

## O4a 観測期間の初期データにおける超新星残骸からの連続重力波の探索

中性子星は、宇宙で最も特異な天体の一つです。中性子星は、質量の大きい恒星が、いわゆる**重力崩壊型超新星爆発**で死ぬときに生まれます。この爆発は恒星を引き裂き、**超新星残骸**と呼ばれる美しい散光星雲を残します（[図 1](#) 参照）。中性子星は若いうちは超新星残骸の中心付近に位置し、残骸が星間物質へと膨張するにつれて徐々に遠ざかっていきます。



図 1: 左: 私たちの研究するターゲット天体の中で最も若い残骸である、約 50kpc 離れた大マゼラン雲に位置する SNR 1987A. ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) の NIRCcam が捉えたもの。JWST は、残骸の中心付近に中性子星が存在し、残骸内部の物質を加熱しているという証拠を積み重ねて示している。画像提供: NASA, ESA, CSA, Mikako Matsuura (カーディフ大学), Richard Arendt (NASA-GSFC, UMBC), Claes Fransson (ストックホルム大学), Josefin Larsson (KTH). 画像処理: Alyssa Pagan (STScI). 右: 私たちの銀河系内にある最も若く、最も明るい既知の重力崩壊型超新星残骸の一つ、カシオペア A. チャンドラ X 線観測衛星が捉えたもの。中央の白い点は、超新星爆発後に残された中性子星であると考えられている点状の X 線源で、「中心コンパクト天体」として知られている。画像提供: X 線: NASA/CXC/明治大学/佐藤寿紀 他; 画像処理: NASA/CXC/SAO/N. Wolk

中性子星は極めて高密度の天体で、**太陽の質量**を超える質量が一つの都市ほどの大きさに凝縮されています。その構造と根底にある物理法則は、科学における最も興味深い未解決問題の一つであり、天体物理学、原子核物理学、素粒子物理学、そして**凝縮物物理学**の分野から関心を集めています。また、中性子星は宇宙で最も強力な磁石です。驚くほど高速で自転し、中には 1 秒間に数百回自転するものもあります。中性子星は、自転軸の周りを 1 回転するごとに 1 回または 2 回、地球の視線方向を横切る光パルスを放射するため、これまでほとんどは「**パルサー**」として発見されています。しかし、すべての中性子星がパルサーとして検出されるわけではなく、その

内部構造は、地表および宇宙で最も感度の高い**電波望遠鏡**でさえも解明するには及びません。**連続重力波**は、これまで見逃されていたパルサーを発見し、その特異な内部を探るための新たな手段となります。

連続重力波は、中性子星が自転する際に放射する、安定して長時間継続するの時空のさざ波です。この信号は、完全に対称ではない中性子星（微小な歪みや「山」をもつ中性子星）から発生します。対称性からのずれが大きいほど、**重力波の歪み**が大きくなり（つまり、より強い信号に）なります。このような星は、少し変形したラグビーボールのような三次元の楕円体をしているため、「三軸」と呼ばれます。連続重力波は星の自転周波数の 2 倍で放射されると予想されており、その検出は未発見のパルサーを見つけるのに役立つでしょう。

Advanced LIGO, Virgo, KAGRA の検出器にとって、若い超新星残骸に位置する中性子星は連続重力波の重要なターゲットです。今回の論文では、2023 年 5 月から 2024 年 1 月までの 8 ヶ月間のデータ（略して O4a と呼ばれる Advanced 検出器の第 4 回**観測運転**期間の最初のパート）を用いて、若い超新星残骸から中年程度の超新星残骸 15 個（うち 14 個は銀河系内、1 個は隣の銀河である大マゼラン星雲内）から連続重力波を探索した結果を報告しています。

現在、**突発的なバースト**による重力波は定期的に観測されていますが、**連続重力波**の検出はそれよりもはるかに困難です。連続重力波信号は、中性子星やブラックホール合体で観測されるバーストよりもはるかに弱く、しばしば数桁も弱いと予想されるため、検出が難しいのです。現在まで、私たちは連続重力波信号を検出できていません。もし検出できれば、中性子星がどのような形状なのか、そして宇宙で最も極端な密度と磁場をもつ状況で物質がどのような状態にあるのかを理解するための大きな進歩となるでしょう。また、これまで見逃されていたパルサーを発見することも可能になるでしょう。しかし、連続波を検出するには、長期間にわたってデータを収集し、信号モデルに合致するような、小さいながらも持続的な変動を探すという忍耐強い努力が必要です。さらに、最適なターゲット天体を選ぶ必要もあります。

私たちの銀河系には多くの超新星残骸があります。本研究では、誕生してから約 40 年 (**SN 1987A**) から数万年までの若い超新星残骸を 15 個を選びました。これらの超新星残骸には、自転周波数がまだ不明な若い超新星が存在する可能性があります。これらの比較的若い年齢の中性子星候補天体では、古い中性子星よりも局所的な変形をもつことが期待されます。なぜなら、中性子星がまだ十分な時間をかけて安定しておらず、変形が滑らかになっていないためです。若い中性子星は自転速度も速く、より大きな重力波歪みを生み出します。しかし、中性子星の自転速度は不明なため、主に天体の年齢と検出器の感度範囲を考慮しながら、広範囲の周波数を探索する

必要があります。若い中性子星は回転エネルギーを失い、時間の経過とともに減速します（スピンドアウン）。そのため、スピンドアウン率のとりうる範囲も含めて探索する必要があります。また、自転周波数の測定が行われた孤立中性子星の観測から、自転周波数に小さなランダムな変動が発生することが示唆されています。

通常の探索（「コヒーレント」探索と呼ばれる）では、観測時間全体にわたって信号がどのように見えるかを示す予測波形（テンプレート）を作成し、それらを観測データと照合します。正しい予測波形を用いて、かつ予測波形の数が多すぎないのであれば、コヒーレント探索は非常に感度が高くなります。しかし、今回の探索では、周波数推定値のないターゲット天体が15個あり、それらのターゲットは自転周波数を変化させたり、小さくてランダムな周波数変化を起こしたりする可能性があります。このような状況では、コヒーレント探索は計算負荷が大きすぎます。そこで、O4aデータを効率的に探索するために、4つの「準コヒーレント」手法を使用しました。準コヒーレント探索では、データを小さなブロックに分けてコヒーレント探索を適用し、それらを結合して観測時間全体をカバーします。データブロックが小さいほど、探索に必要なテンプレートの数が少なくなるため、準コヒーレント探索は計算効率がはるかに高くなります。さらに、私たちは、5つ目の解析プログラムとして、「相互相関」パイプラインを用い、ハンフォードとリビングストンの2つのLIGO検出器から20~1726 Hzにわたって折り畳まれたデータを結合・比較しました。このパイプラインは、事前に特定の波形パターンを仮定しない「モデル非依存」アプローチを採用しており、SN 1987AやカシオペヤAを含む4つの有名な若い超新星残骸のデータに適用しました（図1参照）。

残念ながら、どの探索でも連続重力波信号は報告されていません。しかし、検出されなかったからといって、結果がないわけではありません。探索の感度（検出効率）を推定し、そこから探索した星の特性を推測することができます。例えば、信号強度に制限を設けることで、対象となる中性子星の変形の上限値を制限できます。中性子星の非対称性は、楕円率を表すパラメータ $\epsilon$ で表されます。中性子星のモデルによって楕円率の上限は異なりますが、ほとんどのモデルでは $\epsilon < 10^{-6}$ と予測されています。図2の左のグラフに、いくつかのターゲット天体に対する楕円率の上限を示します。縦軸は、今回の探索で得られた $\epsilon$ の95%上限値です（95%上限値とは、大まかに言えば、パラメータの真の値がこの上限値以下であることが95%確実であることを意味します）。横軸は重力波の周波数で、これは楕円率に2つの影響を与えます。第一に、特定の周波数における重力波の強さは、楕円形の星になるほど大きくなります。第二に、LIGO, Virgo, KAGRAの感度は周波数に依存するため、重力波の強さに対する上限値は全周波数範囲にわたって変化します。私たちは、楕円率を理論上の最大値（ $\epsilon < 10^{-6}$ ）以下に制限することができました。この新しい上限値によって、中性子星の特性を予測するいくつかの物理モデルを除外できるようになります。

三軸中性子星だけが連続重力波を生成する中性子星なのではありません。自転することによって、中性子星内のrモード振動を通じて連続重力波が生じる可能性があります。その振動スケールは振幅 $\alpha$ というパラメータで表されます。振動スケールの理論的な上限は $\alpha < 10^{-3}$ です。楕円中性子星による重力波の強さの限界は、図2の右グラフに示すように、 $\alpha$ の限界値に変換できます。縦軸は $\alpha$ の95%上限、横軸は重力波周波数(Hz)です。

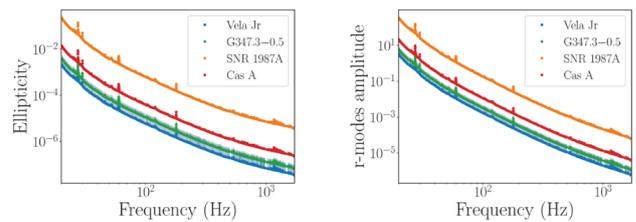


図2: 論文で報告した解析の一部で、ターゲット天体に対する、中性子星の楕円率 $\epsilon$ （左）とrモード振幅（右）の95%上限値。横軸は対応する重力波信号の周波数、縦軸は楕円率（左）／rモード振幅（右）の95%上限値である。青（Vela Jr）、緑（G347.3-0.5）、オレンジ（SNR 1987A）、赤（Cas A）の曲線は、楕円率（左のグラフ）または振幅（右のグラフ）の持ち得る最小値を示している。これは、中性子星がどれだけ楕円か、あるいはどれだけ強いrモードを持ち得るか、を与える上限値である。もし中性子星がこれよりも大きな楕円率を持つならば、おそらく検出できたと考えられる。同様に、もしrモードがこれよりも強ければ、おそらく観測できたと考えられる。このプロットのSNR 1987A（最も若いターゲット天体）の曲線は、O3aに対する解析では用いられなかった5番目の相互相関パイプライン（本文中で説明）の結果である。

結果として、SNR 1987Aも含めて、探索したどの残骸からも連続重力波信号は観測されませんでした。しかし、O4aデータに適用した5つの異なる相補的な探索手法により、連続重力波の強さについてこれまでで最も強い制限値を設定することができました。これにより、O3a以前の結果が改善され、若い超新星残骸からの連続重力波に対する感度が新たなレベルに引き上げられました。最も厳しい制限値が得られたのは、近隣の有名な超新星残骸であるVela Jrに対してです。これにより、中性子星の凹凸の程度や、ある種の内部波（あるいはrモード）の強度を知る助けになります。Vela Jrの場合、これらの凹凸は約1000万分の1未満、rモードは400 Hz以上の周波数において約10万分の1未満であることとなります。これらは、超新星残骸からの連続重力波に対するこれまでで最も感度の高い広帯域周波数探索の結果となりました。

データ収集が継続され、手法と感度が向上するにつれて、連続重力波の初検出は近づいてきます。それまでは、非検出という結果に基づいて物理モデルを制限し、探索の検出効率をさらに高めるよう努めていくことになります。

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



- 本発表の論文  
<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500356>  
 あるいは<https://arxiv.org/abs/2603.25808>
- 連続重力波についての解説は[こちら](#)

（日本語訳：真貝寿明，山本貴宏）