

あなたは私を（星のように）回転させる： 未知の連星中性子星からの連続重力波の探査¹

中性子星*（下記の用語集参照）は超新星爆発の産物であり、太陽質量の10倍から25倍の質量をもっていた元の星の残骸です。このコンパクトな天体は、典型的な半径が10 kmで、質量が太陽と同じ位であるため、中性子星を構成する物質は、これまでに観測されたなかで最も極端な環境の1つになっています。中性子星の構造や構成の研究は、素粒子物理学と天体物理学の双方が学際的に活発に研究する分野になっています。

中性子星の極端なコンパクトさ（または密度）は、重力波放出などの相対論的効果をテストする興味深い実験室になります。実際、Advanced LIGO および Advanced Virgo の重力波検出器は、2つの中性子星の合体によって発生した重力波イベントを複数検出しています。それらの検出の1つであるGW170817は、電磁波（光）の対応物を伴っていて、マルチメッセンジャー検出と呼ばれるような、重力波と光のどちらからも観測された初めてのイベントとなりました。

連続重力波*は、高速で回転する中性子星の内部構造を調べることができるもう1つの手段です。中性子星は、外側の地殻の不完全さ、内部構造にみられるわずかな振動、または対称軸と回転軸の方向のずれによる自由歳差運動のいずれかのために、対称形状からのずれを維持できると理論付けられています。中性子星が急速に回転すると、そのようなずれ変形は連続重力波を発生させます。この重力波は、連星天体の合体時に生成されるものよりも数桁弱いものですが、長期間（数か月から数年）持続するため、長いデータを積分することによって、大きなシグナル・ノイズ比でデータを取得することができます。

このタイプの重力波信号の探査は、潜在的な波源に応じた方法が異なります。たとえば、天空上の位置と回転周波数がすでに電波望遠鏡によって知られている中性子星に対してはターゲット探査と呼ばれる方法が採られます。未知の中性子星があると考えられる方向には、その方向を集中的に調べる方向探査が採られます。今回の論文では、全天探査の結果を報告します。天空の任意の方向から来る完全に未知の中性子星から

の連続重力波信号を探した結果です。とくに、未知の連星中性子星*に焦点を当てた結果です。孤立した中性子星が生じさせる重力波は、長時間をかけながら周波数がゆっくりと減少していく信号だと予想されます。周波数が減少するのは、電磁波放射や重力波放射などのさまざまなエネルギーの放出によるためです。このスピンドアウン*効果は、今回の探査で対象とする中性子星の母集団を考えると、無視できるほど遅いものです。地球上の検出器の観点からみると、重力波信号は地球の自転と公転による周波数変調を示します。この信号は、連星系の中性子星の場合には、伴星をまわる重力波源の相対運動によって生じるドップラー変調*も考慮する必要があるため、さらに複雑になります。

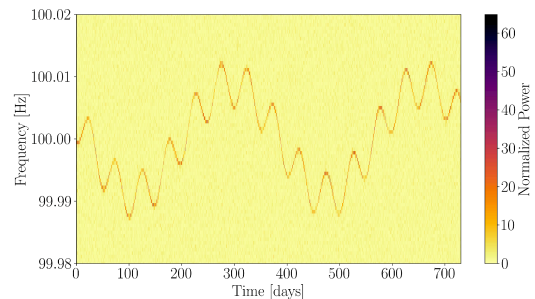


図1: スペクトログラムに見られると考えられる強い連続重力波の形。1秒間に50回自転する変形した中性子星が50日の公転周期で伴星を周回することを仮定したもの。天体の自転周波数の2倍である100Hzの重力波信号が得られることになる。365日の周期性を持つ最も長い振動は、地球の公転によって引き起こされるドップラー変調に対応する。周期が50日の短いものは、伴星をまわる連続重力波源の軌道運動に対応する。説明のために、データ表示している期間（2年）は、実際の探査で使用した期間（6か月）よりも長くなっている。

今回の探査では、重力波信号のスペクトログラム*に対して、BinarySkyHough（バイナリースカイハフ）と呼ばれるハフ変換*の一種を用いました。スペクトログラムは、データの中で最も顕著な周波数を時間軸に沿って示します。基本的な考え方は、連続重力波信号が、図1に示されているように、非常に特徴的な形で変調する様子をスペクトログラムで明確に示すだろ

¹訳者注：原題は、You spin me round (like a star) で、1980年代のDead or Aliveによる歌You spin me round (like a record)に掛けている。

う、というものです。変調の強さは、回転周波数や天空上の位置のような、対象としている重力波源の物理的な特性に関係したパラメータを用いて説明できるので、連続重力波の探査は、データの中に予想される変調を特定する作業になります。

連星軌道の形状を表すパラメータが含まれているため、今回の探査は、単一の中性子星を探す場合よりも多くのパラメータを探索する必要があります。これは、一般的な検索アルゴリズムを用いると、計算コストが膨大になり、問題を引き起こします。簡単な解決策は、グラフィックス・プロセッシング・ユニット (GPU) * を使用して効率を上げる方法でした。GPU は、大量の計算を並行して実行することで、単純な計算を高速化することができるからです。

私たちは、2019年4月から9月までの6か月間の、AdvancedLIGO および AdvancedVirgo 検出器の第3期前半の観測データを用いて、検出器の最も感度の高い帯域での、未知の連星中性子星を波源とする連続重力波を探索しました。連続重力波信号の証拠は見つかりませんでした。その結果として、予想していた重力波信号の母集団設定を検討することにより、今回の探査の感度を推定しました。探査の感度は、私たちの計算プログラム (パイプライン) で検出可能な最も弱い重力波振幅に対応します。今回の探査では、分析したパラメータ空間について、検出可能な最も弱い振幅は以前の推定より 60% 低くなっていて、これまでで最高の感度が得られました。

これらの結果は、天体物理学的に興味深い2つの疑問に回答することになります。1つは、今回の探査で調査できた地球からの距離の最遠値、2つめは今回の探査で考えた連続重力波源の範囲内でどれだけの中性子星の変形が許されるのか、という疑問です。図2と図3は、重力波周波数を横軸として、連続重力波源に対する今回の観測可能距離と許容される中性子星の最大変形の度合いをまとめたものです。上に記したように、私たちは、スピンドウンが無視できる連続重力波源を考えています。この仮定は、中性子星について許容される最大変形の度合いに、両図の影付きの領域で示されるような、絶対的な制限を与えます。言い換えると、重力波以外にスピンドウンしている要素を考えないならば、今回の探査でカバーされている領域よりも高いスピンドウン率を意味する影付きの領域は、除外されることになります。中性子星のスピンドウンを引き起こすメカニズムには、伴星からの物質の降着*

の可能性があります。これらの結果は AdvancedLIGO および AdvancedVirgo の重力波検出器の改善が進んで設計感度に近づいていることを示しています。中性子星のもつ特性について、数値シミュレーションによって得られている推定結果に近いところまで上限値を与えられるレベルになってきているのです。

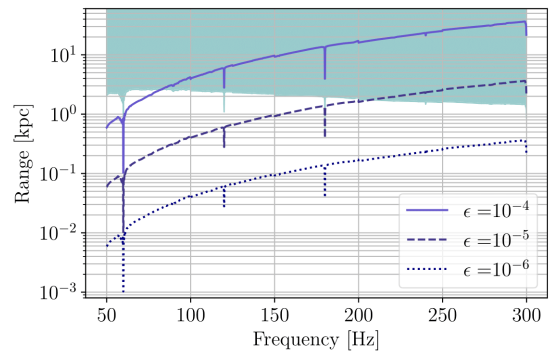


図2: どこまでの距離を今回の探査でカバーできたのかを周波数を軸にして表したグラフ。曲線は、中性子星の楕円率によって表される変形度合いの違いを示す。より大きな変形、かつ、より高い周波数ではより強い連続重力波を生成する傾向があり、より遠い距離までそれらを探索することができる。影付きの領域は、(重力波以外のスピンドウンを想定していない場合に) 今回の探査で制限されたスピンドウン率を示す。参考までに記すと、私たちに最も近い既知の中性子星は 0.1kpc の距離にある。

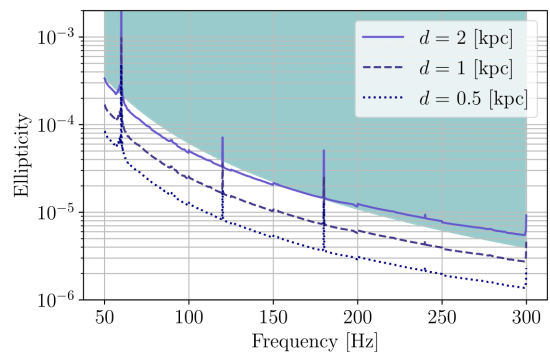


図3: 今回の探査の結果、中性子星に許容される最大変形を周波数を軸として表したグラフ。曲線は、今回の探査で検出可能な連続重力波を生成するために、中性子星がどれだけ変形していなければならないかを表す。連続重力波の振幅は距離とともに減衰するため、近いところにある重力波源は、遠い重力波源よりも楕円率が低いところまで制約される。影付きの領域は、(重力波以外のスピンドウンを想定していない場合に) 今回の探査で制限されたスピンドウン率を示す。

より詳しい情報の取得先

- ウェブサイト:
www.ligo.org
www.virgo-gw.eu
- 論文は[こちら](#).
- 連続重力波についての解説は [こちら](#).

GLOSSARY

- 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): ほぼ一定の周波数の重力波信号。詳細については、[ここ](#)を参照のこと。
- 楕円率 (Ellipticity): 天体が球体からのどれだけ変形しているのかを示す量。赤道面での変形の、自転軸を含む面での変形に対する相対的な大きさ。
- スピンドアウン (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。
- ドップラー偏移 (Doppler shift): 波源や観測者の相対的な運動によって、波の周波数（振動数）が変化すること。
- 連星系 (Binary system): 2 つの天体が重力によってペアになっていること。
- 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な形状を特定するアルゴリズム。
- スペクトログラム (Spectrogram): 周波数成分の時間変化を表した図。
- グラフィックス・プロセッシング・ユニット (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。
- 降着 (Accretion): 重力の作用によって束縛された 2 つの天体間の物質の移動。
- キロパーセク (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。