

深宇宙に短時間バーストの重力波源を探す

はじめに

Advanced LIGO, Advanced Virgo, KAGRA (LVK) 検出器による第 4 期観測運転期間 (O4) は 2023 年 5 月に開始され、その第 1 段階 (O4a) は 2024 年 1 月に終了しました。この期間中、コンパクト連星合体 (CBC) によって生じると予測される特徴的な波形と一致する、多くの重力波信号が発見されました。しかし、重力波を放つ可能性のある天体現象は、これら連星の合体だけではありません。本研究では、「バースト」と呼ばれる短時間 (1 秒未満) の突発的重力波現象を探索しました。これらの、未だ検出されていない短時間バーストの潜在的な発生源としては、超新星、パルサー・グリッチに加え、未知の天体現象の可能性も挙げられます。これらの発生源のいずれかからの重力波を初めて発見できれば、天文学における重要なブレイクスルーとなるでしょう。

(下線を引いた用語は、3 ページ目の用語集に解説あり)

モデルを仮定しない探索

コンパクト連星合体については、重力波がどのような波形になるかについてよく理解されたモデルが存在しており、信号の探索ははるかに容易になっています。その一方、超新星のような短時間バースト源候補の多くについては、重力波がどのような波形になるのかを正確にモデル化することが難しいため、探索も困難になります。どのような信号波形を探すかが明確でないため、「モデルを仮定しない探索 (unmodeled searches)」に頼ることになります。これは、重力波の波形について最小限の仮定のみを置くものです。複数の検出器において近い時刻に観測される、通常よりも大きなエネルギーをもつ信号を手がかりに探索を行う方法です。本当に天体起源の重力波を観測しているならば、その信号はすべての検出器で観測されると考えられるからです。

本研究では 3 つの探索が用いられており、いずれもコヒーレント・ウェーブバースト (cWB) アルゴリズムの派生手法です。前回の第 3 期観測期間 (O3) 以降、これらの探索法は機械学習を組み込むことで改良され、真の天体起源の重力波信号と検出器ノイズとを区別する能力が向上しています。

解析の結果

図 1 に探索結果を示します。バースト型の重力波を探索するにあたり、まず LVK による重力波探索で発見されたコンパクト連星合体からの重力波候補を除外します。これにより、コンパクト連星合体以外の現象による可能性のある候補、すなわち今回探索の対象となるバースト候補が残ります。こうして

得られた候補信号の分布を検出器ノイズで得られると期待される分布と比較します。もし両者に大きなずれが見られれば、それはバースト重力波候補が検出された可能性を示唆します。

残念ながら、今回の探索では短時間バーストの重力波候補は見られませんでした。しかし、検出がなかったとはいえ、シミュレーション信号を用いた解析によって探索感度を評価することができます。探索感度の推定は、検出が期待される重力波源の特徴を理解するのに役立ちます。例えば、シミュレーションによる超新星の重力波信号を検出器データに追加し、cWB 探索がどのような条件下でこれらの人工重力波を発見できるのかを調べることで、超新星から放出される重力波の種類に関する理論を検証し、場合によっては除外することができます。もし特定の理論モデルが、現在の検出器感度で検出可能な重力波を予測しているにもかかわらず、今回の O4a 期間のデータでそのような信号が検出されなかった場合には、その理論モデルが妥当ではないと考えられるからです。

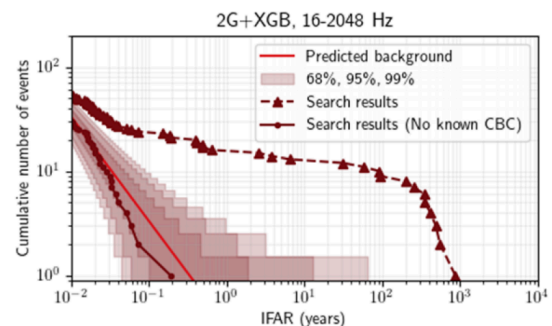


図 1: (論文の図 3): cWB 系の重力波探索法のうちの一つによる探索結果。探索によって検出された重力波候補の累積数を、逆誤警報率 (IFAR) に対してプロットしています。IFAR は、信号がノイズによってランダムに生成された可能性を示す指標であり、IFAR が大きいほど、検出される重力波候補がノイズ由来である可能性が低いことを意味します。線で結ばれた 2 組の記号は、探索によって発見された候補の総数 (三角印) と、データから既知のコンパクト連星合体からの重力波源をすべて除外した後に残った候補数 (丸印) を表しています。赤の実線は、データ内のランダムなノイズによって引き起こされた検出数の中央値を、網掛け領域はこの値の統計的不確実性を表しています。ノイズによる検出率の予測値 (網掛けの不確実性領域を持つ赤の実線) と、コンパクト連星合体からの重力波を除外した後の観測イベント率 (栗色の実線) の類似性は、この探索によって新たな重力波バーストが発見されなかったことを示しています。もしこの探索で、コンパクト連星合体探索では発見されなかった重力波が検出されていれば、それは不確実性領域の右側に、栗色の丸印としてプロット上に現れていたはずですが。

図 2 は、さまざまな超新星モデルに対して、本探索で重力波を検出可能と考えられる推定距離を示しています。

図 3 は、ほ座パルサーを基準として、我々の探索が潜在的な信号の 50% を検出するために必要な、パルサー・グリッチの大きさを示しています。

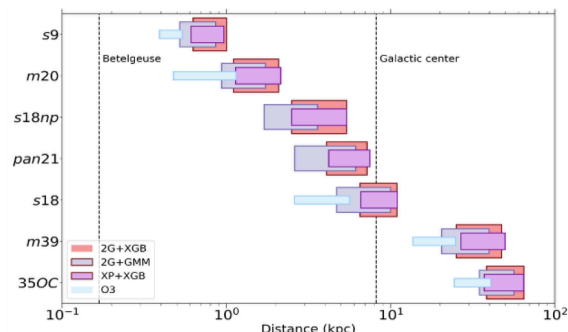


図 2: (論文の図 5): さまざまな超新星の重力波波形に対して、私たちの探索で検出可能な地球からの天体距離を示します。参考として、近い将来超新星爆発を起こす可能性のある近隣のベテルギウスと、超新星の発生率が高い領域である銀河中心の位置を破線で示しています。各箱の左端は、データに加えたシミュレーション信号のうち 10% が検出可能な距離 (単位: 1000 パーセク, kpc と表記) を示し、右端は 50% となる距離を示しています。縦軸はさまざまな超新星の波形を示しています。検討されたモデルの詳細については、論文を参照してください。水色の箱は、前回の観測運転 O3 での感度を示しており、今回の探索では、超新星が発生した場合に、重力波を検出できる距離が大幅に改善されたことを示しています。その他の箱は、O4a の解析で使われた cWB の各手法による結果を示しています。

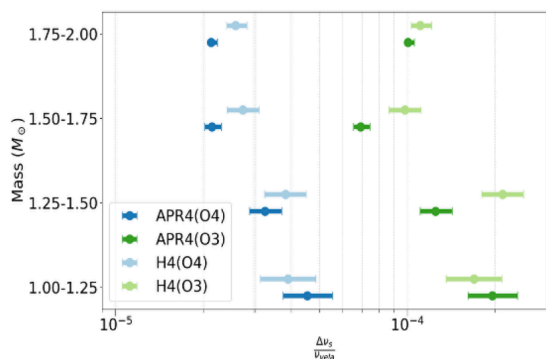


図 3: (論文の図 6): 今回の解析によって 50 % の確率で検出できるパルサー・グリッチの大きさを横軸に示しています。ここでのグリッチの大きさは、ほ座パルサーのような天体 (地球からの距離を 900 光年、自転 (中性子星自身の軸まわりの回転) を毎秒約 11 回転とする) を基準として計算されています。線の横幅は、縦軸に示された中性子星のさまざまな質量範囲を考慮した場合に予想されるグリッチの大きさのばらつきを表しています。APR4 と H4 は、2 つの極端な状態方程式の場合を示しています。緑色のプロットは今回の O4 期間の感度を、青色は O3 で行われた同様の解析での感度を示しています。O4 では、O3 に比べてより小さなパルサー・グリッチを検出できることが分かり感度が向上していることを意味しています。

図 2 と図 3 はどちらも、O3 で行われた同様の解析と比較して、感度が向上していることを示しています。今回の探索では、超新星からの信号だけでなく、さまざまなバースト重力波 (例

えば、論文の表 II を参照) を、これまでよりも遠方まで検出できるようになっています。こうした感度の向上は、検出器の大幅なアップグレードと探索アルゴリズムの改良によるものです。

結論

これまで LVK 研究チームは多くのコンパクト連星合体由来の重力波を検出してきました。では、なぜバースト源からの重力波はこれほどまでに捉えにくいのでしょうか？

一つの理由として、コンパクト連星合体に比べて、パルサー・グリッチや超新星などから放出される重力波の光度 (つまり重力波の強度) がはるかに小さいことが理由です。短時間の重力波バーストがこれまでに検出されていないという事実は、これらの現象が極めて稀であるか、あるいは現在の検出器の到達範囲を超える遠方で発生している、もしくはその両方であることを示唆しています。それでもなお、宇宙にどのような潜在的な重力波源が潜んでいるかは不明です。だからこそ、私たちはこれからも深宇宙の中に重力波を探し続けるのです。

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/P2400601/public/>

(日本語訳: 真貝寿明, 澤田崇広)

用語集

- **コンパクト連星合体 (Compact binary coalescence)**: 一般に CBC と略され、2 つのブラックホール、2 つの中性子星、あるいはブラックホールと中性子星の組で構成された連星が、互いに周回しながら最終的に合体する現象。すべての過程で重力波が生成され、連星が互いに近づき加速するにつれて、周波数と振幅が増加する。合体によって生じる天体は、初期状態に応じて、中性子星またはブラックホールのいずれかになる。連星を構成する天体は、要素 (component) と呼ばれ、主要素 (primary component) とは大きい方の天体を指す。
- **突発的 (Transient)**: 1000 年から 10 億年続くような天体物理的な現象とは対照的な、短い時間スケールの天文学的現象。
- **バースト探索 (Burst search)**: 重力波検出器ネットワークにおける重力波探索法の 1 つで、特定の重力波波形モデルを想定せずに、ネットワーク内の複数検出器に、同時刻に観測されるエネルギー過剰の信号を探索する方法。
- **超新星 (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。
- **パルサー・グリッチ (Pulsar Glitch)**: パルサーとは、電磁放射（通常は電波帯）のパルスを通して観測される中性子星のこと。ただし、すべての中性子星が地球方向に電磁放射をしているわけではなく、あるいは放射されない場合もあるため、すべての中性子星がパルサーとして観測されるわけではない。一部の的中性子星は、パルサーの電磁波観測によって測定される突発的な「ずれ」(グリッチ)を示すことが知られている。これらのパルサー・グリッチのメカニズムとして、星震と、地殻と超流動体の相互作用の 2 つが最もよく研究されている。
- **コヒーレント・ウェーブバースト (Coherent WaveBurst (cWB))**: cWB アルゴリズムは、あらかじめ予測された重力波信号に依存せずに重力波信号を検出する手法。このアルゴリズムは、複数の検出器で測定された信号を比較することで、重力波信号がノイズ背景に対して一貫して際立っているかどうかを判定します。
- **ほ座パルサー (Vela pulsar)**: ほ座にあるパルサーで、超新星爆発の残骸。