

宇宙の重力が奏でる交響曲の中で踊るパルサーを探す

すべての重力波が同じというわけではありません。ブラックホールや中性子星の衝突によって発生し、時空に波紋が広がるように伝わるものがあります。一方、本研究で解析するもののように、はるかに弱けれども、はるかに長く持続するものもあります。これらは**連続重力波**と呼ばれます。連続重力波は、完全な球の形をしていない中性子星が自転するのにもなって放射する、安定した宇宙の「鼓動」です。中性子星は、太陽の約 10~25 倍の質量を持つ**大質量星**が**超新星爆発**でその生涯を終えた後に残る、高密度でコンパクトな星です。直径は約 20 キロメートルですが、太陽よりも大きな質量を持ちます。その中には 1 秒間に数百回自転するものもあり、星の形状が完全に対称でない場合、このわずかな不完全さが連続重力波を放出する原因となります。中性子星が**連星系**の一部である場合、その信号はより複雑になりますが、同時により強くなることもあります。これは、伴星から**降着**によって運ばれた質量が自転を加速させ、重力波信号を強くするためです。

中性子星は宇宙で最もコンパクトな天体の一つであり、そこから放出される連続重力波を検出できれば、極限環境下における物質の物理に関する貴重な知見が得られると考えられます。天文学者たちは、私たちの銀河系には約 1 億個の中性子星が存在すると推定していますが、実際に確認されているのはわずか数千個です。この矛盾を解消することが、本研究で述べるような探索の主な目的の一つです。

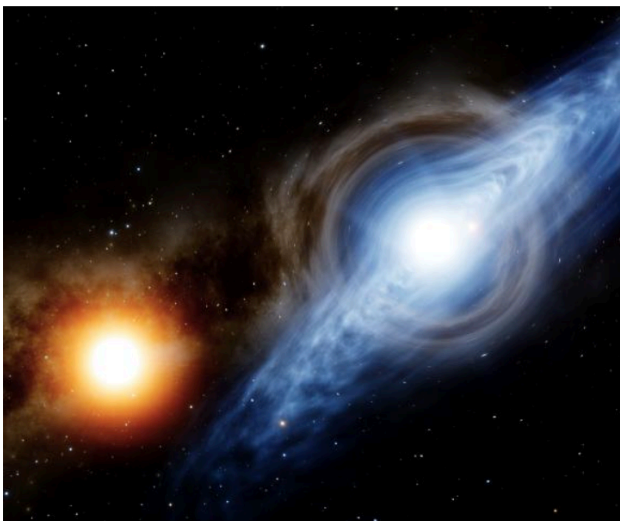


図 1: 連星系における中性子星 (右) と伴星 (左)。出典: SpaceEngine シミュレータ。

連続重力波信号をどのように探す？

中性子星が完全な球形から外れれば外れるほど、強い連続重力波が放出されます。これらの微弱な信号を見つけるために、研究者たちは、LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 重力波検出器のデータを調べ、天の川銀河の中性子星からの連続重力波の証拠を見つけようとしています。

本研究は、LVK の第 4 回**観測運転**の最初の期間 O4a (2023 年 5 月から 2024 年 1 月) のデータを用いて、連星系に存在する未知の中性子星に焦点を当てました。私たちは、あらゆる発生源の位置を考慮し、全天において 100 Hz から 350 Hz の周波数帯の信号を探しました。この周波数帯は、O4a 観測期間の中で最も感度の高い帯域に相当します。

中性子星からの連続重力波信号は、波源の座標系では単一の安定した周波数として生成されます。しかし、私たちの検出器は、地球と共に回転し、太陽の周りを公転しているため、観測する信号には**ドップラー変調**が生じます。連星系における中性子星の場合、自身の軌道運動がドップラー変調を加えます。この「二重ドップラー」効果により、信号の周波数は特徴的なパターンで変調されます。

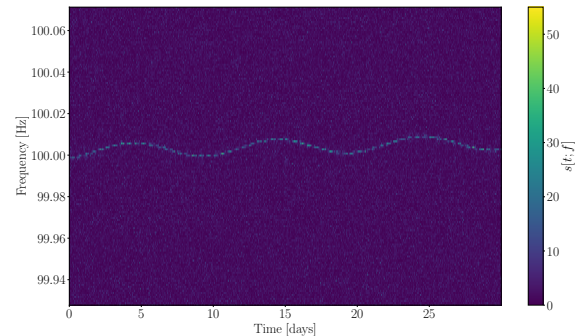


図 2: 模擬連続重力波信号を表すスペクトログラム (周波数・時間空間における、重力波信号の周波数の時間発展の履歴)。この例は、1 秒間に 50 回転する中性子星が伴星の周りを 10 日周期で周回しているもの。振幅変調は、天空の該当部分に対する検出器の感度が日々変化するために生じる。

中性子星の軌道上の運動を記述するために、私たちは 3 つのパラメータを用いました。投影軌道長半径 (地球から見た軌道の大きさ)、軌道周期 (1 周するのにかかる時間)、そして軌道位相 (特定の時刻における軌道上の位置) です。今回の探索では、投影軌道長半径を 5~15 光秒、軌道周期を 7~15 日としました。これらの範囲には、多くの既知の中性子星が見つかっています。

私たちは、連続重力波検索を、GPUを用いて高速化するために設計された **FastTracks** という新しい解析ツールを使用しました。FastTracks は、時間・周波数データ内の信号履歴が連

続重力波信号として期待されるように振る舞っているかどうかを検証します。

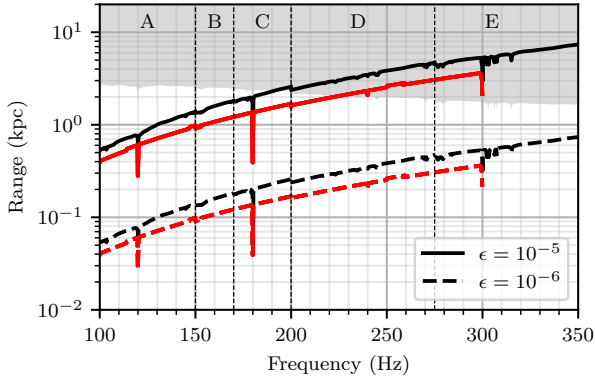


図 3: キロパーセク (kpc) を単位として観測可能な最大範囲を周波数の関数として示したもの。2つの黒い曲線は、中性子星の楕円率の異なる値を表している。楕円率が大きいほど、より強い連続重力波が生成される。灰色の網掛け部分は、今回の探索では対象外となる自転減速率を示す。今回の探索結果(黒)と比較できるように、前回の探索(O3a BinarySkyHough 探索)の結果を赤で示す。

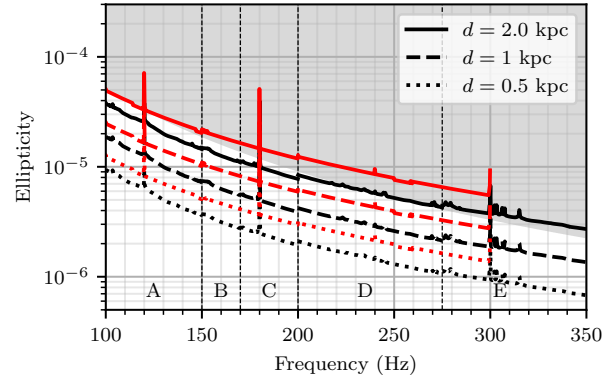


図 4: 今回の非検出結果から得られる、中性子星に許容される最大変形(楕円率)を周波数の関数として示したもの。曲線は、異なる周波数において、中性子星がどの程度変形すれば、今回の探索で検出可能となる連続重力波を生成できたかを表す。網掛け部分は、今回の探索では対象外となる自転減速率を示す。今回の探索結果(黒)と比較できるように、前回の探索(O3a BinarySkyHough 探索)の結果を赤で示す。

私たちの探索は、1024 秒ごとの短時間 **フーリエ変換** (SFT) を用いて、時間・周波数空間で行いました。探索は2つのステップで構成されます。まずデータに **ハフ変換** を適用し、**スペクトログラム** 内の持続信号を探索します。次に、最も有望な信号履歴について、SFT による強度履歴を用いて再計算を行いました。

探索感度と天体物理学的示唆

今回の探索では、連続重力波信号の証拠は見つかりませんでした。しかし、この非検出結果から、私たちの探索の感度、つまり、もしそのような信号が存在していたとしたら、どれほど遠くまで検出できたのかを決定することができます。そのために、数千の連続重力波の模擬信号をデータに注入し、解析によってそれらがどの程度頻繁に検出されるのかを計算しました。そして、これらのテストから、私たちの探索で検出できる最小の信号振幅を求めました。その結果、今回探索したこのパラメータ空間において、これまでで最高の感度を達成していたことがわかりました。

私たちの探索感度を2つの方法で示します。図 3 は、**楕円率** (星の形状が完全な軸対称性からどれだけずれているかを示す指標) のさまざまな値に対して、今回の探索で中性子星を検出できたであろう最大距離を示しています。変形の大きい星はより強い連続重力波信号を生成するため、より遠くのものを検出できます。図 4 は、同じ結果を別の視点から示しています。これは、私たちの探索で検出されない中性子星の最大許容変形率を、周波数の関数として示したものです。私たちの探索では、中性子星の **自転減速率** (スピンドアウン率; 波源から放射される重力波の周波数の変化) は、無視できるほど小さいものと仮定しています。どちらの図でも、網掛け部分は、今回の探索範囲の想定を超えた自転減速率の場合を示しています。

これらの結果は、探索された軌道パラメータの範囲に限りますが、連星系における未知の中性子星からの連続重力波信号に対して、これまでで最も厳しい制限を与えるものです。この結果は、O4a 観測運転中の検出器の感度向上と、新しい FastTracks パイプラインの最適化された性能という2つの重要な要素によって可能になりました。

た。たとえ非検出であっても、このような制限は、私たちの銀河系における未知の中性子星のもつ特性を絞り込むため、価値があるのです。

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



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/P2500437/public>

(日本語訳：真貝寿明，伊藤洋介)

用語集 (ABC 順)

- **降着 (Accretion)**: 重力の作用によって束縛された連星間の物質の移動。落下する物質は角運動量保存則にしたがって通常**降着円盤**を形成する。この円盤では、ガスは中心に向かって螺旋を描き、重力エネルギーが熱エネルギーに変換されることによって加熱される。
- **連星系 (Binary system)**: 重力によってペアになった2つの天体からなる系。 ([Wikipedia](#))
- **連続重力波 (Continuous gravitational waves)**: ほぼ一定の周波数で長時間持続する重力波。このような波は、例えば完全な軸対称性からわずかにずれた高速回転する中性子星などによって生成される。この重力波は非常に弱いですが、観測時間よりもはるかに長い時間スケールにわたって持続する。これにより、長時間データを解析して、ノイズから弱い信号を分離することができる。これは、強力だが短寿命の信号が放出されるコンパクト連星合体などの他の重力波現象とは異なる。
- **楕円率 (Ellipticity)**: 天体が球体からどれだけ変形しているのかを示す量。赤道面での変形を、赤道面と直交する方向の変形との比として表したもの。
- **FastTracks (ファーストトラック)**: 連続重力波信号の検出統計量を計算することに特化して設計された超並列エンジン。GPU を用いて短時間フーリエ変換データを処理している。
- **グラフィックス・プロセッシング・ユニット (Graphics Processing Unit (GPU))**: 大規模並列化を利用したデータ処理に適した特殊なハードウェア。
- **ハフ変換 (Hough transform)**: スペクトログラムで示されるような画像の中の、特定の形状を検出するアルゴリズム。 ([Wikipedia](#))
- **キロパーセク (Kiloparsec (kpc))**: 1000 パーセク。 **パーセク** は、天文学における距離の単位の1つで、およそ3光年あるいは30兆キロメートル。
- **光秒 (Light-second)**: 光が1秒間に進む距離。 ([Wikipedia](#))
- **大質量星 (Massive star)**: 太陽の8倍以上の質量を持つ恒星で、超新星爆発後に中性子星を形成することができる。これより質量の小さい恒星の場合、残骸は白色矮星になる。
- **中性子星 (Neutron Star)**: 太陽の質量の8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。
- **観測運転期間 (Observing run)**: 重力波検出器が天体観測のためにデータを取得している期間。
- **スペクトログラム (Spectrogram)**: 周波数成分の時間変化を表した図。 ([Wikipedia](#))
- **自転減速率 (Spindown rate)**: 中性子星が電磁波や重力波の放出によってエネルギーを失い、自転速度を落とす割合。