

快速射电暴搜索与案例分析

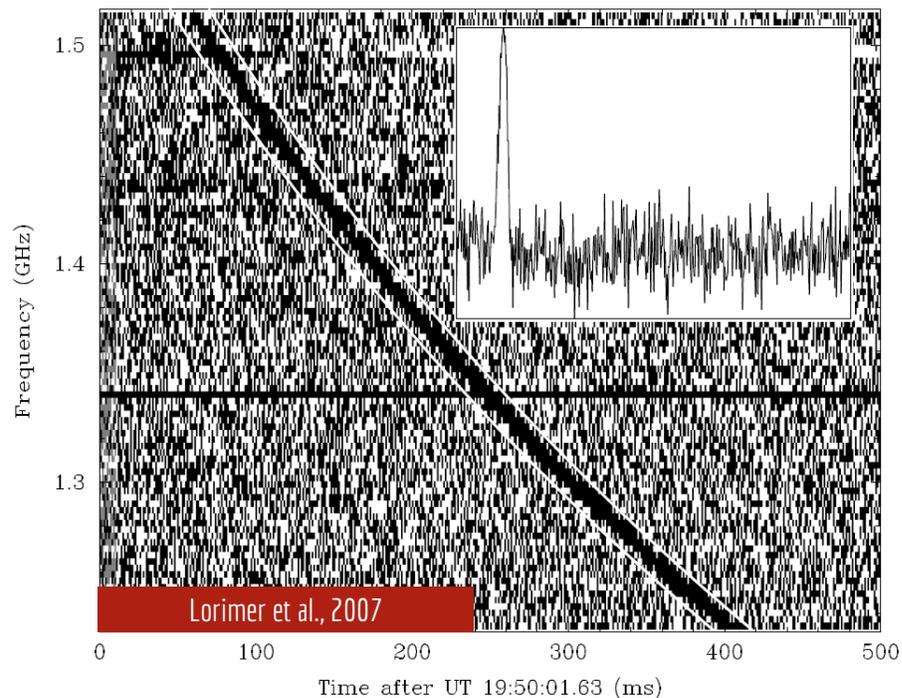
射电部午间讨论会

张永坤

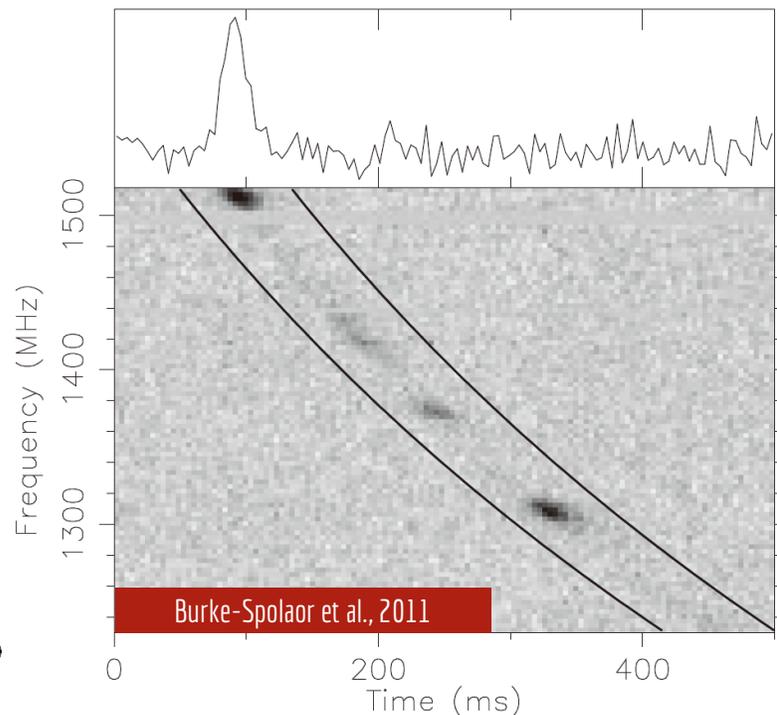
ykzhang@nao.cas.cn / 2025.02.26

快速射电暴 Fast Radio Burst

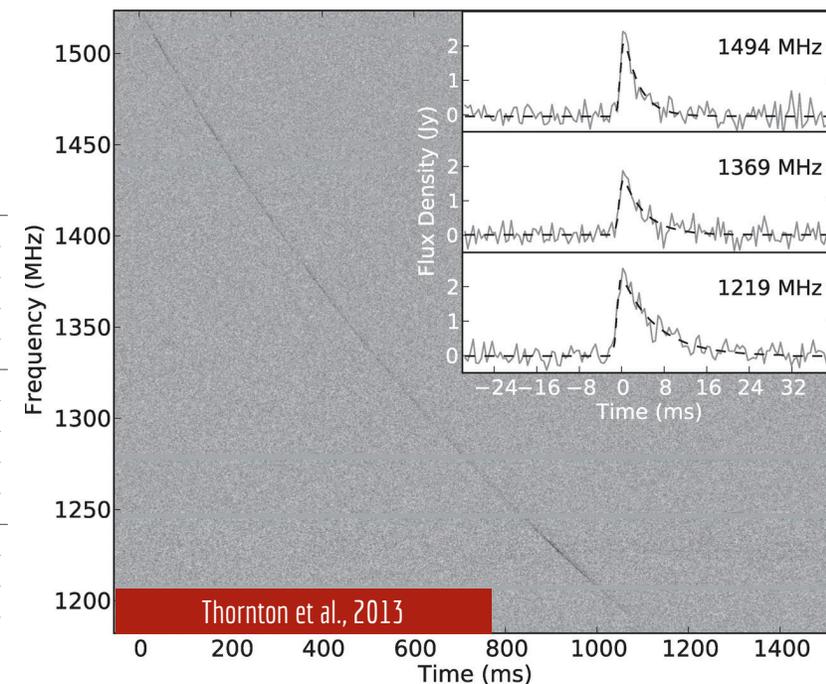
第一个 FRB



假 FRB / Perytons



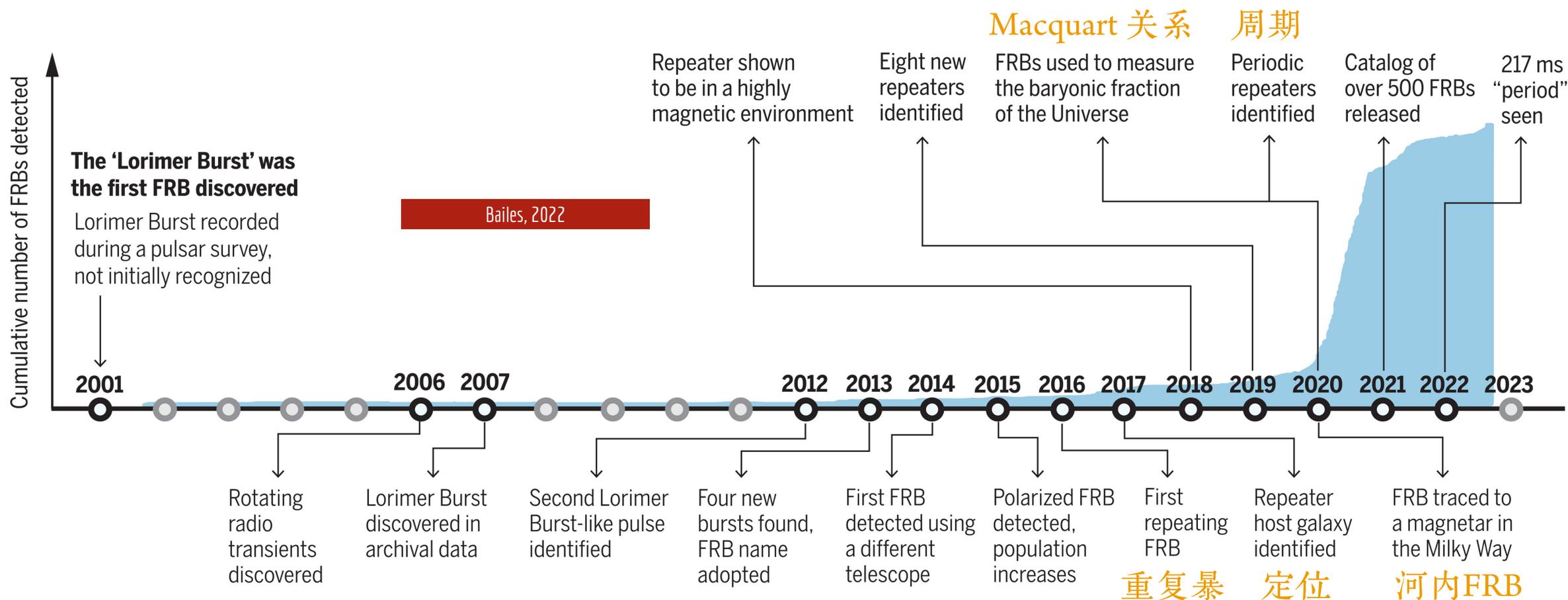
确认 population 存在



射电波段短时标的超亮爆发

快速射电暴研究进展

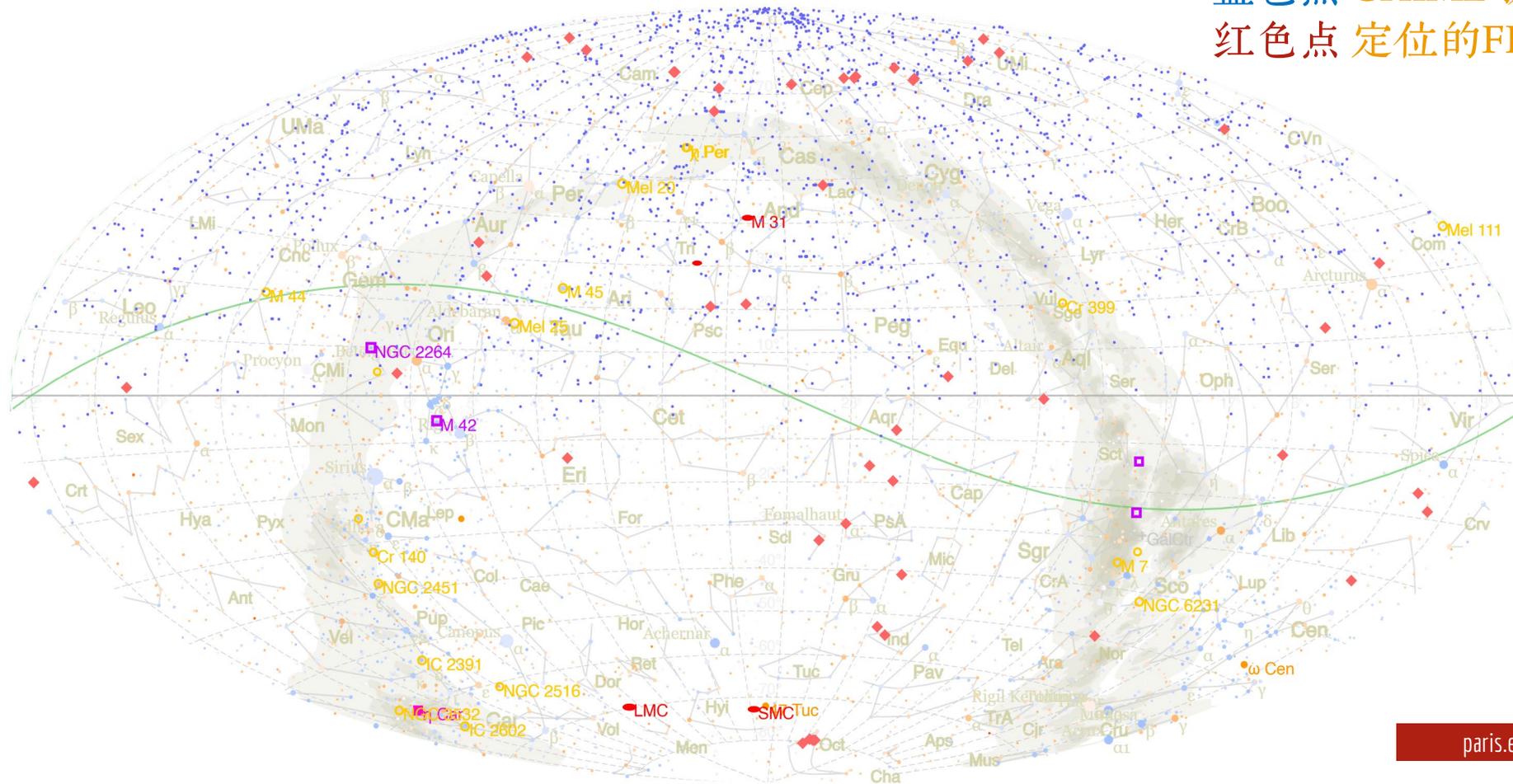
能量、偏振、环境...



几乎每年都有重要发现产生

快速射电暴研究进展

蓝色点 CHIME 探测到的FRB
红色点 定位的FRB



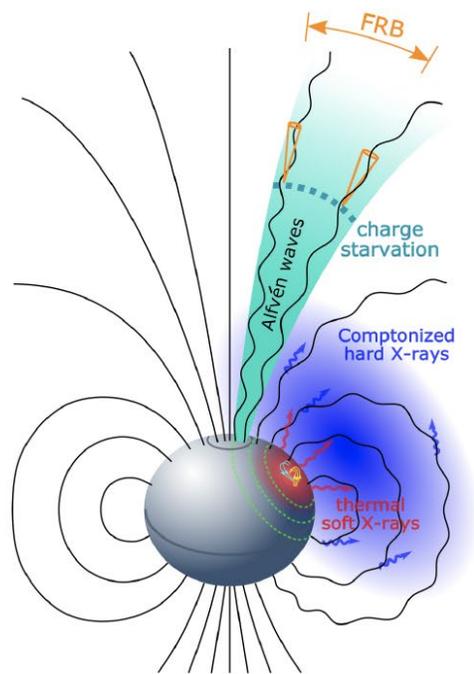
paris.escape.ac.cn/frb

~100个定位的FRB，几千个FRB源，几万个爆发

快速射电暴起源未知 Origin (s?)

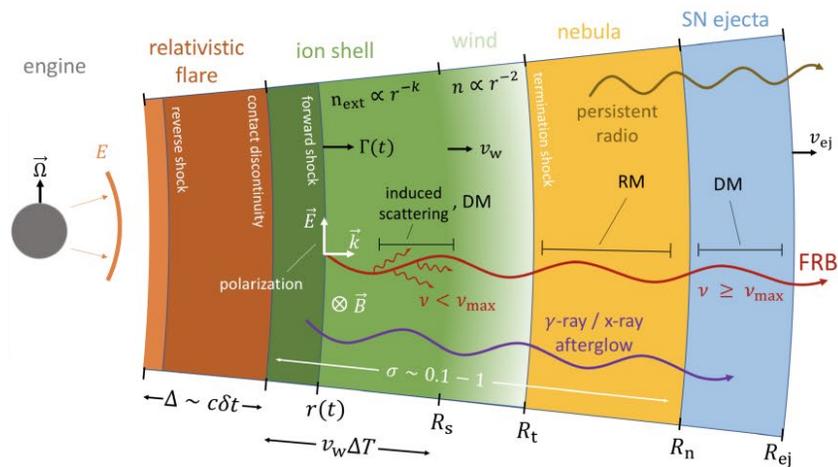
A. 类脉冲星模型

通过调用致密天体的磁层释放能量产生FRB



B. 类伽马暴模型

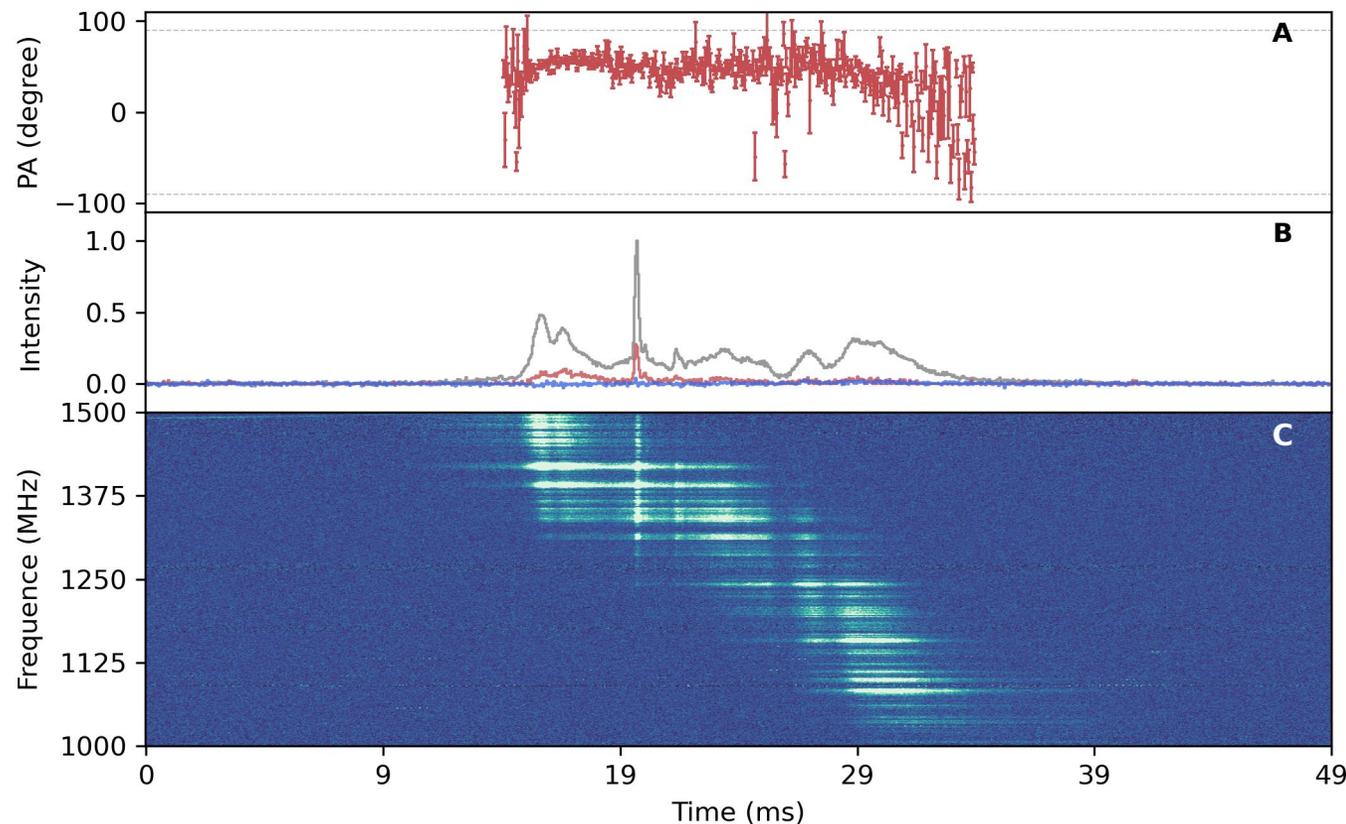
利用相对论性激波产生FRB



Zhang B., 2020

还没有完整确凿的证据支持某种理论

快速射电暴观测属性



时间
能量
形态
漂移
偏振
色散
散射
闪烁
... ..

与辐射机制相关

与传播路径相关

丰富观测属性 => 了解极端辐射机制、探索宇宙物质分布

500米口径球面射电望远镜 / 中国天眼 / FAST



Aperture 500 m (300 m effective)

Frequency Range 1 - 1.5 GHz (19 beam L-band receiver)

Angular Resolution 2.9 arcmin (26 arcmin for 19 beam)

Sky Coverage Dec -14° to 66° (-1° to 52° with full gain)

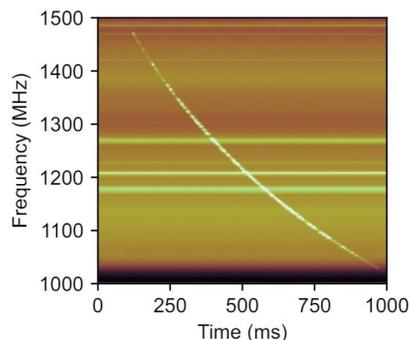
Sensitivity 17 mJy (at time resolution of 49.152 us)

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，研究其时间、能量、偏振等特性，与爆发源周边环境联系起来，以此进一步了解快速射电暴的起源和演化。

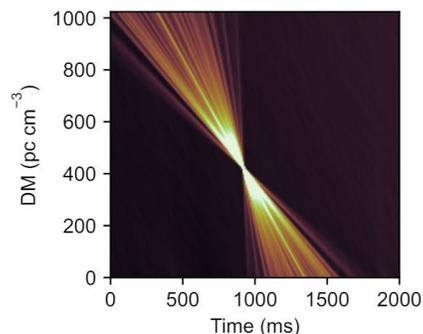
快速射电暴数据展示

强信号

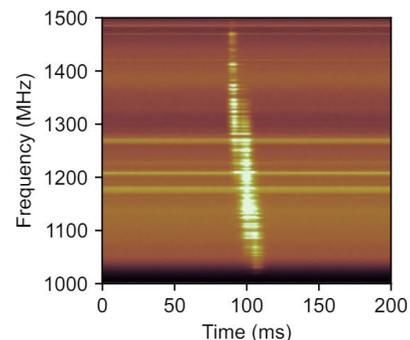
原始时间-频率数据



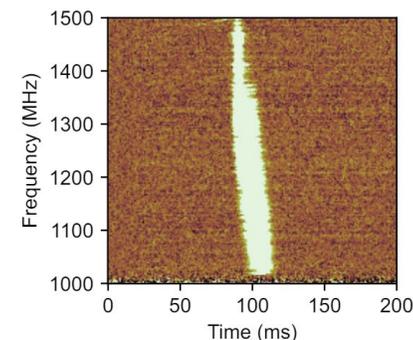
时间-色散数据



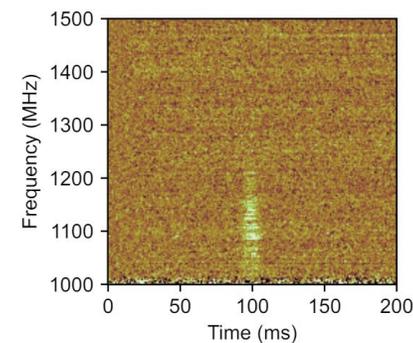
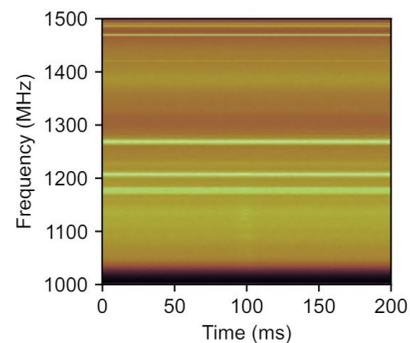
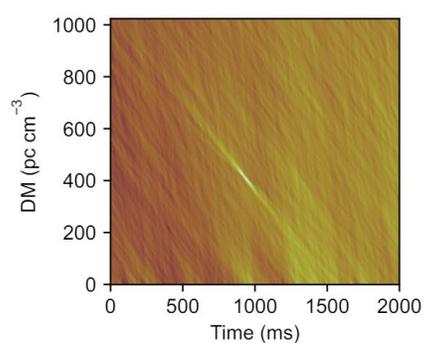
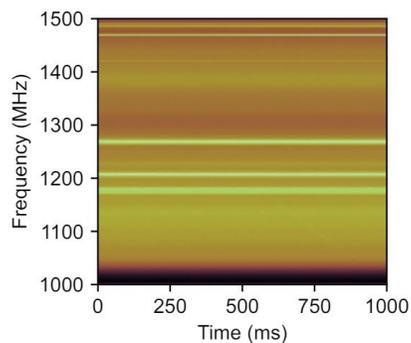
消色散后信号



信号增强

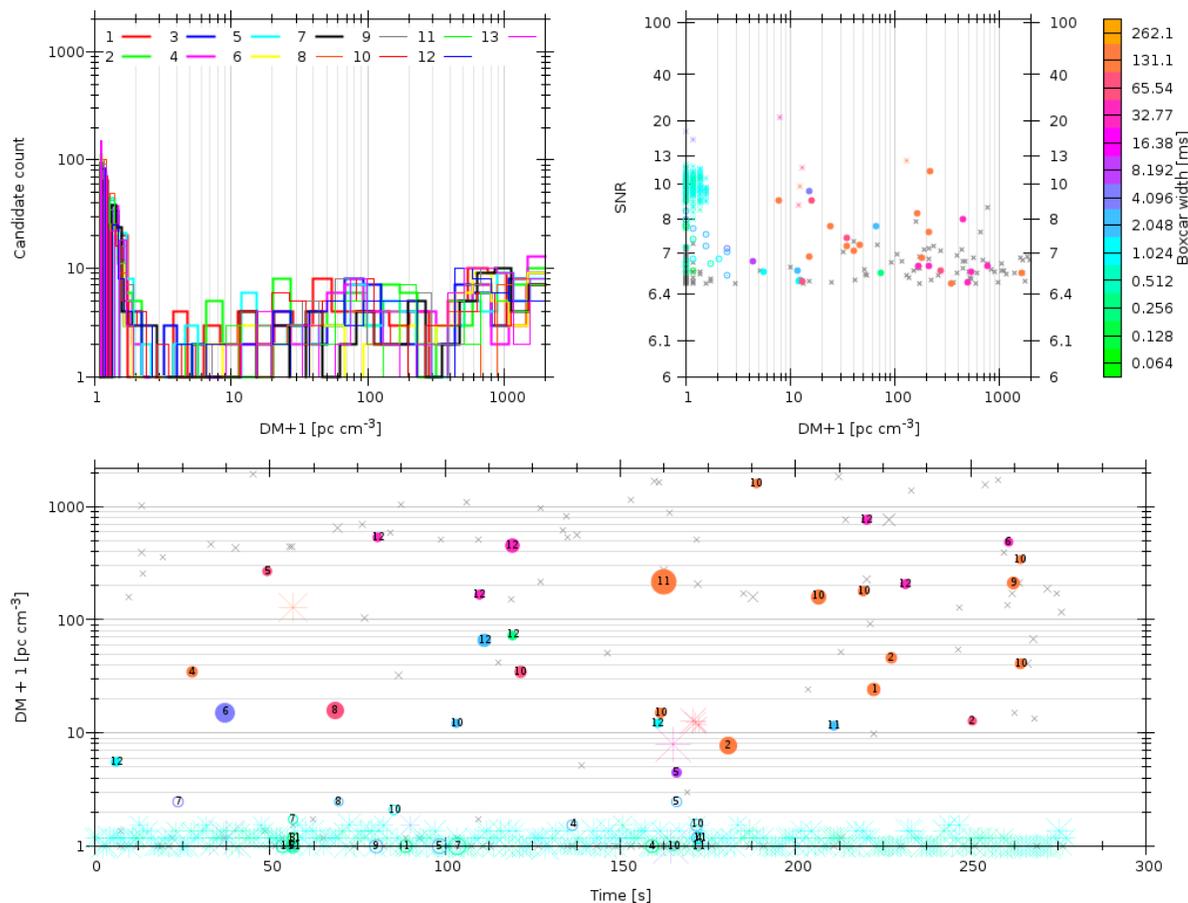


中等强度强信号



搜索快速射电暴 => 在**噪声与干扰**中提取微弱信号的**到达时间**与**色散值**

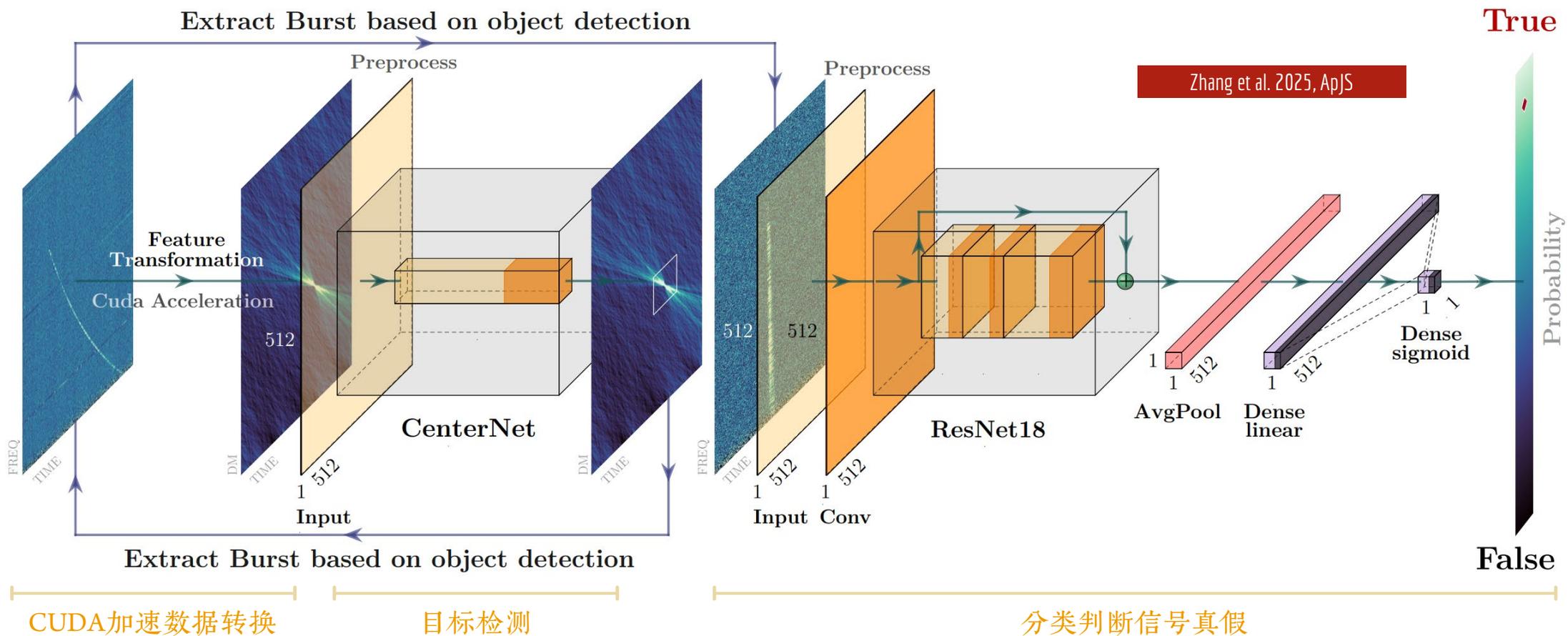
常用搜索方法 E.g. Heimdall



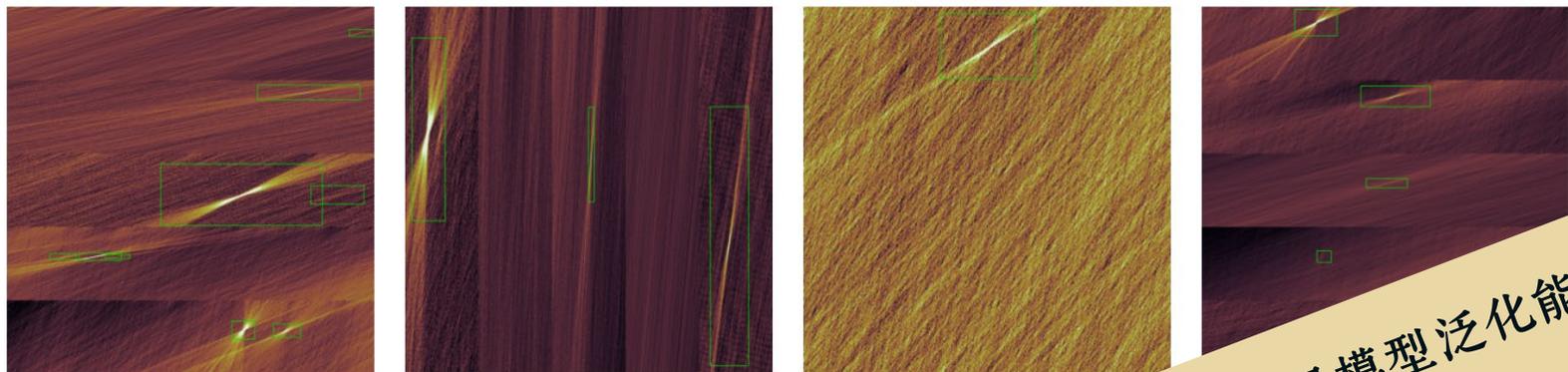
1. 去除 RFI、减基线
2. 划分DM网格、消色散
3. 在时间序列上做 Boxcar
4. 按信噪比阈值提取信号

不完备、假信号多、运行效率低下

基于深度学习的快速射电暴搜索方法 DRAFTS



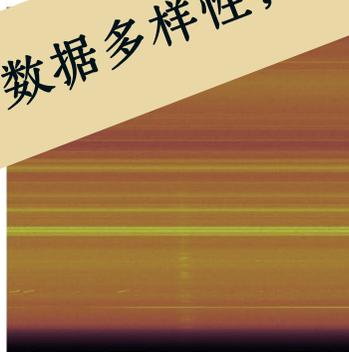
数据增强与模型训练 Data Augmentation



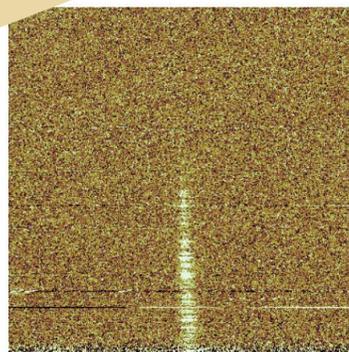
目标检测模型数据增强

1. 数据随机裁剪
2. 1-6个数据切片随机组合

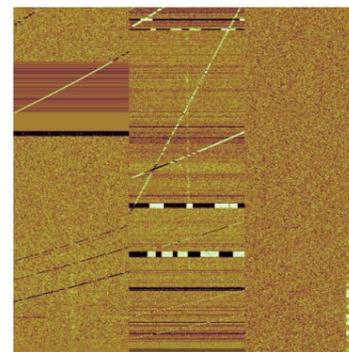
增加数据多样性，拓展模型泛化能力



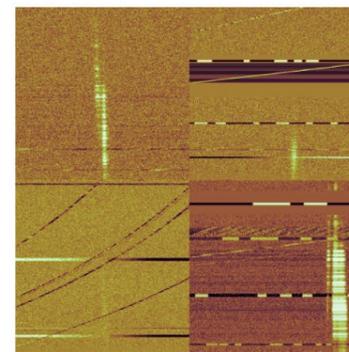
Raw Data



Enhanced Data



3-Combine + RFI



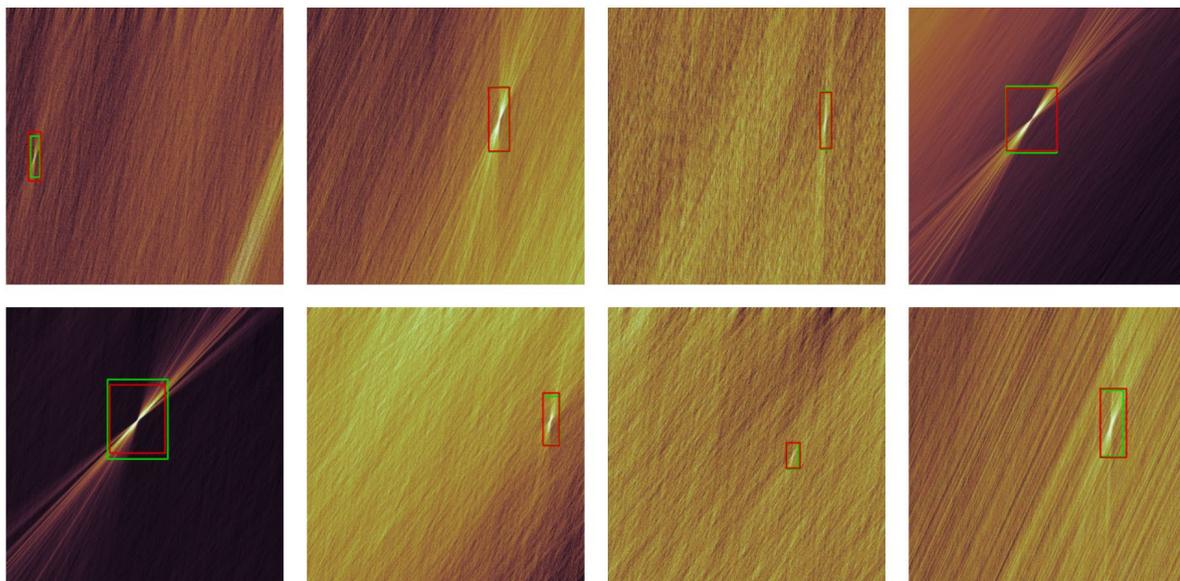
4-Combine + RFI

分类模型数据增强

1. 1-6个数据切片随机组合
2. 随机数生成 RFI
3. 动态范围裁切

使用FAST探测到的真实爆发进行训练 => **CenterNet**目标检测，**ResNet**分类模型

在真实数据上进行测试 FRB-FREX

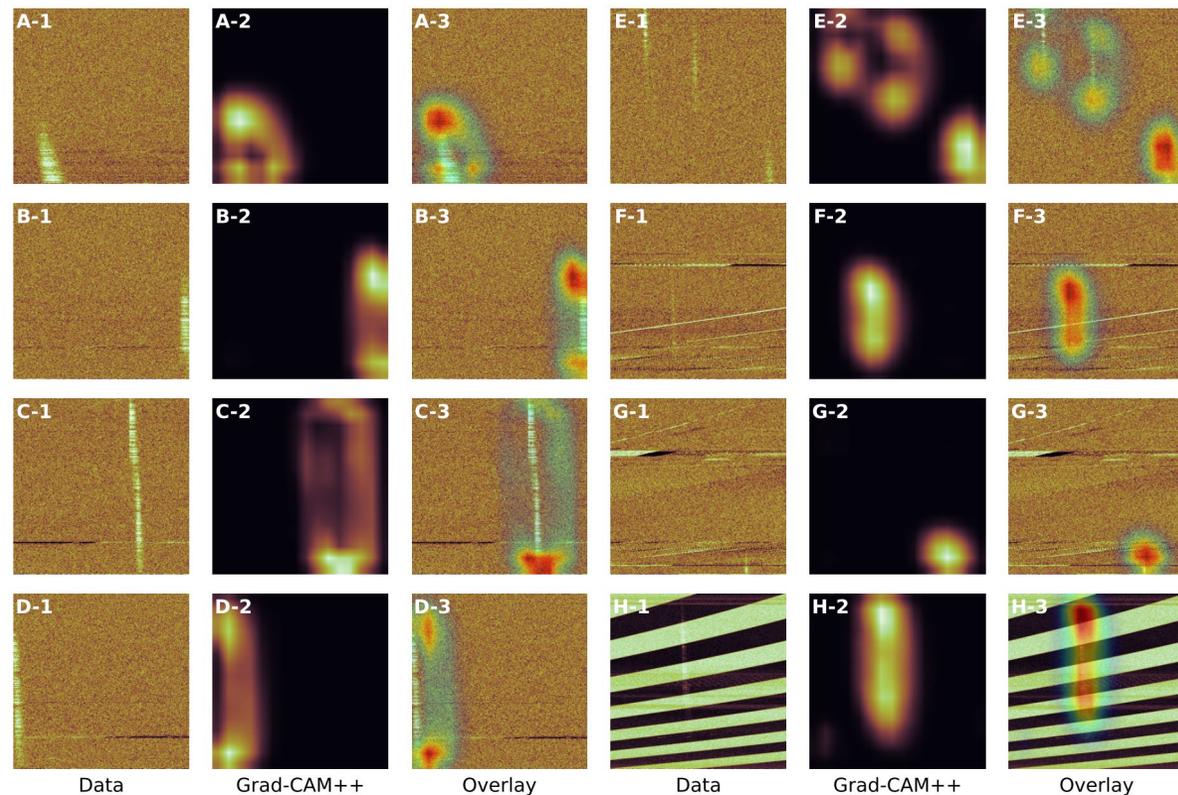


目标检测模型可以探测到不同大小的信号

绿色是人工标记，红色是模型预测

Grad-Cam++展示对模型预测权重高的位置

分类模型学到了正确的特征



FRB-FREX 中包含了 600个 FAST探测到的真实爆发的原始数据片段

与常用方法进行比较 E.g. PRESTO

PRESTO的探测结果

随着信噪比阈值降低，召回率上升，准确率快速下降

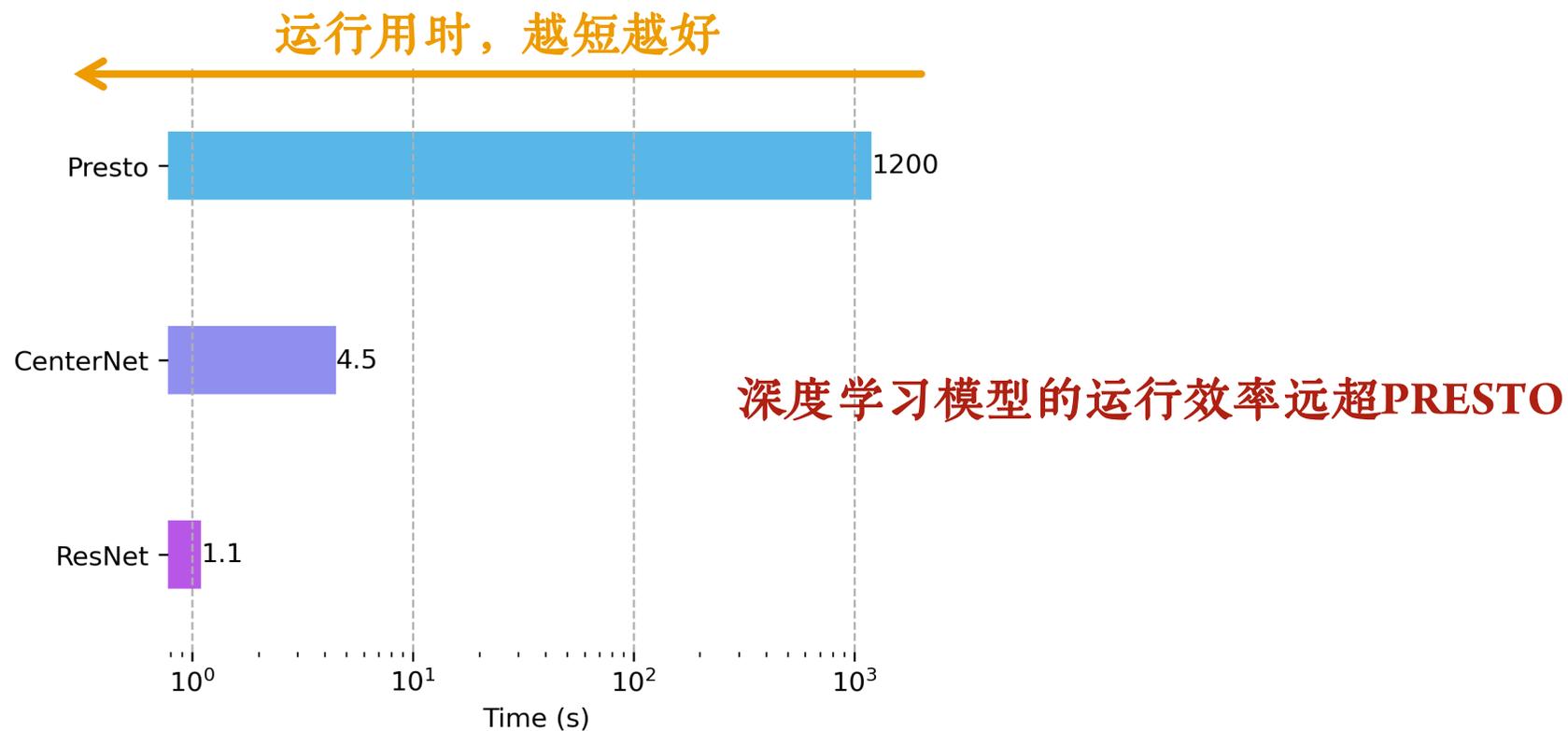
Method	Threshold	TP	FP	Missed	Duplicates	Precision	Recall	Time (s)
Presto	S/N = 3	520	10663950	80	43044	0.0049%	86.7%	~ 120
Presto	S/N = 5	513	17406	87	40818	2.8%	85.5%	-
Presto	S/N = 7	477	4488	123	25402	9.6%	79.5%	-
CenterNet-18	0.5	580	23	20	-	96.2%	96.7%	4.51
CenterNet-50	0.5	578	20	22	-	96.7%	96.3%	4.67
ResNet-18	0.5	600	1	0	-	99.8%	100%	1.16
ResNet-50	0.5	600	1	0	-	99.8%	100%	1.23

PRESTO 使用 100个 DM值消色散

CenterNet 使用1024个 DM值消色散

目标检测模型 和 分类模型都能做到 极高的召回率 同时 保持高准确率

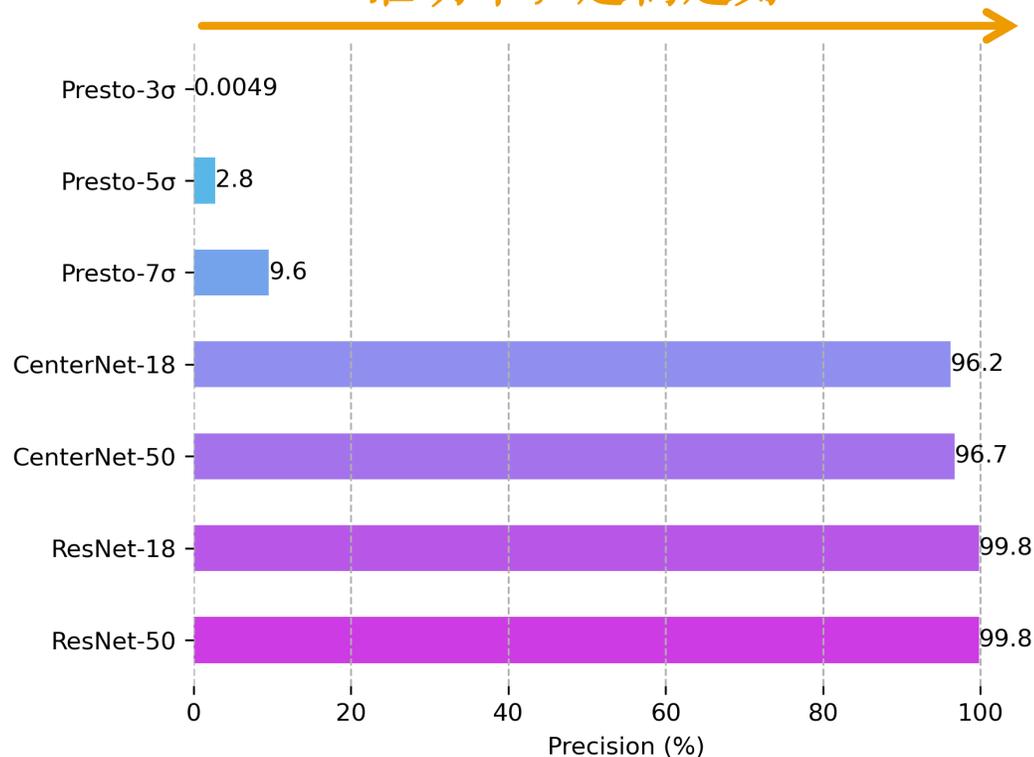
与常用方法进行比较 E.g. PRESTO



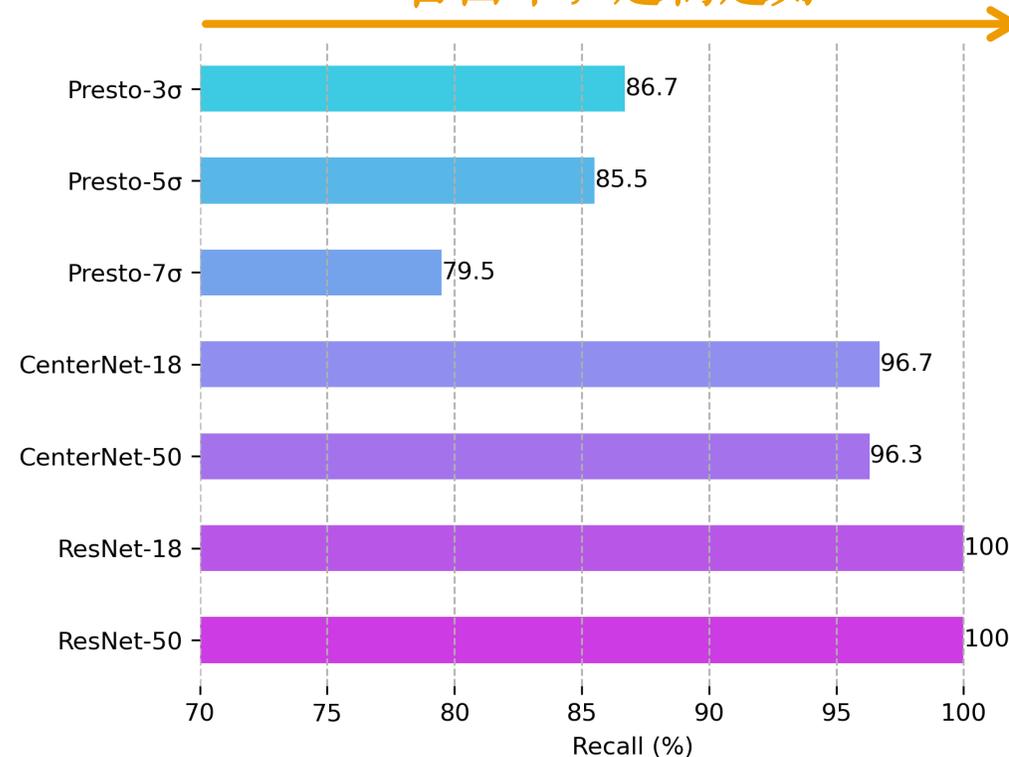
使用三种工具分别处理同一个6秒的文件，运行用时都包含了IO时间

与常用方法进行比较 E.g. PRESTO

准确率，越高越好



召回率，越高越好

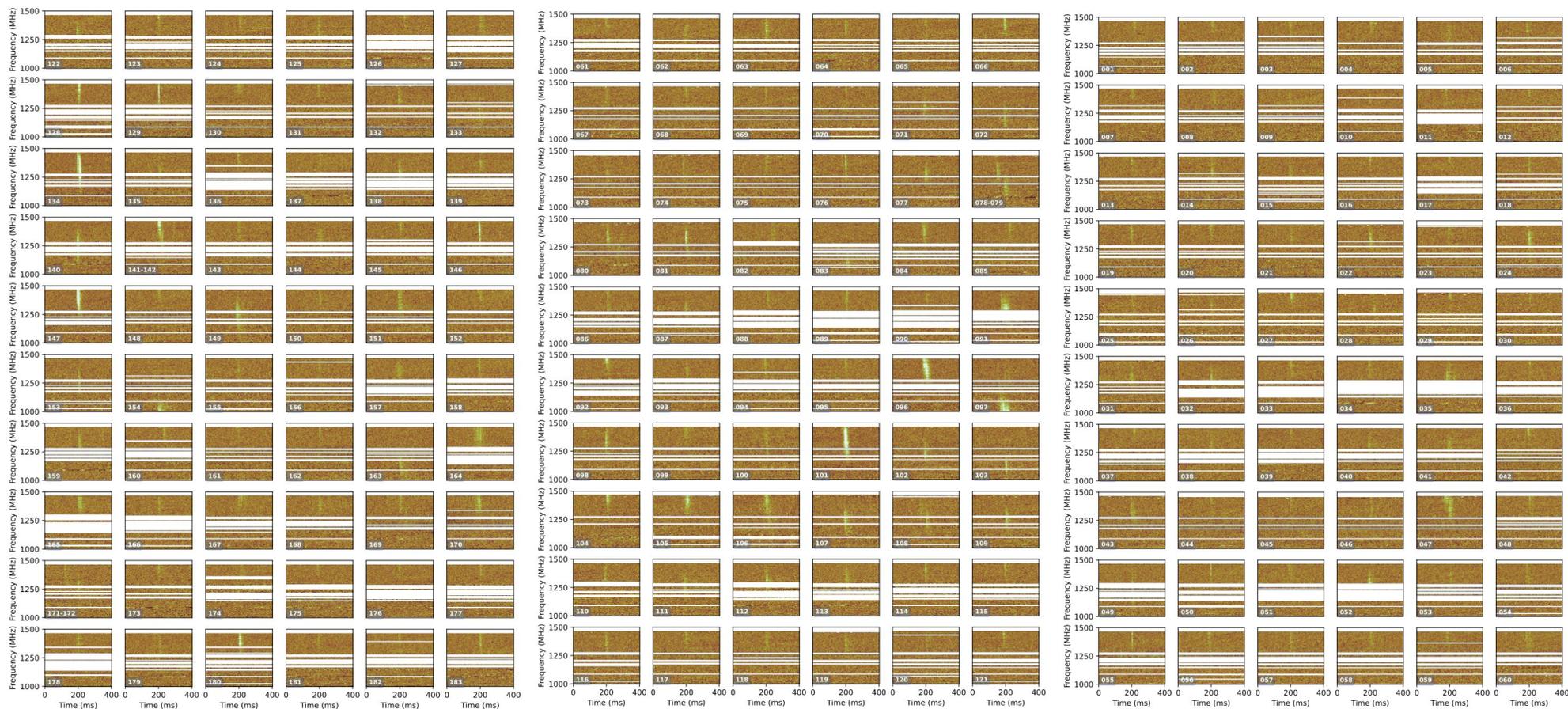


深度学习模型的准确率和召回率都优于PRESTO

使用三种工具分别处理同一个6秒的文件，运行用时都包含了IO时间

重新搜索观测数据 FRB190520

DRAFTS 新探测到的 FRB190520 的爆发



18.3小时的数据，Heimdall 探测到75个爆发，DRAFTS探测到这75个+新的183个

Niu et al. 2022

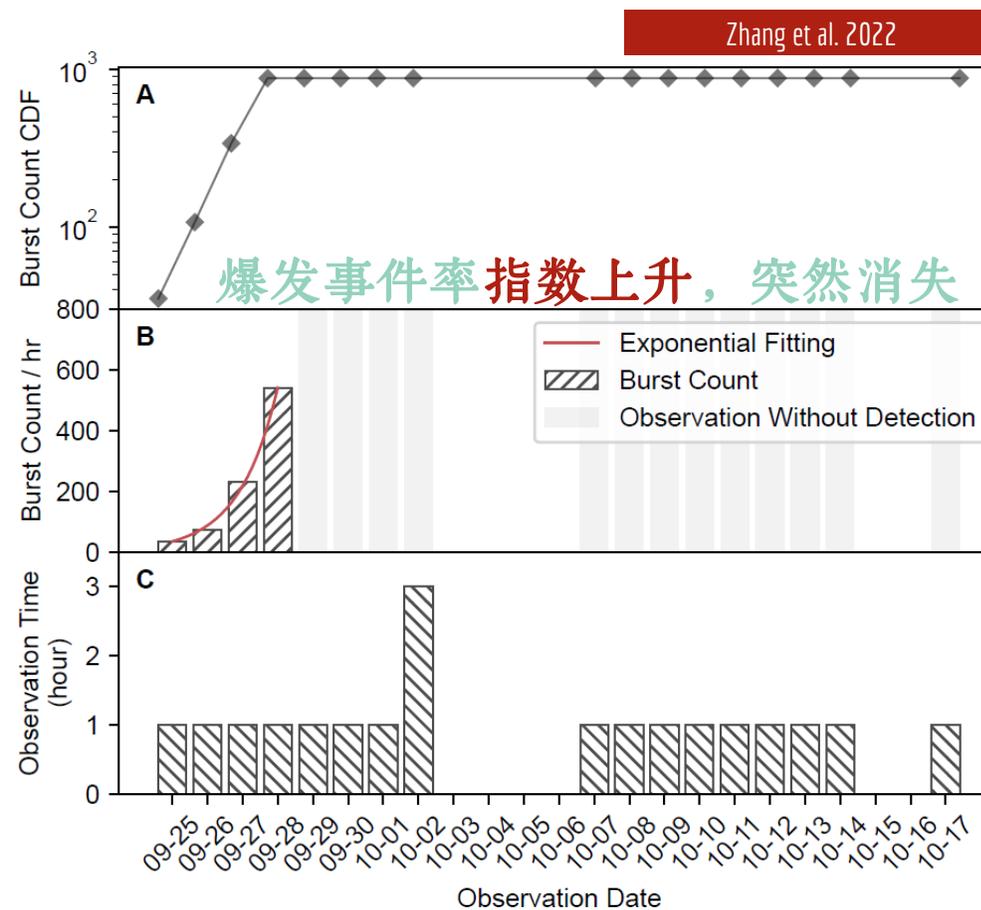
Zhang et al. 2025, ApJS

FRB案例分析 FRB 20201124A

CHIME 于 20年11月24日首次探测

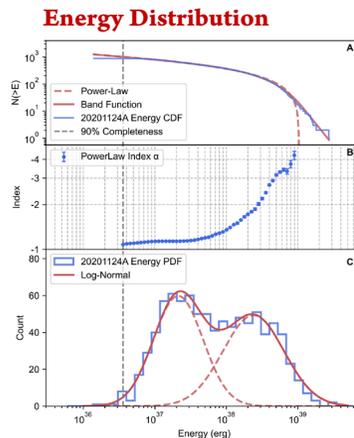
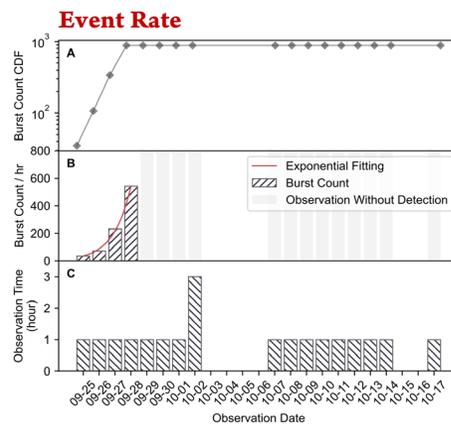
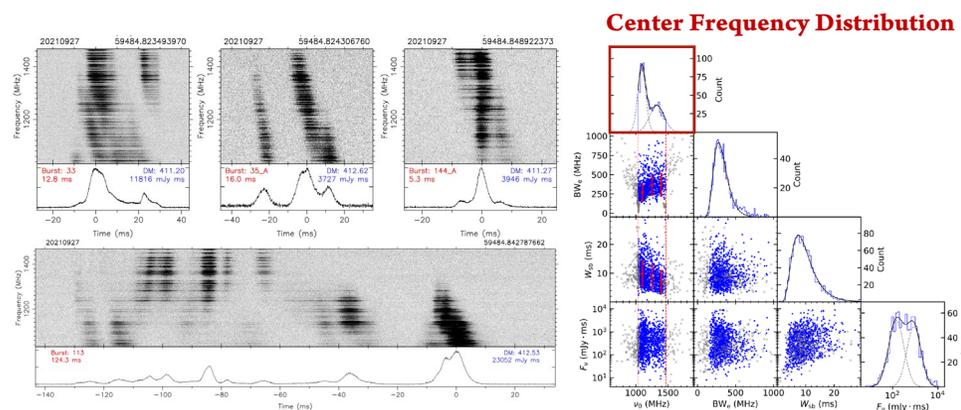
定位在红移为0.09795的棒旋星系

2021年2至4月第一次活跃，2021年9月第二次活跃



介绍FAST在 2021年9月 对 FRB 20201124A的观测

FRB案例分析 FRB 20201124A



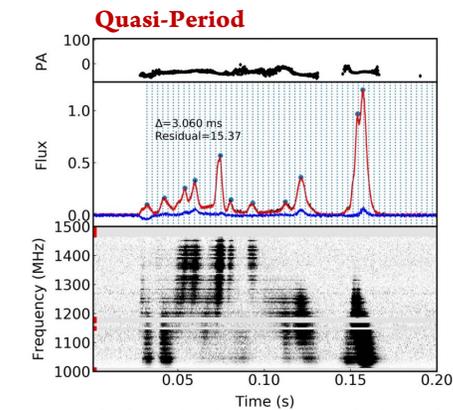
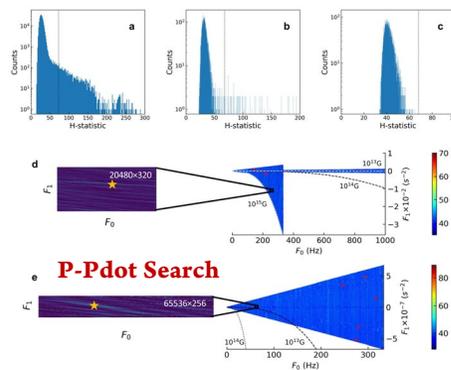
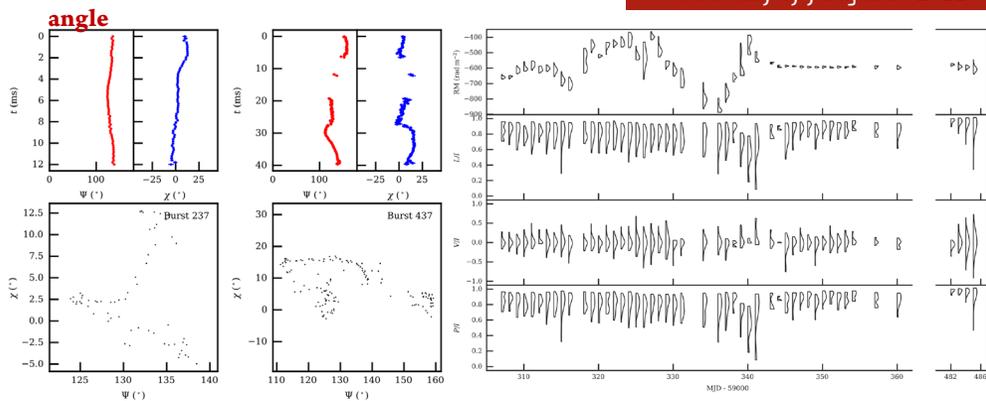
Morphology by Zhou et al. 2022

Energy by Zhang et al. 2022

Polarimetry by Jiang et al. 2022

Periodicity by Niu et al. 2022

Curve of PA and ellipticity



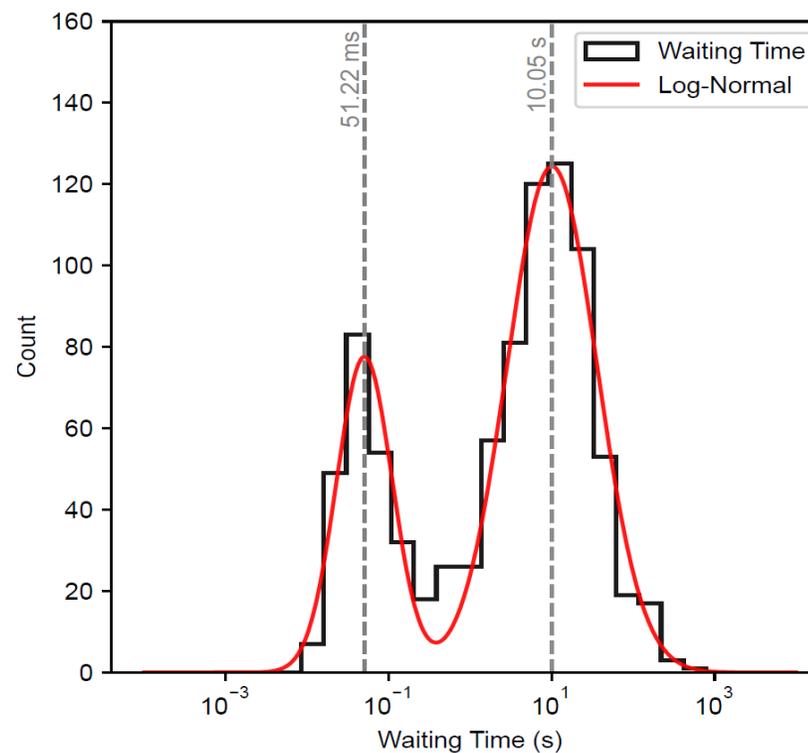
系列文章详细研究FRB此次活跃期 => 形态学、能量、偏振、周期

等待时间分布 FRB 20201124A

等待时间双峰分布

1. 右峰对应活跃性
峰值时间对应事件率倒数
最高事件率每小时542次爆发
不受爆发定义影响

2. 左峰与爆发定义相关



与其它重复FRB类似，等待时间都表现出双峰分布

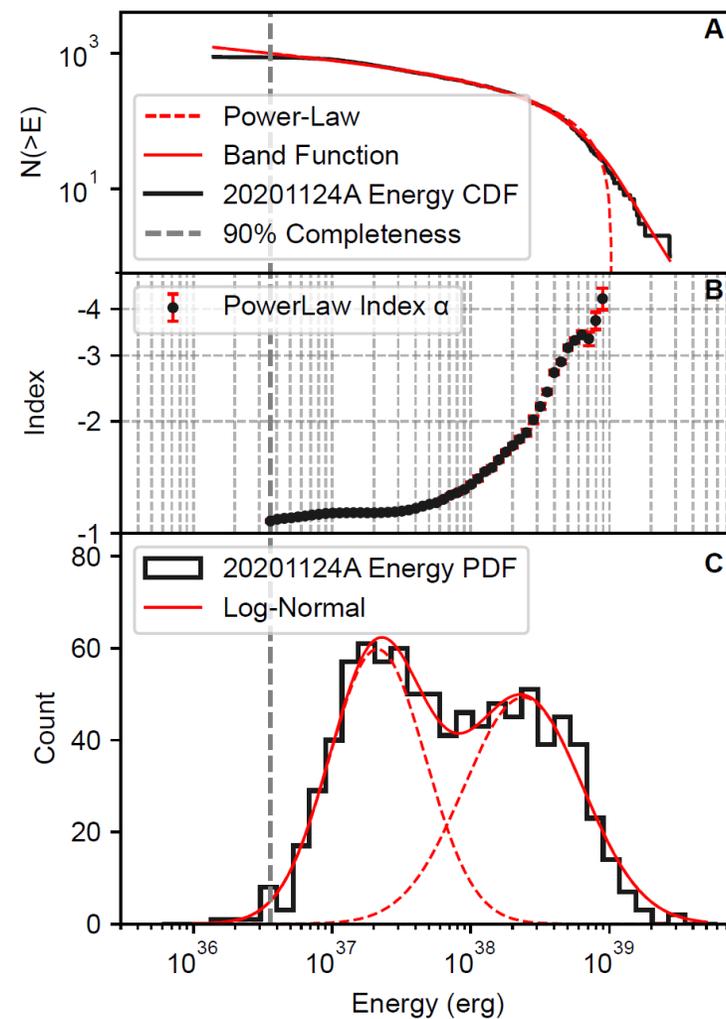
能量分布 FRB 20201124A

能量双峰分布

不能用单一幂律函数描述（幂律指数随阈值变化）

Band Function 平滑连接的断幂函数

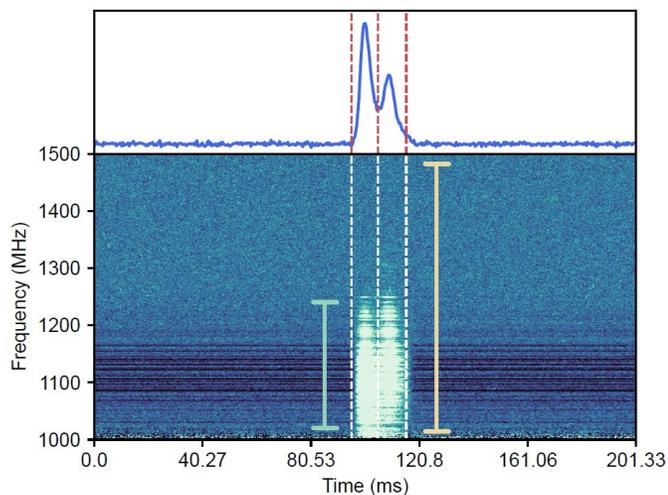
$$N(> E) = \begin{cases} AE^{\hat{\alpha}} e^{-E/E_0} & E \leq (\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0 \\ AE^{\hat{\beta}} \left[\frac{(\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0}{e} \right]^{\hat{\alpha} - \hat{\beta}} & E \geq (\hat{\alpha} - \hat{\beta})E_0 \end{cases}$$



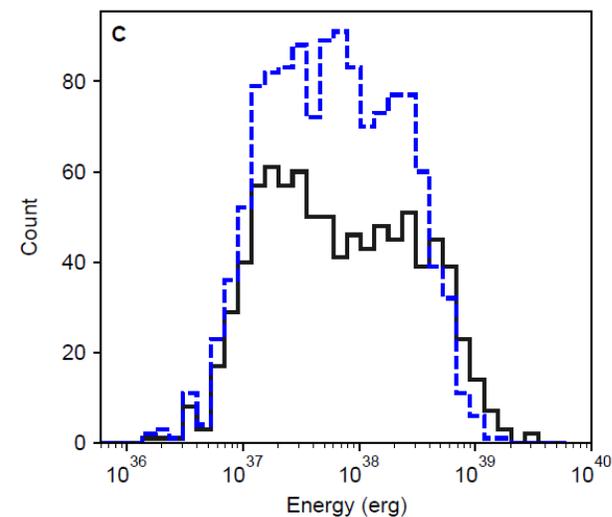
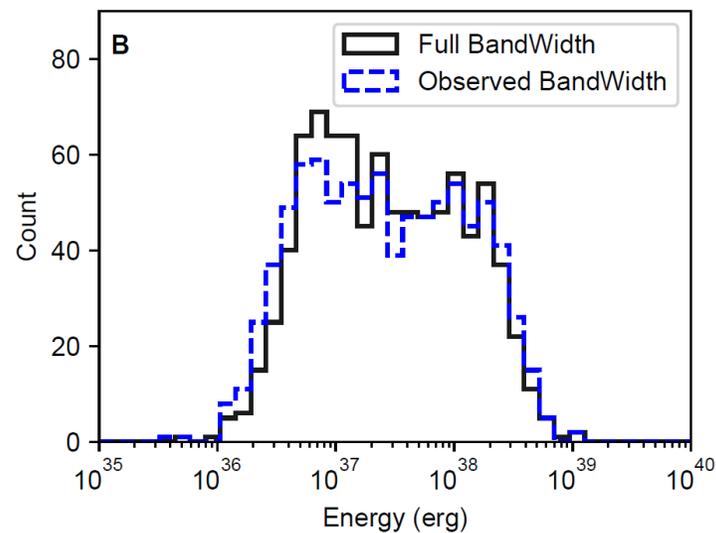
能量的双峰分布 => 多于一种辐射机制？

能量分布 FRB 20201124A

蓝色 爆发带宽
黑色 设备带宽



蓝色 拆分爆发
黑色 并合爆发



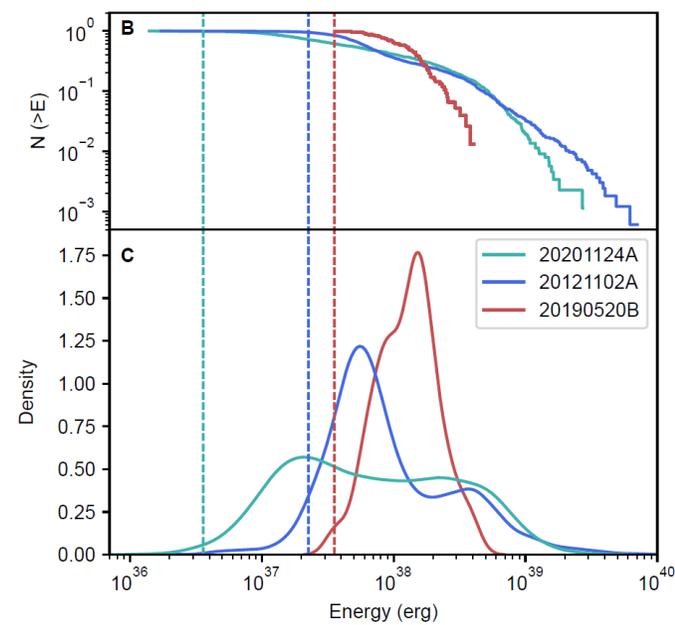
能量分布不受带宽选择的影响

高能量的爆发被拆分为
更多低能量的爆发

能量分布与爆发定义有关，但不受带宽选择影响

能量分布 FRB 20201124A/20121102A/20190520B

不同FRB的能量分布不同
但大都在 $1e36-39$ erg之间



重复FRB有多样的发射特性

能量预算 Energy Budget

不同FRB能量预算

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}

37.6%的磁能

14.3%的磁能 (1天)

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

爆发总能量 × 占空比 × 射电辐射效率 × 波束因子

调用相对论性激波的Synchrotron Maser模型，产生射电频率的能量效率低

要求**更高效**的辐射机制

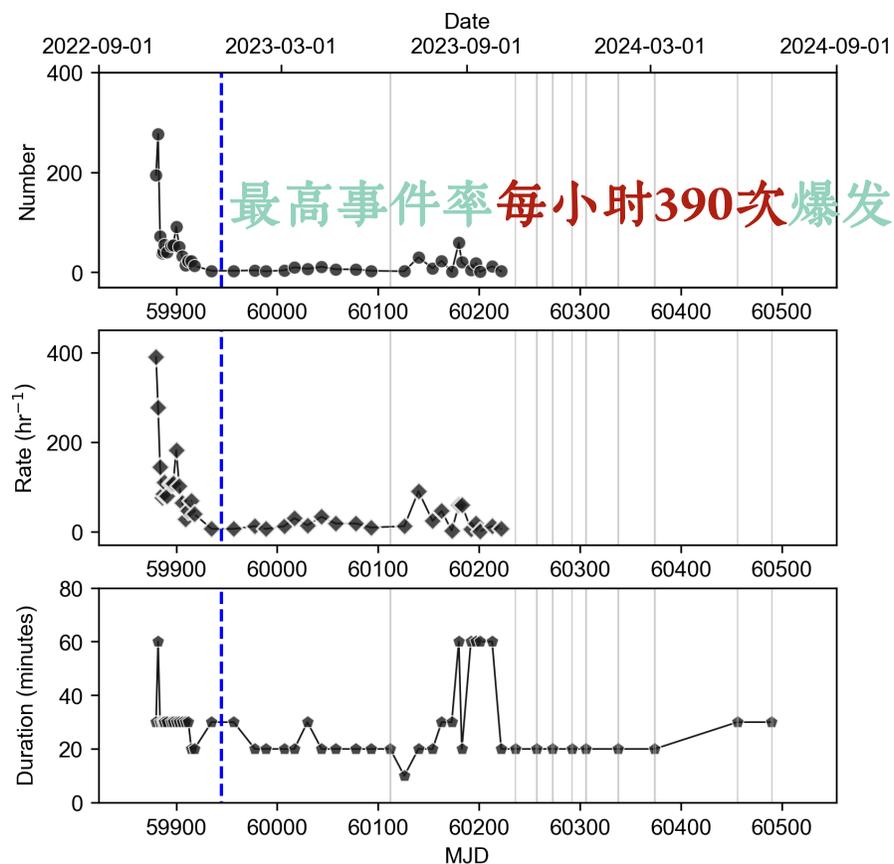
FRB案例分析 FRB 20220912A

Zhang et al. 2023

CHIME 于 22年09月12日首次探测

定位在红移为0.0771的星系，且宿主星系DM贡献很小

2022年09月开始活跃，直至2023年10月最后一次探测到爆发

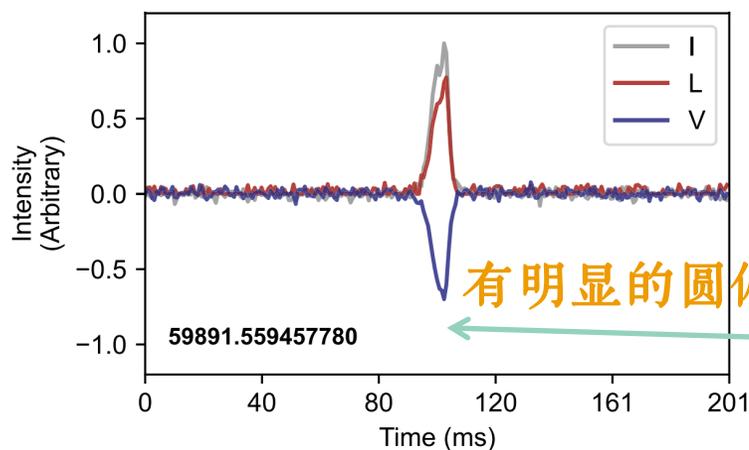


介绍FAST在 2022年10月 对 FRB 20220912A 的观测

FRB案例分析 FRB 20220912A

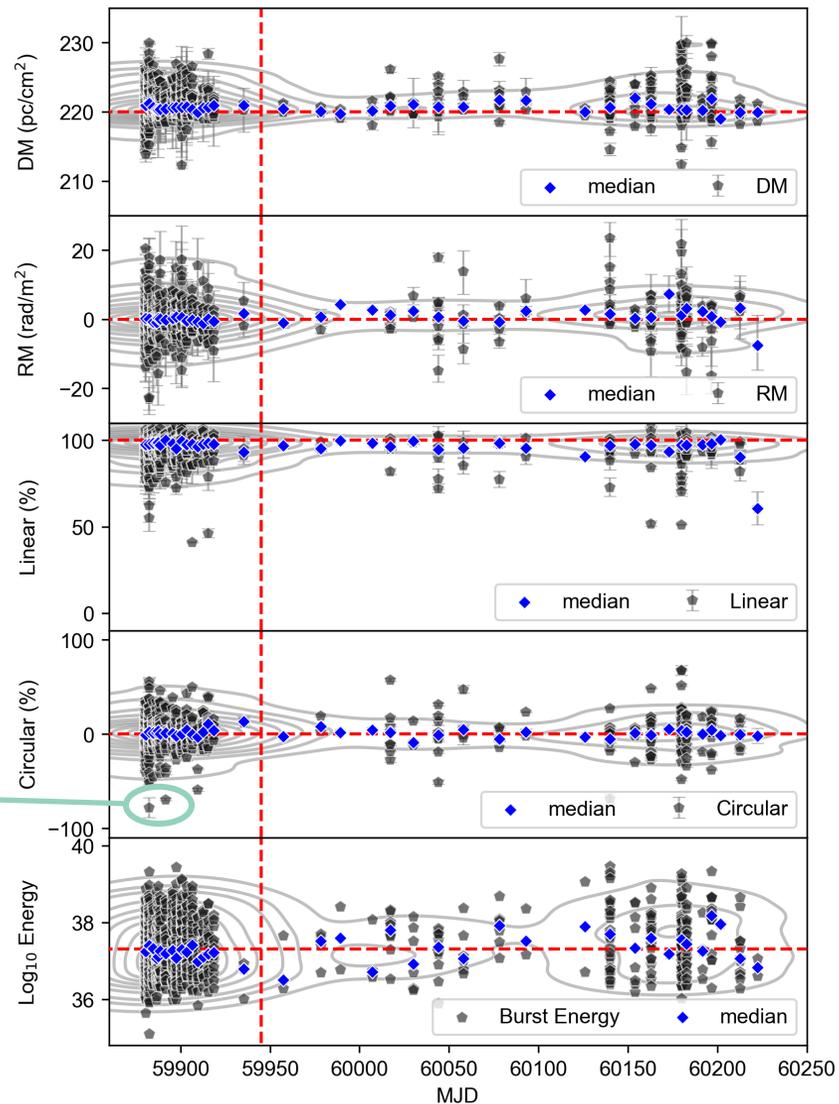
DM值没发生变化

RM接近0，且在一年内保持稳定



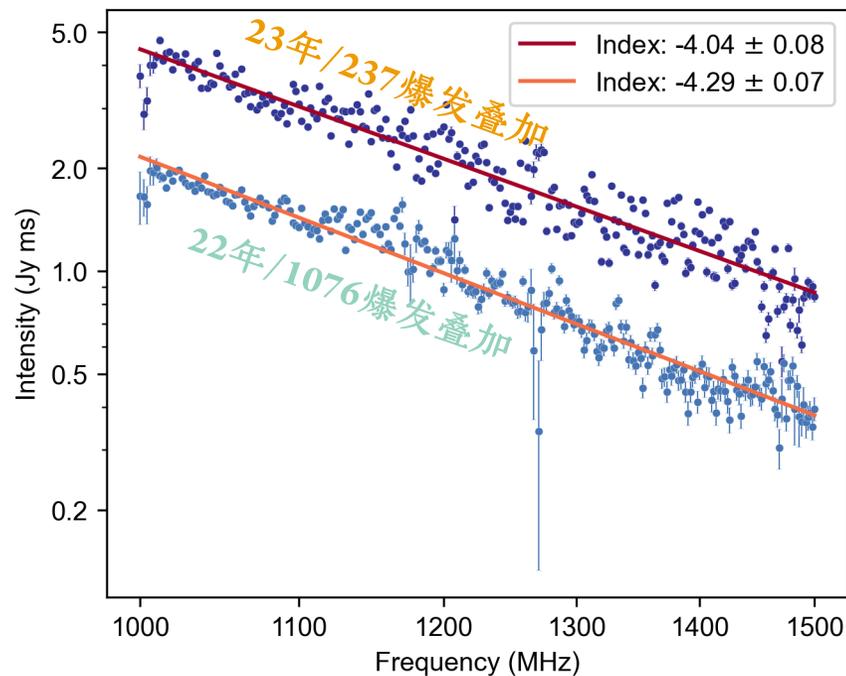
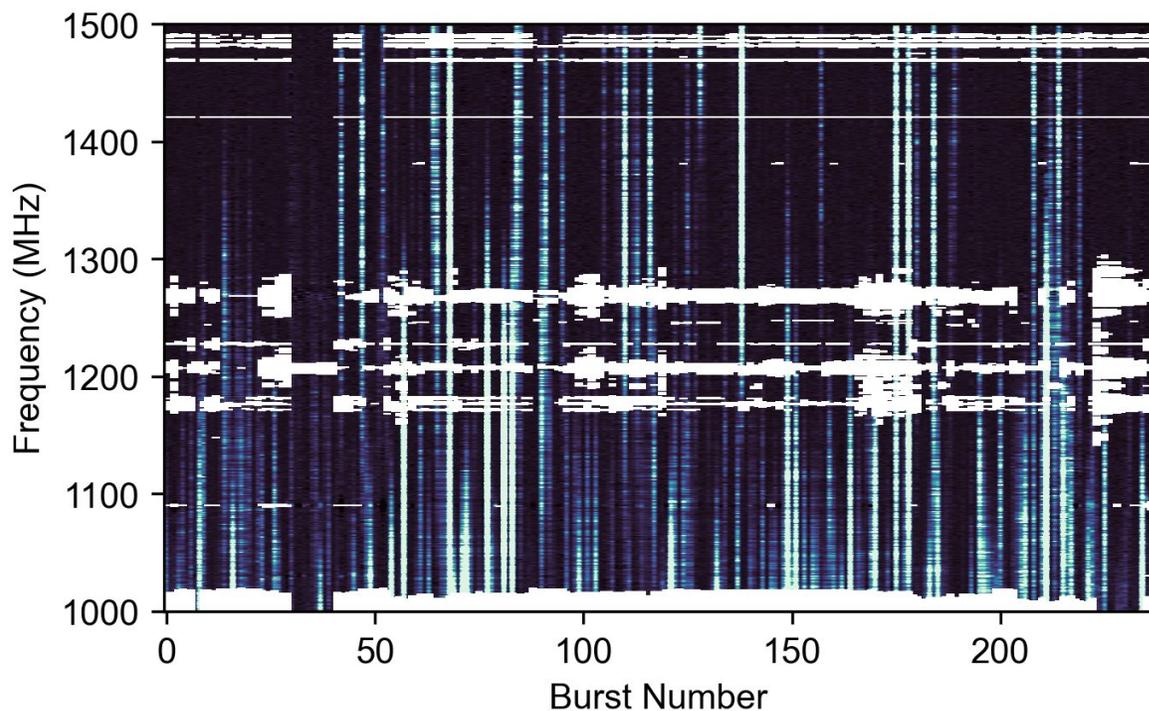
爆发逐渐变亮

宿主星系DM贡献小，RM小且稳定不变 => 环境干净



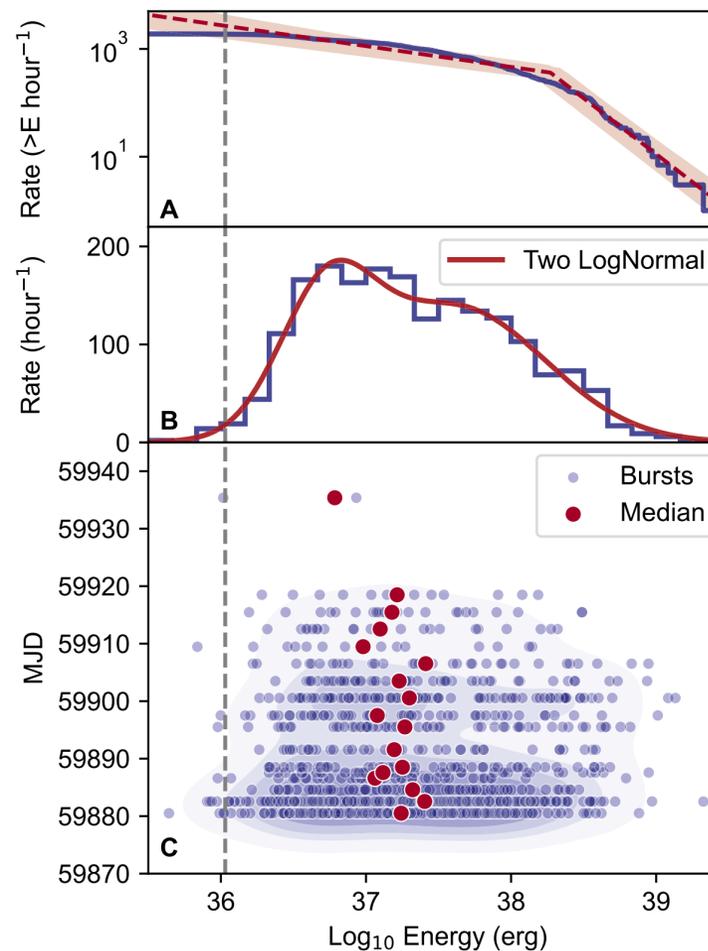
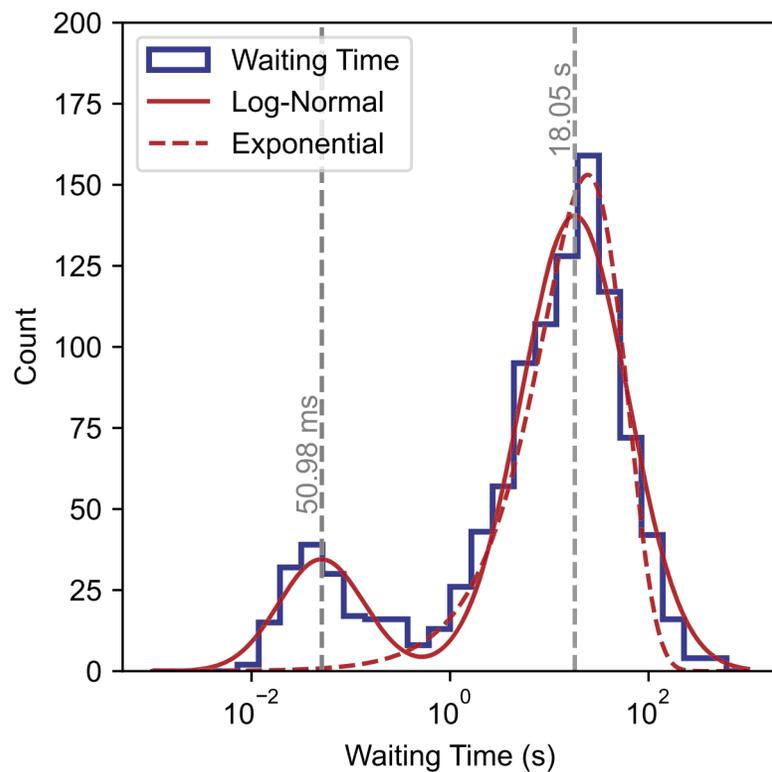
合成光谱 Synthetic Spectrum

定标后爆发频谱叠加



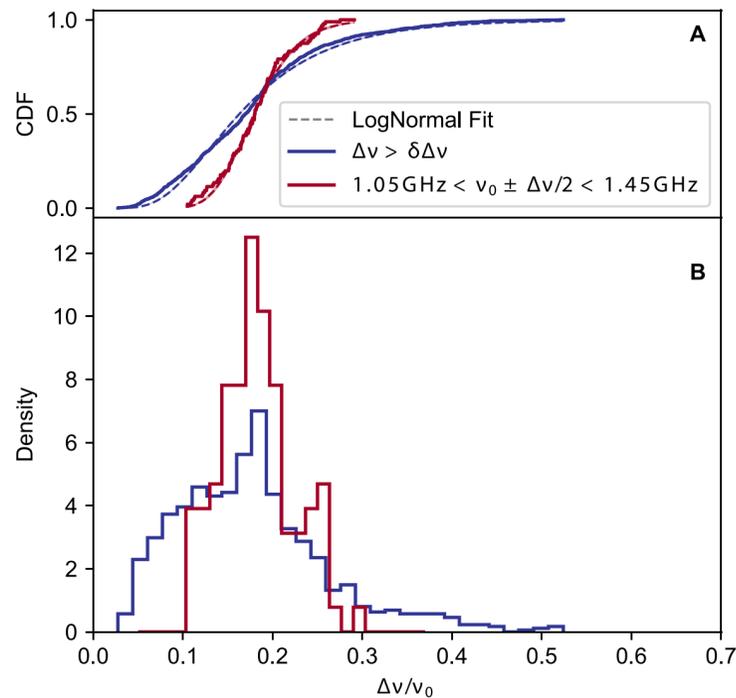
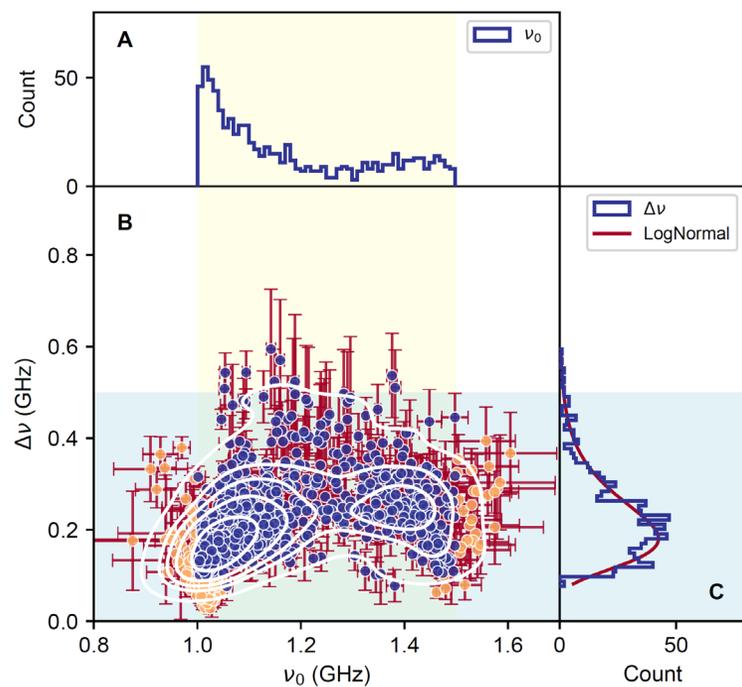
合成频谱符合幂律分布，低频辐射更强，且爆发在变亮

时间与能量分布 Distributions

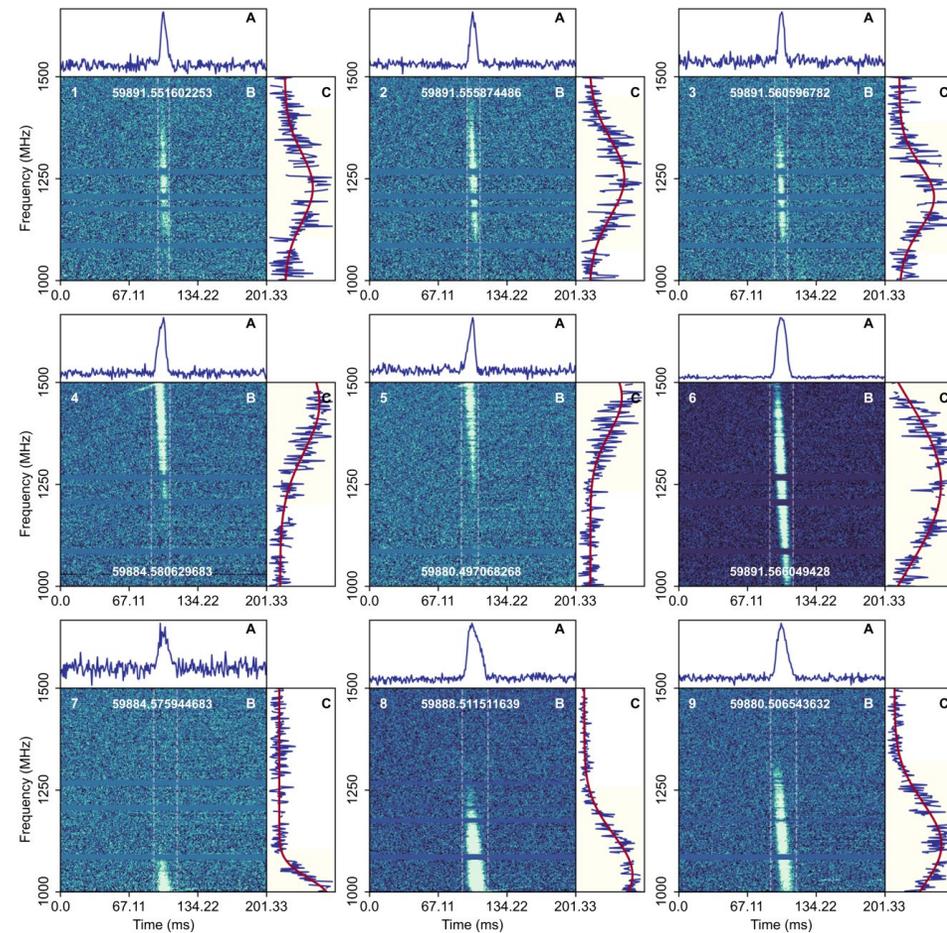


类似FRB 20201124A与其他重复暴，等待时间和能量都是双峰分布

爆发带宽 Spectral Width

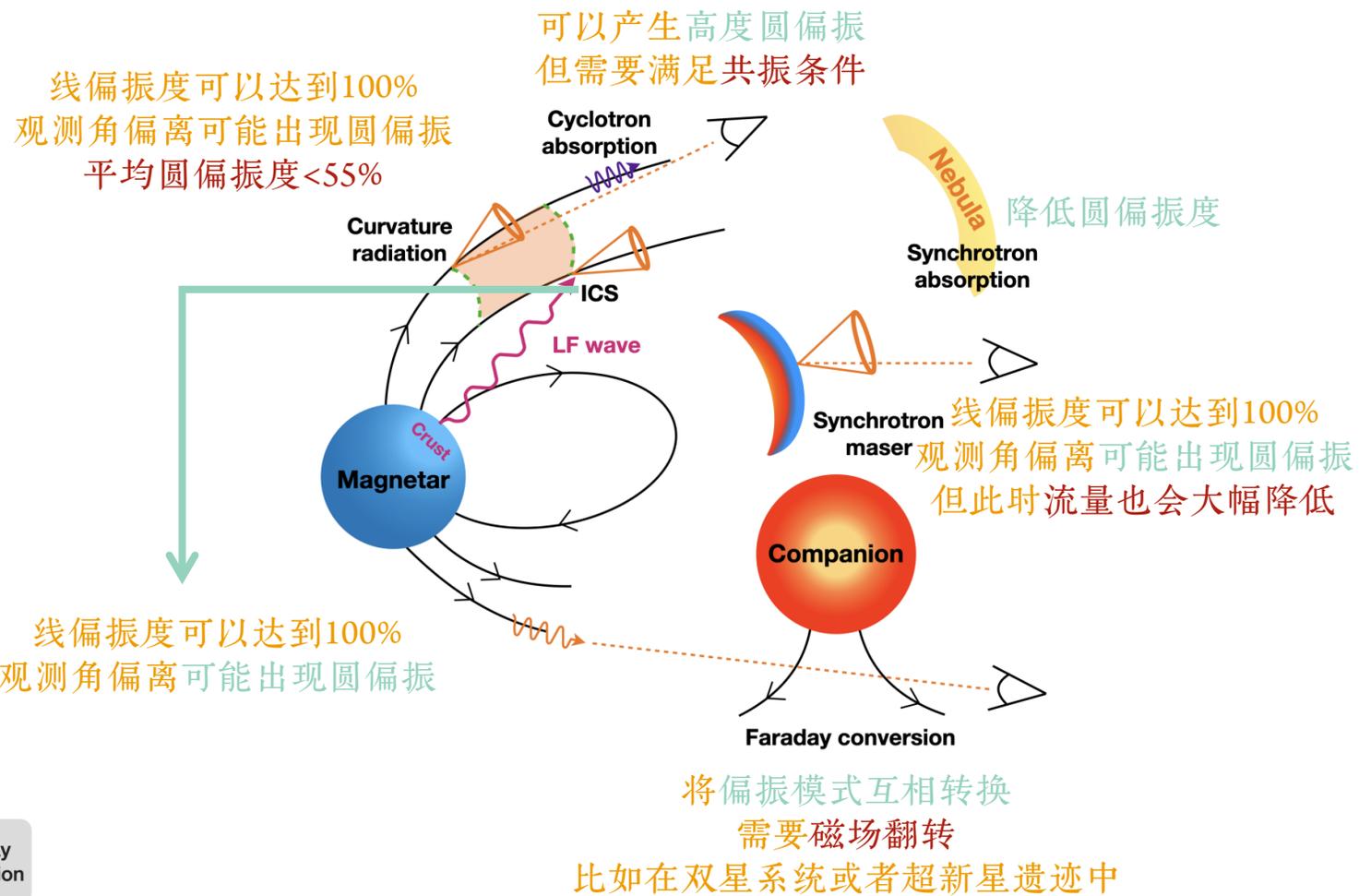
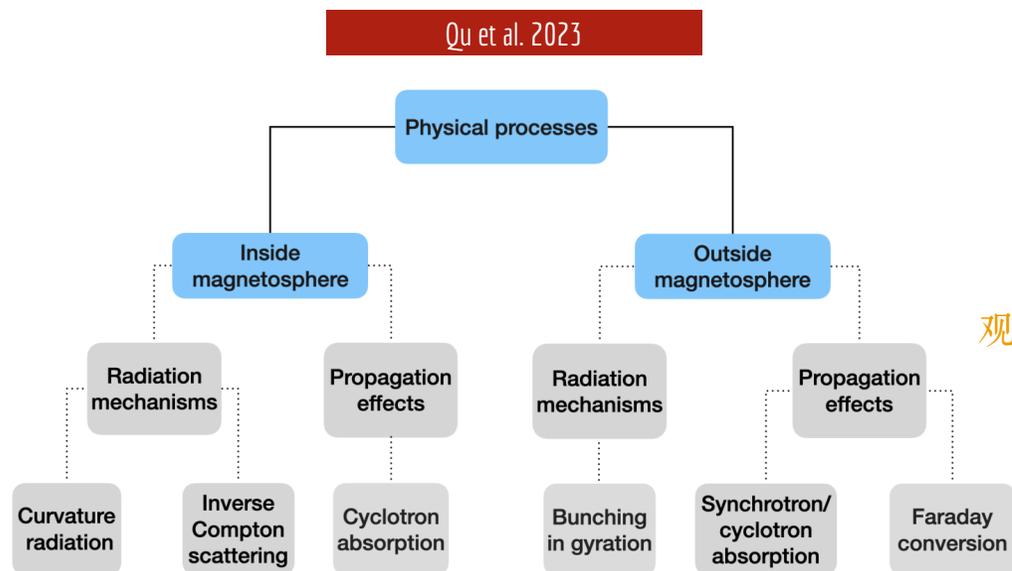


高斯拟合爆发带宽



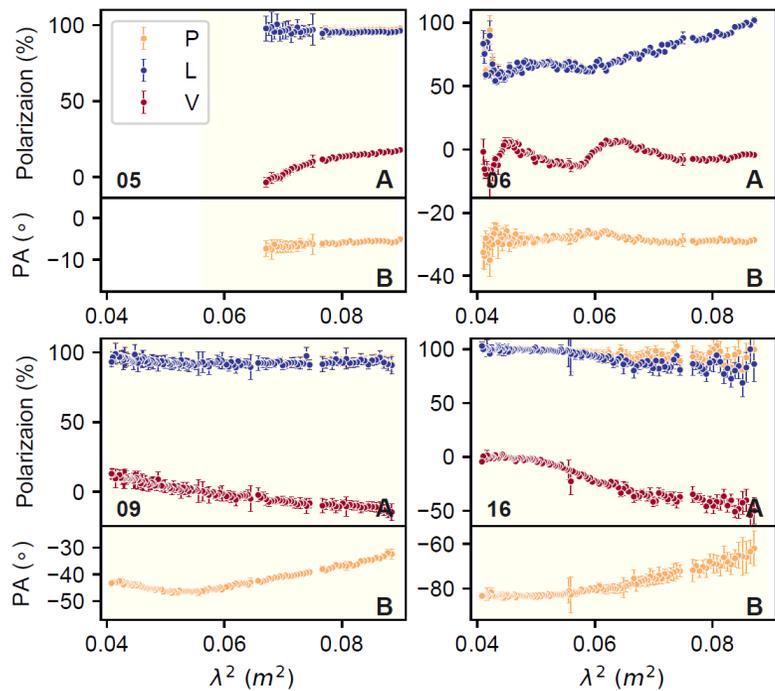
重复FRB倾向于窄谱辐射

偏振产生机制 Polarization



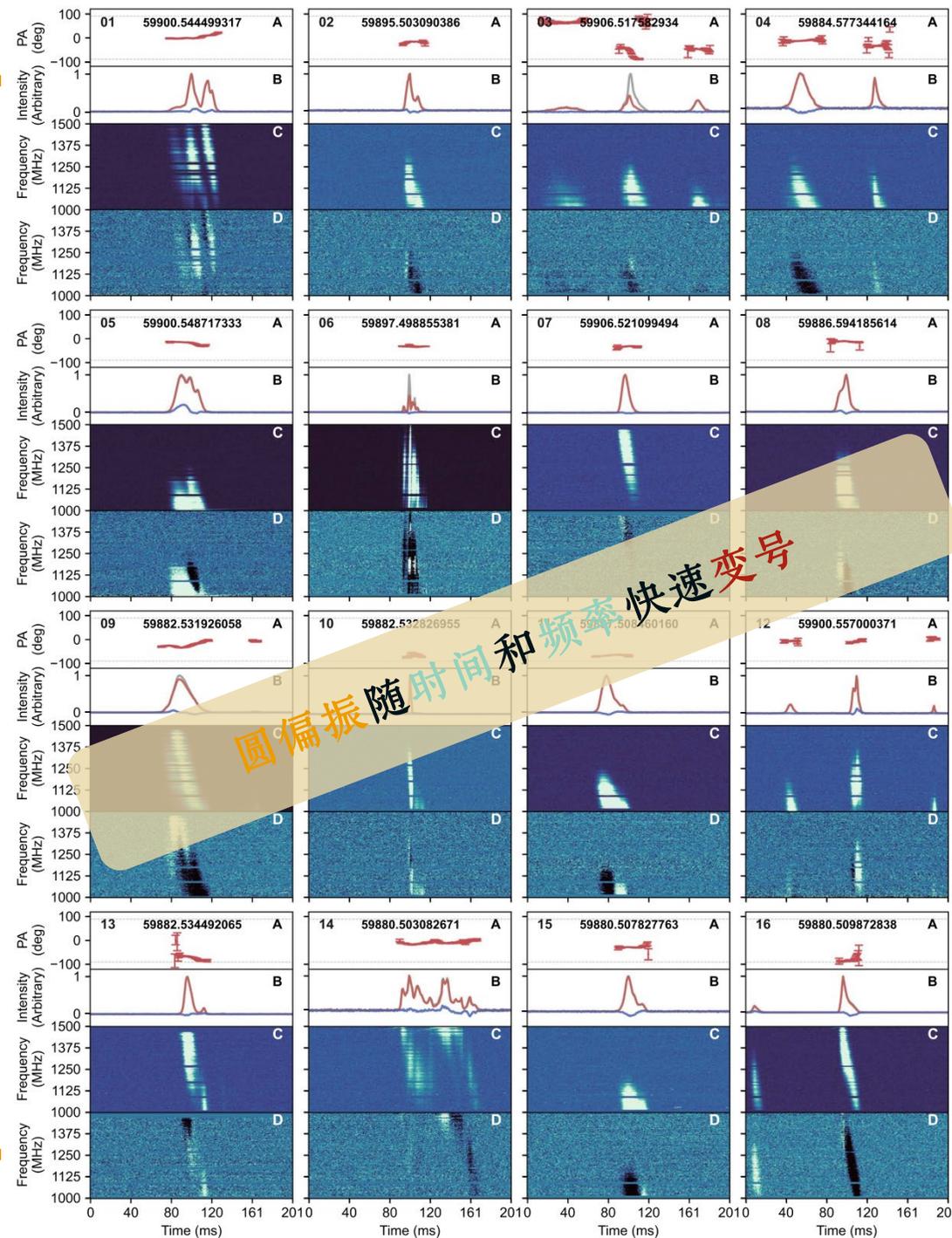
FRB产生偏振的可能机制

圆偏振 Circular Polarization

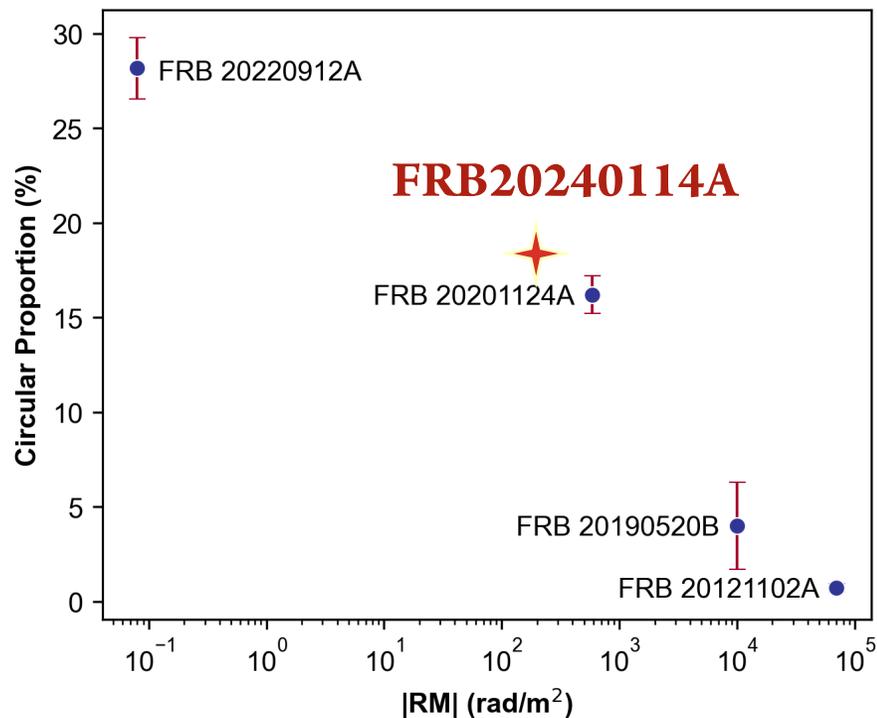


圆偏振随频率振荡

干净的周边环境、高圆偏振度、复杂的圆偏振表现
表明圆偏振更可能是辐射本征产生



圆偏振比例与RM Anti-Correlation



表现出圆偏振的爆发占总爆发数量的比例与RM成反相关关系

复杂的环境倾向于“吸收”圆偏振

FRB案例分析 FRB 20190417A

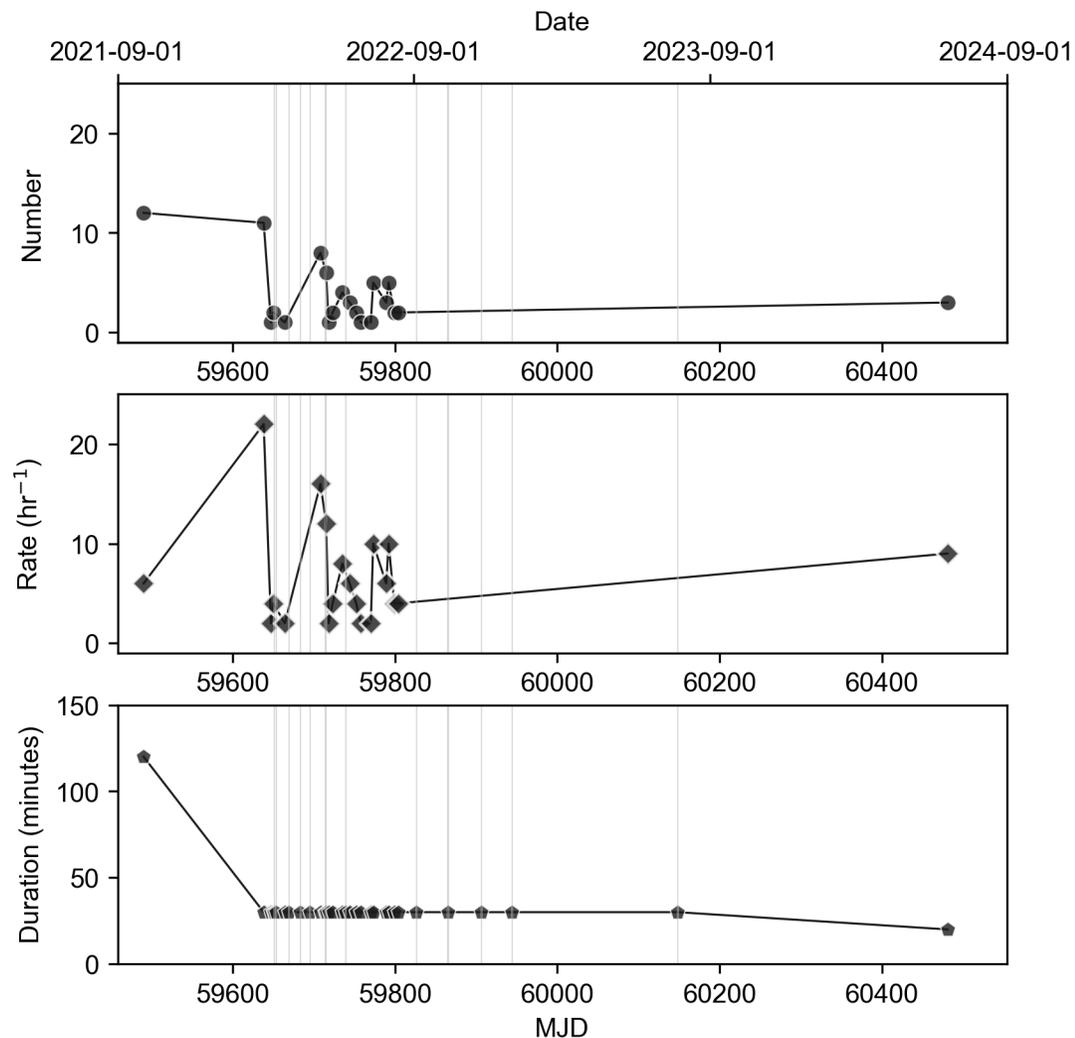
32次观测共计17.3小时
在20次观测中探测到75个爆发
其中12次观测没有探测到爆发

CHIME 于 19年04月17日首次探测

直到2024年才定位在红移为0.12817的星系，DM很大

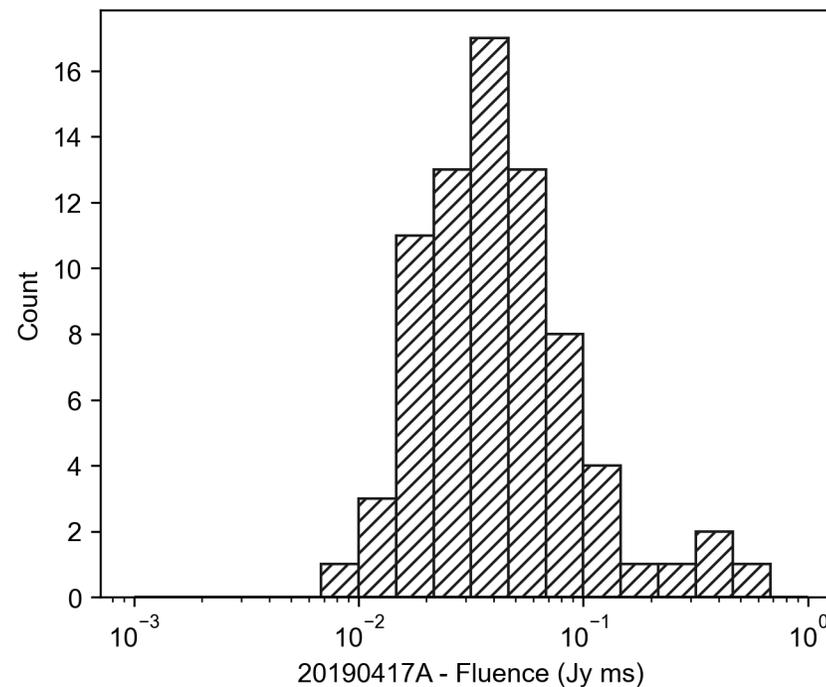
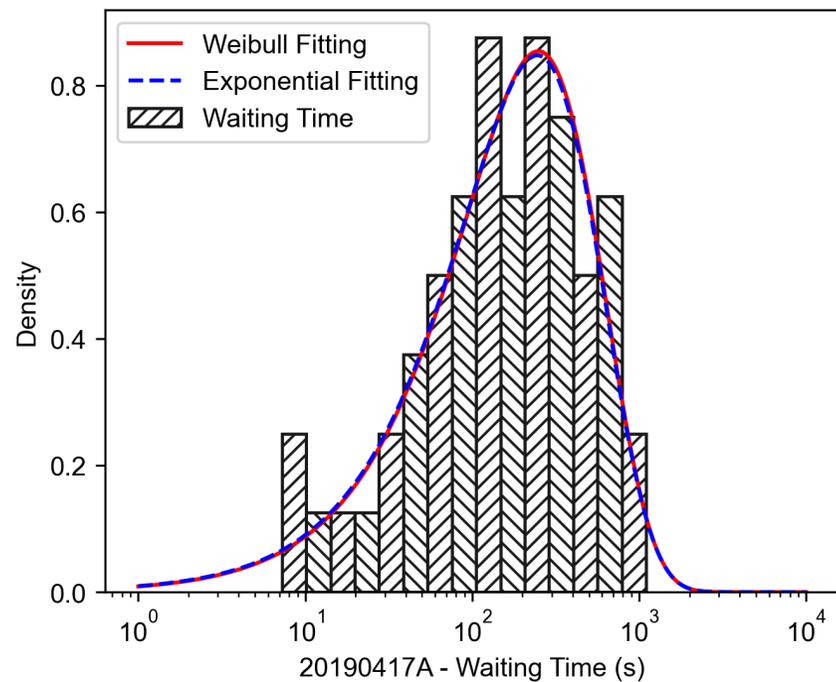
一直断断续续有爆发，不是很活跃

Zhang et al. in prep.



介绍FAST在 2021年到2024年对 FRB 20220912A 的观测

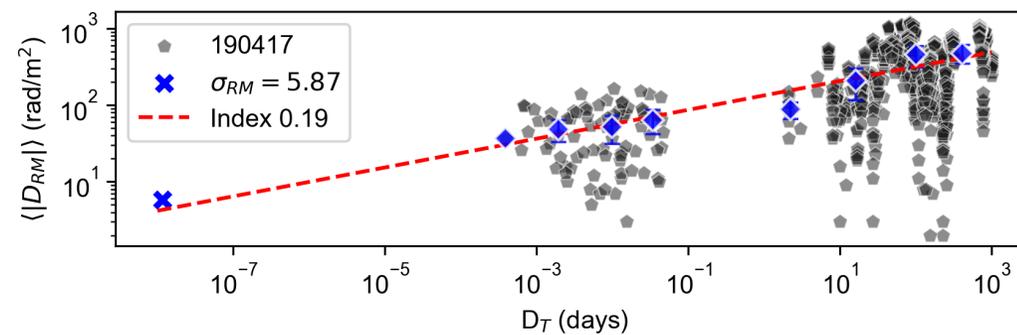
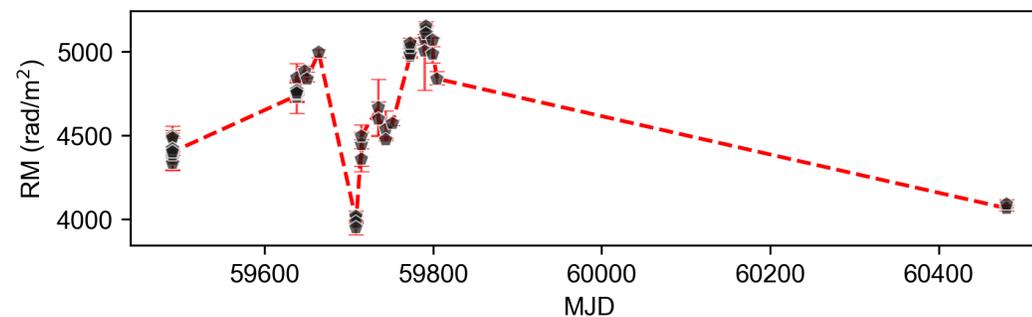
时间与能量分布 Distributions



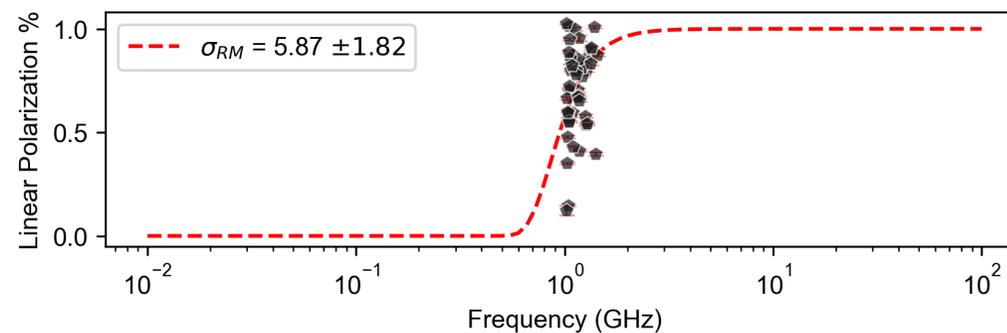
与其他重复暴不太相同，等待时间和能量不表现出明显的双峰分布

偏振 Polarization

RM发生明显变化

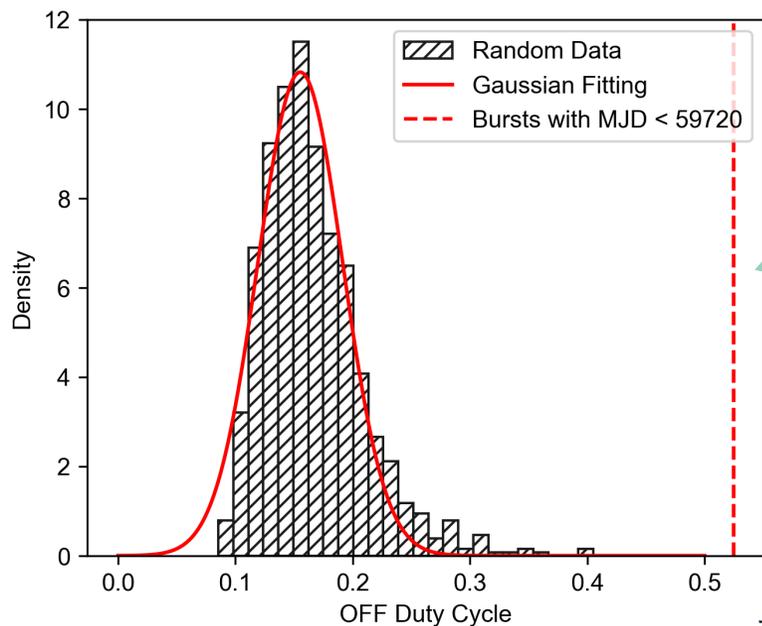


SigmaRM与之前测量值6.1在误差范围内一致



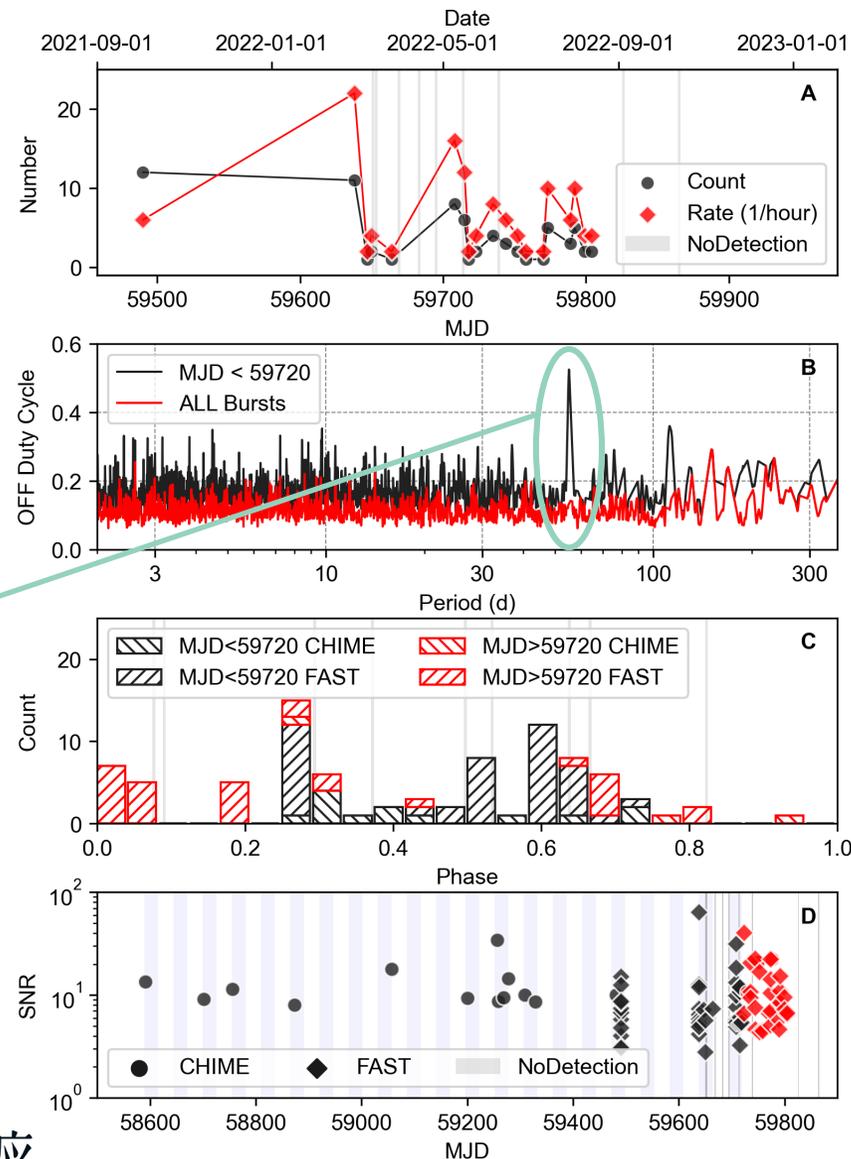
周期性 Periodicity

在2022年5月20日，结合CHIME数据，发现一个55天的周期，占空比小于50%，周期信噪比接近10



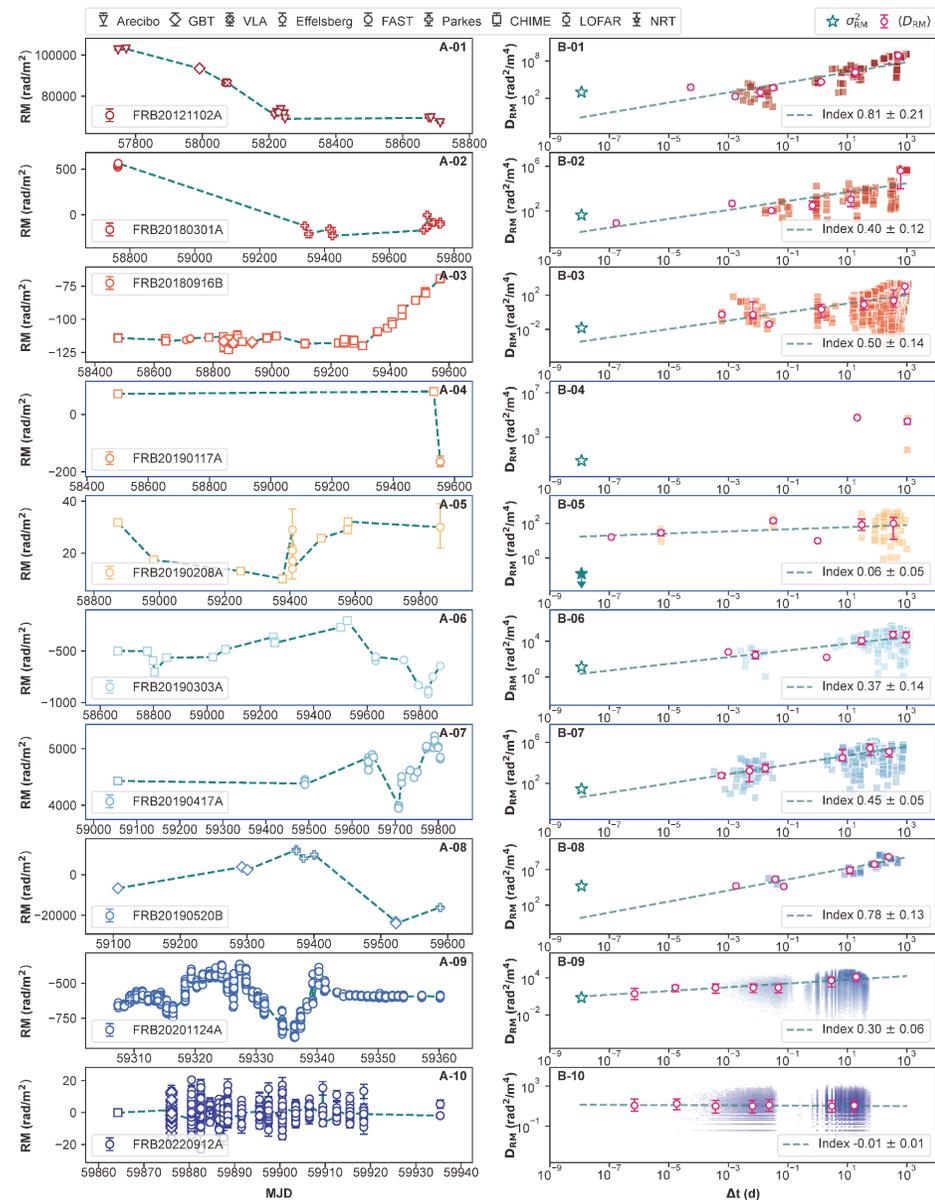
随着后续观测这一周期消失

长周期可能是观测选择效应



偏振与环境 Polarization

重复FRB似乎处于动态变化的磁环境中
大多重复FRB的RM随时间动态变化



漂移扫描多科学目标同时巡天 CRAFTS

高时频噪声 + 脉冲星、中性氢、星系和快速射电暴同时巡天

27%的FAST可见天空覆盖 / 6397平方度

谱线数据量1PB, 脉冲星数据量8PB

数据释放 <https://fasto.scidb.cn/en>

验证222颗脉冲星发现

61毫秒脉冲星

21双星系统 (包含3个脉冲星双星系统)

35个旋转射电暂现源

90个脉冲星已发表

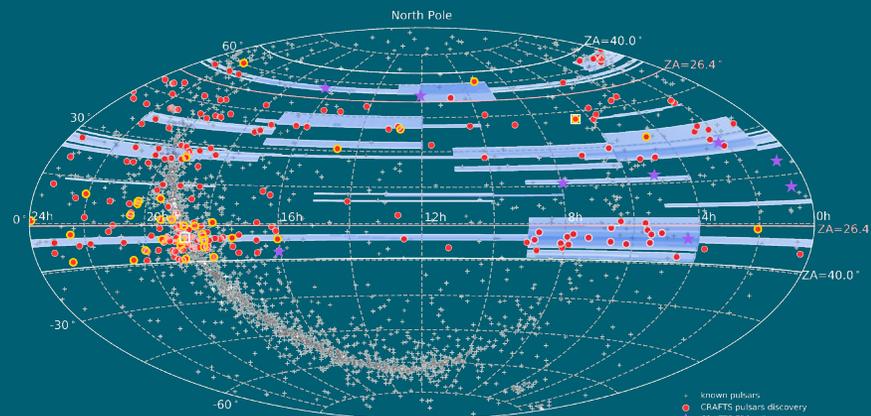
80个脉冲星获得计时解

探测到9个快速射电暴

5个已发表

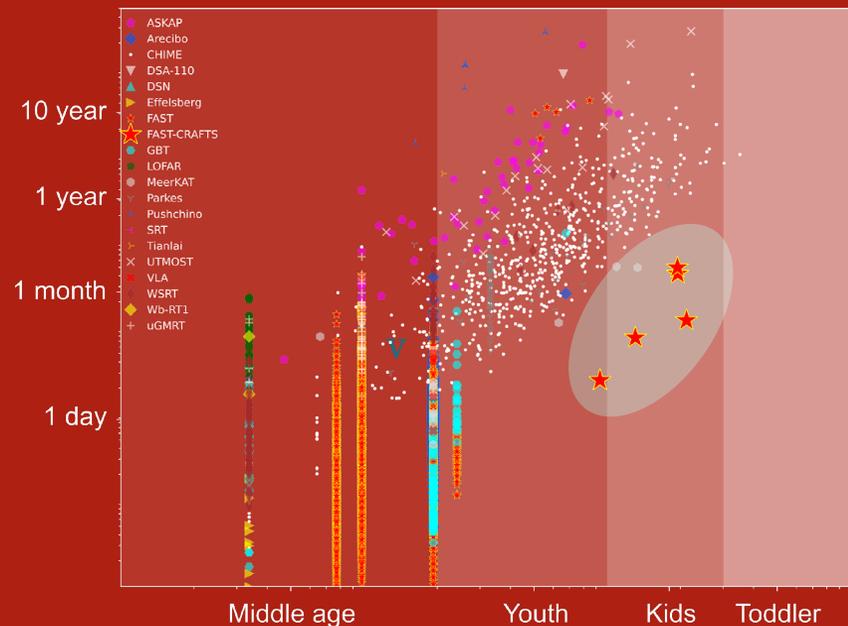
1个持续活跃重复暴

>12万次/天的全天事件率



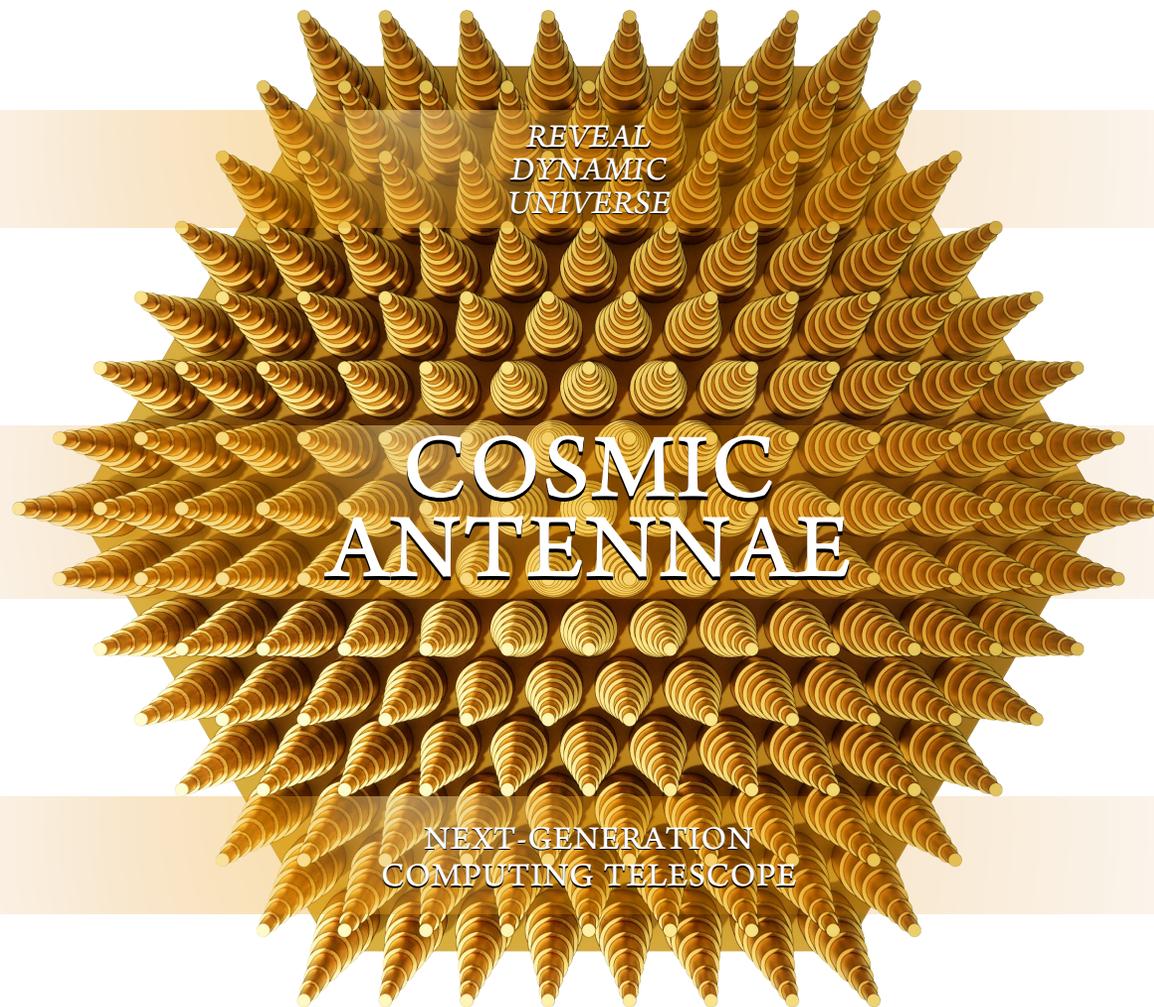
Finished Drift-scans of CRAFTS

等效太阳能量



宇宙年龄

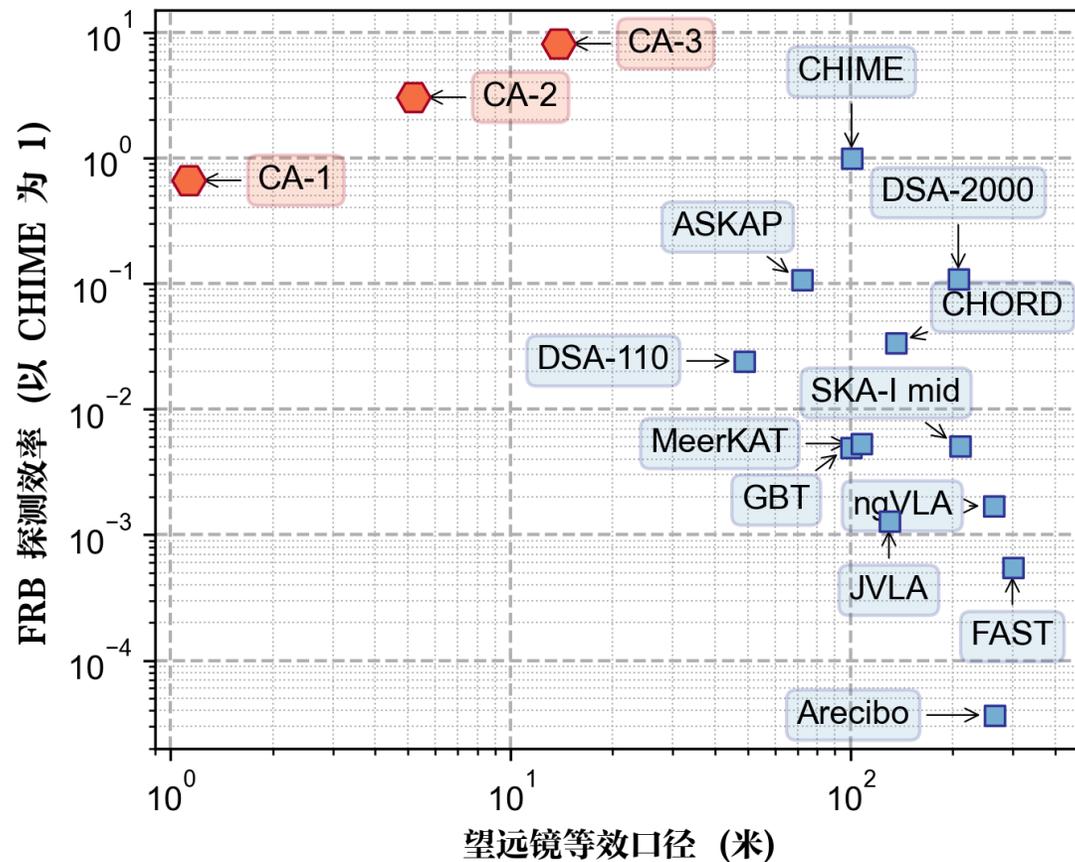
宇宙触角 Cosmic Antennae



计算感知宇宙
宇宙触角

探测率 Detection Rate

1平米的宇宙触角可以
做到接近CHIME
的探测率



总结 Summary

1. DRAFTS在搜索效率、准确率和完备性等方面，表现出优于传统暂现源搜索方法的性能，以应对未来的大数据挑战
2. FRB的超高事件率，限制了其辐射机制，要求高的辐射效率，因此倾向于磁星磁层起源
3. FRB的圆偏振来自辐射本征，复杂的环境会吸收圆偏振
4. 重复FRB倾向于在复杂的、动态演化的磁化等离子体环境中产生，其发射也不是在简单的偶极场中产生
5. FRB的长周期可能是观测时长不足的偏差（选择效应）

暂现源 Transient

在极短时标和中等时标处
还有大量的空白有待填补

