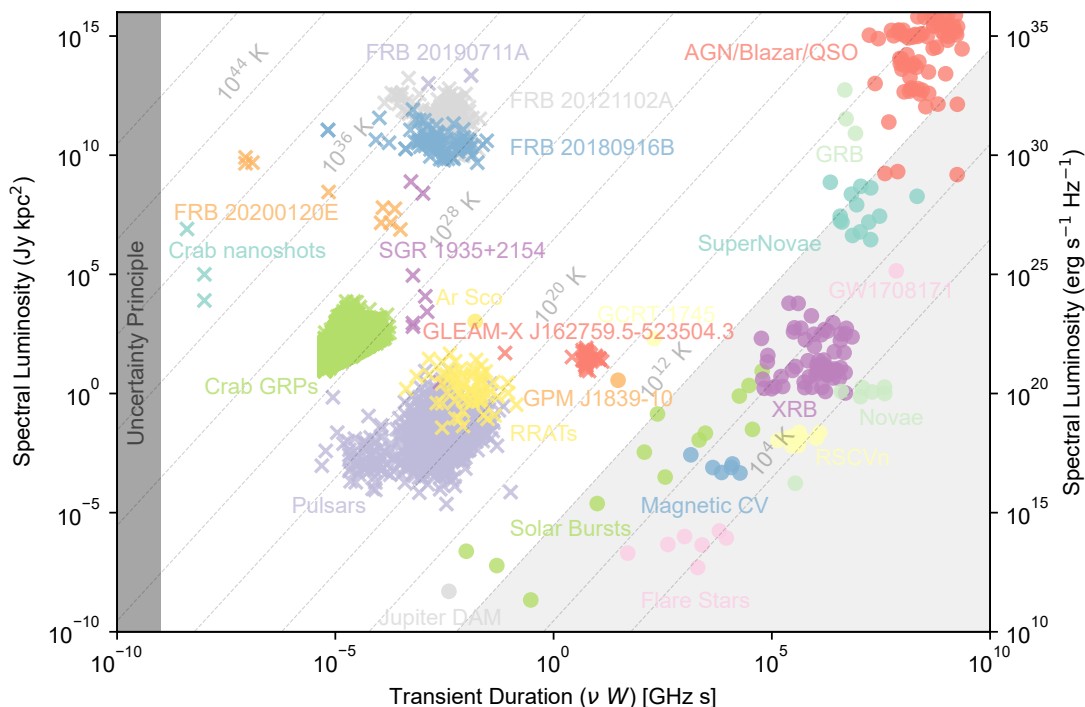


图 6-1 暂现源在持续时标与亮度的相空间。由 Evan Keane¹、Nimmo² 和 Natasha³ 的数据组合而成。

值得注意的是，最近的一些研究从快速射电暴中发现了微秒量级的爆发和微结构。比如 FRB 20200120E 的单个爆发持续时间短至数百微秒 (Kirsten et al., 2022b), 并且在基带数据中发现了数十纳秒的爆发 (Nimmo et al., 2022a)。在之前的研究中，只有蟹状星云脉冲星的纳秒量级的爆发有类似的时间尺度 (Hankins et al., 2003)。鉴于 FRB 20200120E 位于一个古老的球状星团中，它的起源可能与白矮星-中子星双星之间发生的磁相互作用有关 (Kirsten et al., 2022b)。对 FRB 20121102A 的 GBT 数据的重新分析也发现了微秒尺度的爆发 (Snelders et al., 2023)。

除了这种极短时间尺度的爆发，最近 Hurley-Walker et al. (2023) 报告了一个中等持续时间的射电变源 GPM J1839-10。这个源的脉冲持续时间范围从 30 到 300 秒，有一个 21 分钟的周期。在此之前，他们还发现了另一个类似的射电变源 GLEAM-X J162759.5-523504.3，脉冲持续时间为 30 到 60 秒，有一个 18.18 分钟的周期 (Hurley-Walker et al., 2022)。在他们的工作中，这些源被解释为超长周期磁星。早在 2016 年，Marsh et al. (2016) 报道了 AR Scorpii 在射电波段以 1.97 分钟的周期辐射脉冲。这种 1.97 分钟的周期性在一个极宽的电磁波段（从射电到红外、光学、紫外波段）内可以观测到。光学观测看到了这个源很强的线偏振，最高可达 40% (Buckley et al., 2017)。通过光谱观测和质量-半径约束，确定 AR Scorpii 是一个由白矮星和一个 M-矮星主序星组成的双星系统，脉冲来自白矮星。孤立的白矮星主要在紫外到近红外波段释放能量，这是第一个在射电波段探测到发射的白矮星。类似于 AR Scorpii, (Pelisoli et al., 2023) 报道了 J191213.72-441045.1 在整个电磁波段（从射电到 X 射线）都表现出 5.3 分钟的周期性脉冲辐射。这一发现确立了白矮星脉冲星这一群体的存在。

这些极短标和中长时标光变源的发现，表明这种类型的爆发可能比我们之前认为的更为普遍。然而，目前的观测和搜索对这样的参数空间并不敏感。此外，在宇宙中很可能存在更短时间尺度的变化，接近于相应波长上的不确定性原理的极限。对这些源的研究预计在未来几年会有大幅增长，对类似天体的大范围搜索和多波长观测将有效地推进我们对宇宙的认识。

因此，我们希望在未来的工作中，可以深入研究更多的光变现象，包括但不限于以下几个方面

构建并优化暂现源搜索算法，适配更广泛的参数空间与更多的设备。如前面所述，现在的搜索算法主要集中在毫秒到秒量级的光变，对更短以及更长时标的光变并不敏感。另外，随着一系列新设备的上线，观测的时间分辨率和带宽的提升，将会带来海量的数据。因此，我将基于我之前构建基于目标检测的搜索流程，提升优化我们的算法，以应对未来的数据挑战。

构建超大快速射电暴爆发样本集，统一爆发描述语言，从中找出可能存在的新类别和新规律。随着快速射电暴探测数量与日俱增，我们逐渐发现其在时

¹https://github.com/FRBs/Transient_Phase_Space

²<https://github.com/KenzieNimmo/tps>

³https://github.com/nhurleywalker/Transient_Phase_Space

间-频率图上表现出丰富的形态。不同的工作中描述一个爆发的语言不统一，导致结论无法互相对比。之前的大部分工作也都是基于某一个快速射电暴源展开的特例分析，对于快速射电暴大样本的统一分析有助于我们解决快速射电暴分类以及起源的问题。我们将基于多个望远镜 PB 量级的数据，构建超过万数量级的爆发样本，进行统一的参数提取，包括到达时间、能量、宽度、偏振、频率、色散、散射、闪烁等一系列特征。结合基础的统计与一些机器学习算法，对参数和爆发的动态谱进行聚类，从中找出可能存在的新类别和新规律。

探索更高/更低时间分辨率和更宽带宽下的快速射电暴发射，限制快速射电暴辐射机制。目前对快速射电暴的探测集中在毫秒的时间尺度上，观测频段也集中在 L 波段（1-2GHz）。在这两个上仍然有跨越数量级的空间有待探索。通过更快的采样与更宽的频段的观测，去探索快速射电暴的辐射极限，限制快速射电暴的起源。

结合定位与偏振，研究快速射电暴周边环境。最近的多个研究表明，快速射电暴似乎处于复杂的等离子体环境中。然而也不排除类似 FRB 20220912A 这种周边环境干净的例外的存在。偏振携带了快速射电暴传播路径的信息，而射电干涉阵可以将快速射电暴定位在某一个宿主星系中。我们将结合偏振与定位，深入研究快速射电暴周边环境的特征。

引入创新的数学物理方法，深入理解快速射电暴的起源。在我们目前还不了解快速射电暴的起源和辐射机制的情况下，将其与其他物理过程进行比较是区分其基本物理机制异同的有效方法。时间和能量是与辐射机制直接相关的物理量。分析物理现象的时间序列和能量序列可以加深对物理现象起源的理解。在这里，我们广泛收集其它物理现象的数据，如地震、磁星爆发、太阳耀斑、闪电等，将不同的物理现象放在随机性-混沌性相空间中进行比较，以找寻与快速射电暴辐射机制类似的物理现象。

在当今这个科技迅猛发展的时代，技术的升级不仅极大地扩展了我们认识宇宙的边界，更是揭示了天体物理奥义背后的深层次秘密。随着设备的探测能力日益强大，我们得以窥探到更加精细的宇宙结构，透过现象看本质。每一个技术的革新，都是我们向宇宙深处迈出的坚实一步，每一次理论的突破，都让我们与浩瀚星河之间的距离拉得更近。我们希望，在未来，能够见证一个更为丰富多彩、层次分明的宇宙，展开无尽的探索与发现。

参考文献

- Agarwal D, Aggarwal K, Burke-Spolaor S, et al., 2020. FETCH: A deep-learning based classifier for fast transient classification[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 497(2): 1661-1674. DOI: [10.1093/mnras/staa1856](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1856).
- Aggarwal K, 2021b. Observational Effects of Banded Repeating FRBs[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 920(1): L18. DOI: [10.3847/2041-8213/ac2a3a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac2a3a).
- Aggarwal K, Agarwal D, Lewis E F, et al., 2021a. Comprehensive Analysis of a Dense Sample of FRB 121102 Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 922(2): 115. DOI: [10.3847/1538-4357/ac2577](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac2577).
- Akeret J, Chang C, Lucchi A, et al., 2017. Radio frequency interference mitigation using deep convolutional neural networks[J/OL]. *Astronomy and Computing*, 18: 35-39. DOI: [10.1016/j.ascom.2017.01.002](https://doi.org/10.1016/j.ascom.2017.01.002).
- Anna-Thomas R, Connor L, Dai S, et al., 2023. Magnetic field reversal in the turbulent environment around a repeating fast radio burst[J/OL]. *Science*, 380(6645): 599-603. DOI: [10.1126/science.abo6526](https://doi.org/10.1126/science.abo6526).
- GRIFFIN R E, 2019. Southern Horizons in Time-Domain Astronomy: Vol. 339[C/OL]. DOI: [10.1017/S1743921318008645](https://doi.org/10.1017/S1743921318008645).
- Arcus W R, Macquart J P, Sammons M W, et al., 2021. The fast radio burst dispersion measure distribution[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 501(4): 5319-5329. DOI: [10.1093/mnras/staa3948](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3948).
- Bailes M, Jameson A, Flynn C, et al., 2017. The UTMOST: A Hybrid Digital Signal Processor Transforms the Molonglo Observatory Synthesis Telescope[J/OL]. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 34: e045. DOI: [10.1017/pasa.2017.39](https://doi.org/10.1017/pasa.2017.39).
- Bailes M, 2022. The discovery and scientific potential of fast radio bursts[J/OL]. *Science*, 378(6620): abj3043. DOI: [10.1126/science.abj3043](https://doi.org/10.1126/science.abj3043).
- Band D, Matteson J, Ford L, et al., 1993. BATSE Observations of Gamma-Ray Burst Spectra. I. Spectral Diversity[J/OL]. *Astrophys. J.*, 413: 281. DOI: [10.1086/172995](https://doi.org/10.1086/172995).
- Barsdell B R, Bailes M, Barnes D G, et al., 2012. Accelerating incoherent dedispersion[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 422(1): 379-392. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2012.20622.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20622.x).
- BEDOU R A, MNASRI Z, BENZARTI F, 2022. Phase retrieval: Application to audio signal reconstruction[C]//2022 19th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). IEEE: 21-30.
- Beniamini P, Wadiasingh Z, Metzger B D, 2020. Periodicity in recurrent fast radio bursts and the origin of ultralong period magnetars[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 496(3): 3390-3401. DOI: [10.1093/mnras/staa1783](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1783).
- Beniamini P, Kumar P, Ma X, et al., 2021. Exploring the epoch of hydrogen reionization using FRBs [J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 502(4): 5134-5146. DOI: [10.1093/mnras/stab309](https://doi.org/10.1093/mnras/stab309).
- Beniamini P, Kumar P, Narayan R, 2022. Faraday depolarization and induced circular polarization by multipath propagation with application to FRBs[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 510(3): 4654-4668. DOI: [10.1093/mnras/stab3730](https://doi.org/10.1093/mnras/stab3730).
- Bethapudi S, Spitler L G, Main R A, et al., 2023. High frequency study of FRB 20180916B using the 100-m Effelsberg radio telescope[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 524(3): 3303-3313. DOI: [10.1093/mnras/stad2009](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2009).

- Bhandari S, Keane E F, Barr E D, et al., 2018. The SURvey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts - II. New FRB discoveries and their follow-up[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 475(2): 1427-1446. DOI: [10.1093/mnras/stx3074](https://doi.org/10.1093/mnras/stx3074).
- Bhardwaj M, Gaensler B M, Kaspi V M, et al., 2021. A Nearby Repeating Fast Radio Burst in the Direction of M81[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 910(2): L18. DOI: [10.3847/2041-8213/abeaa6](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abeaa6).
- Bhusare Y, Kumar A, Maan Y, et al., 2022. uGMRT detection of more than a hundred bursts from FRB 20220912A in 300 - 750 MHz frequency range[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15806: 1.
- Bochenek C D, Ravi V, Belov K V, et al., 2020. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar [J/OL]. *Nature*, 587(7832): 59-62. DOI: [10.1038/s41586-020-2872-x](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2872-x).
- Bochkovskiy A, Wang C Y, Liao H Y M, 2020. YOLOv4: Optimal Speed and Accuracy of Object Detection[A/OL]. arXiv:2004.10934. arXiv: [2004.10934](https://arxiv.org/abs/2004.10934).
- Brand K, Grobler T L, Kleynhans W, et al., 2023. Feature guided training and rotational standardization for the morphological classification of radio galaxies[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 522(1): 292-311. DOI: [10.1093/mnras/stad989](https://doi.org/10.1093/mnras/stad989).
- Båth M, 1966. Earthquake energy and magnitude[J/OL]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 7: 115-165. DOI: [10.1016/0079-1946\(66\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0079-1946(66)90003-6).
- Buckley D A H, Meintjes P J, Potter S B, et al., 2017. Polarimetric evidence of a white dwarf pulsar in the binary system AR Scorpii[J/OL]. *Nature Astronomy*, 1: 0029. DOI: [10.1038/s41550-016-0029](https://doi.org/10.1038/s41550-016-0029).
- Burke-Spolaor S, Bailes M, Ekers R, et al., 2011. Radio Bursts with Extragalactic Spectral Characteristics Show Terrestrial Origins[J/OL]. *Astrophys. J.*, 727(1): 18. DOI: [10.1088/0004-637X/727/1/18](https://doi.org/10.1088/0004-637X/727/1/18).
- Caleb M, Keane E F, van Straten W, et al., 2018. The SURvey for Pulsars and Extragalactic Radio Bursts - III. Polarization properties of FRBs 160102 and 151230[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 478(2): 2046-2055. DOI: [10.1093/mnras/sty1137](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1137).
- Caleb M, Stappers B W, Abbott T D, et al., 2020. Simultaneous multi-telescope observations of FRB 121102[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 496(4): 4565-4573. DOI: [10.1093/mnras/staa1791](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1791).
- Cao X F, Yu Y W, Zhou X, 2018. Compact Binary Mergers and the Event Rate of Fast Radio Bursts [J/OL]. *Astrophys. J.*, 858(2): 89. DOI: [10.3847/1538-4357/aabadd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aabadd).
- Cencini M, Cecconi F, Vulpiani A, 2010. Chaos: from simple models to complex systems[M/OL]. World Scientific, Singapore. DOI: [10.1142/7351](https://doi.org/10.1142/7351).
- Chatterjee S, Law C J, Wharton R S, et al., 2017. A direct localization of a fast radio burst and its host[J/OL]. *Nature*, 541(7635): 58-61. DOI: [10.1038/nature20797](https://doi.org/10.1038/nature20797).
- CHIME/FRB Collaboration, Amiri M, Bandura K, et al., 2018. The CHIME Fast Radio Burst Project: System Overview[J/OL]. *Astrophys. J.*, 863(1): 48. DOI: [10.3847/1538-4357/aad188](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad188).
- CHIME/FRB Collaboration, Andersen B C, Bandura K, et al., 2019. CHIME/FRB Discovery of Eight New Repeating Fast Radio Burst Sources[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 885(1): L24. DOI: [10.3847/2041-8213/ab4a80](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab4a80).
- Chime/Frb Collaboration, Amiri M, Andersen B C, et al., 2020. Periodic activity from a fast radio burst source[J/OL]. *Nature*, 582(7812): 351-355. DOI: [10.1038/s41586-020-2398-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2398-2).
- CHIME/FRB Collaboration, Andersen B C, Bandura K M, et al., 2020. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar[J/OL]. *Nature*, 587(7832): 54-58. DOI: [10.1038/s41586-020-2863-y](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2863-y).
- Chime/Frb Collaboration B C, Andersen, Bandura K, Bhardwaj M, et al., 2022. Sub-second periodicity in a fast radio burst[J/OL]. *Nature*, 607(7918): 256-259. DOI: [10.1038/s41586-022-04841-8](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04841-8).

- CHIME/FRB Collaboration, 2021. Recent high activity from a repeating Fast Radio Burst discovered by CHIME/FRB[J]. *The Astronomer's Telegram*, 14497: 1.
- Ching T C, Li D, Heiles C, et al., 2022. An early transition to magnetic supercriticality in star formation[J/OL]. *Nature*, 601(7891): 49-52. DOI: [10.1038/s41586-021-04159-x](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04159-x).
- Cho H, Macquart J P, Shannon R M, et al., 2020. Spectropolarimetric Analysis of FRB 181112 at Microsecond Resolution: Implications for Fast Radio Burst Emission Mechanism[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 891(2): L38. DOI: [10.3847/2041-8213/ab7824](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab7824).
- Connor L, van Leeuwen J, 2018. Applying Deep Learning to Fast Radio Burst Classification[J/OL]. *Astron. J.*, 156(6): 256. DOI: [10.3847/1538-3881/aae649](https://doi.org/10.3847/1538-3881/aae649).
- COOKE J, DÍAZ-MERCED W, FORAN G, et al., 2017. Exploring data sonification to enable, enhance, and accelerate the analysis of big, noisy, and multi-dimensional data: workshop 9[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 14(S339): 251-256.
- Cordes J M, Lazio T J W, 2002. NE2001.I. A New Model for the Galactic Distribution of Free Electrons and its Fluctuations[A/OL]. astro-ph/0207156. arXiv: [astro-ph/0207156](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207156).
- Cordes J M, McLaughlin M A, 2003. Searches for Fast Radio Transients[J/OL]. *Astrophys. J.*, 596(2): 1142-1154. DOI: [10.1086/378231](https://doi.org/10.1086/378231).
- Cordes J M, Wasserman I, 2016. Supergiant pulses from extragalactic neutron stars[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 457(1): 232-257. DOI: [10.1093/mnras/stv2948](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2948).
- Cordes J M, Wasserman I, Chatterjee S, et al., 2022. Empirical assessment of aperiodic and periodic radio bursts from young precessing magnetars[J/OL]. *Astrophys. J.*, 929(1): 97. DOI: [10.3847/1538-4357/ac4bbd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4bbd).
- Cruces M, Spitler L G, Scholz P, et al., 2021. Repeating behaviour of FRB 121102: periodicity, waiting times, and energy distribution[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 500(1): 448-463. DOI: [10.1093/mnras/staa3223](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3223).
- Dabbech A, Aghabiglou A, San Chu C, et al., 2023. CLEANing Cygnus A deep and fast with R2D2 [A/OL]. arXiv:2309.03291. arXiv: [2309.03291](https://arxiv.org/abs/2309.03291).
- Dai Z G, 2020. A magnetar-asteroid impact model for FRB 200428 associated with an x-ray burst from SGR 1935+2154[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 897(2): L40. DOI: [10.3847/2041-8213/aba11b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba11b).
- Day C K, Deller A T, Shannon R M, et al., 2020. High time resolution and polarization properties of ASKAP-localized fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 497(3): 3335-3350. DOI: [10.1093/mnras/staa2138](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2138).
- Delgado-Bonal A, 2019. Quantifying the randomness of the stock markets[J/OL]. *Sci Rep*, 9: 12761. DOI: [10.1038/s41598-019-49320-9](https://doi.org/10.1038/s41598-019-49320-9).
- Deng W, Zhang B, 2014. Cosmological Implications of Fast Radio Burst/Gamma-Ray Burst Associations[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 783(2): L35. DOI: [10.1088/2041-8205/783/2/L35](https://doi.org/10.1088/2041-8205/783/2/L35).
- DÍAZ MERCED W L, 2013. Sound for the exploration of space physics data[D]. University of Glasgow.
- DUAN K, BAI S, XIE L, et al., 2019. Centernet: Keypoint triplets for object detection[C]// *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*. 6569-6578.
- Everett J E, Weisberg J M, 2001. Emission Beam Geometry of Selected Pulsars Derived from Average Pulse Polarization Data[J/OL]. *Astrophys. J.*, 553(1): 341-357. DOI: [10.1086/320652](https://doi.org/10.1086/320652).
- Faber J T, Michilli D, McKinven R, et al., 2023. Morphologies of Bright Complex Fast Radio Bursts with CHIME/FRB Voltage Data[A/OL]. arXiv:2312.14133. arXiv: [2312.14133](https://arxiv.org/abs/2312.14133).
- Falcke H, Rezzolla L, 2014. Fast radio bursts: the last sign of supramassive neutron stars[J/OL]. *Astron. & Astrophys.*, 562: A137. DOI: [10.1051/0004-6361/201321996](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321996).

- Fedorova V A, Rodin A E, 2022. Detection of FRB 20220912A at 111 MHz with BSA radio telescope[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15713: 1.
- Feng Y, Li D, Yang Y P, et al., 2022a. Frequency-dependent polarization of repeating fast radio bursts—implications for their origin[J/OL]. *Science*, 375(6586): 1266-1270. DOI: [10.1126/science.abl7759](https://doi.org/10.1126/science.abl7759).
- Feng Y, Zhang Y K, Li D, et al., 2022b. Circular polarization in two active repeating fast radio bursts [J/OL]. *Science Bulletin*, 67(23): 2398-2401. DOI: [10.1016/j.scib.2022.11.014](https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.11.014).
- Feng Y, Jiang J, Zhou D, et al., 2023a. A highly depolarized burst from FRB 20121102A with significantly smaller RM as revealed by FAST[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15980: 1.
- Feng Y, Li D, Zhang Y K, et al., 2023b. An extreme active repeating fast radio burst in a clean environment[A/OL]. arXiv:2304.14671. arXiv: [2304.14671](https://arxiv.org/abs/2304.14671).
- Fong W F, Dong Y, Leja J, et al., 2021. Chronicling the Host Galaxy Properties of the Remarkable Repeating FRB 20201124A[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 919(2): L23. DOI: [10.3847/2041-8213/ac242b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac242b).
- Fonseca E, Andersen B C, Bhardwaj M, et al., 2020. Nine New Repeating Fast Radio Burst Sources from CHIME/FRB[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 891(1): L6. DOI: [10.3847/2041-8213/ab7208](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab7208).
- Gajjar V, Siemion A P V, Price D C, et al., 2018. Highest Frequency Detection of FRB 121102 at 4-8 GHz Using the Breakthrough Listen Digital Backend at the Green Bank Telescope[J/OL]. *Astrophys. J.*, 863(1): 2. DOI: [10.3847/1538-4357/aad005](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aad005).
- Gao H, Li Z, Zhang B, 2014. Fast Radio Burst/Gamma-Ray Burst Cosmography[J/OL]. *Astrophys. J.*, 788(2): 189. DOI: [10.1088/0004-637X/788/2/189](https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/2/189).
- Ge Z, Liu S, Wang F, et al., 2021. YOLOX: Exceeding YOLO Series in 2021[A/OL]. arXiv:2107.08430. arXiv: [2107.08430](https://arxiv.org/abs/2107.08430).
- GIRSHICK R, 2015. Fast r-cnn[C]//International Conference on Computer Vision (ICCV).
- GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al., 2014. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 580-587.
- Golpayegani G, Lorimer D R, Ellingson S W, et al., 2019. GBTrans: a commensal search for radio pulses with the Green Bank 20-m telescope[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 489(3): 4001-4006. DOI: [10.1093/mnras/stz2424](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2424).
- GOODFELLOW I, POUGET-ABADIE J, MIRZA M, et al., 2014. Generative adversarial nets[J]. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- Gourdji K, Michilli D, Spitler L G, et al., 2019. A Sample of Low-energy Bursts from FRB 121102 [J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 877(2): L19. DOI: [10.3847/2041-8213/ab1f8a](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab1f8a).
- GRIFFIN D, LIM J, 1984. Signal estimation from modified short-time fourier transform[J]. *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 32(2): 236-243.
- Guiotto Nai Fovino L, Zanella A, Grassi M, 2024. Evaluation of the Effectiveness of Sonification for Time-series Data Exploration[J/OL]. *Astron. J.*, 167(4): 150. DOI: [10.3847/1538-3881/ad2943](https://doi.org/10.3847/1538-3881/ad2943).
- Guo X, Xiao Y, Chen H, et al., 2024. FAST-FREX ² the FAST dataset for Fast Radio bursts Exploration[M/OL]. *Science Data Bank*. <https://doi.org/10.57760/sciencedb.15070>.
- GUTTMAN S E, GILROY L A, BLAKE R, 2005. Hearing what the eyes see: Auditory encoding of visual temporal sequences[J]. *Psychological science*, 16(3): 228-235.
- Hagstotz S, Reischke R, Lilow R, 2022. A new measurement of the Hubble constant using fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 511(1): 662-667. DOI: [10.1093/mnras/stac077](https://doi.org/10.1093/mnras/stac077).

- Hallinan G, Ravi V, Weinreb S, et al., 2019. The DSA-2000 — A Radio Survey Camera[C/OL]// Bulletin of the American Astronomical Society: Vol. 51. 255. DOI: [10.48550/arXiv.1907.07648](https://doi.org/10.48550/arXiv.1907.07648).
- Hankins T H, Kern J S, Weatherall J C, et al., 2003. Nanosecond radio bursts from strong plasma turbulence in the Crab pulsar[J/OL]. *Nature*, 422(6928): 141-143. DOI: [10.1038/nature01477](https://doi.org/10.1038/nature01477).
- Harrison C, Zanella A, Bonne N, et al., 2022. Audible universe[J/OL]. *Nature Astronomy*, 6: 22-23. DOI: [10.1038/s41550-021-01582-y](https://doi.org/10.1038/s41550-021-01582-y).
- Hashimoto T, Goto T, On A Y L, et al., 2020a. No redshift evolution of non-repeating fast radio burst rates[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 498(3): 3927-3945. DOI: [10.1093/mnras/staa2490](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2490).
- Hashimoto T, Goto T, Wang T W, et al., 2020b. Luminosity-duration relations and luminosity functions of repeating and non-repeating fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 494(2): 2886-2904. DOI: [10.1093/mnras/staa895](https://doi.org/10.1093/mnras/staa895).
- Hashimoto T, Goto T, Chen B H, et al., 2022. Energy functions of fast radio bursts derived from the first CHIME/FRB catalogue[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 511(2): 1961-1976. DOI: [10.1093/mnras/stac065](https://doi.org/10.1093/mnras/stac065).
- HE K, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al., 2017. Mask r-cnn[C]//Proceedings of the IEEE international conference on computer vision. 2961-2969.
- Heiles C, Campbell D B, 1970. Pulsar NP 0532: Properties and Systematic Polarization of Individual Strong Pulses at 430 MHz[J/OL]. *Nature*, 226(5245): 529-531. DOI: [10.1038/226529a0](https://doi.org/10.1038/226529a0).
- HERMANN T, HUNT A, NEUHOFF J G, et al., 2011. The sonification handbook: Vol. 1[M]. Logos Verlag Berlin.
- Herrmann W, 2022. Bright Pulses at 1400 MHz from FRB20220912A[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15691: 1.
- Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, et al., 1968. Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source [J/OL]. *Nature*, 217(5130): 709-713. DOI: [10.1038/217709a0](https://doi.org/10.1038/217709a0).
- Hewitt D M, Snelders M P, Hessels J W T, et al., 2022. Arecibo observations of a burst storm from FRB 20121102A in 2016[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 515(3): 3577-3596. DOI: [10.1093/mnras/stac1960](https://doi.org/10.1093/mnras/stac1960).
- Hewitt D M, Hessels J W T, Ould-Boukattine O S, et al., 2023. Dense forests of microshots in bursts from FRB 20220912A[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 526(2): 2039-2057. DOI: [10.1093/mnras/stad2847](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2847).
- Hilmarsson G H, Michilli D, Spitler L G, et al., 2021a. Rotation Measure Evolution of the Repeating Fast Radio Burst Source FRB 121102[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 908(1): L10. DOI: [10.3847/2041-8213/abdec0](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abdec0).
- Hilmarsson G H, Spitler L G, Main R A, et al., 2021b. Polarization properties of FRB 20201124A from detections with the Effelsberg 100-m radio telescope[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 508(4): 5354-5361. DOI: [10.1093/mnras/stab2936](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2936).
- Huppenkothen D, Pampin J, Davenport J R A, et al., 2023. The Sonified Hertzsprung-Russell Diagram[A/OL]. arXiv:2401.00488. arXiv: [2401.00488](https://arxiv.org/abs/2401.00488).
- Hurley-Walker N, Zhang X, Bahramian A, et al., 2022. A radio transient with unusually slow periodic emission[J/OL]. *Nature*, 601(7894): 526-530. DOI: [10.1038/s41586-021-04272-x](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04272-x).
- Hurley-Walker N, Rea N, McSweeney S J, et al., 2023. A long-period radio transient active for three decades[J/OL]. *Nature*, 619(7970): 487-490. DOI: [10.1038/s41586-023-06202-5](https://doi.org/10.1038/s41586-023-06202-5).
- Hutschenreuter S, Anderson C S, Betti S, et al., 2022. The Galactic Faraday rotation sky 2020[J/OL]. *Astron. & Astrophys.*, 657: A43. DOI: [10.1051/0004-6361/202140486](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140486).

- Hutton K, Woessner J, Hauksson E, 2010. Earthquake monitoring in Southern California for seventy-seven years (1932-2008)[J/OL]. *Bull Seismol Soc Am*, 100(2): 423-446. DOI: [10.1785/0120090130](https://doi.org/10.1785/0120090130).
- Inoue S, 2004. Probing the cosmic reionization history and local environment of gamma-ray bursts through radio dispersion[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 348(3): 999-1008. DOI: [10.1111/j.1365-2966.2004.07359.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2004.07359.x).
- Ioka K, 2003. The Cosmic Dispersion Measure from Gamma-Ray Burst Afterglows: Probing the Reionization History and the Burst Environment[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 598(2): L79-L82. DOI: [10.1086/380598](https://doi.org/10.1086/380598).
- Ioka K, Zhang B, 2020. A Binary Comb Model for Periodic Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 893(1): L26. DOI: [10.3847/2041-8213/ab83fb](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab83fb).
- ITO K, JOHNSON L, 2017. The lj speech dataset[EB/OL]. <https://keithito.com/LJ-Speech-Dataset/>.
- JAGANATHAN K, ELDAR Y C, HASSIBI B, 2016. Stft phase retrieval: Uniqueness guarantees and recovery algorithms[J]. *IEEE Journal of selected topics in signal processing*, 10(4): 770-781.
- Jahns J N, Spitler L G, Nimmo K, et al., 2023. The FRB 20121102A November rain in 2018 observed with the Arecibo Telescope[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 519(1): 666-687. DOI: [10.1093/mnras/stac3446](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3446).
- James C W, Prochaska J X, Macquart J P, et al., 2022. The fast radio burst population evolves, consistent with the star formation rate[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 510(1): L18-L23. DOI: [10.1093/mnrasl/slab117](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab117).
- Jansky K G, 1933. Electrical phenomena that apparently are of interstellar origin[J]. *Popular Astronomy*, 41: 548-555.
- Jiang J C, Wang W Y, Xu H, et al., 2022. FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. III. Polarimetry[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(12): 124003. DOI: [10.1088/1674-4527/ac98f6](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac98f6).
- Jiang P, Tang N Y, Hou L G, et al., 2020. The fundamental performance of FAST with 19-beam receiver at L band[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(5): 064. DOI: [10.1088/1674-4527/20/5/64](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/5/64).
- JIAO L, ZHANG F, LIU F, et al., 2019. A survey of deep learning-based object detection[J]. *IEEE access*, 7: 128837-128868.
- JOCHER G, CHAURASIA A, QIU J, 2023. YOLO by Ultralytics[CP/OL]. <https://github.com/ultralytics/ultralytics>.
- Kagan Y Y, Knopoff L, 1980. Spatial distribution of earthquakes: the two-point correlation function [J/OL]. *Geophys J*, 62(2): 303-320. DOI: [10.1111/j.1365-246X.1980.tb04857.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1980.tb04857.x).
- Karastergiou A, Chennamangalam J, Armour W, et al., 2015. Limits on fast radio bursts at 145 MHz with ARTEMIS, a real-time software backend[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 452(2): 1254-1262. DOI: [10.1093/mnras/stv1306](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1306).
- Katz J I, 2022. FRB 190520B - An FRB in a young supernova remnant?[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 510(1): L42-L44. DOI: [10.1093/mnrasl/slab128](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slab128).
- Keane E F, Stappers B W, Kramer M, et al., 2012. On the origin of a highly dispersed coherent radio burst[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 425(1): L71-L75. DOI: [10.1111/j.1745-3933.2012.01306.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-3933.2012.01306.x).
- Keating L C, Pen U L, 2020. Exploring the dispersion measure of the Milky Way halo[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 496(1): L106-L110. DOI: [10.1093/mnrasl/slaa095](https://doi.org/10.1093/mnrasl/slaa095).

- KIM J, KONG J, SON J, 2021. Conditional variational autoencoder with adversarial learning for end-to-end text-to-speech[C]//International Conference on Machine Learning. PMLR: 5530-5540.
- Kirsten F, Hessels J W T, Hewitt D M, et al., 2022a. PRECISE detects high activity from FRB 20220912A at 1.4 GHz but no bursts at 5 GHz using the Effelsberg telescope[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15727: 1.
- Kirsten F, Marcote B, Nimmo K, et al., 2022b. A repeating fast radio burst source in a globular cluster[J/OL]. *Nature*, 602(7898): 585-589. DOI: [10.1038/s41586-021-04354-w](https://doi.org/10.1038/s41586-021-04354-w).
- Klebesadel R W, Strong I B, Olson R A, 1973. Observations of Gamma-Ray Bursts of Cosmic Origin[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 182: L85. DOI: [10.1086/181225](https://doi.org/10.1086/181225).
- KONG J, KIM J, BAE J, 2020. Hifi-gan: Generative adversarial networks for efficient and high fidelity speech synthesis[J]. *Advances in neural information processing systems*, 33: 17022-17033.
- KUMAR K, KUMAR R, DE BOISSIERE T, et al., 2019. Melgan: Generative adversarial networks for conditional waveform synthesis[J]. *Advances in neural information processing systems*, 32.
- Kumar P, Shannon R M, Flynn C, et al., 2021. Extremely band-limited repetition from a fast radio burst source[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 500(2): 2525-2531. DOI: [10.1093/mnras/staa3436](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3436).
- Kumar P, Shannon R M, Lower M E, et al., 2022. Circularly polarized radio emission from the repeating fast radio burst source FRB 20201124A[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 512(3): 3400-3413. DOI: [10.1093/mnras/stac683](https://doi.org/10.1093/mnras/stac683).
- Kumar P, Luo R, Price D C, et al., 2023. Spectropolarimetric variability in the repeating fast radio burst source FRB 20180301A[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 526(3): 3652-3672. DOI: [10.1093/mnras/stad2969](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2969).
- Kumar P, Linder E V, 2019. Use of fast radio burst dispersion measures as distance measures[J/OL]. *Phys. Rev. D*, 100(8): 083533. DOI: [10.1103/PhysRevD.100.083533](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.100.083533).
- Kumar P, Lu W, Bhattacharya M, 2017. Fast radio burst source properties and curvature radiation model[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 468(3): 2726-2739. DOI: [10.1093/mnras/stx665](https://doi.org/10.1093/mnras/stx665).
- Landi E, Alexander R L, Gruesbeck J R, et al., 2012. Carbon Ionization Stages as a Diagnostic of the Solar Wind[J/OL]. *Astrophys. J.*, 744(2): 100. DOI: [10.1088/0004-637X/744/2/100](https://doi.org/10.1088/0004-637X/744/2/100).
- Lanman A E, Andersen B C, Chawla P, et al., 2022. A Sudden Period of High Activity from Repeating Fast Radio Burst 20201124A[J/OL]. *Astrophys. J.*, 927(1): 59. DOI: [10.3847/1538-4357/ac4bc7](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4bc7).
- Law C J, Abruzzo M W, Bassa C G, et al., 2017. A Multi-telescope Campaign on FRB 121102: Implications for the FRB Population[J/OL]. *Astrophys. J.*, 850(1): 76. DOI: [10.3847/1538-4357/aa9700](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9700).
- Law C J, Bower G C, Burke-Spolaor S, et al., 2018. realfast: Real-time, Commensal Fast Transient Surveys with the Very Large Array[J/OL]. *Astrophys. J. Suppl.*, 236(1): 8. DOI: [10.3847/1538-4365/aab77b](https://doi.org/10.3847/1538-4365/aab77b).
- Law C, Tendulkar S, Clarke T, et al., 2021. VLA/realfast localization and deep imaging of FRB 20201124A[J]. *The Astronomer's Telegram*, 14526: 1.
- Levin Y, Beloborodov A M, Bransgrove A, 2020. Precessing Flaring Magnetar as a Source of Repeating FRB 180916.J0158+65[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 895(2): L30. DOI: [10.3847/2041-8213/ab8c4c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8c4c).
- Li C K, Lin L, Xiong S L, et al., 2021a. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from

- SGR J1935+2154 and with FRB 200428[J/OL]. *Nature Astronomy*, 5: 378-384. DOI: [10.1038/s41550-021-01302-6](https://doi.org/10.1038/s41550-021-01302-6).
- Li C, Li L, Jiang H, et al., 2022. YOLOv6: A Single-Stage Object Detection Framework for Industrial Applications[A/OL]. arXiv:2209.02976. arXiv: [2209.02976](https://arxiv.org/abs/2209.02976).
- Li D, Wang P, Zhu W W, et al., 2021b. A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source[J/OL]. *Nature*, 598(7880): 267-271. DOI: [10.1038/s41586-021-03878-5](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03878-5).
- Li D, Wang P, Qian L, et al., 2018. FAST in Space: Considerations for a Multibeam, Multipurpose Survey Using China's 500-m Aperture Spherical Radio Telescope (FAST)[J/OL]. *IEEE Microwave Magazine*, 19(3): 112-119. DOI: [10.1109/MMM.2018.2802178](https://doi.org/10.1109/MMM.2018.2802178).
- Li D, Dickey J M, Liu S, 2019. Preface: Planning the scientific applications of the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 19(2): 016. DOI: [10.1088/1674-4527/19/2/16](https://doi.org/10.1088/1674-4527/19/2/16).
- Li Z, Gao H, Wei J J, et al., 2020. Cosmology-insensitive estimate of IGM baryon mass fraction from five localized fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 496: L28-L32. DOI: [10.1093/mnras/slaa070](https://doi.org/10.1093/mnras/slaa070).
- Lippiello E, de Arcangelis L, Godano C, 2008. Influence of time and space correlations on earthquake magnitude[J/OL]. *Phys. Rev. Lett.*, 100(3): 038501. DOI: [10.1103/PhysRevLett.100.038501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.100.038501).
- Liu Y L, Li J, Liu Z Y, et al., 2022. A Search Technique Based on Deep Learning for Fast Radio Bursts and Initial Results for FRB 20201124A with the NSRT[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(10): 105007. DOI: [10.1088/1674-4527/ac833a](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac833a).
- Lomb N R, 1976. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data[J/OL]. *Astrophys. Space Sci.*, 39: 447-462. DOI: [10.1007/BF00648343](https://doi.org/10.1007/BF00648343).
- Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al., 2007. A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin[J/OL]. *Science*, 318(5851): 777. DOI: [10.1126/science.1147532](https://doi.org/10.1126/science.1147532).
- Lu W, Kumar P, 2016. A universal EDF for repeating fast radio bursts?[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 461(1): L122-L126. DOI: [10.1093/mnras/slwt113](https://doi.org/10.1093/mnras/slwt113).
- Lu W, Kumar P, 2019a. The maximum luminosity of fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 483(1): L93-L97. DOI: [10.1093/mnras/sly200](https://doi.org/10.1093/mnras/sly200).
- Lu W, Piro A L, 2019b. Implications from ASKAP Fast Radio Burst Statistics[J/OL]. *Astrophys. J.*, 883(1): 40. DOI: [10.3847/1538-4357/ab3796](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3796).
- Lu W, Kumar P, Zhang B, 2020. A unified picture of Galactic and cosmological fast radio bursts [J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 498(1): 1397-1405. DOI: [10.1093/mnras/staa2450](https://doi.org/10.1093/mnras/staa2450).
- Luo J W, Zhu-Ge J M, Zhang B, 2023. Machine learning classification of CHIME fast radio bursts - I. Supervised methods[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 518(2): 1629-1641. DOI: [10.1093/mnras/stac3206](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3206).
- Luo R, Wang B J, Men Y P, et al., 2020a. Diverse polarization angle swings from a repeating fast radio burst source[J/OL]. *Nature*, 586(7831): 693-696. DOI: [10.1038/s41586-020-2827-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2827-2).
- Luo R, Lee K, Lorimer D R, et al., 2018. On the normalized FRB luminosity function[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 481(2): 2320-2337. DOI: [10.1093/mnras/sty2364](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2364).
- Luo R, Men Y, Lee K, et al., 2020b. On the FRB luminosity function - - II. Event rate density[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 494(1): 665-679. DOI: [10.1093/mnras/staa704](https://doi.org/10.1093/mnras/staa704).
- Lyu F, Meng Y Z, Tang Z F, et al., 2021. A comparison between repeating bursts of FRB 121102 and giant pulses from Crab pulsar and its applications[J/OL]. *Frontiers of Physics*, 16(2): 24503. DOI: [10.1007/s11467-020-1039-4](https://doi.org/10.1007/s11467-020-1039-4).

- Lyutikov M, Barkov M V, Giannios D, 2020. FRB Periodicity: Mild Pulsars in Tight O/B-star Binaries[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 893(2): L39. DOI: [10.3847/2041-8213/ab87a4](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab87a4).
- Macquart J P, Ekers R D, 2018. Fast radio burst event rate counts - I. Interpreting the observations [J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 474(2): 1900-1908. DOI: [10.1093/mnras/stx2825](https://doi.org/10.1093/mnras/stx2825).
- Macquart J P, Prochaska J X, McQuinn M, et al., 2020. A census of baryons in the Universe from localized fast radio bursts[J/OL]. *Nature*, 581(7809): 391-395. DOI: [10.1038/s41586-020-2300-2](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2300-2).
- Macquart J P, Bailes M, Bhat N D R, et al., 2010. The Commensal Real-Time ASKAP Fast-Transients (CRAFT) Survey[J/OL]. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 27(3): 272-282. DOI: [10.1071/AS09082](https://doi.org/10.1071/AS09082).
- Madau P, Dickinson M, 2014. Cosmic Star-Formation History[J/OL]. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 52: 415-486. DOI: [10.1146/annurev-astro-081811-125615](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125615).
- Maehara H, Shibayama T, Notsu Y, et al., 2015. Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data[J/OL]. *Earth, Planets and Space*, 67: 59. DOI: [10.1186/s40623-015-0217-z](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0217-z).
- Main R A, Hilmarsson G H, Marthi V R, et al., 2021. Scintillation timescale measurement of the highly active FRB 20201124A[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*. DOI: [10.1093/mnras/stab3218](https://doi.org/10.1093/mnras/stab3218).
- Marcote B, Paragi Z, Hessels J W T, et al., 2017. The Repeating Fast Radio Burst FRB 121102 as Seen on Milliarcsecond Angular Scales[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 834(2): L8. DOI: [10.3847/2041-8213/834/2/L8](https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L8).
- Marcote B, Nimmo K, Hessels J W T, et al., 2020. A repeating fast radio burst source localized to a nearby spiral galaxy[J/OL]. *Nature*, 577(7789): 190-194. DOI: [10.1038/s41586-019-1866-z](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1866-z).
- Margalit B, Metzger B D, 2018. A Concordance Picture of FRB 121102 as a Flaring Magnetar Embedded in a Magnetized Ion-Electron Wind Nebula[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 868(1): L4. DOI: [10.3847/2041-8213/aaedad](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaedad).
- Marsh T R, Gänsicke B T, Hümmelich S, et al., 2016. A radio-pulsing white dwarf binary star [J/OL]. *Nature*, 537(7620): 374-377. DOI: [10.1038/nature18620](https://doi.org/10.1038/nature18620).
- Marthi V R, Bethapudi S, Main R A, et al., 2021. Burst properties of the highly active FRB20201124A using uGMRT[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*. DOI: [10.1093/mnras/stab3067](https://doi.org/10.1093/mnras/stab3067).
- Masui K, Lin H H, Sievers J, et al., 2015. Dense magnetized plasma associated with a fast radio burst[J/OL]. *Nature*, 528(7583): 523-525. DOI: [10.1038/nature15769](https://doi.org/10.1038/nature15769).
- Mckinven R, Gaensler B M, Michilli D, et al., 2023a. A Large-scale Magneto-ionic Fluctuation in the Local Environment of Periodic Fast Radio Burst Source FRB 20180916B[J/OL]. *Astrophys. J.*, 950(1): 12. DOI: [10.3847/1538-4357/acc65f](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acc65f).
- Mckinven R, Gaensler B M, Michilli D, et al., 2023b. Revealing the Dynamic Magnetoionic Environments of Repeating Fast Radio Burst Sources through Multiyear Polarimetric Monitoring with CHIME/FRB[J/OL]. *Astrophys. J.*, 951(1): 82. DOI: [10.3847/1538-4357/acd188](https://doi.org/10.3847/1538-4357/acd188).
- McKinven R, Chime/Frb Collaboration, 2022. Nine Bursts in Three Days from a Newly Discovered Repeating Source of Fast Radio Bursts[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15679: 1.
- Men Y, Barr E, 2024. TransientX: A high performance single pulse search package[A/OL]. arXiv:2401.13834. arXiv: [2401.13834](https://arxiv.org/abs/2401.13834).
- Mereghetti S, Savchenko V, Ferrigno C, et al., 2020. INTEGRAL Discovery of a Burst with Associated Radio Emission from the Magnetar SGR 1935+2154[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 898(2): L29. DOI: [10.3847/2041-8213/aba2cf](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba2cf).

- Metzger B D, Margalit B, Sironi L, 2019. Fast radio bursts as synchrotron maser emission from decelerating relativistic blast waves[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 485(3): 4091-4106. DOI: [10.1093/mnras/stz700](https://doi.org/10.1093/mnras/stz700).
- Michilli D, Hessels J W T, Lyon R J, et al., 2018a. Single-pulse classifier for the LOFAR Tied-Array All-sky Survey[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 480(3): 3457-3467. DOI: [10.1093/mnras/sty2072](https://doi.org/10.1093/mnras/sty2072).
- Michilli D, Seymour A, Hessels J W T, et al., 2018b. An extreme magneto-ionic environment associated with the fast radio burst source FRB 121102[J/OL]. *Nature*, 553(7687): 182-185. DOI: [10.1038/nature25149](https://doi.org/10.1038/nature25149).
- Mickaliger M B, McLaughlin M A, Lorimer D R, et al., 2012. A Giant Sample of Giant Pulses from the Crab Pulsar[J/OL]. *Astrophys. J.*, 760(1): 64. DOI: [10.1088/0004-637X/760/1/64](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/64).
- Nan R, Li D, Jin C, et al., 2011. The Five-Hundred Aperture Spherical Radio Telescope (fast) Project[J/OL]. *International Journal of Modern Physics D*, 20(6): 989-1024. DOI: [10.1142/S0218271811019335](https://doi.org/10.1142/S0218271811019335).
- Nicholl M, Williams P K G, Berger E, et al., 2017. Empirical Constraints on the Origin of Fast Radio Bursts: Volumetric Rates and Host Galaxy Demographics as a Test of Millisecond Magnetar Connection[J/OL]. *Astrophys. J.*, 843(2): 84. DOI: [10.3847/1538-4357/aa794d](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa794d).
- Nimmo K, Hessels J W T, Keimpema A, et al., 2021. Highly polarized microstructure from the repeating FRB 20180916B[J/OL]. *Nature Astronomy*, 5: 594-603. DOI: [10.1038/s41550-021-01321-3](https://doi.org/10.1038/s41550-021-01321-3).
- Nimmo K, Hessels J W T, Kirsten F, et al., 2022a. Burst timescales and luminosities as links between young pulsars and fast radio bursts[J/OL]. *Nature Astronomy*, 6: 393-401. DOI: [10.1038/s41550-021-01569-9](https://doi.org/10.1038/s41550-021-01569-9).
- Nimmo K, Hewitt D M, Hessels J W T, et al., 2022b. Milliarcsecond Localization of the Repeating FRB 20201124A[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 927(1): L3. DOI: [10.3847/2041-8213/ac540f](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac540f).
- Nimmo K, Hessels J W T, Snelders M P, et al., 2023. A burst storm from the repeating FRB 20200120E in an M81 globular cluster[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 520(2): 2281-2305. DOI: [10.1093/mnras/stad269](https://doi.org/10.1093/mnras/stad269).
- Niu C H, Aggarwal K, Li D, et al., 2022a. A repeating fast radio burst associated with a persistent radio source[J/OL]. *Nature*, 606(7916): 873-877. DOI: [10.1038/s41586-022-04755-5](https://doi.org/10.1038/s41586-022-04755-5).
- Niu C H, Li D, Luo R, et al., 2021. CRAFTS for Fast Radio Bursts: Extending the Dispersion-Fluence Relation with New FRBs Detected by FAST[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 909(1): L8. DOI: [10.3847/2041-8213/abe7f0](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abe7f0).
- Niu J R, Zhu W W, Zhang B, et al., 2022b. FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. IV. Spin Period Search[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(12): 124004. DOI: [10.1088/1674-4527/ac995d](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac995d).
- OMORI F, 1895. On the after-shocks of earthquakes[D]. The University of Tokyo.
- OORD A, LI Y, BABUSCHKIN I, et al., 2018. Parallel wavenet: Fast high-fidelity speech synthesis [C]//International conference on machine learning. PMLR: 3918-3926.
- Oppermann N, Yu H R, Pen U L, 2018. On the non-Poissonian repetition pattern of FRB121102 [J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 475(4): 5109-5115. DOI: [10.1093/mnras/sty004](https://doi.org/10.1093/mnras/sty004).
- Ould-Boukattine O S, Herrmann W, Gawronski M, et al., 2022. Bright burst detections from FRB 20220912A at 332 MHz using the Westerbork-RT1 25-m telescope[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15817: 1.

- Pastor-Marazuela I, Connor L, van Leeuwen J, et al., 2021. Chromatic periodic activity down to 120 megahertz in a fast radio burst[J/OL]. *Nature*, 596(7873): 505-508. DOI: [10.1038/s41586-021-03724-8](https://doi.org/10.1038/s41586-021-03724-8).
- Pelisolì I, Marsh T R, Buckley D A H, et al., 2023. A 5.3-min-period pulsing white dwarf in a binary detected from radio to X-rays[J/OL]. *Nature Astronomy*, 7: 931-942. DOI: [10.1038/s41550-023-01995-x](https://doi.org/10.1038/s41550-023-01995-x).
- Pellicciari D, Bernardi G, Pilia M, et al., 2022. Detection of a burst from the newly discovered active repeater FRB20220912A with the Northern Cross radio telescope[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15695: 1.
- Penzias A A, Wilson R W, 1965. A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. [J/OL]. *Astrophys. J.*, 142: 419-421. DOI: [10.1086/148307](https://doi.org/10.1086/148307).
- Perera B, Perillat P, Fernandez F, et al., 2022. Detection of a bright burst from FRB 20220912A at 2.3 GHz with the Arecibo 12-m telescope[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15734: 1.
- Petroff E, Bailes M, Barr E D, et al., 2015a. A real-time fast radio burst: polarization detection and multiwavelength follow-up[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 447(1): 246-255. DOI: [10.1093/mnras/stu2419](https://doi.org/10.1093/mnras/stu2419).
- Petroff E, Keane E F, Barr E D, et al., 2015b. Identifying the source of perytons at the Parkes radio telescope[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 451(4): 3933-3940. DOI: [10.1093/mnras/stv1242](https://doi.org/10.1093/mnras/stv1242).
- Petroff E, Burke-Spolaor S, Keane E F, et al., 2017. A polarized fast radio burst at low Galactic latitude[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 469(4): 4465-4482. DOI: [10.1093/mnras/stx1098](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1098).
- Pincus S M, 1991. Approximate entropy as a measure of system complexity[J/OL]. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*, 88(6): 2297-2301. DOI: [10.1073/pnas.88.6.2297](https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297).
- Piro A L, Gaensler B M, 2018. The Dispersion and Rotation Measure of Supernova Remnants and Magnetized Stellar Winds: Application to Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 861(2): 150. DOI: [10.3847/1538-4357/aac9bc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aac9bc).
- Piro L, Bruni G, Troja E, et al., 2021. The fast radio burst FRB 20201124A in a star-forming region: Constraints to the progenitor and multiwavelength counterparts[J/OL]. *Astron. & Astrophys.*, 656: L15. DOI: [10.1051/0004-6361/202141903](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141903).
- Planck Collaboration, Ade P A R, Aghanim N, et al., 2016. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters[J/OL]. *Astron. & Astrophys.*, 594: A13. DOI: [10.1051/0004-6361/201525830](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525830).
- Platts E, Weltman A, Walters A, et al., 2019. A living theory catalogue for fast radio bursts[J/OL]. *Phys. Rep.*, 821: 1-27. DOI: [10.1016/j.physrep.2019.06.003](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2019.06.003).
- Pleunis Z, Michilli D, Bassa C G, et al., 2021a. LOFAR Detection of 110-188 MHz Emission and Frequency-dependent Activity from FRB 20180916B[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 911(1): L3. DOI: [10.3847/2041-8213/abec72](https://doi.org/10.3847/2041-8213/abec72).
- Pleunis Z, Good D C, Kaspi V M, et al., 2021b. Fast Radio Burst Morphology in the First CHIME/FRB Catalog[J/OL]. *Astrophys. J.*, 923(1): 1. DOI: [10.3847/1538-4357/ac33ac](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac33ac).
- Plotnikov I, Sironi L, 2019. The synchrotron maser emission from relativistic shocks in Fast Radio Bursts: 1D PIC simulations of cold pair plasmas[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 485(3): 3816-3833. DOI: [10.1093/mnras/stz640](https://doi.org/10.1093/mnras/stz640).
- POPOV S B, POSTNOV K, 2007. Hyperflares of sgrs as an engine for millisecond extragalactic radio bursts[A].
- PRENGER R, VALLE R, CATANZARO B, 2019. Waveglow: A flow-based generative network for speech synthesis[C]/ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE: 3617-3621.

- Qian L, Pan Z, Li D, et al., 2019. The first pulsar discovered by FAST[J/OL]. *Science China Physics, Mechanics, and Astronomy*, 62(5): 959508. DOI: [10.1007/s11433-018-9354-y](https://doi.org/10.1007/s11433-018-9354-y).
- Qu Y, Zhang B, 2023a. Polarization of fast radio bursts: radiation mechanisms and propagation effects[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 522(2): 2448-2477. DOI: [10.1093/mnras/stad1072](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1072).
- Qu Y, Zhang B, Kumar P, 2023b. The plasma suppression effect can be ignored in realistic FRB models invoking bunched coherent radio emission[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 518(1): 66-74. DOI: [10.1093/mnras/stac3111](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3111).
- Rafiei-Ravandi M, Smith K M, Li D, et al., 2021. CHIME/FRB Catalog 1 Results: Statistical Cross-correlations with Large-scale Structure[J/OL]. *Astrophys. J.*, 922(1): 42. DOI: [10.3847/1538-4357/ac1dab](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac1dab).
- Rajwade K M, Mickaliger M B, Stappers B W, et al., 2020. Possible periodic activity in the repeating FRB 121102[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 495(4): 3551-3558. DOI: [10.1093/mnras/staa1237](https://doi.org/10.1093/mnras/staa1237).
- Rajwade K, Wharton R, Majid W, et al., 2022. Detection of bursts from FRB 20220912A at 1.4 and 2.2 GHz[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15791: 1.
- Ransom S M, 2001. New search techniques for binary pulsars[D]. Harvard University, Massachusetts.
- Ravi V, Shannon R M, Bailes M, et al., 2016. The magnetic field and turbulence of the cosmic web measured using a brilliant fast radio burst[J/OL]. *Science*, 354(6317): 1249-1252. DOI: [10.1126/science.aaf6807](https://doi.org/10.1126/science.aaf6807).
- Ravi V, 2022. Detection and localization of FRB 20220912A with DSA-110[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15693: 1.
- Ravi V, Law C J, Li D, et al., 2022. The host galaxy and persistent radio counterpart of FRB 20201124A[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 513(1): 982-990. DOI: [10.1093/mnras/stac465](https://doi.org/10.1093/mnras/stac465).
- Ravi V, Catha M, Chen G, et al., 2023. Deep Synoptic Array Science: Discovery of the Host Galaxy of FRB 20220912A[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 949(1): L3. DOI: [10.3847/2041-8213/acc4b6](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acc4b6).
- Redmon J, Farhadi A, 2018. YOLOv3: An Incremental Improvement[A/OL]. arXiv:1804.02767. arXiv: [1804.02767](https://arxiv.org/abs/1804.02767).
- REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al., 2016. You only look once: Unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 779-788.
- REN S, HE K, GIRSHICK R, et al., 2015. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[C]//Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS).
- Ridnaia A, Svinkin D, Frederiks D, et al., 2021. A peculiar hard X-ray counterpart of a Galactic fast radio burst[J/OL]. *Nature Astronomy*, 5: 372-377. DOI: [10.1038/s41550-020-01265-0](https://doi.org/10.1038/s41550-020-01265-0).
- Rowlinson A, Bell M E, Murphy T, et al., 2016. Limits on Fast Radio Bursts and other transient sources at 182 MHz using the Murchison Widefield Array[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 458(4): 3506-3522. DOI: [10.1093/mnras/stw451](https://doi.org/10.1093/mnras/stw451).
- Ryder S D, Bannister K W, Bhandari S, et al., 2023. A luminous fast radio burst that probes the Universe at redshift 1[J/OL]. *Science*, 382(6668): 294-299. DOI: [10.1126/science.adf2678](https://doi.org/10.1126/science.adf2678).
- Saichev A, Sornette D, 2007. Theory of earthquake recurrence times[J/OL]. *J Geophys Res Solid Earth*, 112(B4): B04313. DOI: [10.1029/2006JB004536](https://doi.org/10.1029/2006JB004536).
- Sanidas S, Caleb M, Driessen L, et al., 2018. MeerTRAP: A pulsar and fast transients survey with MeerKAT[C/OL]//Weltevrede P, Perera B B P, Preston L L, et al. Pulsar Astrophysics the Next Fifty Years: Vol. 337. 406-407. DOI: [10.1017/S1743921317009310](https://doi.org/10.1017/S1743921317009310).

- SAWE N, CHAFE C, TREVIÑO J, 2020. Using data sonification to overcome science literacy, numeracy, and visualization barriers in science communication[J]. *Frontiers in Communication*, 5: 46.
- Scarf F L, Gurnett D A, Kurth W S, et al., 1982. Voyager 2 Plasma Wave Observations at Saturn [J/OL]. *Science*, 215(4532): 587-594. DOI: [10.1126/science.215.4532.587](https://doi.org/10.1126/science.215.4532.587).
- Scargle J D, 1982. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data[J/OL]. *Astrophys. J.*, 263: 835-853. DOI: [10.1086/160554](https://doi.org/10.1086/160554).
- Schechter P, 1976. An analytic expression for the luminosity function for galaxies.[J/OL]. *Astrophys. J.*, 203: 297-306. DOI: [10.1086/154079](https://doi.org/10.1086/154079).
- Schölzel C, 2019. Nonlinear measures for dynamical systems[M/OL]. Zenodo. DOI: [10.5281/zenodo.3814723](https://doi.org/10.5281/zenodo.3814723).
- Shechtman Y, Eldar Y C, Cohen O, et al., 2014. Phase Retrieval with Application to Optical Imaging [A/OL]. arXiv:1402.7350. arXiv: [1402.7350](https://arxiv.org/abs/1402.7350).
- Sheikh S, Farah W, Pollak A W, et al., 2022. Bright radio bursts from the active FRB 20220912A detected with the Allen Telescope Array[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15735: 1.
- Sieber W, 1973. Pulsar Spectra[J]. *Astron. & Astrophys.*, 28: 237.
- Snelders M P, Nimmo K, Hessels J W T, et al., 2023. Detection of ultra-fast radio bursts from FRB 20121102A[J/OL]. *Nature Astronomy*, 7: 1486-1496. DOI: [10.1038/s41550-023-02101-x](https://doi.org/10.1038/s41550-023-02101-x).
- Spitler L G, Cordes J M, Hessels J W T, et al., 2014. Fast Radio Burst Discovered in the Arecibo Pulsar ALFA Survey[J/OL]. *Astrophys. J.*, 790(2): 101. DOI: [10.1088/0004-637X/790/2/101](https://doi.org/10.1088/0004-637X/790/2/101).
- Spitler L G, Scholz P, Hessels J W T, et al., 2016. A repeating fast radio burst[J/OL]. *Nature*, 531 (7593): 202-205. DOI: [10.1038/nature17168](https://doi.org/10.1038/nature17168).
- Sridhar N, Metzger B D, Beniamini P, et al., 2021. Periodic Fast Radio Bursts from Luminous X-ray Binaries[J/OL]. *Astrophys. J.*, 917(1): 13. DOI: [10.3847/1538-4357/ac0140](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0140).
- Staelin D H, 1970. Observed Shapes of Crab Nebula Radio Pulses[J/OL]. *Nature*, 226(5240): 69-70. DOI: [10.1038/226069a0](https://doi.org/10.1038/226069a0).
- Stevens S S, 1937. A Scale for the Measurement of the Psychological Magnitude Pitch[J/OL]. *Acoustical Society of America Journal*, 8(3): 185. DOI: [10.1121/1.1915893](https://doi.org/10.1121/1.1915893).
- Surnis M P, Agarwal D, Lorimer D R, et al., 2019. GREENBURST: A commensal Fast Radio Burst search back-end for the Green Bank Telescope[J/OL]. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 36: e032. DOI: [10.1017/pasa.2019.26](https://doi.org/10.1017/pasa.2019.26).
- Tan X, Qin T, Soong F, et al., 2021. A Survey on Neural Speech Synthesis[A/OL]. arXiv:2106.15561. arXiv: [2106.15561](https://arxiv.org/abs/2106.15561).
- Tendulkar S P, Bassa C G, Cordes J M, et al., 2017. The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 834(2): L7. DOI: [10.3847/2041-8213/834/2/L7](https://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/L7).
- Thornton D, Stappers B, Bailes M, et al., 2013. A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances[J/OL]. *Science*, 341(6141): 53-56. DOI: [10.1126/science.1236789](https://doi.org/10.1126/science.1236789).
- Tong H, Wang W, Wang H G, 2020. Periodicity in fast radio bursts due to forced precession by a fallback disk[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 20(9): 142. DOI: [10.1088/1674-4527/20/9/142](https://doi.org/10.1088/1674-4527/20/9/142).
- Totani T, 2013. Cosmological Fast Radio Bursts from Binary Neutron Star Mergers[J/OL]. *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, 65: L12. DOI: [10.1093/pasj/65.5.L12](https://doi.org/10.1093/pasj/65.5.L12).
- Totani T, Tsuzuki Y, 2023. Fast radio bursts trigger aftershocks resembling earthquakes, but not solar flares[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 526(2): 2795-2811. DOI: [10.1093/mnras/stad2532](https://doi.org/10.1093/mnras/stad2532).

- TUCKER BROWN J, HARRISON C, ZANELLA A, et al., 2022. Evaluating the efficacy of sonification for signal detection in univariate, evenly sampled light curves using astronify[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 516(4): 5674-5683.
- Vedantham H K, Ravi V, Hallinan G, et al., 2016. The Fluence and Distance Distributions of Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 830(2): 75. DOI: [10.3847/0004-637X/830/2/75](https://doi.org/10.3847/0004-637X/830/2/75).
- Wadiasingh Z, Timokhin A, 2019. Repeating Fast Radio Bursts from Magnetars with Low Magnetospheric Twist[J/OL]. *Astrophys. J.*, 879(1): 4. DOI: [10.3847/1538-4357/ab2240](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab2240).
- WALKER B N, NEES M A, HERMANN T, et al., 2011. The sonification handbook[J]. Chapter Theory of Sonication.
- Wang C Y, Bochkovskiy A, Liao H Y M, 2022a. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[A/OL]. arXiv:2207.02696. arXiv: [2207.02696](https://arxiv.org/abs/2207.02696).
- Wang C Y, Yeh I H, Liao H Y M, 2024. YOLOv9: Learning What You Want to Learn Using Programmable Gradient Information[A/OL]. arXiv:2402.13616. arXiv: [2402.13616](https://arxiv.org/abs/2402.13616).
- Wang F Y, Yu H, 2017. SGR-like behaviour of the repeating FRB 121102[J/OL]. *J. Cosmol. Astropart. Phys.*, 2017(3): 023. DOI: [10.1088/1475-7516/2017/03/023](https://doi.org/10.1088/1475-7516/2017/03/023).
- Wang F Y, Zhang G Q, 2019. A Universal Energy Distribution for FRB 121102[J/OL]. *Astrophys. J.*, 882(2): 108. DOI: [10.3847/1538-4357/ab35dc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab35dc).
- Wang F Y, Zhang G Q, Dai Z G, et al., 2022b. Repeating fast radio burst 20201124A originates from a magnetar/Be star binary[J/OL]. *Nature Communications*, 13: 4382. DOI: [10.1038/s41467-022-31923-y](https://doi.org/10.1038/s41467-022-31923-y).
- Wang F Y, Wu Q, Dai Z G, 2023a. Repeating fast radio bursts reveal memory from minutes to an hour[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 949(2): L33. DOI: [10.3847/2041-8213/acd5d2](https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd5d2).
- Wang P, Men Y, Zhou D, et al., 2020. FRB121102 is active again as revealed by FAST[J]. *The Astronomer's Telegram*, 13959: 1.
- Wang W Y, Jiang J C, Lee K, et al., 2022c. Polarization of magnetospheric curvature radiation in repeating fast radio bursts[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 517(4): 5080-5089. DOI: [10.1093/mnras/stac3070](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3070).
- Wang W Y, Yang Y P, Niu C H, et al., 2022d. Magnetospheric Curvature Radiation by Bunches as Emission Mechanism for Repeating Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 927(1): 105. DOI: [10.3847/1538-4357/ac4097](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4097).
- Wang W, Luo R, Yue H, et al., 2018. FRB 121102: a starquake-induced repeater?[J/OL]. *Astrophys. J.*, 852(2): 140. DOI: [10.3847/1538-4357/aaa025](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aaa025).
- Wang Y B, Kurban A, Zhou X, et al., 2023b. Statistical properties and lensing effect on the repeating fast radio burst FRB 180916.J0158+65[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 524(1): 569-576. DOI: [10.1093/mnras/stad1922](https://doi.org/10.1093/mnras/stad1922).
- Watanabe K, Masuda S, Segawa T, 2012. Hinode Flare Catalogue[J/OL]. *Sol. Phys.*, 279(1): 317-322. DOI: [10.1007/s11207-012-9983-y](https://doi.org/10.1007/s11207-012-9983-y).
- Xu C K, Cheng C, Appleton P N, et al., 2022a. A 0.6 Mpc H I structure associated with Stephan's Quintet[J/OL]. *Nature*, 610(7932): 461-466. DOI: [10.1038/s41586-022-05206-x](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05206-x).
- Xu H, Niu J R, Chen P, et al., 2022b. A fast radio burst source at a complex magnetized site in a barred galaxy[J/OL]. *Nature*, 609(7928): 685-688. DOI: [10.1038/s41586-022-05071-8](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05071-8).
- Xu H, Niu J, Lee K, et al., 2021a. FAST detection and localization of FRB20201124A[J]. *The Astronomer's Telegram*, 14518: 1.

- Xu H, Chen S, Guo Y, et al., 2023. Searching for the Nano-Hertz Stochastic Gravitational Wave Background with the Chinese Pulsar Timing Array Data Release I[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 23(7): 075024. DOI: [10.1088/1674-4527/acdfa5](https://doi.org/10.1088/1674-4527/acdfa5).
- Xu S, Zhang B, 2020. Probing the Intergalactic Turbulence with Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 898(2): L48. DOI: [10.3847/2041-8213/aba760](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba760).
- Xu S, Weinberg D H, Zhang B, 2021b. Statistical Measurements of Dispersion Measure Fluctuations in Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 922(2): L31. DOI: [10.3847/2041-8213/ac399c](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac399c).
- Yamasaki S, Goto T, Ling C T, et al., 2024. The true fraction of repeating fast radio bursts revealed through CHIME source count evolution[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 527(4): 11158-11166. DOI: [10.1093/mnras/stad3844](https://doi.org/10.1093/mnras/stad3844).
- Yang Y P, Zhang B, 2018. Bunching Coherent Curvature Radiation in Three-dimensional Magnetic Field Geometry: Application to Pulsars and Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 868(1): 31. DOI: [10.3847/1538-4357/aae685](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aae685).
- Yang Y P, Zhang B, 2021. Fast radio Bursts and their high-energy counterparts from magnetar magnetospheres[J/OL]. *Astrophys. J.*, 919(2): 89. DOI: [10.3847/1538-4357/ac14b5](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac14b5).
- Yang Y P, Xu S, Zhang B, 2023. Faraday rotation measure variations of repeating fast radio burst sources[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 520(2): 2039-2054. DOI: [10.1093/mnras/stad168](https://doi.org/10.1093/mnras/stad168).
- Yao J M, Manchester R N, Wang N, 2017. A New Electron-density Model for Estimation of Pulsar and FRB Distances[J/OL]. *Astrophys. J.*, 835(1): 29. DOI: [10.3847/1538-4357/835/1/29](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/1/29).
- Yu Z, Deng F, Niu C, et al., 2022. Detection of FRB 20220912A at 750 MHz with the Tianlai Dish Pathfinder Array[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15758: 1.
- Zanazzi J J, Lai D, 2020. Periodic Fast Radio Bursts with Neutron Star Free Precession[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 892(1): L15. DOI: [10.3847/2041-8213/ab7cdd](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab7cdd).
- Zanella A, Harrison C M, Lenzi S, et al., 2022. Sonification and sound design for astronomy research, education and public engagement[J/OL]. *Nature Astronomy*, 6: 1241-1248. DOI: [10.1038/s41550-022-01721-z](https://doi.org/10.1038/s41550-022-01721-z).
- Zhang B, 2017. A “Cosmic Comb” Model of Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 836(2): L32. DOI: [10.3847/2041-8213/aa5ded](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aa5ded).
- Zhang B, 2018. Fast Radio Burst Energetics and Detectability from High Redshifts[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 867(2): L21. DOI: [10.3847/2041-8213/aae8e3](https://doi.org/10.3847/2041-8213/aae8e3).
- Zhang B, 2020a. Unexpected emission pattern adds to the enigma of fast radio bursts[J/OL]. *Nature*, 582(7812): 344-346. DOI: [10.1038/d41586-020-01713-x](https://doi.org/10.1038/d41586-020-01713-x).
- Zhang B, 2020b. The physical mechanisms of fast radio bursts[J/OL]. *Nature*, 587(7832): 45-53. DOI: [10.1038/s41586-020-2828-1](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2828-1).
- Zhang B, 2022. Coherent Inverse Compton Scattering by Bunches in Fast Radio Bursts[J/OL]. *Astrophys. J.*, 925(1): 53. DOI: [10.3847/1538-4357/ac3979](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac3979).
- Zhang B, 2023. The physics of fast radio bursts[J/OL]. *Reviews of Modern Physics*, 95(3): 035005. DOI: [10.1103/RevModPhys.95.035005](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.95.035005).
- Zhang R C, Zhang B, 2022a. The CHIME Fast Radio Burst Population Does Not Track the Star Formation History of the Universe[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 924(1): L14. DOI: [10.3847/2041-8213/ac46ad](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac46ad).
- Zhang R C, Zhang B, Li Y, et al., 2021. On the energy and redshift distributions of fast radio bursts [J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 501(1): 157-167. DOI: [10.1093/mnras/staa3537](https://doi.org/10.1093/mnras/staa3537).
- Zhang X, Gao H, 2020. What binary systems are the most likely sources for periodically repeating FRBs?[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 498(1): L1-L5. DOI: [10.1093/mnras/slaa116](https://doi.org/10.1093/mnras/slaa116).

- Zhang Y K, Wang P, Feng Y, et al., 2022b. FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. II. Energy Distribution[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(12): 124002. DOI: [10.1088/1674-4527/ac98f7](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac98f7).
- Zhang Y K, Li D, Zhang B, et al., 2023. FAST Observations of FRB 20220912A: Burst Properties and Polarization Characteristics[J/OL]. *Astrophys. J.*, 955(2): 142. DOI: [10.3847/1538-4357/aced0b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aced0b).
- Zhang Y, Niu J, Feng Y, et al., 2022c. FAST detection of high activity FRB 20220912A[J]. *The Astronomer's Telegram*, 15733: 1.
- Zhang Y G, Gajjar V, Foster G, et al., 2018. Fast Radio Burst 121102 Pulse Detection and Periodicity: A Machine Learning Approach[J/OL]. *Astrophys. J.*, 866(2): 149. DOI: [10.3847/1538-4357/aadf31](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aadf31).
- Zhao Z Y, Wang F Y, 2021. FRB 190520B Embedded in a Magnetar Wind Nebula and Supernova Remnant: A Luminous Persistent Radio Source, Decreasing Dispersion Measure, and Large Rotation Measure[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 923(1): L17. DOI: [10.3847/2041-8213/ac3f2f](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac3f2f).
- Zhao Z Y, Zhang G Q, Wang F Y, et al., 2023. Rotation Measure Variations and Reversals of Repeating FRBs in Massive Binary Systems[J/OL]. *Astrophys. J.*, 942(2): 102. DOI: [10.3847/1538-4357/aca66b](https://doi.org/10.3847/1538-4357/aca66b).
- Zhou B, Li X, Wang T, et al., 2014. Fast radio bursts as a cosmic probe?[J/OL]. *Phys. Rev. D*, 89(10): 107303. DOI: [10.1103/PhysRevD.89.107303](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.89.107303).
- Zhou D J, Han J L, Zhang B, et al., 2022. FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A: I. Burst Morphology[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 22(12): 124001. DOI: [10.1088/1674-4527/ac98f8](https://doi.org/10.1088/1674-4527/ac98f8).
- Zhu W, Li D, Luo R, et al., 2020. A Fast Radio Burst Discovered in FAST Drift Scan Survey[J/OL]. *Astrophys. J. Lett.*, 895(1): L6. DOI: [10.3847/2041-8213/ab8e46](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8e46).
- Zhu-Ge J M, Luo J W, Zhang B, 2023. Machine learning classification of CHIME fast radio bursts - II. Unsupervised methods[J/OL]. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 519(2): 1823-1836. DOI: [10.1093/mnras/stac3599](https://doi.org/10.1093/mnras/stac3599).

致 谢

磨磨蹭蹭，终于还是写到了这里。讲道理，我是一个不善言辞的人，就像过去几次被叫到要说点什么，半天憋不出仨瓜俩枣。写东西对我来说，也是一件很困难的事情。所以我几乎从五年前就开始考虑这个致谢要怎么写，然而直到现在，我也还是没想到该如何把这部分写好。在这篇博士毕业论文的最后，我尽我最大的努力，也只能以下面这些平淡的表达，来感谢那些在我攻读博士学位期间给予我支持、鼓励和帮助的人们。尽管可能不是那么的完备。

首先，我要特别感谢我的导师，李葭老师和蔡肇伟老师。感谢两位老师在过去五年间对我的悉心指导，以及在各种问题上的启蒙与源源不断地灵感注入。从早期的完全跟不上老师在说什么，到中期不完全能跟上老师在说什么，到后期差不多能跟上老师在说什么，我能感受到在两位老师渊博的学识和敏锐的物理直觉的熏陶下自己的进步。在求学期间，两位老师的指导让我涉猎了广泛的研究领域，在一些方向上做了一点小事情。尽管由于时间原因在毕业前还有一些小事情没能完成，但都像纸飞机已经抛出，总还是会有落地的时候。我想，我要学的，还有很多。

然后，我还要感谢张冰老师、冯天师、王天师、牛巨、姚台在合作研究中对我的指导与帮助，让我学到了很多新的知识和技能。感谢吕华蕾师姐、刘姝师姐和石惠师姐在日常生活中对我的关心和帮助。感谢 ISM 组的各位老师和同学，感谢所有直接或间接帮助和支持我的人。你们的帮助是我完成这篇论文不可或缺的一部分。虽然无法一一列举，但我将永远铭记。

最后，我要深深感谢我的家人对我的无私的照顾和深深的关心。我真诚的感谢你们一直以来的支持、鼓励和保护。尽管你们可能并不完全理解我所做的研究，但你们对我的支持和理解是我研究的最大动力和源泉。

再次感谢大家，愿你们的生活充满幸福与阳光！

2024 年 6 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历:

2015年09月——2019年06月, 中国科学院大学, 物理学, 理学学士。

2019年09月——2024年06月, 中国科学院国家天文台, 天体物理, 攻读博士学位。

已发表(或正式接受)的学术论文:

第一作者论文

- (1) **Zhang, Yong-Kun**, Li, Di, Feng, Yi, Wang, Pei, Niu, Chen-Hui, Dai, Shi, Yao, Ju-Mei, Tsai, Chao-Wei, *The arrival time and energy of FRBs traverse the time-energy bivariate space like a Brownian motion*, 2024, [Science Bulletin](#), cited **4**
- (2) **Zhang, Yong-Kun**, Li, Di, Zhang, Bing, Cao, Shuo, Feng, Yi, Wang, Wei-Yang, Qu, Yuanhong, Niu, Jia-Rui, Zhu, Wei-Wei, Han, Jin-Lin, Jiang, Peng, Lee, Ke-Jia, Li, Dong-Zi, Luo, Rui, Niu, Chen-Hui, Tsai, Chao-Wei, Wang, Pei, Wang, Fa-Yin, Wu, Zi-Wei, Xu, Heng, Yang, Yuan-Pei, Zhang, Jun-Shuo, Zhou, De-Jiang, Zhu, Yu-Hao, *FAST Observations of FRB 20220912A: Burst Properties and Polarization Characteristics*, 2023, [The Astrophysical Journal](#), **955**, 142, cited **24**
- (3) **Zhang, Yong-Kun**, Wang, Pei, Feng, Yi, Zhang, Bing, Li, Di, Tsai, Chao-Wei, Niu, Chen-Hui, Luo, Rui, Yao, Ju-Mei, Zhu, Wei-Wei, Han, Jin-Lin, Lee, Ke-Jia, Zhou, De-Jiang, Niu, Jia-Rui, Jiang, Jin-Chen, Wang, Wei-Yang, Zhang, Chun-Feng, Xu, Heng, Wang, Bo-Jun, Xu, Jiang-Wei, *FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. II. Energy Distribution*, 2022, [Research in Astronomy and Astrophysics](#), **22**, 124002, cited **24**
- (4) Feng, Yi, **Zhang, Yong-Kun** (co-first author), Li, Di, Yang, Yuan-Pei, Wang, Pei, Niu, Chen-Hui, Dai, Shi, Yao, Ju-Mei, *Circular polarization in two active repeating fast radio bursts*, 2022, [Science Bulletin](#), **67**, 2398-2401, cited **13**

合作发表论文

- (5) Feng, Yi, Li, Di, Yang, Yuan-Pei, **Zhang, Yongkun**, Zhu, Weiwei, Zhang, Bing, Lu, Wenbin, Wang, Pei, Dai, Shi, Lynch, Ryan S., Yao, Jumei, Jiang, Jinchun, Niu, Jiarui, Zhou, Dejiang, Xu, Heng, Miao, Chenchen, Niu, Chenhui, Meng, Lingqi, Qian, Lei, Tsai, Chao-Wei, Wang, Bojun, Xue, Mengyao, Yue, Youling, Yuan, Mao, Zhang, Songbo, Zhang, Lei, *Frequency-dependent polarization of repeating fast radio bursts—implications for their origin*, 2022, [Science](#), **375**, 1266-1270

- (6) Li, D., Wang, P., Zhu, W. W., Zhang, B., Zhang, X. X., Duan, R., **Zhang, Y. K.**, Feng, Y., Tang, N. Y., Chatterjee, S., Cordes, J. M., Cruces, M., Dai, S., Gajjar, V., Hobbs, G., Jin, C., Kramer, M., Lorimer, D. R., Miao, C. C., Niu, C. H., Niu, J. R., Pan, Z. C., Qian, L., Spitler, L., Werthimer, D., Zhang, G. Q., Wang, F. Y., Xie, X. Y., Yue, Y. L., Zhang, L., Zhi, Q. J., Zhu, Y., *A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source*, 2021, *Nature*, **598**, 267-271
- (7) Anna-Thomas, Reshma, Connor, Liam, Dai, Shi, Feng, Yi, Burke-Spolaor, Sarah, Beniamini, Paz, Yang, Yuan-Pei, **Zhang, Yong-Kun**, Aggarwal, Kshitij, Law, Casey J., Li, Di, Niu, Chenhui, Chatterjee, Shami, Cruces, Marilyn, Duan, Ran, Filipovic, Miroslav D., Hobbs, George, Lynch, Ryan S., Miao, Chenchen, Niu, Jiarui, Ocker, Stella K., Tsai, Chao-Wei, Wang, Pei, Xue, Mengyao, Yao, Ju-Mei, Yu, Wenfei, Zhang, Bing, Zhang, Lei, Zhu, Shiqiang, Zhu, Weiwei, *Magnetic field reversal in the turbulent environment around a repeating fast radio burst*, 2023, *Science*, **380**, 599-603
- (8) Niu, C. -H., Aggarwal, K., Li, D., Zhang, X., Chatterjee, S., Tsai, C. -W., Yu, W., Law, C. J., Burke-Spolaor, S., Cordes, J. M., **Zhang, Y. -K.**, Ocker, S. K., Yao, J. -M., Wang, P., Feng, Y., Niino, Y., Bochenek, C., Cruces, M., Connor, L., Jiang, J. -A., Dai, S., Luo, R., Li, G. -D., Miao, C. -C., Niu, J. -R., Anna-Thomas, R., Sydnor, J., Stern, D., Wang, W. -Y., Yuan, M., Yue, Y. -L., Zhou, D. -J., Yan, Z., Zhu, W. -W., Zhang, B., *A repeating fast radio burst associated with a persistent radio source*, 2022, *Nature*, **606**, 873-877
- (9) Xu, H., Niu, J. R., Chen, P., Lee, K. J., Zhu, W. W., Dong, S., Zhang, B., Jiang, J. C., Wang, B. J., Xu, J. W., Zhang, C. F., Fu, H., Filippenko, A. V., Peng, E. W., Zhou, D. J., **Zhang, Y. K.**, Wang, P., Feng, Y., Li, Y., Brink, T. G., Li, D. Z., Lu, W., Yang, Y. P., Caballero, R. N., Cai, C., Chen, M. Z., Dai, Z. G., Djorgovski, S. G., Esamdin, A., Gan, H. Q., Guhathakurta, P., Han, J. L., Hao, L. F., Huang, Y. X., Jiang, P., Li, C. K., Li, D., Li, H., Li, X. Q., Li, Z. X., Liu, Z. Y., Luo, R., Men, Y. P., Niu, C. H., Peng, W. X., Qian, L., Song, L. M., Stern, D., Stockton, A., Sun, J. H., Wang, F. Y., Wang, M., Wang, N., Wang, W. Y., Wu, X. F., Xiao, S., Xiong, S. L., Xu, Y. H., Xu, R. X., Yang, J., Yang, X., Yao, R., Yi, Q. B., Yue, Y. L., Yu, D. J., Yu, W. F., Yuan, J. P., Zhang, B. B., Zhang, S. B., Zhang, S. N., Zhao, Y., Zheng, W. K., Zhu, Y., Zou, J. H., *A fast radio burst source at a complex magnetized site in a barred galaxy*, 2022, *Nature*, **609**, 685-688
- (10) Zhu, Weiwei, Xu, Heng, Zhou, Dejiang, Lin, Lin, Wang, Bojun, Wang, Pei, Zhang, Chunfeng, Niu, Jiarui, Chen, Yutong, Li, Chengkui, Meng, Lingqi, Lee, Kejia, Zhang, Bing, Feng, Yi, Ge, Mingyu, Göğüş, Ersin, Guan, Xing, Han, Jinlin, Jiang, Jinchun, Jiang, Peng, Kouveliotou, Chryssa, Li, Di, Miao, Chenchen, Miao, Xueli, Men, Yunpeng, Niu, Chenghui, Wang, Weiyang, Wang, Zhengli, Xu, Jiangwei, Xu, Renxin, Xue, Mengyao, Yang, Yuanpei, Yu, Wenfei, Yuan,

- Mao, Yue, Youling, Zhang, Shuangnan, **Zhang, Yongkun**, *A radio pulsar phase from SGR J1935+2154 provides clues to the magnetar FRB mechanism*, 2023, [Science Advances, 9, eadf6198](#)
- (11) Wu, Zi-Wei, Main, Robert A., Zhu, Wei-Wei, Zhang, Bing, Jiang, Peng, Niu, Jia-Rui, Han, Jin-Lin, Li, Di, Lee, Ke-Jia, Li, Dong-Zi, Yang, Yuan-Pei, Wang, Fa-Yin, Luo, Rui, Wang, Pei, Niu, Chen-Hui, Xu, Heng, Wang, Bo-Jun, Wang, Wei-Yang, **Zhang, Yong-Kun**, Feng, Yi, Zhou, De-Jiang, Xu, Yong-Hua, Deng, Can-Min, Zhu, Yu-Hao, *Scintillation Arc from FRB 20220912A*, 2024, [Science China Physics, 67, 219512](#)
- (12) Xu, Jiaying, Feng, Yi, Li, Di, Wang, Pei, **Zhang, Yongkun**, Xie, Jintao, Chen, Huaxi, Wang, Han, Kang, Zhixuan, Hu, Jingjing, Zheng, Yun, Tsai, Chao-Wei, Chen, Xianglei, Zhou, Dengke, *Blinkverse: A Database of Fast Radio Bursts*, 2023, [Universe, 9, 330](#)
- (13) Zhu, Yuhao, Niu, Chenhui, Cui, Xianghan, Li, Di, Feng, Yi, Tsai, Chaowei, Wang, Pei, **Zhang, Yongkun**, Meng, Fanyi, Zheng, Zheng, *Do Multi-Structural One-Off FRBs Trace Similar Cosmology History with Repeaters?*, 2023, [Universe, 9, 251](#)
- (14) Wang, Bo-Jun, Xu, Heng, Jiang, Jin-Chen, Xu, Jiang-Wei, Niu, Jia-Rui, Chen, Ping, Lee, Ke-Jia, Zhang, Bing, Zhu, Wei-Wei, Dong, Su-Bo, Zhang, Chun-Feng, Fu, Hai, Zhou, De-Jiang, **Zhang, Yong-Kun**, Wang, Pei, Feng, Yi, Li, Ye, Li, Dong-Zi, Lu, Wen-Bin, Yang, Yuan-Pei, Caballero, R. N., Cai, Ce, Chen, Mao-Zheng, Dai, Zi-Gao, Esamdin, A., Gan, Heng-Qian, Han, Jin-Lin, Hao, Long-Fei, Huang, Yu-Xiang, Jiang, Peng, Li, Cheng-Kui, Li, Di, Li, Hui, Li, Xin-Qiao, Li, Zhi-Xuan, Liu, Zhi-Yong, Luo, Rui, Men, Yun-Peng, Niu, Chen-Hui, Peng, Wen-Xi, Qian, Lei, Song, Li-Ming, Sun, Jing-Hai, Wang, Fa-Yin, Wang, Min, Wang, Na, Wang, Wei-Yang, Wu, Xue-Feng, Xiao, Shuo, Xiong, Shao-Lin, Xu, Yong-Hua, Xu, Ren-Xin, Yang, Jun, Yang, Xuan, Yao, Rui, Yi, Qi-Bin, Yue, You-Ling, Yu, Dong-Jun, Yu, Wen-Fei, Yuan, Jian-Ping, Zhang, Bin-Bin, Zhang, Song-Bo, Zhang, Shuang-Nan, Zhao, Yi, Zheng, Wei-Kang, Zhu, Yan, Zou, Jin-Hang, *Atlas of dynamic spectra of fast radio burst FRB 20201124A*, 2023, [Chinese Physics B, 32, 029801](#)
- (15) Zhang, Lei, Freire, Paulo C. C., Ridolfi, Alessandro, Pan, Zhichen, Zhao, Jiaqi, Heinke, Craig O., Chen, Jianxing, Cadelano, Mario, Pallanca, Cristina, Hou, Xian, Fu, Xiaoting, Dai, Shi, Gügercinoğlu, Erbil, Guo, Meng, Hessels, Jason, Hu, Jiale, Li, Guodong, Ni, Mengmeng, Pan, Jingshan, Ransom, Scott M., Ruan, Qitong, Stairs, Ingrid, Tsai, Chao-Wei, Wang, Pei, Wang, Long, Wang, Na, Wu, Qingdong, Yuan, Jianping, Zhang, Jie, Zhu, Weiwei, **Zhang, Yongkun**, Li, Di, *Discovery and Timing of Millisecond Pulsars in the Globular Cluster M5 with FAST and Arecibo*, 2023, [The Astrophysical Journal Supplement Series, 269, 56](#)

- (16) Niu, Jia-Rui, Zhu, Wei-Wei, Zhang, Bing, Yuan, Mao, Zhou, De-Jiang, **Zhang, Yong-Kun**, Jiang, Jin-Chen, Han, J. L., Li, Di, Lee, Ke-Jia, Wang, Pei, Feng, Yi, Li, Dong-Zi, Luo, Rui, Wang, Fa-Yin, Dai, Zi-Gao, Miao, Chen-Chen, Niu, Chen-Hui, Xu, Heng, Zhang, Chun-Feng, Wang, Wei-Yang, Wang, Bo-Jun, Xu, Jiang-Wei, *FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. IV. Spin Period Search*, 2022, [Research in Astronomy and Astrophysics, 22, 124004](#)
- (17) Jiang, Jin-Chen, Wang, Wei-Yang, Xu, Heng, Xu, Jiang-Wei, Zhang, Chun-Feng, Wang, Bo-Jun, Zhou, De-Jiang, **Zhang, Yong-Kun**, Niu, Jia-Rui, Lee, Ke-Jia, Zhang, Bing, Han, Jin-Lin, Li, Di, Zhu, Wei-Wei, Dai, Zi-Gao, Feng, Yi, Jing, Wei-Cong, Li, Dong-Zi, Luo, Rui, Miao, Chen-Chen, Niu, Chen-Hui, Tsai, Chao-Wei, Wang, Fa-Yin, Wang, Pei, Xu, Ren-Xin, Yang, Yuan-Pei, Yang, Zong-Lin, Yao, Ju-Mei, Yuan, Mao, *FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A. III. Polarimetry*, 2022, [Research in Astronomy and Astrophysics, 22, 124003](#)
- (18) Zhou, D. J., Han, J. L., Zhang, B., Lee, K. J., Zhu, W. W., Li, D., Jing, W. C., Wang, W. -Y., **Zhang, Y. K.**, Jiang, J. C., Niu, J. R., Luo, R., Xu, H., Zhang, C. F., Wang, B. J., Xu, J. W., Wang, P., Yang, Z. L., Feng, Y., *FAST Observations of an Extremely Active Episode of FRB 20201124A: I. Burst Morphology*, 2022, [Research in Astronomy and Astrophysics, 22, 124001](#)
- (19) Zhang, Lei, Ridolfi, Alessandro, Blumer, Harsha, Freire, Paulo C. C., Manchester, Richard N., McLaughlin, Maura, Kremer, Kyle, Cameron, Andrew D., Zhang, Zhiyu, Behrend, Jan, Burgay, Marta, Buchner, Sarah, Champion, David J., Chen, Weiwei, Dai, Shi, Feng, Yi, Fu, Xiaoting, Guo, Meng, Hobbs, George, Keane, Evan F., Kramer, Michael, Levin, Lina, Li, Xiangdong, Ni, Mengmeng, Pan, Jingshan, Padmanabh, Prajwal V., Possenti, Andrea, Ransom, Scott M., Tsai, Chao-Wei, Venkatraman Krishnan, Vivek, Wang, Pei, Zhang, Jie, Zhi, Qijun, **Zhang, Yongkun**, Li, Di, *Radio Detection of an Elusive Millisecond Pulsar in the Globular Cluster NGC 6397*, 2022, [The Astrophysical Journal Letters, 934, L21](#)
- (20) Li, Di, Wang, Pei, **Zhang, Yongkun**, *Shining on from the first light: The early sciences of FAST*, 2021, [Chinese Science Bulletin, 66, 1272-1280](#)
- (21) Niu, Chen-Hui, Li, Di, Luo, Rui, Wang, Wei-Yang, Yao, Jumei, Zhang, Bing, Zhu, Wei-Wei, Wang, Pei, Ye, Haoyang, **Zhang, Yong-Kun**, Niu, Jia-rui, Tang, Ning-yu, Duan, Ran, Krco, Marko, Dai, Shi, Feng, Yi, Miao, Chenchen, Pan, Zhichen, Qian, Lei, Xue, Mengyao, Yuan, Mao, Yue, Youling, Zhang, Lei, Zhang, Xinxin, *CRAFTS for Fast Radio Bursts: Extending the Dispersion-Fluence Relation with New FRBs Detected by FAST*, 2021, [The Astrophysical Journal Letters, 909, L8](#)
- (22) Feng, Yi, Hobbs, G., Li, D., Dai, S., Zhu, W. W., Yue, Y. L., Wang, P., Zhang, S.

-B., Qian, L., Zhang, L., Wang, S. Q., Miao, C. C., Yuan, M., **Zhang, Y. -K.**, *A Single-pulse Study of PSR J1022+1001 Using the FAST Radio Telescope*, 2021, [The Astrophysical Journal, 908, 105](#)

申请或已获得的专利:

专利申请号 202310004618.4, 一种识别快速射电暴的方法、装置、存储介质及电子设备, 于 2023 年 04 月 04 日初审合格进入实质审查阶段。

获奖情况:

- (1) 2023 年, 博士研究生国家奖学金, 教育部
- (2) 2021 年, 三好学生, 中国科学院大学
- (3) 2020 年, 三好学生, 中国科学院大学

