

第3期観測期間の前半のデータを用いた若い超新星残骸からの連続重力波探査

大質量星^{*}は、その最後に重力崩壊型超新星爆発^{*}と呼ばれる劇的な爆発を起こします。この爆発の後には、爆発で放出された塵に囲まれた非常に高密度な中性子星^{*}が残ります(図1)。爆発で放出された塵は数光年^{*}もの広がりを持っていますが、中心の中性子星は直径およそ30km(12マイル)で質量は太陽質量のおよそ1.4倍です。中性子星は宇宙の中でも最も高密度な天体の一つです。中性子星の組成やその基になる物理機構は物理学における最大の謎の一つであり、宇宙物理、核物理、素粒子物理や凝縮系物理などの幅広い分野からの注目を集めています。アドバンスド・ライゴ^{*}やアドバンスド・ヴィルゴ^{*}にとっては、中性子星は連続重力波^{*}の有望な波源であるため重要な天体です。今回私たちは、第3期観測期間の前半(O3a)に対応する2019年からの6ヶ月のデータを用いて、私たちの銀河系に存在する15個の若い超新星残骸からの連続重力波を探査しました。

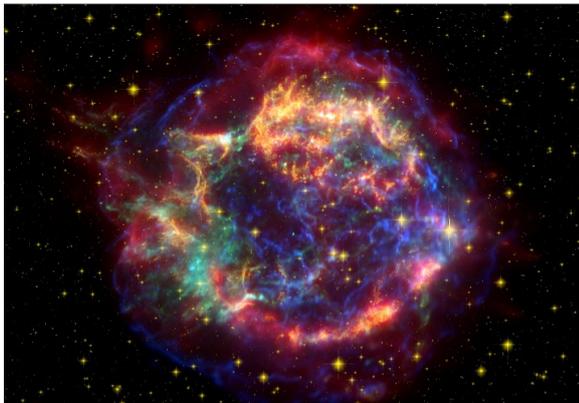


図1: カシオペアA。今回の探査のターゲットとなった若い超新星残骸の一つ。出典: NASA/JPL-Caltech/Krause et al.

現在、突発的重力波^{*}は頻繁に観測されていますが、連続重力波は検出されていません。これは突発的な重力波が強く短い信号であるのに対し、連続重力波は非常に静かでノイズと区別することが難しいためです。連続重力波を検出するためには、私たちは辛抱強く長期間にわたってデータを集め、信号のモデルと一致するような、小さくて、ゆっくりと変化する揺らぎを探査しなくてはなりません。連続重力波の探査として、私たちは高速回転する中性子星が発生させる波を調べています。星は完全に一樣な球形からずれている場合、自転周波数の2倍の周波数を持つ重力波を放出します。ひずみが大きいほど放出される重力波ひずみ^{*}も大きくなります(つまり、大きな信号になります)。このような星はラグビーボールのように3次元楕円体の形をしていることから「三軸不等」と呼ばれています。

私たちの銀河系には多くの超新星残骸が存在しています。私たちは100歳から10,000歳程度の、自転周波数がわかっていない若い超新星残骸を15個選びました。若い超新星残骸をターゲットにした理由は、若い中性子星は古いもの比べてより強く非一様に変形していると考えられているからです。また、若い中性子星は自転も速く、大きな重力波ひずみも作り出します。しかし、私たちはそれらの中性子星がどれくらい速く自転しているか知らないで、私たちは広い周波数帯にわたって探索する必要があります。また、若い中性子星は時間と共に回転エネルギーを失い、自転が遅くなっていく(スピンドアウン)ので、私たちはスピンドアウン率についても調べなくてはなりません。さらに、単独の中性子星の観測から自転周波数が小さくランダムに揺らいでいることも示唆されています。

通常の探索(コヒーレント探索と呼ばれる)では、私たちは観測期間全体にわたって信号がどのように見えるかをモデル化して、理論波形を構成します。そして、それらとデータとの整合性をとります。もし私たちが正しい信号の理論波形を持っていて、かつ理論波形の数がそれほど多くなければ、コヒーレント探索は非常に感度が高い手法です。しかし、私たちが選んだ15のターゲットは、周波数がわかっておらず、また周波数は徐々に小さくなったりランダムに変化したりする可能性があります。この場合、コヒーレント探索は計算コストが非常に高くなってしまいます。O3aのデータを効率的に探索するため、私たちは3種類の準コヒーレントな手法を用いました。準コヒーレントな手法は、短い区切りごとにコヒーレントな手法を適用し、それらを組み合わせることで全観測期間をカバーする手法です。データの区切りが短いほど探索に必要な理論波形は少なくなり、準コヒーレント探索はより計算コストの面で効率的です。私たちが用いた3種類の手法はそれぞれ、感度が最も良くなるもの、周波数が急激に変化する信号に適したもの、そして特定の宇宙物理的なモデルに特化したもの、です。しかし、どの手法を用いても連続重力波は検出できませんでした。

検出できなかったとしても、何も結果が得られなかったということではありません。私たちは用いた手法の感度^{*}を推定し、そこから天体の性質についての情報を引き出すことができます。自転する中性子星は、その歪みが大きければ大きいほど強い重力波を放出します。信号の強さに制限を与えることで、私たちはターゲットとした中性子星がとりうる歪みの強さに上限を与えることができます。中性子星の非対称性は楕円率^{*} ϵ と呼ばれるパラメータで測られます。中性子星のモデルによって異なる楕円率の値が予言されていますが、多くのモデルでは $\epsilon < 10^{-6}$ となっています。図2に、3つのターゲットに対する楕円率の上限を示しました。縦軸は今回の観測で得られた ϵ に対する95%の上限値^{*}で、横軸は重力波の周波数です。楕円率の周波

数依存性について二つの見方ができます。一つ目は、同じ周波数でも楕円率が大きな星の方が重力波の振幅が大きくなります。二つ目は、ライゴやヴィルゴの感度は周波数によって異なるので、重力波の強度に対する制限も周波数帯によって大きく変化します。私たちは理論的な上限値である $\epsilon < 10^{-6}$ 以下までなんとか制限をつけることができました。この制限をより厳しくできれば、私たちは中性子星の性質を予言するさまざまな物理モデルを選別できるようになるでしょう。

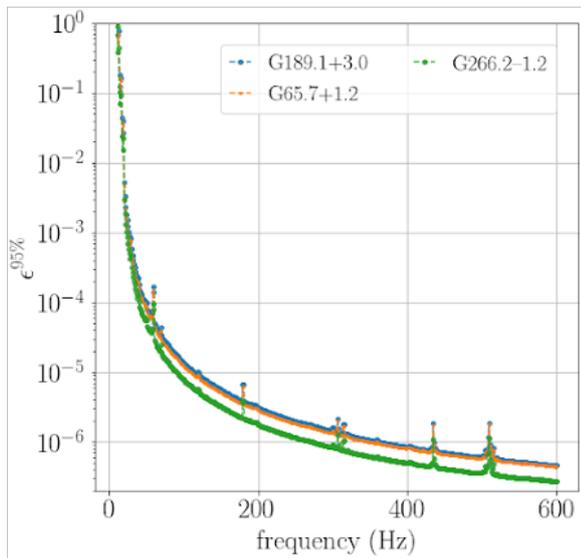


図 2: 論文中で扱ったいくつかのターゲットに関する、中性子星の楕円率 ϵ に対する 95% 上限値 ϵ 。横軸は私たちが検出する重力波信号の周波数で、縦軸は楕円率に対する 95% 上限値。緑 (G266.2-1.2)、青 (G189.1+3.0)、オレンジ (G65.7+1.2) の線は私たちが検出可能な最も小さな楕円率を示している。これは中性子星がどれだけ楕円体になっているかの上限を与える。(なぜなら、もしこれよりも楕円体になっていたら、私たちはすでにそれを見つけているはずだから。)

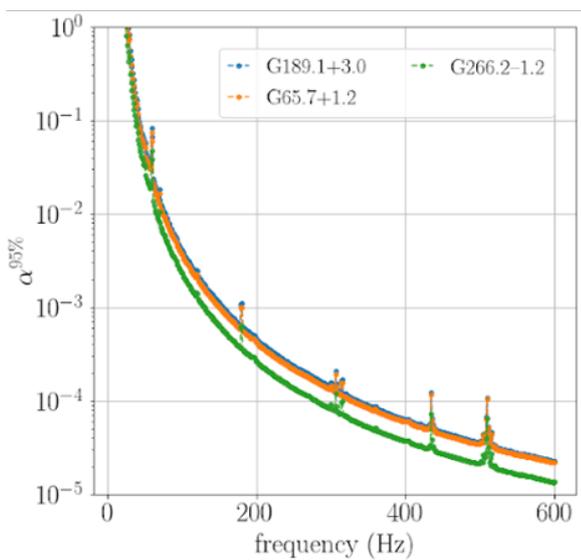


図 3: 論文中で扱ったいくつかのターゲットに関する、r モード振動 α の振幅に対する 95% 上限値。横軸は私たちが検出する重力波信号の周波数で、縦軸は振幅に対する 95% 上限値。緑 (G266.2-1.2)、青 (G189.1+3.0)、オレンジ (G65.7+1.2)

の線は私たちが検出可能な最も小さな振幅を示している。これは中性子星の r モードの強さに上限を与える。(なぜなら、もしこれよりも楕円体になっていたら、私たちはすでにそれを見つけているはずだから。)

三軸不等であることだけが中性子星が連続重力波を放出する唯一のメカニズムではありません。中性子星の r モード振動 α によっても連続重力波が駆動されることがあります。この振動の大きさは振幅 α で特徴付けられます。理論的な上限値は $\alpha < 10^{-3}$ です。図 3 に示すように、楕円体の中性子星に与えられた重力波強度の上限は α の上限に変換することができます。縦軸に α に対する 95% の上限値、横軸に重力波の周波数 (Hz) を書いています。3 つのターゲットについて 150Hz よりも高い周波数帯で $\alpha < 10^{-3}$ という上限を得ることができました。これは r モードの振幅に対する制限になっています。

データを収集し、解析手法を向上させていけば、連続重力波を見つける確率は高くなっていきます。その時までには、私たちは未検出であることを用いて物理的なモデルに制限を与え、私たちの探索手法の感度を向上させていくことになります。

用語集

- **連続重力波 (Continuous gravitational wave)**: 長い間継続する重力波放射。詳細は [こちら](#) をご覧ください。
- **楕円率 (Ellipticity)**: 物体が球状からどの程度ずれているかの指標。赤道面に垂直な方向への歪みに対する赤道面上の相対的な歪みの比で定義される。
- **光年 (Light-year)**: 距離の単位で、光が 1 年かけて進む距離。1 光年はおよそ 9.46 兆キロメートル (あるいは約 5.88 兆マイル)。
- **ライゴ (LIGO)**: レーザー干渉計重力波観測所 (LIGO) は、米国にある 2 つの重力波検出器を持つ。1 つはリ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 4km の長さの腕を備えた大規模なレーザー干渉計であり、通過する重力波によって引き起こされる腕の長さの相対的な変化を測定する装置である。
- **大質量星 (Massive star)**: 大質量星は太陽の 8 倍以上の質量を持つ星。重たい星だけが超新星爆発の後、中性子星を形成することができる。もし軽ければ、残存物は白色矮星になる。
- **中性子星 (Neutron star)**: 非常に高密度で、重たい星が崩壊した後に残る天体。典型的な中性子星は質量が地球の 100 万倍であるにもかかわらず、直径が 30 キロメートル程度しかない。
- **r モード (R-modes)**: 中性子星の内部流体のほとんどで引き起こされている波。星の自転と同程度の周波数をもち、特に若い中性子星の場合はライゴやヴィルゴの周波数帯になり得る。
- **感度 (Sensitivity)**: 検出器の検出能力を測る指標。ノイズの小さい検出器はより弱い信号を検出できるので、高い感度をもつと言われる。

- **ひずみ (Strain)** : 通過する重力波によって引き起こされる時空の変形による 2 つの測定点間の距離変化の比率. 地球に到達する最も強い重力波でさえ典型的なひずみは非常に小さく, 通常は 10^{-21} 未満.
- **超新星爆発 (Supernova)** : 激しい爆発によって, 明るい天体として急速に出現し, その後消えていく. 超新星は, 銀河全体の明るさよりも明るく輝く可能性がある. 巨大な星の崩壊に由来するものや, 2 つの白色矮星の合体に由来するものなど, さまざまな種類の超新星がある.
- **突発的 gravitational waves** : コンパクト連星合体のような, 短く激しいイベントから放出される重力波. ほとんどの突発的 gravitational waves は数秒間かそれより短い時間しか検出器に現れない.
- **上限値 (Upper limit)** : ある物理量 (例えば, 重力波ひずみ) に対する上限値とは, 95% の有意性を持って検出できる最も小さな値のこと. したがって, 私たちが何も検出できなかったとすれば, 95% の確率でそれ以上の値を出すものはないと言える.

- **ヴィルゴ (Virgo)** : イタリア, ピサ近郊のカシーナに作られた地上レーザー干渉計.

もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみよう.

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



論文のプレプリント全文は [こちら](#) からダウンロードできます. このリーフレットの英語版は [ここ](#).

日本語版への翻訳: 山本貴宏, 真貝寿明