

高速電波バーストと連星中性子星合体

山崎 翔太郎

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: yamasaki@astron.s.u-tokyo.ac.jp



高速電波バースト (FRB) は、電波帯域においては宇宙で最も明るい未知の爆発的天体現象として、世界的に大きな注目を集めている。ほとんどのFRBは一回しか観測されないが、複数回リピートするFRBの出現が多く、研究者を悩ませている。そこで筆者らは、両種族を統一的に説明可能なモデルを提案した。リピートしないFRBは、連星中性子星合体時に増幅される回転エネルギーを源とした、パルサー型の電波放射として説明可能である。ところが、合体環境は星由来の噴出物によって著しく汚染される可能性があるため、FRBの伝播は自明ではない。我々は数値的相対論-流体シミュレーションの結果を用いて、合体前後での星周環境を定量的に調べた。結果として、合体瞬間の前後約1ミリ秒間は、星周環境が透明であり、リピートしないFRBが生成・伝播可能であることを示した。一方で、連星中性子星合体の一部は、高速回転する安定な大質量中性子星を残す可能性がある。我々はこの点に着目し、残留中性子星がリピートするFRBの起源になり得ることを示した。連星中性子星合体を起源とするこれら二種族について、筆者らが構築した発生頻度の進化モデルは、現在のFRB検出状況を上手く説明する。さらに、合体後に高速回転大質量中性子星が残る場合、重力波検出後1-10年以内にリピートするFRBが現れてくるというユニークな予言を行った。

1. 高速電波バーストの新世紀

本稿の対象である「高速電波バースト」(Fast Radio Burst=FRB)は、2007年にオーストラリア・パークス64m電波望遠鏡のパルサー探査用アーカイブデータから初めて発見された¹⁾。1970年代初頭に発見されて以来、50年もの長きに渡って活発に研究が行われてきたガンマ線バーストの後継ともいえるべき、新世紀の電波突発天体現象である。名前の「Fast (高速)」は、極めて短いミリ秒

のバースト継続時間に由来する^{*1}。観測波長は主に電波のギガヘルツ帯 (GHz) で、パルサーに類似したコヒーレントな明るいシングルパルスが検出される。ほとんどのバーストは一回性の現象として検出されており、他波長対応天体は見つかっていない。驚くべきことに、FRBの発生頻度は非常に高く、1日あたり全天で数千回から1万回程度と見積もられている。

FRBはパルサー電波パルスと同様の探査方法により検出されるが、両者は以下に述べる点で大き

*1 「高速」という言葉だと、短時間というより高速移動のイメージがあり、高速電波バーストは訳語として違和感があるという指摘を受けたことがある。しかし、「速い」という言葉は「早い」と同じ読みであることからわかるとおり、もともとは時間に関する概念で「短時間で終わる」という意味を持っている。「高速」という言葉にも、移動速度を形容するだけでなく、例えば「高速計算」や「高速処理」という使い方があり、また、「瞬時」や「短い」などの言葉だと、fastよりは別の英単語が思い浮かぶ。以上の理由から、我々としては、「高速電波バースト」が原語のニュアンスを最も適切に反映する訳語と考えて、これを用いることにする。

く異なる。その最たるは、FRBの非常に大きな分散指標 (Dispersion Measure=DM) である。分散指標は、視線方向の電子数密度を積分した柱密度として定義され (単位はパーセク毎立方センチメートル)、主にパルサーの電波パルス観測で得られる物理量である。パルス発生源と観測者の間に存在する物質の量を反映するため、およその距離指標として用いられる。一般に、銀河系内パルサーのDMは、物質密度の大きい銀河面付近では大きな値を示すが、銀河面から離れるにしたがって急激に減少する。これは、銀河系内パルサーDMの分布が、天の川銀河のディスク構造と、それに付随した星間空間プラズマの分布を反映したものと解釈できる。驚くべきことに、FRBは全天でほぼ等方的に、銀河面から大きく離れた方向でも発生し、なおかつFRBのDMは同方向の銀河系内パルサーのDMを大きく超過する (図1参照)。これは銀河系内天体では説明できない量なので、宇宙全体に満ちている非常に密度の小さい銀河間物質中の電子によるものと考えられ、そこから距離を推定すると50-100億光年 (赤方偏移1程度) という宇宙論的な遠方からやってきていることになる^{2),3)}。距離の大きさは、それだけ巨大な爆発現象を意味するため、この仮定が正しければ、FRBは電波において宇宙で最も明るい天体ということになる。

一般に、電波パルスは星間空間のプラズマを通過する際に散乱を受け、波は様々な光路を取る。また、波は光路上での屈折率の変化により群遅延を受ける。これらの効果に起因した、FRBパルス到来時刻の遅れやパルス幅の拡がりには、特徴的な周波数依存性が見られる。また、FRBの電波パルスが直線偏光している場合、星間プラズマ中の磁場により電磁波の偏光面が回転する、いわゆるファラデー回転が検出される。ファラデー回転

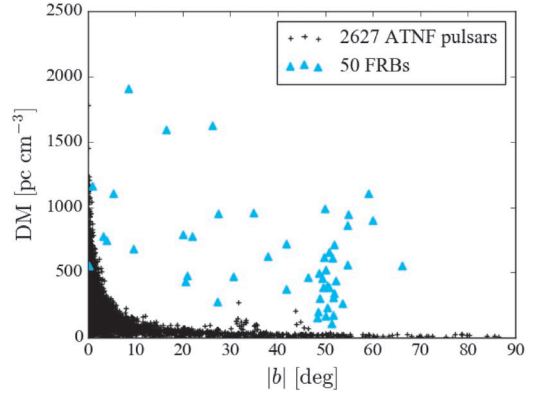


図1 FRB⁴⁾と銀河系内パルサー⁵⁾の分散指標 (DM) を銀緯の絶対値に対してプロットしたもの。FRBは同緯度の銀河系内パルサーよりはるかに大きなDM値を示すことから、銀河系外起源と考えられる。

は、伝播経路に平行な磁場成分と電子数密度の積を視線方向で積分した量として定義される回転指標 (Rotation Measure=RM) という物理量に焼き直すことができる。また、FRBは輝度温度が非常に大きく、パルサー電波放射に比べてはるか遠方から伝播することが可能なため、銀河間物質や銀河間磁場の情報を抽出できる可能性がある。このように、FRBは宇宙論的な諸問題に迫るための新しい道具としても期待されている。今後この謎に満ちた新種の天体現象の研究が世界的にますます活発化することと思われる。

2. 「リピーター」の発見

現在見つかっているほとんどのFRBは、オーストラリアのパークス電波望遠鏡により、一回きりのイベントとして検出されてきた。FRB発生後、同じ方向を数十~数百時間にわたって追観測したにも関わらず、再びバーストが検出される「反復性」の兆候は見えていない。唯一の例外は、FRB 121102というバーストである*2。これは、プエ

*2 初稿段階 (2018年12月) では、反復する例はFRB 121102のみであったが、その後CHIMEにより2例目FRB 180814.J0422+73の発見が報告された⁶⁾

ルトリコ・アレシボ電波望遠鏡によるサーベイで発見された唯一のFRBであり⁷⁾、後に、繰り返しバーストすることがわかった^{8),9)}。全てのバーストがほぼ同じDM値を示すことから、同じ天体源(距離)からのイベントであると考えられる。バーストの到来時間の間隔は数十ミリ秒から数時間程度に及び、明らかな周期性は見られない。FRB 121102は、今のところ唯一リピートするバーストであることから、単に「リピーター」とも呼称される。

一般に、FRBのサーベイ観測に用いられる電波望遠鏡の視野は広く(5-10分角)、天球面上で正確にFRBの到来方向を決定するのは容易ではない。まして、それが継続時間数ミリ秒の一回きりの現象であればなおさらである。ところが、リピーターに関しては、反復性が位置決定精度を大幅に向上させ、狭視野・高感度の電波干渉計であるVLAによる直接検出を可能にした¹⁰⁾。さらに、FRB 121102の方向が0.1秒角以下の精度で決定したことにより、可視光域での追観測によって母銀河(FRBが属している銀河)が同定され、その赤方偏移は0.193であることがわかった¹¹⁾。これは、発見当初から示唆されていた宇宙論的距離を裏付ける結果となった。さらに、FRB 121102と同じ位置に明るい定常電波源が発見されたことで、起源天体が非常に若いパルサーである可能性が有力視されている^{12),13)}。

3. 連星中性子星合体モデル

FRBの起源は未だ謎に包まれており、数多くの理論モデルが提唱されている。宇宙の遠方で何がFRBを生み出すのか? まず単純に、バーストの継続時間がミリ秒と短いことから、発生源のサイズは非常に小さいことが予想される。また、バーストの非常に大きなエネルギー(10の38乗から40乗エルグ:参考までにミリ秒周期で回転するパルサーの電波パルスは典型的に10の30乗エルグ程度のエネルギーを持つ)を説明するためには、

高密度星同士の衝突や崩壊または爆発といった状況を想定するのが自然である。さらに、FRBの発生頻度が高く(全天で1日に数千回から1万回)、宇宙論的な遠方でも起きていることから、発生源がそれなりに普遍的な天体現象である必要がある。以上のような理由から、FRB起源モデルには中性子星や白色矮星、ブラックホールといったコンパクト星が関係するものが多い(多様なFRB理論モデルについては、文献14が詳しい)。本研究では連星中性子星合体モデル¹⁵⁾を考察する。

連星中性子星とは、文字通り2個の中性子星で構成される連星系である。連星中性子星の形成過程については未だ謎が多いが、もともと2つの主系列星から成っていた連星が、2回の超新星爆発を経て中性子星同士の連星系に進化する、というのが標準的な描像となっている。連星を成す2つの中性子星は、重力波を放出しながら徐々にその軌道を縮めていく。中性子星連星の誕生時における連星間の距離と軌道離心率が一定の条件を満たせば、連星は宇宙年齢以内に合体する。銀河系内では、1975年に発見され、初めて重力波の間接的存在証明となったHulse-Taylor連星を含め、合体条件を満たす連星中性子星が9個報告されている。合体の際に、合体前とは比較にならない程強い重力波を放出することから、有力な重力波源としても注目を集めてきた。最近では、2017年10月に、LIGO/VIRGOにより、初の連星中性子星合体からの重力波検出(GW170817)という大ニュースが報告され¹⁶⁾、広く話題となった。

一般に合体後の連星が辿る運命としては、以下に挙げる可能性が考えられる。(1)合体直後、即座にブラックホールへと崩壊する場合。(2)一時的に重力的に不安定な大質量中性子星を形成し、その後ブラックホールへと崩壊する場合。(3)安定した高速回転大質量中性子星がそのまま残る場合。どの分岐を辿るかは、主に中性子星の核密度状態方程式と連星の総質量によって決定される。大質量中性子星のエネルギー散逸機構については

不定性が大きい（磁気回転不安定性による早期の重力波放出や、ニュートリノによるエネルギー放出等が考えられる）、大質量中性子星の寿命（ブラックホールへと崩壊するまでの時間）については解明されていない。

上に述べたような特徴を持つ連星中性子星合体を通して、FRBがどのように作られるかという点に話を戻そう。合体前の個々の中性子星は、磁気双極子放射により長い時間をかけて回転エネルギーを放出してきたため、ほぼ無回転だと考えられる。つまり、回転エネルギーによって駆動されるパルサー的な電磁波放射は行っていない。しかしながら、合体直後に形成される大質量中性子星は、合体前の軌道角運動量をそのまま受け継ぐため、ミリ秒の回転周期で高速回転する。したがって、この大質量中性子星が合体前と同様の双極磁場（10の12.5乗ガウス程度）を獲得すれば、磁気双極子放射により、観測されているFRBの明るさを十分に説明できるだけの回転エネルギーを放出する。この際に期待されるパルサー的な電波放射がFRBの起源となり得る。FRBと連星中性子星合体の発生頻度の見積もりには、それぞれ大きな不定性があるが、仮にFRBの電波放射が等方向的であるとすれば、FRBの発生頻度密度（単位共同体積あたりの発生頻度）は、アメリカのLIGOや欧州のVIRGO等の重力波検出器によって見積もられている、近傍での連星中性子星合体の発生頻度密度¹⁶⁾に近い値となる。

このモデルで問題となるのは、合体直後の星周環境である。FRBの連星合体モデルが予測する電波放射の生成時刻は合体前数ミリ秒¹⁷⁾から合体の瞬間¹⁵⁾までと考えられている。しかしながら、連星合体前後には、合体噴出物質（イジェクタ）が飛び散り、星周環境は極めて不透明になる可能性がある。この場合、FRBが星周環境を脱出し、観測者まで伝播することは不可能になり、理論モデルとしては破綻する。そこで我々は、数値的相対論シミュレーションを用いてこの問題を定量的

に調べた。具体的には、FRBを駆動するであろう2つの中性子星（合体後は1つの大質量中性子星）の回転速度と、FRBの伝播を妨げるイジェクタの分布、両方の時間発展を追った。

4. 連星中性子星合体シミュレーション

我々は、連星合体前後における星由来の物質の分布を調べるため、木内建太氏（京都大学）の協力を得て、連星中性子星合体シミュレーションを行った。以下にシミュレーションの設定を述べる。

イジェクタの力学的な進化は、磁場の有無に大きく影響されないため、磁場なしの流体計算のみを行った。中性子星の核密度状態方程式は、相対論的平均場近似にハイペロンの効果を入れたH4を仮定し、簡単のために、連星総質量が2.8太陽質量の等質量連星を設定した。合体の直前10ミリ秒程度（この時の連星間距離は約50キロメートル）から計算を行った結果、連星は5-6回のインスパイラルを経て合体し、大質量中性子星を形成した（図2参照）。合体後約15ミリ秒まで計算を行ったが、大質量中性子星は回転により自己重力を支えており、ブラックホールへと潰れないことが確認できた。

図3は合体前後の中性子星の自転速度とイジェクタの柱密度の時間進化を示したものである。合体の1ミリ秒前から合体瞬間にかけて、星の自転速度は10倍以上も増幅し、ミリ秒周期（水平破線に対応）で高速回転を始めることが確認できる。双極子放射の公式によれば、エネルギー解放率は自転速度の4乗に比例して大きくなるため、この間に、放出可能なFRB光度は1万倍も増幅することになる。一方で、FRBの伝播を妨げるイジェクタの生成に関しては、全ての方向において、合体後約0.5ミリ秒以降に立ち上がりが見えている。つまり、中性子星の回転速度がFRBを発生させるのに十分なほど大きくなった後、約1ミリ秒間は、

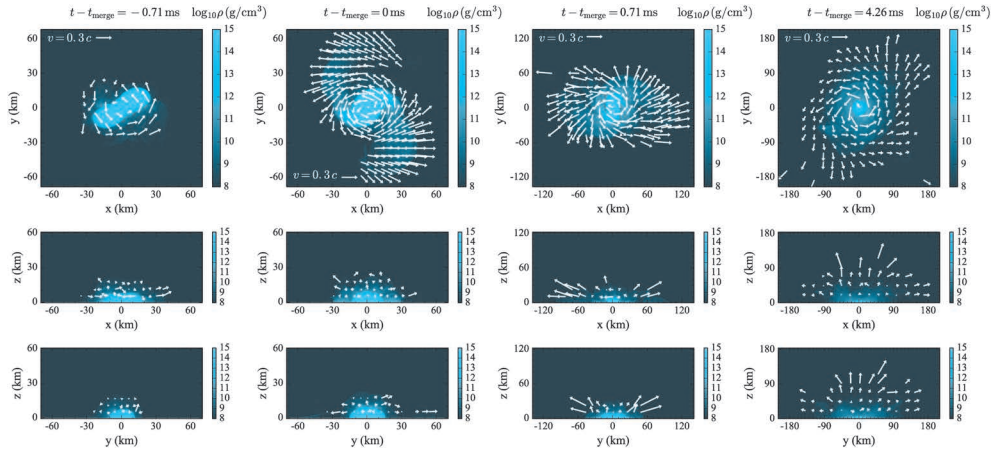


図2 連星中性子星合体シミュレーションの密度プロファイルのスナップショット．速度場は白矢印で示されている．左から右の列に向かって，合体前0.71ミリ秒，合体瞬間，合体後0.71ミリ秒，合体後4.26ミリ秒を示す．第1段目は軌道面，第2・3段目は軌道面に垂直な断面を表す．

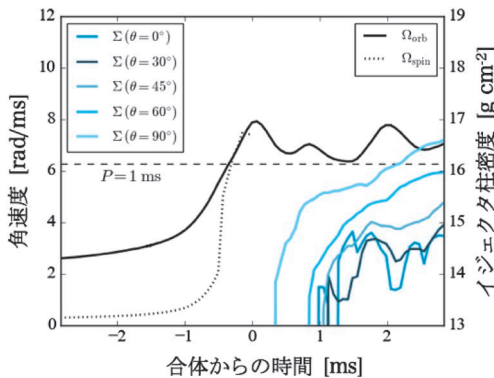


図3 中性子星自転速度（黒実線・点線/左縦軸）とイジェクタの柱密度（色付き実線/右縦軸）の時間進化．時刻は合体時をゼロとして表記してある．黒の実線・点線はそれぞれ軌道角速度と2つの中性子星について平均した自転角速度を示す．柱密度の色の違いは角度方向の違いに対応する（ $\theta=0^\circ$ は北極， $\theta=90^\circ$ は赤道面を表す）．

イジェクタの生成と放出が起こらず，期待される電波放射がほぼ全方向に対して伝播可能であることがわかる．さらに，FRB発生後約1ミリ秒後に劇的なイジェクタ生成が行われることから，FRBのバースト継続時間を説明できる可能性がある．

以上により，FRBの連星中性子星合体モデルの

核心であった，合体の直前直後における星周環境汚染問題について重要な示唆が得られた．これらの結果は，イジェクタの生成が一回性のFRBを説明する上で問題にはならないことを示している．では，リピートするFRB (FRB 121102) についてはどうだろうか？ 次章では新しいシナリオについて説明する．

5. リピーターをどう説明するか？

一回性の現象である連星中性子星合体がFRB 121102のようなリピーターを説明できないのは明らかである．FRB 121102は，その周囲で定常的に（時間によらずほぼ一定の明るさで）光る明るい電波源が特定されたことから，その起源が，超光度超新星という重力崩壊型の超新星爆発によって生み出された30-100歳程度の非常に若い中性子星ではないかという説が盛んに議論されている^{12), 13)}．この特殊な超新星爆発は，爆発後に高速回転する強磁場中性子星（マグネター）を形成する可能性がある．高速回転中性子星の回転エネルギーによって駆動されるパルサー風が，爆発の際に飛散したイジェクタと衝突することにより衝撃波を作ってイジェクタを加熱し，これが定常

(1) 連星中性子星合体 (2) 大質量中性子星形成 (3) パルサー星雲(1-10年後)

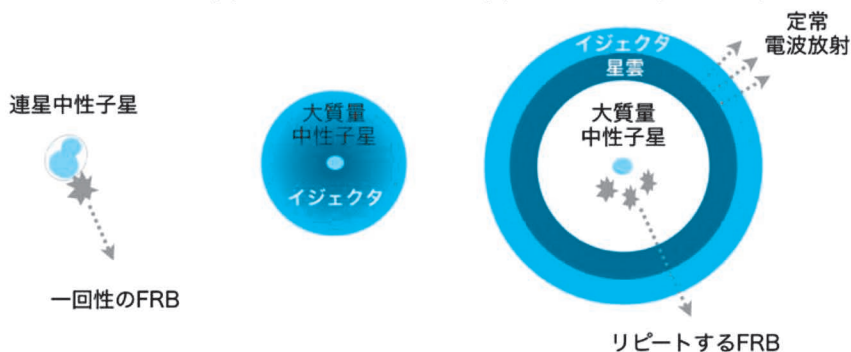


図4 連星中性子星合体により二種族のFRBを説明する本モデルの概念図。(1) 合体時、イジェクタが飛ぶ前に一回性の明るいFRBを生成し、(2) その後はイジェクタによって電波が隠される。(3) 大質量中性子星によるパルサー風とイジェクタとの衝突により形成された星雲領域から、定常電波を放射する。その一方で、イジェクタの密度が十分に小さくなれば(合体から約1年後)、再び大質量中性子星の回転エネルギーの許す限り(<10年程度)、暗いFRBが繰り返し観測される。

電波源として光る(パルサー星雲)という解釈である。このシナリオにおいて、FRB放射自体は、パルサー星雲の中心にある若い中性子星の活動によって生み出されるため、定常電波放射とは区別される。

しかしながら、高速回転する中性子星を作るのは何も上のような特殊な超新星だけではない。3章で述べた、連星中性子星合体の辿る運命を思い出していきたい。特殊なケースという扱いであり議論されてこなかったが、連星合体の一部は「(3) 長時間安定した高速回転大質量中性子星を残す」という可能性がある。連星合体時に一回きりのFRB(非リピーター)を生成し、その後、安定した大質量中性子星を残した場合は、この中性子星の活動がリピートするFRB(リピーター)の起源となる(この割合は中性子星の核密度状態方程式と連星質量分布によって決定されるため、大きくも小さくもなり得る)。この発想に基づき、連星中性子星合体による、統一的なFRB種族の説明を試みる(図4参照)。

リピーターが磁場エネルギーによって駆動されている可能性もあるが、本研究では回転エネルギーによる駆動を考える。すでに図3で見たよう

に、大質量中性子星はミリ秒周期で高速回転をするため、リピートするFRBを生成するのに十分な回転エネルギーを有している。一般に、リピーターは非リピーターよりも暗いバーストであることが知られている(見かけの明るさで1桁程度異なる)。この事実は、リピーターが、連星合体後に時間が経ち、当初ミリ秒で高速回転していた大質量中性子星の回転が遅くなった時期のFRB放射であると考えれば説明がつく。

次章では、連星合体後に高速回転する大質量中性子星が残った場合に焦点を当て、観測や他のモデルとの比較を行う。

6. 残留中性子星の星周環境：超光度超新星モデルとの比較

我々は、連星中性子星合体後に安定した大質量中性子星が残された場合に、FRBが観測可能になるタイムスケールを見積もった。まずは定性的に考えてみる。超新星と連星中性子星合体どちらのケースでも、爆発/合体直後は濃いイジェクタが星周囲で膨張しているため、星起源のあらゆる電波放射は吸収されてしまいFRBとして観測することはできない。時間が経過するにつれてイジェク

タ密度は小さくなるため、上の条件から中性子星の年齢への下限がつく。一方で、FRB 121102の観測で発見された定常電波源を（少なくとも5年以上）中性子星の回転エネルギーによって維持しなければならないという条件から、中性子星の年齢に上限がつく（回転エネルギーは時間とともに減衰する）。リピーターが磁場エネルギーにより駆動されている場合は、この上限はさらに長くなり得る。

連星中性子星合体におけるイジェクタの量は超光度超新星の場合に比べて3桁程度小さい。一方で、イジェクタの速度は超光度超新星に比べて1桁大きい。すなわち、合体後のイジェクタ密度が電波を透過できるほど小さくなるのにかかる時間は、超光度超新星に比べて相対的に短くなる。一方で、イジェクタ密度が小さくなるタイムスケールが短いことから、パルサー風との衝撃波により定常電波を維持できる時間も短くなる（一般に高密度環境の方がショックのエネルギーは大きくなる）。計算の結果、典型的な連星合体のパラメーターに対して、FRBを生成可能な残存中性子星の年齢は1-10年程度であることがわかった。これは超光度超新星の30-100年^{12), 13)}という値に比べて1桁小さいことがわかる。

また、FRBの回転指標（1章を参照）はリピーターの場合で10の5乗ラジアン毎平方メートルと大きく¹⁸⁾、幾つかの非リピーターは10ラジアン毎平方メートル程度（FRB 150807¹⁹⁾/FRB 150215²⁰⁾）という非常に小さい値を示すことが報告されている。超新星モデルの場合、大質量イジェクタによって非常に大きい回転指標を持つFRBを説明することは可能だが、後者の非常に小さい回転指標を持つFRBを説明することは難しい。一方で我々の考える連星中性子星合体の二種族モデルは、どちらも説明可能である。連星合体の瞬間の星周環境はイジェクタの少ない非常にクリーンな環境であるから、一部の非リピーターFRBが示す、無視できるほど小さい回転指標も説明可能と

なる。

7. 二種族進化モデル

我々は、5章で述べたアイデアを元に、FRBの発生頻度進化モデルを構築した。すなわち、連星中性子星合体時に一回性の非常に明るい非リピーターFRBが発生し、その後、大質量中性子星の活動により暗いリピーターFRBが発生するという二種族モデルである。従来の連星中性子星合体モデルによれば、非リピーターは連星合体に付随して発生する。FRBが等方向的に近い放射をする と仮定すれば、非リピーターの発生頻度は、連星中性子星合体の発生頻度と近い値になる。その一方で、リピーターは、連星合体後に安定した残留中性子星が形成された場合にのみ発生可能である。さらに、一つの連星合体が発生させることのできるリピーターの総数は、残留中性子星がリピーターとして活動できる寿命にも依存する。

次に、FRBの光度関数には不定性が大きいいため、ごく単純な仮定として、2種類の標準光源仮説（天体の絶対的な光度が全て同じであるという仮定）を導入する。すなわち、明るい非リピーターは赤方偏移1の距離において1 Jy（ジャンスキー、電波強度の単位）に相当する明るさを持ち、一方、リピーターは赤方偏移0.2の距離で0.1 Jyの明るさを持つと仮定する。つまり、両者を同じ距離に置いた場合、光度は約2桁異なる。これら非リピーターとリピーター双方の赤方偏移と明るさは、既知のFRBの典型値から取った。これにより、ある検出器の感度によって観測可能なリピーター・非リピーターまでの距離を見積もることが可能になる。

以上の仮定に基づいて、二種族のFRBの発生頻度をプロットしたのが図5である。リピーターの発生頻度曲線を決めるには、連星合体発生頻度への比例定数を決める必要があるが、ここでは、パークス電波望遠鏡の感度（1 Jy程度）において、リピーターの発見率が非リピーターの10%であ

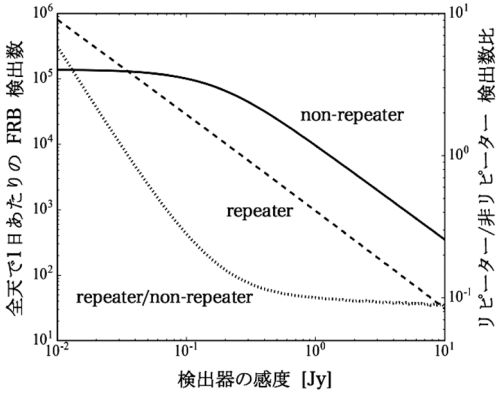


図5 検出器の感度に対するリピーターと非リピーターの検出期待数(実線破線, 左縦軸)及び非リピーターに対するリピーターの検出数比(点線, 右縦軸). リピーター検出数は, 安定した大質量中性子星が生成される割合とFRBを生成可能な活動期間の長さに応じて任意に規格化できる. ここでは, パークス電波望遠鏡の感度(約1 Jy)でリピーター検出数が非リピーター検出数の10%であると仮定した.

ると仮定した(もちろん実際にはパークスで明らかなりピーターは未だ検出されていない).

最初に, 非リピーターに焦点を当てる. 検出器の感度が低い(明るいものしか見えない)場合, 非リピーターの発生頻度曲線はほぼ直線となっている. これは, 曲率のない平坦な宇宙で, 一様な密度で天体が分布する場合の傾き-1.5に近い. 明るいことはすなわち距離が近いことを意味し, 平坦な近傍宇宙において空間的に一様な密度分布のFRBを観測することになる. 逆に, 検出器の感度を上げる(暗いものまで見える)と, 非リピーターの検出頻度曲線が折れ曲り, やや平坦になっていくことがわかる. これは, 本質的に明るい非リピーターが遠方まで観測可能であるため, 宇宙論的な効果が現れた結果である. 具体的には, 遠方まで観測できると, 宇宙論の効果により観測可能な体積が大きく増える一方で, 連星合体の発生頻度密度が大きく減少し, これら2つの効果が相殺したためである.

次にリピーターに焦点を当てる. リピーターの

発生頻度曲線はほぼ直線を示す. これは, リピーターが本質的に暗い天体であるために近傍にあるものしか観測できないためであり, 上述したような近傍の非リピーターと同様の解釈ができる.

最後に, リピーター/非リピーター検出数比に着目する. 図5の点線によれば, 検出器の感度を上げていくに従って, 相対的なリピーター発見率が劇的に上昇する傾向が見られる. これは, 唯一のリピーターFRB 121102が, 高感度のアレシボ電波望遠鏡(パークス電波望遠鏡の約10倍程度良い感度を持つ)によるサーベイで発見されたという事実を上手く説明する.

8. 楕円銀河からのFRB

前章までに紹介した, 統一的な連星中性子星合体モデルから導かれる予言について述べる. 現在, 母銀河が高い精度で特定されているFRBはリピーターFRB 121102に限られており, その母銀河は星形成を行う矮小銀河であることが分かっている. 一般に, 重力崩壊型超新星や, それに伴う中性子星/ブラックホールの誕生は寿命の短い大質量星の最期に関連しており, ほとんどの場合, 活発に星形成がおきていて若い星が多い渦巻き銀河や矮小銀河に見つかりやすい. FRB 121102を説明するモデルとして, 超光度超新星が提案された一因はここにある. 一方で連星中性子星合体は, 星形成の盛んな若い銀河でも起こるが, 特に楕円銀河のように古い星の集まりで, 最近の星形成をしていない銀河で起こりやすい傾向にある. したがって, 我々のモデルが正しければ, 近い将来, リピーターと非リピーターの両方が楕円銀河から検出される可能性がある.

実は, 母銀河同定はFRB 121102が初めてではない. 史上初のFRB母銀河はFRB 150418という非リピーターに対して発見された²¹⁾. この母銀河は赤方偏移0.492(約50億光年)という遠方の楕円銀河であった. しかし, 後に母銀河の同定に対する反論があり²²⁾, 様々な追観測が行われたが²³⁾

未だに決着はついていない。最近では、2例の非リピーターについて楢円銀河がFRBの誤差領域内で見つかり、母銀河候補の一つとして報告されている^{24), 25)}。高い精度で母銀河を同定するには、電波望遠鏡の誤差領域を小さくする必要がある。しかしながら、電波望遠鏡の視野は一般に広く、反復性のない非リピーターに対して方向決定精度を向上させるのは困難である。したがって、誤差体積内に母銀河が偶然見つかる確率が非常に低い点を統計的に明確にしなければならない。このために、すばるのような広視野・高感度の可視光望遠鏡を用いて、誤差領域内を十分に深く観測する努力が続けられている^{21), 26)}。一方、電波においても、ASKAP (Australian Square Kilometre Array Pathfinder) や CHIME (Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment) のような広視野のFRB検出器が稼働を始めたことにより、近傍の明るいFRBの検出が増えてきた²⁷⁾。統計的見地からの母銀河特定が行われる日はそう遠くないかもしれない。

9. 重力波観測とFRB

連星中性子星合体は、重力波源としても期待されている。FRBの放射が鋭くビーム(光の進行が特定の方向に集中)していなければ、原理的には重力波との同時検出が可能である。しかしながら、重力波検出による位置推定の誤差領域は非常に大きく、これを十分にカバーできる電波望遠鏡は存在しないため、現状では困難である。連星中性子星合体の高精度の方向特定は、合体後数日から数百日というタイムスケールで現れる、キロノヴァ/マクロノヴァと呼ばれる紫外線から近赤外線域での電磁波対応天体を観測することによってなされる。これに対し、FRBはミリ秒という短時間の突発天体現象なので、重力波検出の数日後に方向が決まってからの電波観測では遅い、というのが従来の考え方であった。

ところが、もし連星合体後に安定な高速回転大

質量中性子星が残った場合、リピーターFRBの発生が期待される。6章で見たように、我々のモデルは連星合体後1-10年にわたってFRBの出現を予測するため、重力波と電磁波対応天体観測により合体の方向が高精度で特定された後、数年間にわたる電波観測によりFRBを検出できる可能性がある。連星中性子星合体の位置からリピーターFRBが検出されれば、これは逆説的に、合体後に安定な大質量中性子星が形成されたことの証拠となる。これは、従来の重力波観測とは独立に中性子星の核密度状態方程式を制限する新しい手法になり得る。

10. まとめ

近年大きな話題となっているFRBについて、連星中性子星合体モデルの観点から筆者らの最近の研究を紹介した。

リピートしないFRBは、連星中性子星合体時に増幅される回転エネルギーを源とした、パルサー型の電波放射として説明可能である。我々は数値的相対論流体シミュレーションの結果を用いて、合体前後約1ミリ秒間での星周環境が透明であり、リピートしないFRBが生成・伝播可能であることを示した。

一方で、連星中性子星合体の一部は、高速回転する安定な大質量中性子星を残す可能性がある。我々はこの点に着目し、残留中性子星がリピートするFRBの起源になり得ることを示した。連星中性子星合体を起源とするこれら二種族について、筆者らが構築した発生頻度の進化モデルは、現在のFRB検出状況を上手く説明する。さらに、合体後に高速回転大質量中性子星が残る場合、重力波検出後1-10年以内にリピートするFRBが現れてくるというユニークな予言を行った。

現在、謎のヴェールに包まれたFRBの解明に向けて、世界中の研究者達が精力的に取り組んでいる。特に観測面では、FRBに特化した新しい検出装置の台頭により、一日に数十個のFRBを検出す

る時代が来ようとしている。検出数の飛躍的増加に伴い、我々のモデルを統計的に議論することも可能になるだろう。今後もFRB観測の進展から目が離せない。

謝辞

ここで紹介させて頂いた研究は、筆者の修士論文の一部と査読論文(文献28)に基づいています。本研究は、筆者の指導教官である戸谷友則教授と、京都大学基礎物理学研究所の木内建太氏との共同研究によって成されたものです。研究の機会とサポートを頂いたことに深く感謝します。加えて、編集委員の滝脇知也氏には非常に丁寧に記事をチェックして頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。最後に、初稿前段階での校正を手伝ってくれた、愛する妻にも心から感謝します。

参考文献

- 1) Lorimer, D. R., et al., 2007, *Science*, 318, 777
- 2) Inoue, S., 2004, *MNRAS*, 348, 999
- 3) Ioka, K., 2003, *ApJ*, 598, L79
- 4) Petroff, E., et al., 2016, *PASA*, 33, e045
- 5) Manchester R. N., et al., 2005, *AJ*, 129, 1993
- 6) The CHIME/FRB Collaboration., et al., 2019, *Nature*, 566, 235
- 7) Spitler, L. G., et al., 2014, *ApJ*, 790, 101
- 8) Spitler, L. G., et al., 2016, *Nature*, 531, 202
- 9) Scholz, P., et al., 2016, *ApJ*, 833, 177
- 10) Tendulkar, S. P., et al., 2017, *ApJ*, 834, L7
- 11) Chatterjee, S., et al., 2017, *Nature*, 541, 58
- 12) Kashiyama, K., & Murase, K., 2017, *ApJ*, 839, L3
- 13) Metzger, B. D., et al., 2017, *ApJ*, 841, 14
- 14) Platts, E., et al., 2018, arXiv:1810.05836
- 15) Totani, T., 2013, *PASJ*, 65, L12
- 16) Abbott, B. P., et al., 2017, *Phys. Rev. Lett.*, 119, 161101
- 17) Wang, J.-S., et al., 2016, *ApJ*, 822, L7
- 18) Michilli, D., et al., 2018, *Nature*, 553, 182
- 19) Ravi, V., et al., 2016, *Science*, 354, 1249
- 20) Petroff, E., et al., 2017, *MNRAS*, 469, 4465
- 21) Keane, E. F., et al., 2016, *Nature*, 530, 453
- 22) Williams, P. K. G., & Berger, E., 2016, *ApJ*, 821, L22
- 23) Bassa, C. G., et al., 2016, *MNRAS*, 463, L36
- 24) Mahony, E. K., et al., 2018, *ApJ*, 867, L10
- 25) Petroff, E., et al., 2019, *MNRAS*, 482, 3109
- 26) Tominaga, N., et al., 2018, *PASJ*, 70, 103

- 27) Shannon, R. M., et al., 2018, *Nature*, 562, 386
- 28) Yamasaki, S., et al., 2018, *PASJ*, 70, 39

Fast radio bursts and binary neutron star mergers

Shotaro YAMASAKI

Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Fast radio bursts (FRBs) are enigmatic millisecond-duration radio transients. Most FRBs do not show evidence of repetition, and such non-repeating FRBs may be produced at the time of a merger of binary neutron stars (BNS), provided that the BNS merger rate is close to the high end of the currently possible range. However, the merger environment is polluted by dynamical ejecta, which may prohibit the radio signal from propagating. We examine this issue by using a general-relativistic simulation of a BNS merger, and show that the ejecta appears about 1 ms after the rotation speed of the merged star becomes the maximum. Therefore, there is a time window in which an FRB signal can reach outside, and the short duration of non-repeating FRBs can be explained by screening after ejecta formation. A fraction of BNS mergers may leave a rapidly rotating and stable neutron star, and such objects may be the origin of repeating FRBs like FRB 121102. We show that a merger remnant would appear as a repeating FRB on a time scale of about 1–10 yr, and expected properties are consistent with the observations of FRB 121102. We construct an FRB rate evolution model that includes these two populations of repeating and non-repeating FRBs from BNS mergers, and show that the detection rate of repeating FRBs relative to non-repeating ones rapidly increases with improving search sensitivity. This may explain why only the repeating FRB 121102 was discovered by the most sensitive FRB search with Arecibo. We predict that a repeating FRB will appear 1–10 yr after a BNS merger that is localized by gravitational waves and subsequent electromagnetic radiation.