

パルサーのしゃっくりは、重力波で聞こえるか？

2024 年、電波天文学者にとって古くからの親友の一つが、重力波探索にとって非常に刺激的な機会をもたらしました。ほ座 (Vela) パルサーと呼ばれる中性子星が「グリッチ」を引き起こしたのです。これは、本来は安定した電波信号に一種の「しゃっくり」が生じる現象です。パルサー・グリッチの背後にある物理プロセスは未だ完全には解明されておらず、関連する重力波を検出することは、この謎を解くための重要な一歩となる可能性があります。

パルサー・グリッチ

地球から約 1000 光年の距離にあり、年齢は 1 万年ほどしか経っていないほ座パルサーは、特に興味深い星の 1 つです。このパルサーは、巨大な星が一生の終わりに超新星爆発を起こした際に生じた極めて高密度の残骸で、極度に圧縮されて中性子星になったものです。また、非常に速く (1 秒間に 11 回以上) 自転し、非常に強い磁場 (地球の磁場の 1 兆倍以上) を持つため、強力な電磁波のビームを放射しています。この電磁波のビームが自転のたびに地球を通過する際、電波望遠鏡 (および他の波長で観測する望遠鏡) はパルス状の信号を捉えます。これがパルサーと呼ばれる理由です。パルサーは時間の経過とともにゆっくりとエネルギーを失い、自転速度が低下しますが、このエネルギー損失の一部は、連続的な重力波放射によって説明できる可能性があります。

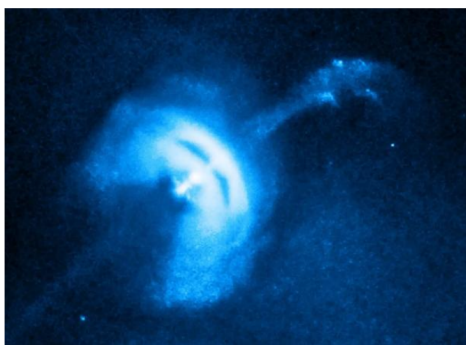


図 1: ほ座パルサーを取り囲む星雲とそこから噴き出すジェット。X 線画像 (NASA/CXC/トロント大学/M.Durant 他 提供) と可視光線画像 (credit: DSS/Davide De Martin) の合成。

しかし、ほ座パルサーの場合、この非常に規則的な一連のパルスは、約 2 年に一度、いわゆるグリッチと呼ばれる異常な特徴を示します。このグリッチでは、パルサーの回転が突然再び加速するのです。このようなグリッチは他のパルサーでも知られていますが、ほ座パルサーはグリッチが観測された最初のパルサーであり、これまでに知られている中で最も強いグリッチのいくつかを示し、さらにこの奇妙なしゃっくりを最も頻繁

に発生させるパルサーの一つです。それでもなお、望遠鏡による観測だけでは、グリッチは依然として非常に謎めいた現象です。これらの現象は、強力な「星震」、星内部の高密度領域における超流動効果、あるいはその両方に関連している可能性が高いのですが、詳細は依然として不明なのです。

LIGO と Virgo の重力波検出器が完全な観測モードに入っていた 2024 年 4 月下旬、電波望遠鏡によって、ほ座パルサーの大規模グリッチが観測されました。LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーション (LVK) が、この最新のグリッチに注目したのは言うまでもありません。ほ座は南天の星座であるため、このグリッチに関する正確な時刻情報を提供したのは、アルゼンチン電波天文学研究所とタスマニア大学プレザント山天文台の 2 つの電波望遠鏡でした。



図 2: この研究に参加している 4 つの観測所：アルゼンチンとタスマニアにある 2 つの電波望遠鏡と、米国の LIGO 重力波検出器 2 基。Credits: Argentine Institute of Radioastronomy, University of Tasmania, LIGO Laboratory (Caltech/MIT)

パルサー・グリッチが重力波を引き起こすのはなぜか？

中性子星は、その極めて高い密度と高速自転のため、重力波の発生源としても有望視されています。ゆっくりとしたスピンドウン（自転速度の減少）による微弱な長期信号に加え、パルサー・グリッチなどの激しい事象が発生するたびに、より強い信号が短時間で生成される可能性があります。実際、パルサー・グリッチが重力波を発生させる仕組みについては、いくつかのモデルが存在します。

まず、中性子星はさまざまな振動を伴い、鐘のように鳴り響くと考えられます。最も強い振動は「f モード」（基本モード）と呼ばれます。鐘をハンマーで叩くと響くように、グリッチは、このような f モードを引き起こす可能性があります。中性子星が振動すると、キロヘルツ帯の重力波が放出されると予想されます。これはほんの一瞬、長くても数秒間しか持続しません。

次に、グリッチは中性子星の形状を変形させる可能性があります。これは、静止しているパルサーのほぼ滑らかな形状から、しばらくの間、一種の「一時的な山」が形成される様子を想像してください。この変形が起こると、不均一になった自転によって重力波も放出されます。しかし、中性子星の巨大な重力により、この山は最終的に再び消滅します。これらの重力波は、f モードの重力波よりもはるかに低い周波数（パルサーの自転周波数の 2 倍、つまりほ座パルサーの場合は約 22 ヘルツ）で、f モードの重力波よりも弱いですが、数日、あるいは数ヶ月も続く可能性があるため、その全体的な影響を検出できる可能性は依然として高いと考えられます。

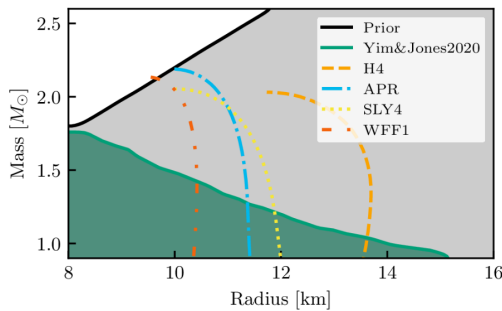


図 3: (論文の図 7) LIGO の重力波検出器が、ほ座パルサーの 2024 年のグリッチ以降に重力波を検出できなかったことから、重力波放射モデルの一部が正しくないか、この中性子星の特性によって重力波放出が弱めて弱かったことがわかります。特に、長時間信号に関する我々の結果は、グリッチ後のパルサーの電波放射に見られる特定の変化が「一時的な山」によって引き起こされたのではない、あるいは、もしそうだとすると、パルサーの質量やサイズがある値以下であることとなります。このグラフは、中性子星の半径（横軸）と質量（縦軸）におけるそれらの制限値を示しています。黒の実線の下幅広い領域は、当初検討した可能性のある値の集合であり、左下に向かう緑の網掛け部分は、長時間信号は観測されていないものの、検証したモデルによれば、山がいくつかの重力波を放射していると仮定しても生き残る領域です。破線と点線は、中性子星の質量と半径が互いどのような関係にあるかについてのいくつかの理論的予測に対応しています。

重力波探索

LIGO の検出器は第 4 回観測運転期間に非常に優れた感度を達成し、ほ座パルサーのグリッチのような事象によって引き起こされる重力波を初めて現実的に発見できる可能性が高まりました。この機会を捉えるため、グリッチ中に実際に何が起こるのか不明なことが多々あるにもかかわらず、何かを発見できるよう、さまざまな手法を組み合わせました。未知の物理や複雑な検出器ノイズパターンに対する堅牢性を確保するためには、信号の種類ごとに複数の異なる探索アルゴリズムを使用することが重要なのです。

数秒または数分程度の持続時間の信号を探索するために、3 つの異なるアルゴリズムを使用しました。これらのアルゴリズムは広い周波数帯をカバーし、特定の信号モデルを仮定しないため、予想される f モードだけでなく、摂動を受けた中性子星が放出する可能性のあるその他の短寿命信号にも感度があります。

さらに、30 分から最大 4 か月にわたる持続時間となるような長い信号用に設計された他の 4 つのアルゴリズムも用いました。これらは、たとえば「一時的な山」のシナリオから予想されるように、約 11 ヘルツと約 22 ヘルツの信号周波数に焦点を当てています。

初めて得られた物理的な制限、そして将来の展望

残念ながら、LIGO 検出器の現在の観測における記録的な感度にもかかわらず、ほ座パルサーからの重力波の確実な兆候はまだ見つかっていません。しかし、今回の一連の結果は重要なマイルストーンとなりました。十分な感度のおかげで、パルサー・グリッチ後の重力波に、物理的に意味のある制限を初めて課すことができたのです。グリッチの事象で放出されたすべてのエネルギーが重力波に変換されたならば、何らかの発見があったはずですが、この結果は、長時間信号のすべてに当てはまりません。一方、f モードの場合、1 キロヘルツ未満の低周波数でのみ新しい制限が当てはまりますが、現実的な中性子星モデルのほとんどは、より高い周波数での重力波放射を予測しています。

その結果、今回の探索で何も発見できなかったことから、ほ座パルサーについて得られた最良の知見は、「一時的な山」シナリオに対しての以下のどちらか、ということになります。グリッチ後にパルサーの電波放射に見られる特定の変化が、このような「一時的な山」によって引き起こされたという考えは正しくない。あるいは、この考えが正しく、このシナリオで予測された通りに重力波が放射されたとすれば、このパルサーは、この種のコンパクトな恒星残骸としては可能な限り小型で軽量の部類に入る。なぜなら、より大きく重い中性子星であれば、その「一時的な山」から放出された重力波信号は、私たちには発見できたはずだからです（図 3 参照）。

これらの結果は、他の中性子星観測（例えば、連星中性子星合体として有名な GW170817）の結果と矛盾しません。これらの観測結果から、ほ座パルサーは太陽よりも大きな質量を半径 15km 以下の球体に詰め込んでいることがわかります。これは地球上のほとんどの都市とほぼ同じ大きさです。

この画期的な結果から、重力波検出器の感度がさらに向上した将来には、パルサーのグリッチによって、より正確な制限が得られることが期待されます。そして最終的には、グリッチ

を起こしたパルサーからの重力波を直接検出することで、ほ座やその兄弟星がなぜこのような奇妙なしゃっくりを経験するのかという謎の解明に進むことでしょう。

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

<https://www.iar.unlp.edu.ar> (アルゼンチン電波天文台 [スペイン語])

<https://ra-wiki.phys.utas.edu.au> UTAS 電波天文台 (Mt. Pleasant Radio Observatory)

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイトでニュースを更新しています。

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>

- 本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/P2500086/public>

あるいは<https://arxiv.org/abs/2512.17990>

(日本語訳：真貝寿明，祖谷元)

用語集

- **電波天文学 (Radio astronomy)**: 地球上のラジオやテレビ信号に使用されているものと同様の長波長の電磁放射を用いた天文学の研究。
- **重力波 (Gravitational waves (GWs))**: 質量の大きい物体が加速することによって生じる時空の波紋。電磁波と同様に光速で伝わる。アインシュタインの一般相対性理論によって予言された。
- **パルサー (Pulsar)**: 「脈動する電波源」が由来で、磁極から電磁放射のビームを放射する、大きな磁化をもつ回転するコンパクトな星のこと。 [Wikipedia](#)
- **ほ座 (Vela) パルサー (Vela pulsar)**: 南天のほ座にあるパルサーで、超新星爆発の残骸。地球から約 1000 光年離れていて、地球に最も近く、最も明るく、最も活発なパルサーの一つとして知られている。このパルサーは単に「ほ座」と呼ばれることもある。パルサーに関する詳細情報とビデオツアーについては、[ここ](#)。
- **中性子星 (Neutron Star)**: 寿命を迎えた大質量星の遺物。大質量の星が核燃料を使い果たすと、超新星爆発として知られる壊滅的な状態で死滅し、中性子星が形成されることがよくある。あまりにも質量が大きすぎて密度が高いため、原子は地球上で通常観測されるような状態を保てず、中性子の塊になる。中性子星は太陽とほぼ同じ大きさの質量をもつにも関わらず、直径は 10 キロメートルほどしかない。 [Wikipedia](#)
- **パルサー・グリッチ (Pulsar glitch)**: パルサーの自転速度が突然変化する現象。この現象を引き起こす中性子星内部のメカニズムは、まだ完全には解明されていない。これは、重力波の探索を困難にする厄介なノイズ効果である検出器のグリッチと混同してはならない。
- **電磁波・電磁放射 (Electromagnetic radiation (EM))**: [可視光線](#)は赤から紫までの範囲だが、この範囲を超えても [スペクトル](#)が続く。赤色光を超えると赤外線、マイクロ波、電波があり、紫を超えると紫外線、X 線、ガンマ線がある。天文学者はスペクトルの異なる領域を用いて宇宙のさまざまな側面を観測する。しかし、スペクトルのどの領域でも暗くて観測が難しいことがある。 ([Wikipedia](#))
- **連続重力波 (Continuous gravitational waves)**: 極めて弱いながらも安定した重力波で、通常は小さな変形を伴う回転する中性子星から発生すると考えられている。私たちは、最近の LIGO データを用いて、ほ座パルサーを含む多くのパルサーからもこの重力波を探索し、観測された減速エネルギー損失のうち、重力波になるものは、1%未満であるだろうことを報告している。(詳細は、[こちら](#))
- **超流動 (Superfluid)**: 流体が粘性なしで流れる、特異な物質の状態。 ([Wikipedia](#))
- **キロヘルツ (Kilohertz (kHz))**: 1000 ヘルツの振動周波数。音波の場合、これは人間の可聴範囲の上限に相当し、重力波の場合も LIGO 検出器の感度の上限に相当する。そのため、最も感度の高い数百ヘルツという周波数よりも信号を見つけるのが難しくなる。
- **第 4 回観測運転 (Fourth observing run (O4))**: LIGO-Virgo-KAGRA ネットワークの重力波検出器がデータを取得していた、2023 年 5 月から 2025 年 11 月までの観測期間。
- **ライゴ (LIGO)**: 米国にある 2 つの重力波検出器から構成されるレーザー干渉計重力波観測所。1 つはルイジアナ州リビングストンの近くにあり、もう 1 つはワシントン州ハンフォードの近くにある。どちらの検出器も、直交する 2 本の 4 km の長さの腕を備えた大規模なレーザー干渉計。 ([Wikipedia](#))