

## 「ビッグ・グリッチャー」を探る： パルサー J0537-6910 の r モード 振動からの重力波

「ビッグ・グリッチャー」としても知られる PSR J0537-6910 は、天文学者から多くの注目を集めている非常に特殊なパルサーです。パルサーは、大きな質量をもつ星のコアが潰れることによってできた、急速に回転する中性子星 (\* は用語解説あり) です。この天体は多くの点で極端です。自然界で知られている最も強い磁場 (地球の磁場の 10 億倍以上) を持つものだけでなく、宇宙で最もコンパクトな天体の 1 つなのです。太陽の質量以上のものを大都市の大きさの空間に詰め込み、内部密度は原子核の密度を超えています。

「パルサー」という名前は、電磁放射のパルスを発生させる天体であることに由来しています。このパルスは、電磁波が中性子星の磁極から継続的に流れ出ていることが原因です。磁気軸が回転軸と同じ向きを向いていない場合、図 1 に示すように、放射線ビームは灯台のように周囲を掃引し、ビームが地球方向を向いたときにパルスが到達します。

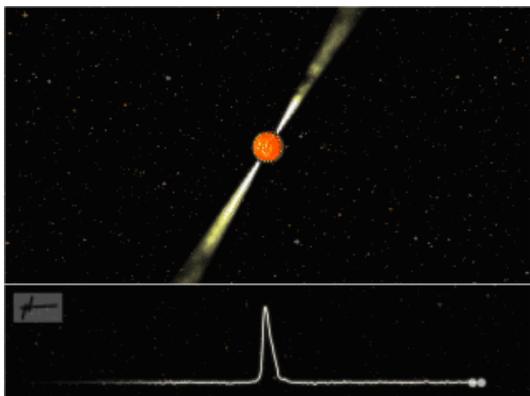


図 1: 芸術家によるパルサーのイメージ。クレジット: Joeri van Leeuwen, ライセンス: CC-BY-AS.

星から到着するパルスのタイミングを精密に測ることによって、私たちは星の回転速度と、その時間変化を測定できます。そして、回転速度の時間変化を理論モデルと比較すれば、パルサーの回転エネルギーを運び去り、回転を減速させる物理的メカニズムが何なのかを理解することにつながります。特に、天文学者はこれをブレーキ指数として知られるパラメータを使って定量化します。主なスピンドアウン\*を引き起こすのが電磁波の場合、ブレーキ指数は約 3 となり、重力波の放出が主な理由の場合にはより高い値となることが予想されます。

パルサー PSR J0537-6910 は、大マゼラン雲\* にあり、62 Hz (つまり、1 秒間に 62 回) で回転する若いパルサーです。このパルサーは急速にスピンドアウンすることが観察されているだけでなく、「パルサーグリッチ」と呼ばれる回転速度の突然の増加現象も頻繁に発生します (そのため、非公式のニックネームで「ビッグ・グリッチャー」と呼ばれています)。他の多くのパルサーとは異なり、PSR J0537-6910 は電波では観

測されず、X 線で観測されます。X 線は地球の大気を透過しないため、この種の観測は宇宙空間で行う必要があります。PSR J0537-6910 は、ロッシ X 線タイミング探査機 (*Rossi X-ray Timing Explorer*) と呼ばれる X 線望遠鏡衛星を使用して最初に発見されました。以下では *RXTE* と記載します。*RXTE* は、1996 年から 2012 年の間、運用されました。2017 年には、中性子内部構造探査機 (*Neutron star Interior Composition Explorer*, 以下 *NICER* と記載します) と呼ばれる X 線望遠鏡が国際宇宙ステーションに設置され、以来、PSR J0537-6910 の観測に使用されています。

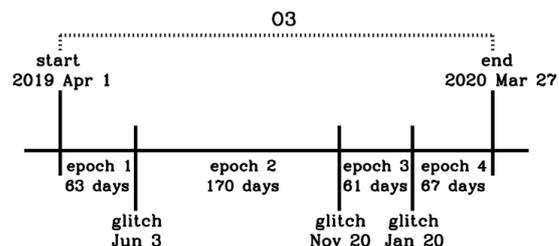


図 2: LIGO-Virgo の O3 観測期間と、J0537-6910 のグリッチ発生日、および (国際宇宙ステーションに設置された) *NICER* X 線望遠鏡によって観測されたグリッチとグリッチの間の日数。

何年にもわたる観測により、パルサーの激しいグリッチ活動が明らかになり、グリッチ間のブレーキ指数の測定も可能になりました。特に、*RXTE* と *NICER* の両方の観測は、グリッチから遠く離れた時刻では、ブレーキ指数が約 7 であることを示唆しています。これはパルサーとしては非常に珍しい値であり、r モード\* 振動による重力波によって星がスピンドアウンしている場合に予想される値です。r モードは、回転する星に存在する一種の流体波であり、地球上のロスビー波のようにコリオリの力に起因するものであり、重力波を生成する可能性があります。実際、いくつかの理論では、すべての若いパルサーでは r モードによる重力波放出が活発に行われ、パルサー誕生時の速い回転速度から、現在観測される多くのパルサーが示す遅い回転速度になる原因と考えています。他の原因としては、減衰する磁場の影響などの可能性があります。ただし、ブレーキ指数 7 という測定結果は、PSR J0537-6910 が r モードによるスピンドアウンの最終段階にまだある可能性を示唆しているのです。

この仮説をテストするために、LIGO, Virgo および KAGRA の研究コラボレーションは、*NICER* チームと協力して、パルサー J0537-6910 からの r モード駆動の連続重力波探査を行いました。

LIGO の第 1 期と第 2 期観測 (それぞれ O1 と O2) の公開データを使用して、このパルサーから r モードを探査する試

みがすでに行われていましたが、これらの期間には、X線観測の併用ができていませんでした。今回の解析では、LIGOとVirgoの第3期観測期間のデータ（O3データセット）を利用しました。

O3データは、O1およびO2データよりもはるかに低いノイズレベルで、かなり優れた品質を備えており、さらにも最も重要なこととして、2017年以降のNICERによるPSR J0537-6910観測と観測期間が重なります。NICERのデータは、パルサーの回転速度を正確に記録しており、グリッチがいつ発生したのかが分かります。図2に示すように、グリッチ間の重力波データを注意深く分析することによって、弱い信号を最も感度の高い方法で探索することができるのです。重力波の周波数とパルサーの回転速度の関係は、星の質量と半径に依存し、それらが未知のため、正確にはわかっていません。そのために、ある程度広い重力波の周波数領域（約86~97Hz、[ここ](#)を参照）の信号を調べる必要があります。今回私たちは、2つの独立した方法を用いて探査しました。どちらも、グリッチ間のデータを、rモードによる重力波信号をモデル化した波形予測と照合する方法です。波形予測のテンプレートには、周波数と周波数の変化率の2つの未知のパラメータがあり、これらはブレーキ指数に関連しています。重力波信号の証拠は見つかりませんでしたが、この非発見の結果により、PSR J0537-6910のrモード駆動スピンドウンの理論モデルに厳しい制約を課すことができます。特に、星から放出される重力波の振幅に関する一連の上限を得ることができました。これは、この値を超えていたならば、今回の観測期間中に検出できていたはずだ、という値です。図3は、今回得られた重力波振幅の上限を、PSR J0537-6910のrモード駆動スピンドウンの理論モデルの予測と比較したものです。正確な振幅は星の未知の質量と半径に依存するため、これらの予測は幅をもった領域で表されています。

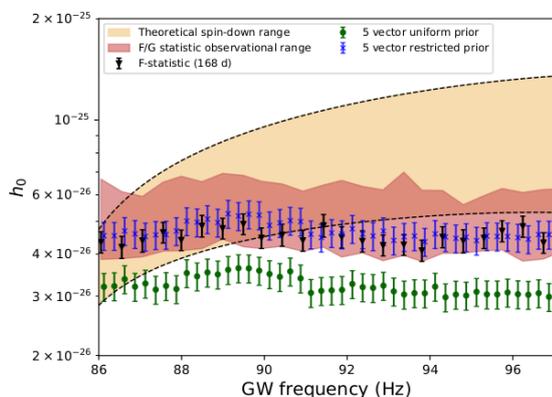


図3: いわゆるF/G統計法と5-ベクトル法を用いて得られた、重力波振幅  $h_0(f)$  (縦軸) の上限値を周波数 (横軸) の関数として描いたもの。破線の曲線は理論上のスピンドウン範囲を示し、暗い影付きの領域は今回の解析によって得られた制限を示しています。詳細については、論文を参照してください。

私たちの結果は、予測された領域を十分に調査していることを示しており、特に高周波数領域でのいくつかの検出方法では、得られた上限値が理論モデルによって示唆された重力波振幅をはるかに下回っています。図4に、中性子星の質量の限界に関する結果を示します。私たちの結論では、PSR J0537-6910が、rモードで重力波を放出する大質量中性子星である可能性を除外していますが、まだこのシナリオで小質量中性子星である可能性が残されています。次の観測期間（O4）は、2022年の後半に始まる予定であり、LIGO、Virgo、およびKAGRA検出器のネットワークによって、そしてうまくいけば、NICER X線望遠鏡のデータを活用してパルサー J0537-6910 からの重

力波を検索する新しい機会となるでしょう。

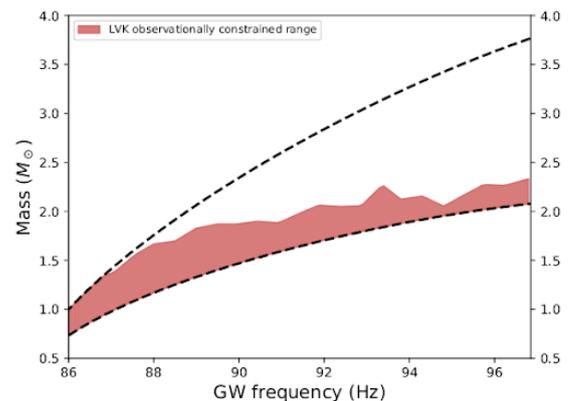


図4: rモードによる重力波放出が中性子星をスピンドウンさせている、と仮定したもとで得られたパルサー J0537-6910の質量の制限 (縦軸) を周波数 (横軸) の関数として描いたもの。影付きの領域は、今回の解析によって除外されなかった値を示します。

## 用語集

- **中性子星 (Neutron Star):** 太陽の質量の10倍から25倍の質量を持つ星が超新星爆発を起こした残骸。典型的な中性子星の質量は太陽質量の約1~2倍、半径は10~15キロメートルで、これまでに発見された中で最もコンパクトな天体の1つ。
- **連続重力波 (Continuous gravitational wave):** ブラックホール合体では、周波数が急激に上昇するごく短時間の重力波信号になるが、それとは対照的に、常に存在し、ほぼ一定の周波数を持つ重力波信号のこと。詳細については、[ここ](#)を参照のこと。
- **スピンドウン (Spindown):** 中性子星の自転が、電磁波や重力波の放出によって遅くなっていく割合。
- **大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud):** 天の川銀河から5万パーセクの距離にある矮小銀河。大マゼラン雲・小マゼラン雲とも南半球では肉眼で観測できる。
- **rモード (R-mode):** 星の周りを移動し、自転によるコリオリの力によって駆動される流体波。 [wikipedia](#) も参照してください。

## もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみよう。

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)
- [www.nasa.gov/nicer](http://www.nasa.gov/nicer)



無料で読める論文原稿は[ここ](#)から、またはプレプリントサーバ [arXiv:2104.14417](https://arxiv.org/abs/2104.14417) から。

このリーフレットの英語版は[ここ](#)。  
日本語版への翻訳：真貝寿明, 山本貴宏