



快速射电暴脉冲研究进入高统计性时代

徐佳莹¹, 李菡^{2*}

1. 之江实验室, 杭州 311100;

2. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

* 联系人, E-mail: dili@nao.cas.cn

快速射电暴(fast radio burst, FRB)是在宇宙空间中发生的持续时标为毫秒量级的射电脉冲信号, 瞬时辐射流量峰值可达数十央斯基(Jy), 爆发的总能量相当于太阳几天甚至几个月内辐射的总能量。

快速射电暴于2007年被Lorimer等人^[1]首次发现并报道之后, 经历了初期的真实性质疑。在射电这个波段, 快速射电暴的信号很容易被淹没在手机、WiFi这类人造无线电信号之中, 直到2013年4个新的快速射电暴被发现^[2], 质疑声才逐渐消失。人们转而对快速射电暴产生了极大的兴趣, 快速射电暴正式成为天文学重要的新兴领域。近几年, 得益于新的观测设备和技术的不断更新和突破, 以及不断壮大且充满活力的科研人员, 无论是快速射电暴观测的样本数量, 还是人们为解开快速射电暴起源之谜所作出的贡献量, 无疑都是巨大的。

随着近几年大量快速射电暴样本的出现, 重复的快速射电暴(以下简称“重复暴”)也随之被天文学家们注意到, 尤其是FRB 20121102和FRB 20201124, 都被观测到有极高的爆发率。FRB 20121102是天文学家于2015年发现的第一个重复的快速射电暴源^[3]。这个源初次记录于2012年, 并于2015年在相同的空间位置再次被探测到, 且色散量(表征传播路径上穿过的自由电子柱密度)也相同。在之后的观测中, FRB 20121102以极高的重复率区别于其他的快速射电暴, 也是第一个被定位的重复暴^[4,5]。2021年, 李菡团队^[6]利用中国500米口径球面射电望远镜(Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope, FAST)成功捕捉到了FRB 20121102的极端活动期, 首次展现了快速射电暴迄今为止最宽能量范围的分布情况, 在59.5 h内累计获取了1652个高信噪比的爆发信号, 最剧烈时段达到每小时122次爆发(图1)。本次记录的次数超过了以往所有文献记载次数的总和, 构成有史以来最大的快速射电暴数据集, 为探索快速射电暴的理论模型提供了新的线索。比如, 李菡团队^[6]根据FRB 20121102在高端的爆发, 推测出重复快速射电暴可能并非来自单一、孤立致密天体; 内华达大学张冰教授则推测, 该快速射电暴可能起源于一种特殊的中子星, 可能是一颗“年轻的中子星”(https://m.thepaper.cn/baijiahao_16168383); 频繁的爆发还对相干辐射模型进行



徐佳莹 之江实验室智能计算平台研究中心计算天文组博士后, 澳门科技大学地球与行星科学专业博士。主要研究方向为快速射电暴、磁重联。



李菡 中国科学院国家天文台研究员、FAST首席科学家, 观测天文学家, 突破基金会聆听计划指导委员会委员。发现了星际分子氧气, 组织发现了FAST首个新脉冲星、首个新快速射电暴等。主要研究方向包括星际介质、望远镜技术、脉冲星搜索及快速射电暴等。

了限制, 相干辐射是否可以在如此短的爆发时间间隔内完成发射也是一个问题。该研究成果于2021年10月14日发表在*Nature*杂志, 并被评为“2021年度中国科学十大进展”之一。由此可见, 快速射电暴在天文领域的新兴程度和活跃程度很高, 但关于其起源和产生机制目前尚缺乏共识。

随之而来的问题是, 是否所有的快速射电暴都会重复爆发? 目前在观测到的数百例快速射电暴爆发源中, 大部分快速射电暴是一次性爆发的, 仅有约4%呈现出重复爆发的现象。目前只爆发了一次的快速射电暴会不会被观测到第二次爆发呢? 这类后随监测任务对于具有极高灵敏度的FAST十分有利。那么, 这些重复爆发的快速射电暴是否具有周期性呢? 这又是一个令人费解的问题。迄今为止, 确切找到周期性的快速射电暴还只有一例, 即FRB 20180916, 这个快速射电暴存在一个16.35 d的周期^[7]。FRB 20121102也通过观测发

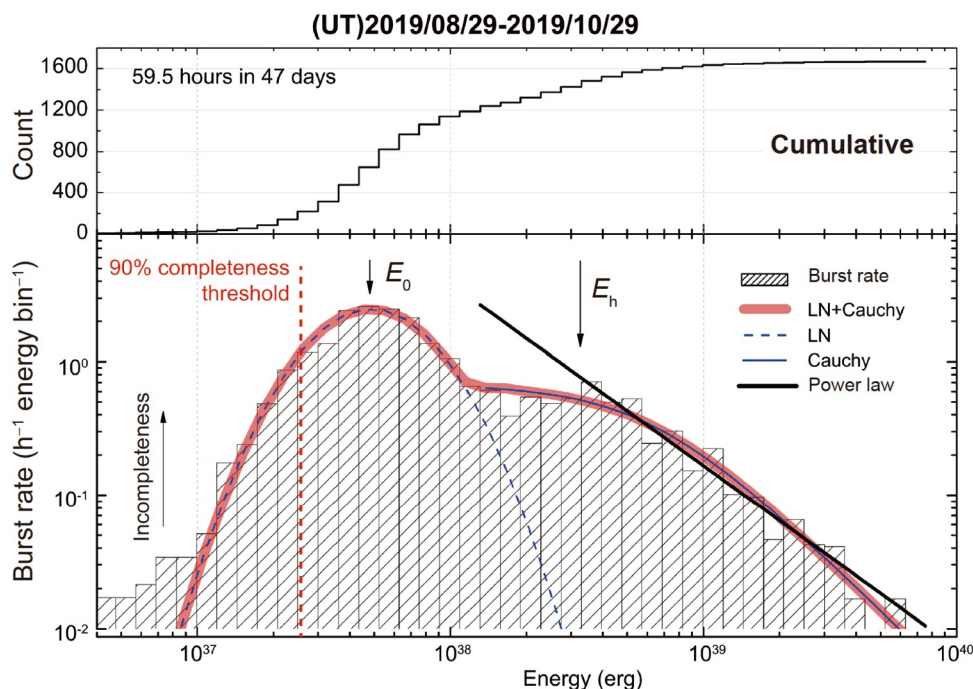


图 1 (网络版彩色)FRB 20121102爆发的各向同性等效能量在1.25 GHz的爆发率分布^[6]

Figure 1 (Color online) Burst rate distribution of the isotropic equivalent energy at 1.25 GHz for FRB 20121102 bursts^[6]

现可能存在一个159 d的周期^[8]。

2020年1月11日, FAST正式投入运行。FAST实现了多项自主创新, 汇集了世界最先进、最精尖的仪器和技术, 攻克了望远镜巨大体量和超高精度等技术难题, 显著提升了我国射电天文研究和技术水平, 综合性能达到国际领先水平, 对我国天文学领域实现重大原创性突破起到了重要的基础支撑作用。FAST的高灵敏度已经在低频引力波、快速射电暴、脉冲星等前沿方向催生突破。未来还将建设FAST阵列, 其高灵敏度和高角分辨率有望在射电天文领域实现世界领先, 中国天文学家将凭借FAST做出更多世界一流的研究成果。

1 快速射电暴最新进展

2018年之前, 全球望远镜观测到的FRB爆发数量只有10余例, 2018年之后, 观测样本激增增至约600例, 重复暴也从之前的2例发展成现在的24例, 并完成了19个宿主星系的定位工作^[9]。这在很大程度上归功于加拿大氢强度图谱实验射电望远镜(CHIME/FRB), 其超大视场对快速射电暴的观测是非常有利的, 每天都能发现几例新的快速射电暴。伴随着大量样本的出现, 近几年对快速射电暴的起源以及宿主星系方面的研究进展迅速。

(1) 快速射电暴的产生机制和物理起源至今仍有许多未解之谜。鉴于快速射电暴极短的爆发时间和极高的亮温度等特征, 很多天文学家猜测磁陀星(即磁场极强的特殊中子星)是产生快速射电暴的最佳候选体^[10,11]。2020年4月28日, 加拿

大CHIME望远镜和美国STARE-2望远镜首次探测到来自银河系内的一颗名为SGR 1935+2154磁陀星的毫秒射电爆发(FRB 20200428)^[12,13], 这是人们第一次从磁陀星上探测到如此明亮的射电辐射。FAST对该磁陀星进行了监测^[14]。两篇发现文章和FAST监测结果同时发表在*Nature*杂志。同一时间, 我国科学家利用“慧眼”卫星同样探测到了该磁陀星产生的X射线和FRB 20200428的同时爆发^[15]。经过数据分析, 证实了这两个同时爆发的事件是由同一个爆发过程产生的。这一观测结果发表在*Nature Astronomy*, 意味着国际上首次认证了磁陀星是产生快速射电暴的天体之一。该例银河系中的快速射电暴被评为“2020年十大科学发现”之一。

(2) 快速射电暴重复暴的发现对定位其宿主星系起到了至关重要的作用。快速射电暴定位的难度非常大。Ravi等人^[16]使用多波束探测, 首次将定位区域锁定在了两个波束的重叠部分。Chatterjee等人^[4]结合使用VLA(Very Large Array)阵列和综合孔径技术成像技术, 成功找到了FRB 20121102的宿主星系——一个质量小、金属丰度低的矮星系。但是VLA阵列的视场很小, 且快速射电暴的爆发时间不确定, 如果不是FRB 20121102非常高的爆发率, 使用VLA进行定位的时间成本是难以估量的, 所以这种定位方法无法成为主流。之后, 位于澳大利亚中西部沙漠的SKA探路者阵列(ASKAP)使用相控阵接收机, 同时兼顾视场和空间分辨率, 能够在仅有一次爆发的情况下就定位出一个足够探测宿主星系的空间区域, 使之成功成为快速射电暴定位的利器。ASKAP目前已定

位出10余个快速射电暴。

2 创新性和科学意义

在过去的5年里,随着样本数量的不断增加,快速射电暴的时间尺度从纳秒到毫秒量级,距离从kpc到Gpc量级,快速增加的样本数量除了有助于识别源的类型和不同辐射机制之外,还有助于根据目前搜寻过程中的不足之处推动未来仪器设备和搜寻算法上的改进和突破,以寻求样本质量上的提升,进而实施更有科学研究价值的观测项目。随着观测设备的不断改进和搜寻算法的更新,未来5年的快速射电暴观测样本将有望超过过去半个世纪发现的已知银河系射电脉冲星集合。假设快速射电暴与中子星有关,那么我们可能很快就会发现比银河系中的中子星更多的河外中子星。这个大样本对于种群综合研究和局部环境特性的统计研究都是至关重要的。

科技的创新能力已经成为国家实力最关键的体现,学科解决理论问题,技术解决实际问题。技术的进步推动着科学的进步,科学的论证又离不开技术的支持,科学与技术本就是相辅相成的关系。Dan Werthimer于2015年访问国家天文台时打赌说,“FRB 20121102的定位工作会在FAST成功运行之前完成”。预言最终实现,FAST没能在第一时间见证FRB的发展,但是中国从来没有停止过相关的建设。FAST从提出到运行,历经20余载,终在2020年投入使用,并打破了多项技术瓶颈,利用其超高灵敏度的优势捕捉到了FRB 20121102的活跃

脉冲,59.5 h内1652次的爆发数量打破了之前自这个源347次爆发数量的观测纪录,并催生出了一系列具有创新性的研究成果:(1) 相较之前普遍局部的能量谱图,首次揭示了快速射电暴爆发率存在特征能量(4.8×10^{37} erg)并具有双峰结构,严格限制了单一磁陀星起源等多种模型,揭示了快速射电暴的基础物理机制;(2) 在为期47 d的观测活动中,通过1652次的爆发计算得出的总各向同性的能量为 6.4×10^{46} erg,占磁陀星总能量的约38%;(3) 1652次爆发之间的时间间隔呈现出正则对数分布,这种分布形态也在其他天体物理爆发中出现过,一般对应随机过程。极高的爆发率有利于对重复暴进行统计分析和检查时域上的特征及机制,揭示过去不被观察到的快速射电暴特征,对现有的快速射电暴模型也提出了严格限制。

本轮观测并没有发现其周期性的规律,可能由于随机波束、辐射高度的变化或是传播的延迟效应导致其周期性被掩盖,更可能是由于辐射过程内禀的随机性。

过去虽有遗憾,但未来必定不会错过。相信在不久的将来,中国天文学家将凭借FAST做出更多世界一流的科学成果。这也是各国之间科技水平的较量,FAST以后来居上的姿态追赶着前方数不尽的赛道。未来,我们还将拥有FAST阵列,更多、更高精度的观测数据以及更先进、智能的算法必将推动快速射电暴领域的高速发展。除了快速射电暴,宇宙中还存在着各种各样未知的现象等待着人们去窥视。技术的进步决定了人类认知的边界。

推荐阅读文献

- 1 Lorimer D R, Bailes M, McLaughlin M A, et al. A bright millisecond radio burst of extragalactic origin. *Science*, 2007, 318: 777–780
- 2 Thornton D, Stappers B, Bailes M, et al. A population of fast radio bursts at cosmological distances. *Science*, 2013, 341: 53–56
- 3 Spitler L G, Scholz P, Hessels J W T, et al. A repeating fast radio burst. *Nature*, 2016, 531: 202–205
- 4 Chatterjee S, Law C J, Wharton R S, et al. A direct localization of a fast radio burst and its host. *Nature*, 2017, 541: 58–61
- 5 Tendulkar S P, Bassa C G, Cordes J M, et al. The host galaxy and redshift of the repeating fast radio burst FRB 121102. *Astrophys J*, 2017, 834: L7
- 6 Li D, Wang P, Zhu W W, et al. A bimodal burst energy distribution of a repeating fast radio burst source. *Nature*, 2021, 598: 267–271
- 7 Amiri M, Andersen B C, Bandura K M, et al. Periodic activity from a fast radio burst source. *Nature*, 2020, 582: 351–355
- 8 Rajwade K M, Mickaliger M B, Stappers B W, et al. Possible periodic activity in the repeating FRB 121102. *Mon Not Roy Astron Soc*, 2020, 495: 3551–3558
- 9 Petroff E, Hessels J W T, Lorimer D R. Fast radio bursts at the dawn of the 2020s. 2021, arXiv: 2107.10113
- 10 Nicholl M, Williams P K G, Berger E, et al. Empirical constraints on the origin of fast radio bursts: Volumetric rates and host galaxy demographics as a test of millisecond magnetar connection. *Astrophys J*, 2017, 843: 84
- 11 Margalit B, Metzger B D. A concordance picture of FRB 121102 as a flaring magnetar embedded in a magnetized ion–electron wind nebula. *Astrophys J*, 2018, 868: L4
- 12 Bochenek C D, Ravi V, Belov K V, et al. A fast radio burst associated with a Galactic magnetar. *Nature*, 2020, 587: 59–62
- 13 Andersen B C, Bandura K M, Bhardwaj M, et al. A bright millisecond-duration radio burst from a Galactic magnetar. *Nature*, 2020, 587: 54–58
- 14 Lin L, Zhang C F, Wang P, et al. No pulsed radio emission during a bursting phase of a Galactic magnetar. *Nature*, 2020, 587: 63–65
- 15 Li C K, Lin L, Xiong S L, et al. HXMT identification of a non-thermal X-ray burst from SGR J1935+2154 and with FRB 200428. *Nat Astron*, 2021, 5: 378–384
- 16 Ravi V, Shannon R M, Bailes M, et al. The magnetic field and turbulence of the cosmic web measured using a brilliant fast radio burst. *Science*, 2016, 354: 1249–1252

Summary for “快速射电暴脉冲研究进入高统计性时代”

FAST helps push the study of fast radio bursts into statistical regimes

Jiaying Xu¹ & Di Li^{2*}

¹ Zhejiang Lab, Hangzhou 311100, China;

² National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

* Corresponding author, E-mail: dili@nao.cas.cn

The 2007 discovery of fast radio bursts (FRBs), bright and millisecond-duration astronomical radio pulses, presented to the astronomical community a tantalizing opportunity into the transient Universe. Understanding the origins, mechanisms and applications of FRBs is currently one of the most rapidly evolving sub-fields of astrophysics. Most FRBs originate from far outside the Milky Way and are many orders of magnitude more luminous than other known bursting radio sources, particularly pulsars (neutron stars).

The total FRB population now stands at approximately 600 published sources, 24 repeaters, and 19 with localized host galaxies. Most FRBs appear to be one-off, only about four percent of the FRBs are now known to repeat. While the volume of observations grows at a breakneck pace, the overarching question of the field remains: “Where do FRBs come from?” Interestingly, FRBs can be hosted in a variety of galaxy types and environments. FRB 20121102 was successfully located in a low-mass and low-metallicity dwarf galaxy, coincident with a persistent radio source. VLBI observations have demonstrated that this source is compact. With the Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope (FAST), FRB 20121102 has been extensively observed, resulting in the discovery of 1652 independent bursts with a peak burst rate of 122 per hour and over three orders of magnitude variation in energy. For the first time, the burst energy distribution can be fully recovered and is found to be bimodal, suggesting that there may be more than one emission mechanisms or emission sites or beam shapes. In contrast to the single power-law energy distribution commonly found for FRBs, a characteristic peak in the burst rate energy distribution is found at 4.8×10^{37} erg. The estimated total isotropic energy, 6.4×10^{46} erg, released during the 47-day observational campaign, corresponds to approximately 38% of the available magnetar spin energy. Despite the high burst rate, no periodicity has been found.

Higher time-resolution data, sustained monitoring, and better localization from the last 2–3 years have provided a wealth of information and significant discoveries regarding the origin of FRBs. A supremely bright FRB-like burst (FRB 20200428) has been detected from a Galactic magnetar SGR 1935+2154 by STARE2 and CHIME/FRB. It provides strong evidence linking magnetars to sources of FRBs. The explosively growing number of FRBs and studies of individual FRBs start to reveal the source and radiation mechanisms of FRBs. Significant breakthroughs rely on the emergence of new observational facilities as well as a growing breadth of expertise joining the field. With ever-growing capabilities of observing facilities and processing power, the FRB sample in the next 5 years will supersede that of radio pulsars from the past half century. We are witnessing the unveiling of a dynamic Universe.

fast radio bursts, FAST, FRB 20121102, magnetar

doi: [10.1360/TB-2022-0346](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0346)