

中性子星の磁気圏活動から 迫る Fast Radio Burst



榎戸



木坂



寺澤

榎戸輝揚¹・木坂将大²・寺澤敏夫³

〈¹ 理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

〈² 広島大学 〒739-8526 広島県東広島市鏡山 1-3-1〉

〈³ 東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: 1 teruaki.enoto@a.riken.jp, 2 kisaka@hiroshima-u.ac.jp, 3 terasawa@icrr.u-tokyo.ac.jp

Fast radio burst (FRB) は、宇宙論的な距離からも届く明るい電波バーストである。FRBの正体は解明されていないものの、繰り返しバーストを頻発するリピーターの発見や、いくつかのFRBで母銀河が同定されるなど、急速に研究が進んでいる。FRBの継続時間がミリ秒以下と短い点や、銀河系内のマグネターからX線のバーストに付随してFRBが見つまっている点などから、中性子星の磁気圏に由来する現象が有力な候補と考えられている。本稿ではFRBの観測史を概説し、中性子星の磁気圏現象とFRBを比較するため、かにパルサーの巨大電波パルスや、突発増光するマグネターからの電波バーストなどの研究成果を報告する。最後に、日本の電波望遠鏡を使ったFRBの初検出も紹介する。リピーター FRB 20201124A からの明るいバーストを2022年2月に捉えることができた。

1. 謎の電波バースト Fast Radio Burst

1.1 FRB観測の進展

パルサー天文学を牽引してきたオーストラリアのパークス電波望遠鏡は、2001年8月24日にマゼラン雲周辺を観測し、アーカイブデータに残っていた。このデータには、小マゼラン雲から3°ほど離れた方角から到来した、30 Jyを超える明るい電波バーストが記録されていた(図1(上))。この謎めいたバーストは、パルサーの突発的な放射を調べる研究で見つかり、2007年に報告した発

見者にちなんで後にロリマー・バースト (Lorimer Burst) と呼ばれている [1]。次に述べるように電波の周波数によるバーストの到来時刻の差から、銀河系内やマゼラン雲が起源とは解釈できず、さらに遠方から到来したと考えられた。ロリマー・バーストは単発の現象で、次なる展開まで、しばらくの時を要した*1。6年後の2013年、類似した4例もパークスで報告され [4]、これらの電波バーストはFast Radio Burst (FRB, 高速電波バーストなどの邦訳) と呼ばれるようになる*2。FRBの正体はわかっておらず、その発生源まで

*1 なお、2013年までにも、1イベントの検出 [2] と後述する人工ノイズの存在の報告 [3] といった進展があった。

*2 FRBの発見に先立って、日本の那須望遠鏡も含め [5]、電波帯域の突発天体の検出や探索は行われていた。たとえば、M87の方向からの電波バースト [6]、銀河面他の電波パルス探索 [7, 8]、RRATs (詳細は本文) の発見 [9] などが挙げられる。

の距離は一般にはよくわからない。しかし電波帯域では、波長ごとの到来時間差からある程度の距離の推定が可能である。図1（上）のように、宇宙空間を伝搬する電波の信号は、自由電子の影響を受けて低周波数ほど遅く到来する（群遅延効果）。この時間遅れ δt は、信号が伝搬してきた空間に含まれる自由電子の総量に比例する。そこで、電子密度 n_e （平均密度 \bar{n}_e ）を発生源までの距離 D で積算した分散量度（Dispersion Measure, 以後DM）を

$$DM = \int_0^D n_e dl \sim \bar{n}_e D \text{ (pc cm}^{-3}\text{)} \quad (1)$$

と定義すると、周波数 ν における信号の到来時刻の遅延 δt は、電子の電荷 e 、質量 m_e 、光速 c として、

$$\begin{aligned} \delta t &= \frac{e^2}{2\pi m_e c^2} \frac{DM}{\nu^2} \\ &= 4.14 \text{ ms} \left(\frac{DM}{\text{pc cm}^{-3}} \right) \left(\frac{\nu}{1 \text{ GHz}} \right)^{-2} \end{aligned} \quad (2)$$

と表せる。つまり、遅延から求まる分散量度DMは発生源までの距離の指標となる。DMには天の川銀河と発生源周辺の寄与が含まれており、銀河系内の寄与は銀緯を b ($^\circ$) とすると $DM \sin |b| \lesssim 45 \text{ (pc cm}^{-3}\text{)}$ と知られている。見つかっているFRBは高銀緯であるにもかかわらず $\sim 100\text{--}3000 \text{ (pc cm}^{-3}\text{)}$ と大きなDM値を示し、銀河系外の宇宙論的な距離から届いた現象であることを強く示唆していた。たとえば、銀河間物質の寄与で $DM = 1000 \text{ pc cm}^{-3}$ は、赤方偏移 $z \sim 1$ で光度距離 $\sim 10 \text{ Gpc}$ ほどに対応する [12, 13]。

特に大切なのは、パークス電波望遠鏡の狭い視野（全天に対して $\sim 10^{-5}$ ）を考えると、発生頻度は全天で1日あたり $\sim 10^3$ 回ほどにもなり、宇宙の各所で発生している高頻度な現象と考えられる。しかし、ペリトン（Peryton）と呼ばれていた、FRBに類似した地球の自然現象ないし人工ノイズの混入が依然として問題と認識されてい

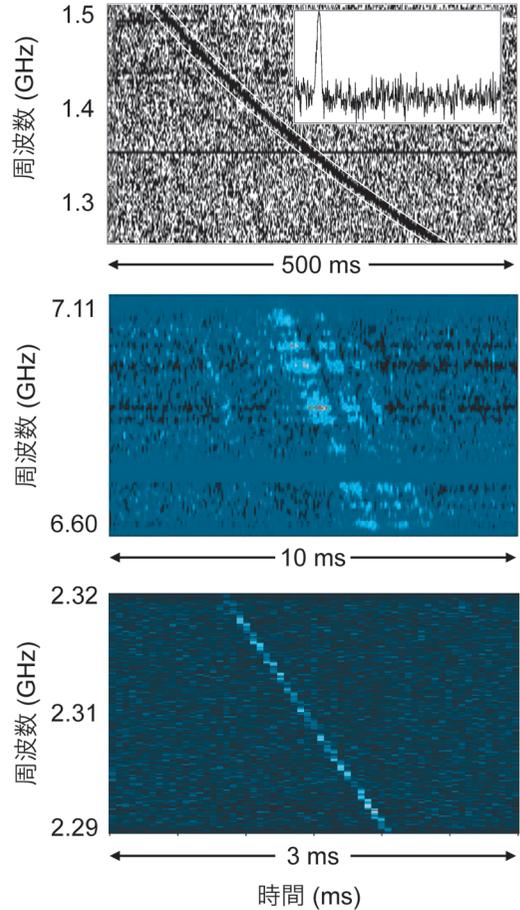


図1. 本稿で登場する3つの電波バーストの比較。ダイナミックスペクトルと呼ばれる波長ごとの電波強度の時間変化。群遅延効果は補正されていない。(上) パークス電波望遠鏡で観測された最初のFRB「ロリマー・バースト」[1]。(中) マグネターXTE J1810-197のアウトバースト時に日立の電波望遠鏡で観測された電波バースト ([10] のデータをもとに作成)。(下) 白田の電波望遠鏡で観測された、かにパルサーの巨大電波パルス [11]。

た。2015年になると、パークス電波望遠鏡のランタイムに多発するノイズは、周辺施設において電子レンジを加熱中に急にドアを開けられた場合に発生することが特定され [14]、ノイズを除去しても残る本当の宇宙由来のバーストがあることも明確になった。

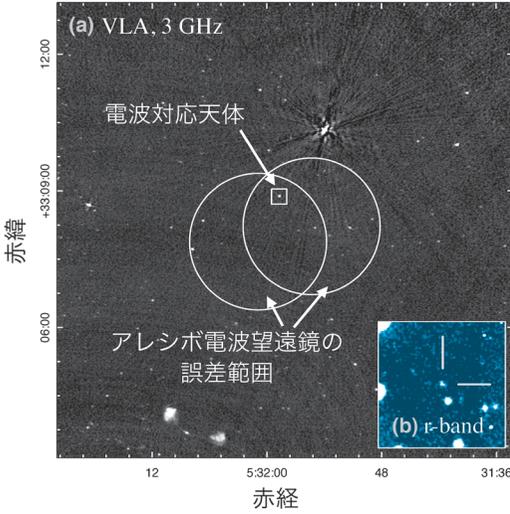


図2. バーストを繰り返すFRB 121102の母銀河を特定した電波（VLA）と可視光のイメージ [16].

次の大きな進展は、高感度のアレシボ電波望遠鏡による繰り返しバーストするリピーターFRB 121102の発見である [15]。パークス電波望遠鏡の単一鏡ではバーストの発生方向は分角ほどの精度でしか決まらず、母銀河を特定することは難しかった。リピーターであれば電波干渉計により分角以下での位置決定が可能になる。6ヵ月に及ぶ83時間のVery Large Array (VLA)による観測から0.1"の精度で位置が決まり、赤方偏移 $z=0.193$ の星形成中の矮小銀河が母銀河と特定された [16] (図2)。さらに母銀河の中心核から少し離れた位置にある、電波光度 $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ のコンパクト ($\leq 0.7 \text{ pc}$) な定常電波源が対応することも突き止められた [17]。その頃には、FRBの母銀河を特定する多くのグループの努力により、数年のうちにリピーターに限らず単発のFRBについても、FRB 180924 [18], FRB 190523 [19]などで母銀河が特定された。

さらに最近は、Australian Square Kilometre Array Pathfinder (ASKAP), a major upgrade of Molonglo Observatory Synthesis Telescope (UTMOST), Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment (CHIME) など複数の広視野の電波観測が始動して結果を出し始め、FRBの発見数も急増して統計的な研究が始まっている。なかでもカナダ西部に設置されたCHIME望遠鏡は、FRBの発見数を大幅に増やし、その中に複数のリピーターFRBを発見して最先端の成果を上げ続けている*3 [20]。特に、図3のように、数メガパーセクというごく近傍で見つかったFRBは今後の鍵になるだろう。本稿の後半で議論する。

1.2 FRB正体の候補とは？

さて、これまで明らかになったFRBの特徴は以下の通りである [21]。

- 1) 電波帯域で観測される ($0.1\text{--}10 \text{ GHz}$; e.g., 1 GHz で $F=0.1\text{--}500 \text{ Jy}$).
- 2) 輝度温度が高く ($T_b=10^{33\text{--}40} \text{ K}$), 宇宙で一番明るいコヒーレント放射である。
- 3) 大きな分散量度が測定されており ($DM\sim 80\text{--}3000 \text{ pc cm}^{-3}$), 宇宙論的距離 ($z\geq 1$, $\geq 10 \text{ Gpc}$) からも届いている。
- 4) 遅延補正後の継続時間が短く ($\Delta t < 1 \text{ ms}$), 発生源はコンパクト ($R=c\Delta t \lesssim 300 \text{ km}$).
- 5) フルーエンス ($F\Delta t=0.1\text{--}100 \text{ Jy ms}$) から、放出エネルギーが大きい ($E\sim 4\times 10^{39} (d/1 \text{ Gpc})^2 \text{ erg}$).
- 6) 発生レートが高く、超新星爆発の $\sim 10\%$, ガンマ線バーストの1万倍ほど ($R_{\text{FRB}}\sim 10^4 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$).
- 7) リピーターFRBも20天体以上見つかっている (e.g., FRB 121102).
- 8) 母銀河が特定された例が10イベントを超える。

*3 筆者のひとり(榎戸)は、CHIME電波望遠鏡の初期運用時に、CHIME/FRBプロジェクトを率いているマギール大学のヴィッキー・カスピ先生のもとに長期滞在していた。カスピ先生は講演会の中で「CHIMEは宇宙科学のバーゲンセール」とおっしゃっていた。実際、CHIMEはプロジェクト規模に比して驚くほど多くの科学的知見を報告している。コストパフォーマンスの観点でも、チーム運営の観点でも見習うことが本当に多いプロジェクトだ。

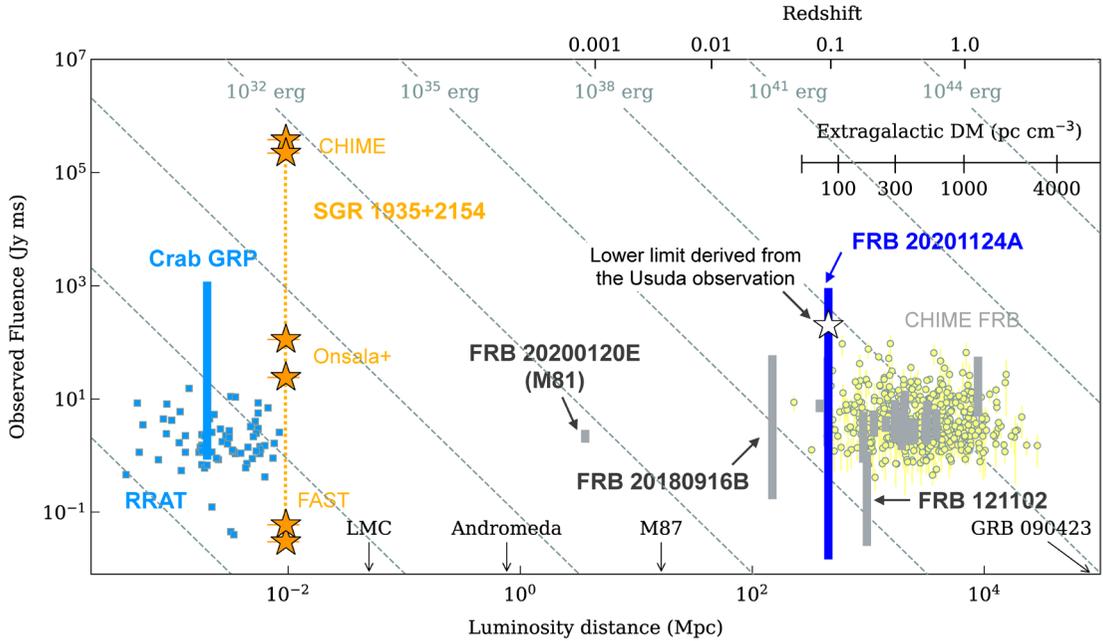


図3. FRBと関連する電波バースト現象の観測されたフルエンスと発生源までの距離。RRAT (青の四角, RRAT catalog), かにパルサーの巨大電波パルス (Crab GRPと書かれた青の帯), 銀河系内のマグネター SGR 1935+2154 (星), リピーター FRB (FRB名の書かれた灰色か青色の帯) [25], リピーターを確認できていないFRB (100 Mpc以遠の丸) を示した。距離は光度距離で示している。下の軸には、大マゼラン雲 (LMC), アンドロメダ銀河 (Andromeda), ブラックホールの直接撮像で有名な M87, 遠方のガンマ線バースト GRB 090423 までの距離を参考までに矢印で追加した。上の軸には、赤方偏移と銀河間空間の分散量 (Extragalactic DM) の目安を追加している [12, 13]。斜めの点線は発生源でのバーストの放射エネルギーの見積もり。

上記の特徴を説明するため、数多くの理論モデルが提出されてきた*4。単発しか検出されていない天体とリピーターに対しては起源が異なる可能性も議論されているものの、共通点として継続時間が短いことからコンパクトな放射領域かつエネルギー密度が高く、また発生頻度も高いことなどにより、比較的ありふれた存在である中性子星やブラックホールといった高密度星が、有力な起源の候補である。実際、中性子星は高い輝度温度のコヒーレントな電波放射を起こすことが広く知られている。これらは周期的なパルス放射として観測される場合が多いものの、銀河系内で単発の明るい電波パルスを起こす Rotating radio transients (RRATs) と呼ばれるパルサー、周期的な通常の

電波パルスよりも数桁以上も明るいバーストを散発的に放出する巨大電波パルス (Giant Radio Pulse, 以後 GRP と表記), 一部のマグネターの活動期にみられる強度変動の激しい電波パルスなど、FRBに近い特徴を持つものもある。たとえば、図4のような、電波突発天体の分類図の上で、FRBの近くには中性子星に関わる現象が多く分布する。これらの類似した電波バーストの発生強度分布はベキ関数で記述でき、リピーター FRB が示す分布との類似性が指摘されている (図5)。

このような電波バーストの放出エネルギーは、観測されている銀河系内の中性子星ではFRBに及ばないものの、たとえば銀河系内では見つからないが、系外で誕生もない (≤ 100 年) 中

*4 FRBの理論モデルの一覧はFRB wiki (url: <https://frbtheorycat.org/index.php>) に整理されている [22].

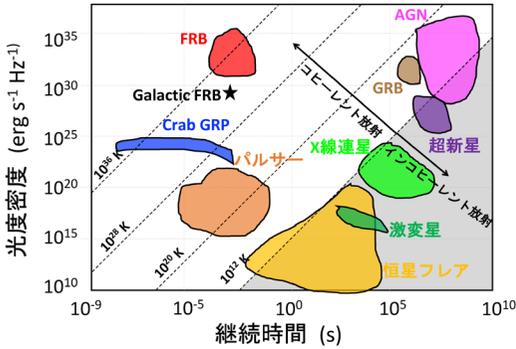


図4. さまざまな電波突発天体の光度密度と継続時間。図中の温度の値は輝度温度を表す [26]。輝度温度 10^{12} K より低い領域はインコヒーレント放射と考えられる領域を表す。

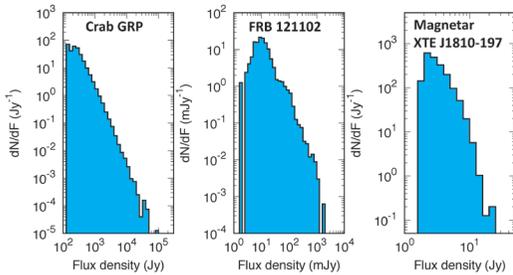


図5. 巨大電波パルス (GRP), FRB, マグネターの電波バースト (MRB) のフラックス強度分布 (logN-logS)。GRP はかにパルサー [11], FRB は FRB 121102 [27], マグネターの電波バーストは XTE J1810-197 [10] のデータを採用。

中性子星で、回転速度が非常に速い、あるいは磁場が非常に強い天体が引き起こす GRP やマグネターのバースト現象であれば、FRB として観測される可能性がある [23, 24]。

そこで私たちは、中性子星に関わる現象のうち「マグネターの巨大フレアやショートバーストのような磁気エネルギー解放」と「回転駆動型パルサーの GRP による回転エネルギーの解放」という 2 つの現象のいずれか (もしくは両方) が FRB

ではないか、という作業仮説で研究を進めた。特に、銀河系内での中性子星からの明るい電波パルス放射を詳細に調べることが、FRB の解明への重要なアプローチとなる。次節ではまず、GRP やマグネターの電波バーストの観測とそこから得られる FRB への示唆について考える。

2. かにパルサーの巨大電波パルス

GRP は FRB に類似した中性子星からの電波バーストである。その代表的な例は、地球から 2 kpc の距離にある有名な「かにパルサー」で常に発生している。それどころか、この GRP によってかにパルサーが発見されている [28]。ここでは、しばし脱線して、日本の天文学史におけるかにパルサー観測を振り返ってから、FRB を意識した最新のかにパルサーの話題を紹介する。

2.1 かにパルサーと日本の天文学

1054 年の超新星爆発の記録は藤原定家の明月記まで遡り、近代科学の観測としてかにパルサーが 1968 年に発見されて以降は、電波からガンマ線にわたるほぼ全波長で、かにパルサーとかに星雲の観測が行われてきた。かに星雲と分離してかにパルサーを検出した日本の初観測は 1975 年 1 月に X 線で行われた [29]。この観測はパルサーそのものではなく、月による掩蔽を用いてかに星雲の X 線でのサイズを測定することが目的であったが、そのためにはパルサーも観測してパルス成分を分離することが必要であった。その後、すだれコリメータを用いた気球観測や [30]、はくちょう、ぎんが衛星などで X 線観測が続いてきた [31]。

一方、意外なことに、日本の天文学者による電波パルスの検出はこれより遅れ、2009 年 2 月 20 日の東北大グループによる 300 MHz 帯観測が最初である [32]。電波帯域でのかにパルサーは、かに星

*5 300 MHz から数 GHz 帯の電波では、パルス成分と星雲成分の強度比は 10^{-3} – 10^{-4} と、パルスは星雲よりずっと暗い。一方、X 線帯ではこの比は 10^{-1} 程度であり、パルスは相対的に明るい。そのため、X 線では短時間の時間積分 (観測装置にもよるが NICER なら秒程度) でパルス成分が星雲成分の背景から浮かび上がってくるのに対し、電波では十数分以上の積分が必要となる。

雲の強力なバックグラウンドに隠されており^{*5}、パルサー成分を分離することが技術的に困難であるのが日本での観測が遅れた理由の一つと考えられる。東北大で観測が行われたころ、JAXA宇宙科学研究所・NICT・東大宇宙線研究所を中心として、かにパルサーの電波とX線の同時観測の準備が始まっていた。詳しくは次のサブセクションで述べるが、1990年代から、「かにパルサーのGRPと他波長のパルスが相関を持つか」に興味を持たれており、2010年段階では（そしてその後2021年まで）未解決の問題であった。そこで、遅れて観測を始める日本としては格好のニッチ課題であったわけである。当時、日本のX線天文衛星「すざく」が稼働中であり、年に1-2回程度、かに星雲・かにパルサーを用いた較正観測が行われていた。

その較正観測スケジュールに合わせてJAXA白田、NICT鹿島の電波望遠鏡による同時観測が3回行われた。しかし、それだけでは統計が足りず、相関上限を付けたただけであった [33]。ところで、それまでかにパルサーは世界的に多周波数で観測されていたとはいえ、それぞれの観測日が異なり、真の同時観測はほとんど行われていなかった。それに注目した三上諒氏（当時大学院生）は、東北大、茨城大日立、NICT鹿島、JAXA白田など数か所の観測所の協力により、2014年9月6日に300 MHz帯から8 GHz帯に及ぶ多波長同時観測を行った [34]。これが、日本発の出版論文としては最初のかにパルサーの電波観測の結果である。その後、2016年に打ち上げられた「ひとみ」衛星でも、X線の絶対時刻付けの検証目的と合わせてかにパルサーが観測され、GRPに同期したX線超過の上限値が得られた [35]^{*6}。

2.2 電波とX線の同時観測

FRBが実際に宇宙論的な距離で発生する自然

現象と明らかになると、その起源や放射プロセスを巡り世界中で熾烈な観測の競争が始まった。現象的に類似性の強い、かにパルサーのGRPについてもFRBの解明の観点から新しい光が当たるようになった。筆者らは、電波とX線の多波長観測と、GRPとFRBの関係性に着目して、FRB研究に切り込むことを考えた。

長らく、GRPでの増光現象は電波でしか発生しないと考えられてきた。しかし2003年、GRPに同期して可視光パルスも数%だけ明るくなる現象が高速度カメラで発見された [37]。電波での10倍以上の増光に対し、可視光ではわずか数%だけの増光という非対称性は不思議である。電波はコヒーレント機構、可視光はインコヒーレント機構と輻射機構が異なると考えられており、その差が原因かもしれない。もしそうなら、可視光同様にインコヒーレント機構によると考えられているX線やガンマ線ではどうなるだろう？そのような関心から、過去20年間の間に、衛星や地上望遠鏡を使い、複数のグループが探査プロジェクトを実施したが、X線やガンマ線では増光は確認できず、上限値が得られるだけであった [38-42]。

GRPに同期したX線やガンマ線の増光の探査で難しい点は、これまでの望遠鏡では十分な統計量の光子を集められないことだった。2017年に国際宇宙ステーションに設置されたX線望遠鏡 Neutron star Interior Composition Explorer (NICER) は、中性子星の表面からの放射に最適化して1.5 keV付近でかつてないX線集光能力を誇り、高い時間分解能と、明るい天体でも検出器が飽和しないという、GRPの探索には有利な性能を持ち合わせていた。

筆者らは、NICERと白田64 m電波望遠鏡（2 GHz）と茨城32 m電波望遠鏡（6, 8 GHz）を中心にした日本の電波観測メンバーと連携して国際共同研究グループを組み、2017年から2年ほどの

^{*6} なお、かにパルサーの視線方向は毎年6月中旬に太陽近傍（太陽半径の5倍程度）を通過する。このことを用いて、GRPを用いた太陽コロナの電子密度の観測が名古屋大学で行われている [36]。

かにパルサーを見るNICERと臼田・鹿島さん
NICER, Usuda, and Kashima are watching the Crab Pulsar



図6. NICERと鹿島・臼田の電波望遠鏡による、かにパルサー観測を漫画表現 (credit ひっぐすたん)

間に合計15回に上るX線と電波の同時観測を実施した(図6)。その結果、これまで最大のX線-電波の同時・多波長データを蓄積し、慎重な解析の結果、GRPに同期してX線でも $3.8 \pm 0.7\%$ (5.4σ の有意性)で増光することを世界で初めてつきとめた(図7) [11]。X線の増光は約4%という小さく感じられるが、パルサーのX線のフラックスは電波よりも 10^7 倍も大きいため、GRPの発生時に放出されるエネルギーはこれまで知られていたよりも10-100倍も大きいことになる(図8)。この事実は、かにパルサーのような若い中

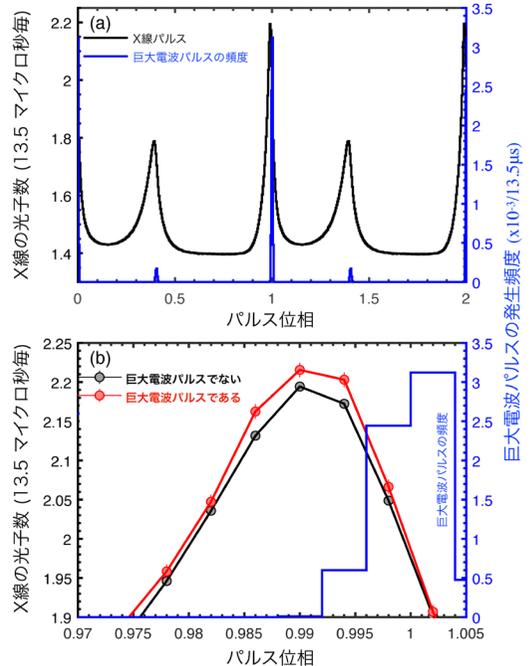


図7. (a) X線望遠鏡NICERが観測した、かにパルサーのX線パルス波形(黒の曲線)と同時観測で検出した巨大電波パルス(GRP)の発生頻度(青の曲線)を2周期分で示した。1周期の中で、パルスにはメインパルス(パルス位相が0付近)と、インターパルス(パルス位相が0.4付近)の2つがある [11]。 (b) 上図のメインパルス付近の拡大図。黒線は通常時のX線波形で、赤線はGRPが起きたときのパルス。GRPに同期してX線も3.8%増光していることが検出できた。

性子星のGRPがFRBであり、そのエネルギー源は回転エネルギーであるという説を難しくする。というのは、もしそうだとすると、これまで考慮されていなかったX線がエネルギーの大部分を持ち逃げしてしまうため、FRBの起源と想定したパルサーの回転エネルギーは急速に減少して、数年以内にFRBの活動性が弱まってしまふ [43]。しかし実際には、リピーターとして振る舞うFRB 121102などは数年以上にわたって継続した活動性を見せており、回転エネルギーを起源とする説は分が悪い。

本章の最後に、GRPの放射機構について触れ

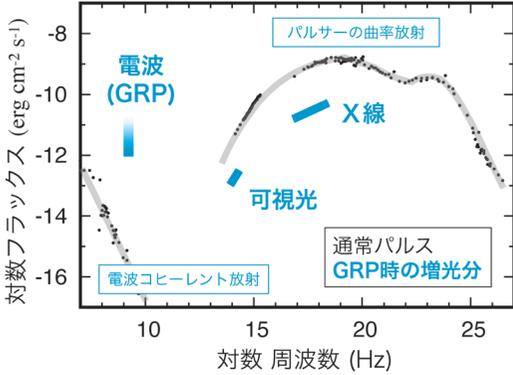


図8. かにパルサーの定常パルスの多波長スペクトル (黒) と巨大電波パルスの増光分の比較 (青) [11].

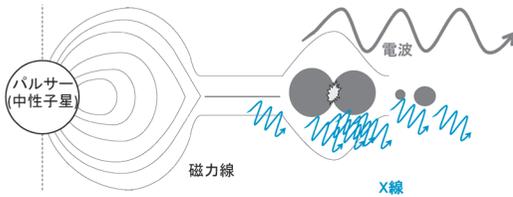


図9. GRPとX線増光モデルの1つ。中性子星から離れたところで磁気再結合によりプラズマの塊が形成される。この塊の合体時にできる電磁波がGRPとして見え、塊からX線が放射される。

ておきたい。電波とX線の相関に対する最も単純な解釈の1つは、電波とX線を放射する粒子の数が通常より増加することである。ただしX線の増光率は4%程であるから、X線の増光領域は通常の放射領域のごく一部である必要がある。ほかに電流シートでのプラズマの塊の衝突モデル (図9) [44], 増光した電波を電子-陽電子がサイクロトロン共鳴吸収してX線を放射するモデル [45] などをもとにしたアイデアが議論され始めている。

3. マグネターのアウトバースト

GRPでの回転エネルギーの放出がFRBという解釈は、そのままだと難しいことがわかった。では、マグネターの磁気エネルギー解放はどうだろうか? マグネターは定常的にX線で輝いている天体の他に、突発的に定常放射が明るくなり、

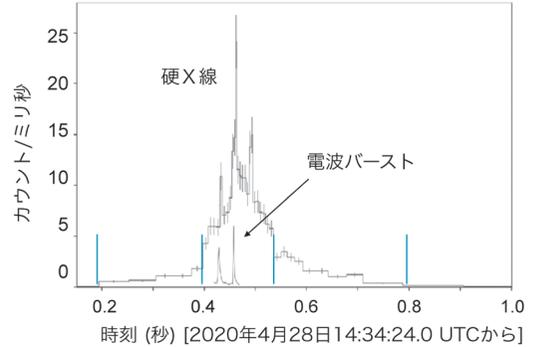


図10. SGR 1935+2154からINTEGRAL衛星が検出したX線バースト (黒の折れ線) とCHIMEが検出した電波バースト (2つのカーブ) [49]. 縦の青線は引用論文での解析に用いた時刻を示すもので、本記事では直接には関係ない。

ショートバーストを連射するトランジェント型のマグネターが、銀河系内とマゼラン雲に知られている。その観測的特徴はレビュー論文 (たとえば [46, 47], 日本語で [48] など) を参照されたい。FRBをマグネターと考える場合の難点は、銀河系内のマグネターの大部分は電波で検出できず、マグネター特有のショートバーストに同期した電波バーストも観測されていなかったことである。

これに新たな観測結果が2020年4月27日18時26分20秒 (世界時) に加わった。この瞬間、銀河系内のありふれたマグネター SGR 1935+2154 から、マグネター特有の数ミリ秒の継続時間のショートバーストがX線・ガンマ線衛星で検出され [49-52], それと同時に地上の複数の電波望遠鏡では電波バーストも検出された (図10) [26, 53]. これは銀河系外のFRBに比べて弱いバーストだが、距離が近いために検出できたと考えられる (図3). X線バーストとして観測される磁気リコネクションがトリガーとなって、電波のバーストがFRBとして観測されている可能性があり、FRBのマグネター説の有力な証拠のひとつとなった。しかし、X線のバーストでの放出エネルギーは電波よりも 10^5 倍も大きかったので、このまま通常のFRBの明るさまで 10^5 のエネルギー比であ

るとすると、FRBの起源は、これまで観測された最大級のマグネターバーストを1日に何度も起こすような、我々の知るマグネターとは異なる天体となる [54]. まだ情報も少ないこともあり、SGR 1935+2154は世界中のX線、電波望遠鏡によって精力的に観測が続けられている [55].

このようにマグネターのX線・ガンマ線と、電波の同時観測は、今後さらに大切になっていくだろう。マグネターの磁気活動にはFRBに類似するものが多いが、電波パルスを出す天体は数天体に限られる (radio-loud magnetar と呼ばれる). 筆者らのチーム (Eie, 寺澤ほか) では、電波パルスを出すトランジェント型のマグネター XTE J1810-197が10年の静穏期のあと、2018年12月に突発的に再増光した際に、7ヵ月に及ぶ多波長の電波観測を実施した [10]. たとえば、図5はFRB, GRP, およびマグネターからの電波バーストの発生強度分布 (いわゆる $\log N - \log S$) を比較したもので、おおむね冪関数に従う分布をもつ。これらの比較は今後の考察の鍵のひとつとなるだろう。

もうひとつの鍵は、近傍で見つかるFRBと、その母銀河の集中的な多波長観測だろう。たとえば、図3にも描かれている近傍銀河 M81 (3.6 Mpc) で発見されたりピーター FRB 20200120E [56-58] は、国内の電波望遠鏡で検出可能なほどに明るいため (2 GHzで >10 Jy), 白田64 m電波望遠鏡などを用いて日本でも観測ができる。また、突発的なマグネターのアウトバーストは、X線では世界中の天文衛星で精力的に観測されているが、日本の電波望遠鏡も活躍できるかもしれない。たとえば、マグネターの場合には、低周波数を飯館惑星電波望遠鏡 (0.3 GHz), 高周波数を茨城32 m望遠鏡 (高萩・日立, 6, 8 GHz) でカバーする。FRB 121102の発生頻度分布で低エネルギー側でみられる、べき分布からのずれ (図5) が、かにパルサーでも見られるのかなども興味深い。

4. 中性子星の磁気圏活動

FRBの正体を中性子星の磁気圏での現象に着目して検討してきた。特に、「回転駆動型パルサーのGRP」と「マグネターの磁気エネルギー解放でのバースト」という2つの銀河系内の例を見てきた。少なくとも、マグネター SGR 1935+2154の例を観る限り、強磁場の中性子星が関係する現象が含まれているのは間違いなさそうである。しかし、FRBは単一種族であるのか、複数の現象が混在しているのかもまだよくわかっておらず、今後の観測の進展を注視していきたい。

さて、紹介したいいずれのケースでも、中性子星の磁気圏では、回転または磁場のエネルギーを効率よく変換してプラズマや電磁波のエネルギーとして放出する。そもそも、このエネルギー変換がどこでどのように起こるかは、パルサーとして中性子星が発見されて以来の謎として残されている。

最近の10年で、磁気圏でのプラズマの加速や生成を扱えるプラズマ粒子シミュレーションの研究が発展し、エネルギー変換についての理解も大きく進展した。しかし、特に回転駆動型に対しては、粒子が生成する過程に対して計算コストの問題から非常に簡略化したモデルを採用しており、このモデルの扱いが結果に大きく影響する。

中性子星の磁気圏で発生する強い電場は、粒子を高エネルギーまで加速し、その結果、ガンマ線が放射される。このガンマ線と、強磁場やX線との反応の結果、雪崩的な粒子生成 (電磁カスケード) が起こる。この電磁カスケードの結果は磁気圏内のプラズマのエネルギー分布に反映する。この過程を直接に検証することは難しい。しかし、このプラズマの運動論的效果は、パルサーのコヒーレント電波放射に決定的な役割を果たすと考えられており、放射機構の解明とプラズマの分布関数は密接に関わっている。普通のパルサーの電波放射の効率は低いため、現在の観測から得られる制限はあまり強くなく、放射機構も未解明のま

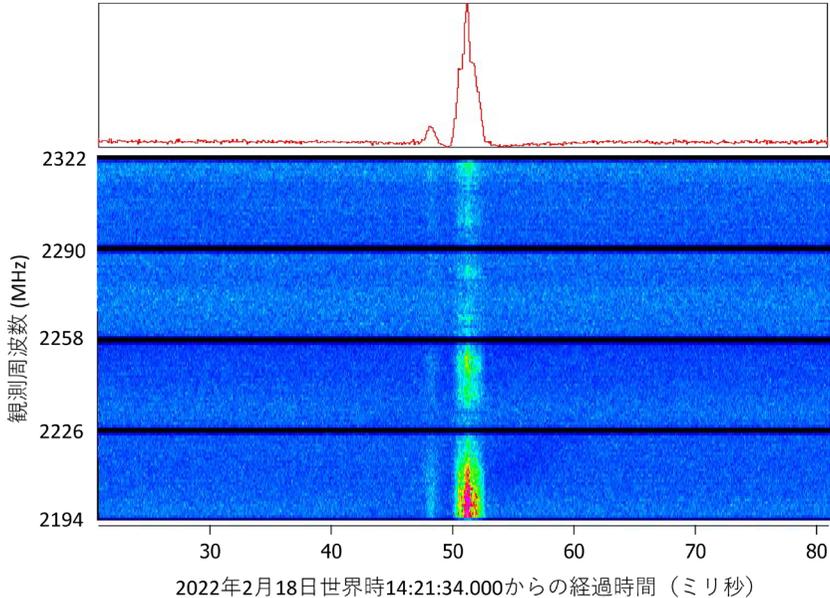


図11. 日本の電波望遠鏡で初検出のFRB 20201124Aのライトカーブとダイナミックスペクトル（群遅延補正後） [66].

ま残されている。一方で、FRBの明るさを説明するには、高い放射効率が要求される。したがって、FRBが実現しうる環境の考察から、パルサーの放射やエネルギー変換機構にも厳しい制限を与えることができる。また、電波の放射効率が高ければ、かにパルサーのGRPのように、コヒーレント電波放射に同期した可視光やX線などの高エネルギー放射も期待でき、多波長観測が重要となる。このように、FRBを解明することは、パルサー磁気圏での長年の課題の解明にも大きく寄与するだろう。

5. 日本の電波望遠鏡でFRB初検出

本稿の最後に、日本の電波望遠鏡によるFRBの初検出を紹介したい。比較的近傍（赤方偏移 $z=0.098$, 光度距離453 Mpc [59, 60]) のリピーターFRB 20201124Aは、2021年3月から4月に非常に高い活動性を示し [61, 62], 2022年1-3月にもFRBが報告された [63-65]. これを受けて、臼田の64 m電波アンテナにより、2022年2月18日の7時11分から15時14分（世界時）の8時間、中

心周波数2258 MHz、全帯域128 MHzでの観測を行った。その結果、14時21分34秒ごろに200 Jy msを超える明るいバーストの検出に成功した（図11） [66]. 検出されたイベントはこのリピーターに対して過去最大級の明るさであり（図3）、本稿で紹介した、かにパルサーの最大級のGRPに匹敵していた [11]. さらに検出された周波数2.2-2.3 GHzもこれまでで最も高い周波数であるなどの重要性を持つ。現在、国立天文台の電波天文学の大学院生を中心に精力的な解析が進んでいる。このFRBの検出を皮切りに、日本でも観測的研究が進展することを期待したい。

謝辞

図1, 図5の作成では、Sujin Eie氏にXTE J1810-197のデータを提供いただきました。また、2.1節では、かにパルサーの日本の天文業界での研究史をまとめるに際して、河合誠之氏、牧島一夫氏を含め諸先輩方に過去の研究史をお伺いさせていただきました。著者の誤解などあればご指摘いただければ幸いです。丁寧な査読をしていただ

いた川中宣太氏や、本稿を書くに際してご助力いただいた皆様に、ここでお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Lorimer, D. et al., 2007, *Science*, 318, 777
 [2] Keane, E., et al., 2012, *MNRAS*, 425, 71
 [3] Burke-Spolaor, S., et al., 2012, *ApJ*, 727, 18
 [4] Thornton, D., et al., 2013, *Science*, 341, 53
 [5] Aoki, T., et al., 2014, *ApJ*, 781, 10
 [6] Linscott, I. R. & Erkes, J. W., 1980, *ApJ*, 236, L109
 [7] Nice, D. J., et al., 1999, *ApJ*, 513, 927
 [8] Cordes, J. M., & McLaughlin, M. A., 2003, *ApJ*, 596, 1142
 [9] McLaughlin, M. A., et al., 2006, *Nature*, 439, 817
 [10] Eie, S., et al., 2021, *PASJ*, 73, 1563
 [11] Enoto, T., et al., 2021, *Science*, 372, 187
 [12] Ioka, K., 2003, *ApJL*, 598, L79
 [13] Inoue, S., 2004, *MNRAS*, 348, 999
 [14] Petroff, E., et al., 2015, *MNRAS*, 451, 3933
 [15] Spitler, L. G., et al., 2016, *Nature*, 531, 202
 [16] Chatterjee, S., et al., 2017, *Nature*, 541, 58
 [17] Marcote, B., et al., 2017, *ApJ*, 834, L8
 [18] Bannister, K. W., et al., 2019, *Science*, 365, 565
 [19] Ravi, V., et al., 2019, *Nature*, 572, 352
 [20] CHIME/FRB Collaboration, 2019, *Nature*, 566, 235
 [21] Caleb, M., & Keane, E., 2021, *Universe*, 7, 453
 [22] Platts, E., et al., 2019, *Phys. Rep.*, 821, 1
 [23] 櫻山和己, 2020, *天文月報* 113, 795
 [24] Kashiyama, K. & Murase, K. 2017, *ApJ*, 839, L3
 [25] Amiri, M., et al., 2021, *ApJS*, 257, 59
 [26] Bochenek, C. D., et al., 2020, *Nature*, 587, 59
 [27] Li, D., et al., 2021, *Nature*, 598, 267
 [28] Staelin, D. H. & Reifenstein, E. C., III, 1968, *Science*, 162, 1481
 [29] Fukada, Y., et al., 1976, *Ap&SS*, 42, 245
 [30] Makishima, K. et al., 1979, 16th International Cosmic Ray Conference, 1, 80–502341, 37
 [31] Kawai, N., et al., 1993, *AIP Conf. Proc.*, 280, 213
 [32] 北元, 2010, 東北大学理学部卒業論文
 [33] 三上諒, 2016, 東京大学理学系研究科博士論文
 [34] Mikami, R., et al., 2016, *ApJ*, 832, 212
 [35] Hitomi Collaboration, 2018, *PASJ*, 70, 15
 [36] Tokumuaru, M., et al., 2020, *Solar Physics*, 295, 6
 [37] Shearer, A. B., et al., 2003, *Science*, 301, 493
 [38] Bilous, A. V., et al., 2012, *ApJ*, 749, 24
 [39] Bilous, A. V., et al., 2011, *ApJ*, 728, 110
 [40] Mickaliger, M. B., et al., 2012, *ApJ*, 760, 64
 [41] Aliu, E., et al., 2012, *ApJ*, 760, 136
 [42] MAGIC Collaboration, 2020, *A&A*, 634, 25
 [43] Kisaka, S., et al., 2017, *PASJ*, 69, L9
 [44] Philippov, A. A., et al., 2019, *ApJ*, 876, L6
 [45] Lyubarskii, Y. E., & Petrova, S. A., 1998, *A&A*, 337, 433
 [46] Kaspi, V., & Beloborodov B., 2017, *ARA&A*, 55, 261
 [47] Enoto, T., et al., 2019, *Rep. Prog. Phys.*, 82, 10, 106901
 [48] 榎戸輝揚, 2012, *天文月報* 105, 431
 [49] Mereghetti, S., et al., 2020, *ApJ*, 898, L29
 [50] Li, C. K., et al., 2021, *Nature Astron.*, 5, 378
 [51] Ridnaia, A., et al., 2021, *Nature Astron.*, 5, 372
 [52] Tavani, M., et al., 2021, *Nature Astron.*, 5, 401
 [53] CHIME/FRB Collaboration, 2020, *Nature*, 587, 54
 [54] Margalit, B., et al., 2020, *ApJ*, 899, L27
 [55] Bailes, M., et al., 2021, *MNRAS*, 503, 5367
 [56] Bhardwaj, M., et al., 2021, *ApJ*, 910, L18
 [57] Kirsten, F., et al., 2022, *Nature*, 602, 585
 [58] Majid, W., et al., 2021, *ApJ*, 919, L6
 [59] Fong, W.-F., et al., 2021, *ApJ*, 919, L23
 [60] Ravi, V., et al., 2022, *MNRAS*, 513, 982
 [61] Lanman, A. E., et al., 2022, *ApJ*, 927, 59
 [62] Xu, H., et al., 2021, *arXiv:2111.11764*
 [63] Ould-Boukattine, O. S., et al., 2022, *ATel*, 15190
 [64] Ould-Boukattine, O. S., et al., 2022, *ATel*, 15192
 [65] Atri, P., et al., 2022, *ATel*, 15197
 [66] Takefuji, K., et al., 2022, *ATel*, 15285

Fast Radio Bursts and Pulsar Magnetospheric Activities

Teruaki ENOTO, Shota KISAKA, and Toshio TERASAWA

RIKEN, Cluster for Pioneering Research, 2-1, Hirosawa Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: Fast radio bursts (FRBs) are bright radio bursts that reach us even from cosmological distances. Although the origin of FRBs is still unknown, their research is progressing rapidly. We review the observational history of FRBs, and compare them with magnetospheric phenomena in neutron stars in our Galaxy, including giant radio pulses from the Crab pulsar and radio bursts from transient magnetars. We also successfully detected a bright FRB from the repeating FRB 20201124A in 2022 February.