

O4a 期の観測：45 個の既知のパルサーからの連続重力波は観測されず

LIGO-Virgo-KAGRA コラボレーション（以下、LVK 共同研究チーム）は、中性子星からの極めて微弱な連続重力波 (continuous gravitational waves) の新たな探索結果を発表しました。2023 年 5 月から行われている第 4 期観測の初期 (2024 年 1 月まで) の期間 (O4a) のデータに対するこの探索は、ブラックホールの合体などの劇的なイベントではなく、安定し、孤立した物体から放出される重力波を捉えるという研究に、新たな一歩を踏み出したこととなります。連続重力波は微弱で安定したほぼ周期的な信号であり、ブラックホールを除けば宇宙で最も密度の高い物体である中性子星の内部について教えてくれるかもしれません。



図 1: X 線と可視光線領域で見える「かに星雲」(Crab Nebula)。写真の中央がかに星雲。Image credit: X-ray : NASA/CXC/ASU/J. Hester et al.; optical : NASA/HST/ASU/J. Hester et al.

連続重力波とは？ その重要性とは？

重力波は、巨大な物体が加速度運動することによって引き起こされる時空のさざ波です。これまでに、LVK 共同研究チームは、ほぼ 100 の重力波信号の検出を発表していますが、それらのほとんどは連星ブラックホールの合体からのものです。しかし、これらの爆発的な現象とは異なり、連続重力波は個々の中性子星が小さな「欠陥」を持つことから発生すると考えられています。中性子星は、超新星として爆発した巨大な星の残骸です。爆発後に残された非常に高密度のコアであり、直径わずか 20 キロメートルの球体に、太陽よりも重い質量を詰

め込んだような天体です。これらの中性子星の 1 つに小さな隆起や変形があれば、自転しながら微弱で周期的な重力波を放出する可能性があります。このような重力波を検出できれば画期的な発見となり、研究者は中性子星の「剛性」と構造を研究して、極限状態にある物質に関する新しい情報を解明することにつながります。

なぜパルサーを扱うのか？

パルサーは連続重力波探索にとって特に興味深いターゲットです。パルサーは強力な磁場を持つ中性子星で、さまざまな周波数帯域（電波、X 線、ガンマ線）にわたる電磁波のビームを放射します。パルサーが回転すると、これらのビームは宇宙の灯台のように空間を照らし、地球方向を向くたびにパルスを地球に届けます。複数の天文台によるパルサーの電磁気観測により、パルサーの天球面上の位置、自転速度、およびその時間的変化に関する正確な情報が得られます。この情報により、パルサーは連続重力波探索の主要候補となります。連続重力波が出現する可能性のある周波数範囲に正確に焦点を合わせることができるとのことです。今回の探索では、LVK 共同研究チームは 45 個の既知のパルサー（図 2 を参照）に焦点を当て、それらから発せられる微弱な連続重力波を探しました。研究チームは、2 つの異なる理論放射モデルを検討しました。自転周波数の 2 倍での連続重力波放射モデル（単一高調波モデル）と、スピン周波数の 1 倍と 2 倍の両方での連続重力波放射（二重高調波放射モデル）モデルです。

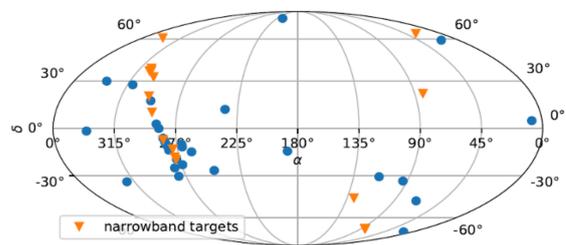


図 2: 今回解析したパルサーの天球面上の位置。

どのような探索をしたのか。

LVK 共同研究チームは、重力波の探索に世界で最も感度の高い観測装置を使用しています。その装置とは、高度で精密

なレーザー干渉計で、時空の非常に小さなゆがみを検知することができます。しかし、その感度をもってしても連続重力波の検出は極めて困難です。連続重力波は非常に微弱であるため、検出器由来のノイズに埋もれていることが予想されるため、研究者はノイズを深く掘り下げるために高度なアルゴリズムとデータ分析技術に頼らなければなりません。チームは、さまざまな天文台から得られていた各パルサーの位置と自転に関する詳細な情報を使用しました。これはマルチメッセンジャー天文学の1つの例といえます。つまり、電磁波による天体観測で得られた各パルサーからの情報を用いて、連続重力波探索のターゲットを絞ることで検出可能性を高めます。このようなターゲットを絞った探索と対照的なのが「全天探索」です。「全天探索」では、研究者は天球面全体にわたってあらゆる信号を探しますが、その信号がどこから来るかはわかりません。今回は、既知のパルサーをガイドとして使用することで、研究者は予想される重力波の到来方向および周波数に焦点を当てることができます。ターゲット検索は最も感度の高い分析ですが、考慮される放射モデル、つまり、信号の特性を予想する連続重力波放射の物理モデルに大きく依存します。

何がわかった？

O4a 観測期間のデータの分析では、LVK 共同研究チームは解析した 45 個のパルサーからの明確な連続重力波信号を検出することはできませんでした。しかし、それでも私たちの結論は価値がありました。検出可能なはずの連続重力波が見つからなかったことから、中性子星の変形、つまり「楕円率」がどの程度の大きさになるかについて、新しい制限（いわゆる上限値、図3を参照）をつけることができたのです。つまり、中性子星の変形が小さすぎて検出可能な重力波を生成できなかったとしても、これらのパルサーの変形の最大値についてより正確な推定値を得ました。私たちの近くにある明るいミリ秒パルサー J0437-4715 の場合、楕円率に対する最も強い制限は約 9 ppb (ppb は 10 億分の 1) で、中性子星の半径を 10 km と仮定すると、変形は 100 ミクロン未満となるのです！

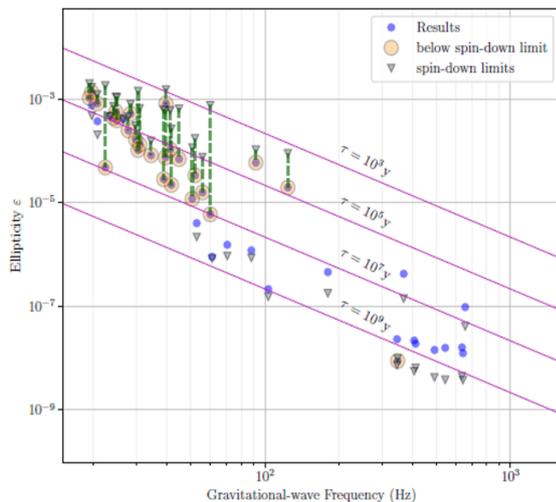


図 3: 青い円: 予想される連続重力波周波数の関数としての各パルサーの楕円率の観測的上限。灰色の三角形: パルサーの自転周波数の減少が完全に連続重力波放射によるものであると仮定した場合の楕円率の理論的な上限。

次はどうなる？

連続重力波信号は依然として捉えにくいものですが、探索を重ねるごとに検出に近づいています。感度が向上するごとに、いつか連続重力波信号を捉えられる可能性が高まり、それとともに宇宙を研究する新しい方法も生まれます。LVK 共同研究チームは今後も技術を改良し、検出器の感度を高めて観測を続け、連続重力波信号の検出に向けて邁進していきます。その過程では、中性子星がどれだけ変形できるかという知識が更新され続けるという意味で、連続重力波が検出されなかったという事実も非常に興味深いものになります。連続重力波の探索は長期戦であり、研究を重ねるごとに、中性子星からの微弱で安定した重力波放射の検出に近づいていきます。これらの重力波が検出されれば、宇宙で最も神秘的な物体に関する確かな情報が得られ、極限密度の物質に何が起こるのかという大きな疑問に答えるのに役立つことになるでしょう。

用語集

- **連続重力波 (Continuous gravitational waves):** わずかに変形した中性子星の自転によって発生すると考えられている周波数がほぼ一定の重力波信号。
- **中性子星 (Neutron star):** 超新星爆発後に残された非常に高密度な星。
- **パルサー (Pulsars):** 中性子星の1つのタイプで、強い磁場をもち、自転によって電磁波のビームを恒常的に発する星。地球から観測すると、パルスを発していることが観測される。
- **楕円率 (Ellipticity):** 中性子星の形状がどれだけ完全な球から変形しているのかを示す量。連続重力波の強度の目安になる。

さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでも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/P2400315/public/>

あるいは<https://arxiv.org/abs/2501.01495>

(日本語訳：真貝寿明，山本貴宏)