

アドバンスト・ライゴとアドバンスト・ヴィルゴの第3観測期における 長時間重力波バーストの全天探査

私たちはすでに [GWTC-2 カタログ](#) でリリースされているように、50 個ものコンパクト連星合体現象を検出していますが、まだ検出されていない重力波現象も多く残されています。重力波検出器の国際ネットワークも増加し、[LIGO](#)、[Virgo](#)、および [KAGRA](#) による共同観測体制になっていて、さまざまな天体物理学的現象から重力波信号を見つける可能性が高まっています。ここでは、「長い」時間スケールでの突発的 * 重力波 (* 印は、用語解説が下記にあり)、つまり、数秒から数分に渡って観測される重力波について考察します。そのような波源の 1 つは、離心率 * が大きいコンパクト連星合体 * です。これらの波源からの重力波の放出はよく理解されていますが、離心率が無視できる連星の場合と同様に、テンプレート波形を使用して信号を探索することには計算上の困難があります。この他にも、マグネター * 表面の変形や、誕生後間もない中性子星に非対称に落ちる物質など、あまりよく理解されていない波源もあります。これらの波源のどれかからでも重力波を検出することができれば、よく理解されていない現象への深く、新しい洞察をもたらすことになるでしょう。たとえば、マグネターからの重力波の検出は、それらの磁場の強度と形状を制限するのに役立ちます。このような現象の根幹にあるすべての物理を説明するモデルは、これらの波源には一般に得られていないし、少なくともコンパクト連星合体よりも不確実であるため、重力波信号の検出に使用される手法は、最小限の仮定あるいは無仮定で行われます。これにより、未知の形状の信号の検出が可能になりますが、これは、潜在的な波源の範囲が広いためには良いものの、弱い信号については感度は低くなります。もちろん、まだ予測されていない波源である可能性は、最もエキサイティングなもの 1 つです。

解析と結果

私たちは、3 つの異なるパイプライン * を使用して、これらの長時間の突発的重力波が継続している時間と放出周波数の範囲を調べました。複数のパイプラインを使用することには多くの利点があります。(1) 重力波信号の特徴を模倣する機器または環境起源のノイズ (非ガウスの * な過渡ノイズ) を、それぞれのパイプラインが独立に処理するため、検出結果がより堅牢になります。(2) さまざまな可能性のあるモデルや信号形状が、さまざまなパイプラインによってさまざまな有効性でカバーされ、天体物理モデルと「アドホック」モデル * の両方に対するパイプラインの感度から、それぞれのモデルへの制限を与えることができます。今回考慮したアドホックモデルには、帯域制限された白色雑音 * (WNB) とサイン・ガウシアン (SG) 信号を含んでいます。また、さまざまな天体から放出される可能性のある信号に対して、天体物理的モデルも使用します。これらには、連星中性子星合体で形成されたマグネター *、ブラックホール降着円盤 * 不安定性 (ADI)、[ガンマ線バーストプラトー](#) (GRBplateau) (ガンマ線バースト残光によって生成された X 線が減衰しない段階)、円軌道から外れたコンパクト連星合体の波形 (ECBC)、および [最内安定円軌道](#) 内で回転ブラックホール周囲の降着

がもたらす広帯域チャープ波形 (ISCOchirp) を含みます。私たちは、ECBC 波形については、さまざまな質量と軌道離心率、ISCOchirp 波形については中心ブラックホールのさまざまな質量、マグネター波形についてはマグネターの回転周波数と磁気的変形による [扁平率](#) を調べました。これらの信号の持続時間は 6 秒 (ADI-B) から 470 秒 (GRBplateau) までさまざま、それらの時間周波数 [スペクトログラム](#) を図 1 に示します。

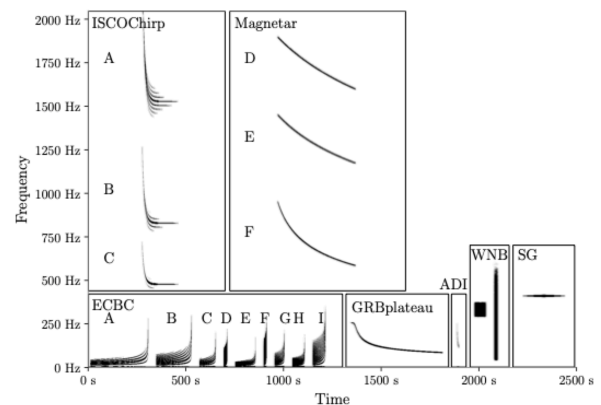


図 1: この解析で使用された重力波波形の時間-周波数スペクトログラム (本文を参照)。これらは、6 秒 (ADI-B) から 470 秒 (GRBplateau) の範囲の持続時間の信号をカバーする。

いずれのパイプラインも、ハンフォードとリビングストーンにある検出器の両方で、一致する重要なイベントを検出できませんでした。両方の検出器が動作していた204日間のデータで最も大きなイベントは、ノイズであることと矛盾しませんでした。ヴィルゴ検出器は、第3期観測期間 O3 (図2を参照) では感度が比較的低いため、この検出には寄与しませんでした。次の観測期間 O4 では含めた解析ができると期待されます。

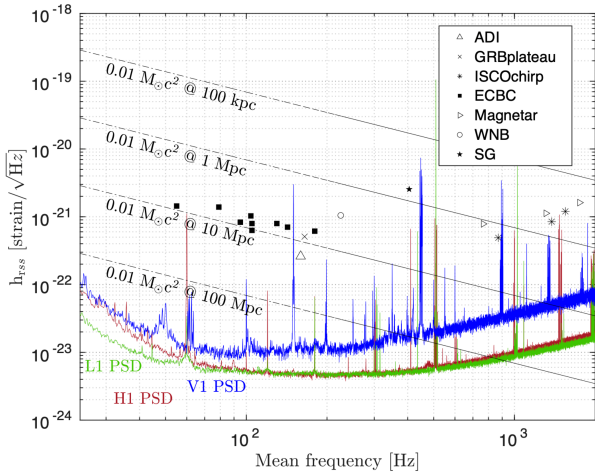


図2: 重力波のひずみ * 振幅 (異なる時刻での二乗振幅の合計の平方根が取られる) を縦軸に、検出効率 50% 50年に一度の偽警報率となる平均周波数でプロットした図。赤、緑、青の曲線は、ハンフォード (H1)、リビングストーン (L1)、およびヴィルゴ (V1) 検出器の平均振幅スペクトルノイズ密度であり、検出結果がさまざまな周波数での検出器の感度に依存していることを示す。破線は、太陽質量 (M_{\odot}) の 1/100 に相当するエネルギーが重力波に転換されたときの振幅 h_{TSS} の周波数依存性を、波源までの距離 (メガパーセク * (Mpc) 単位) を変えて示した。

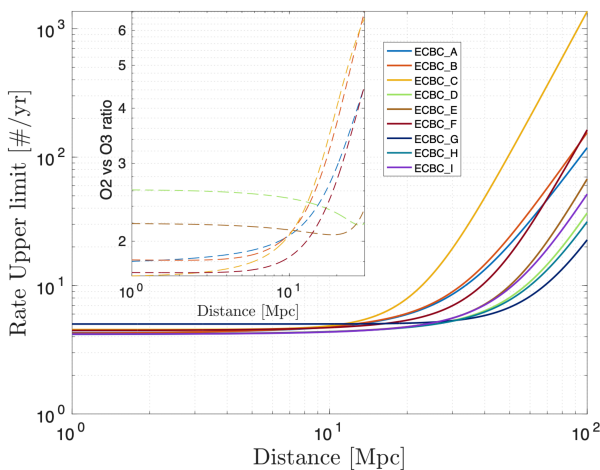


図3: 円軌道より外れたコンパクト連星合体率の90%信頼度 * での上限を距離の関数として示す。各波形について、最良の結果のみが表示している。挿入図は、ECBC A と ECBC F の O2 での結果に対する比率を示している。

検出がなかったことから、私たちは重力波振幅の上限値を導くことができます。各モデルに最も敏感なパイプラインからの結果を使用して、上記で仮定した長時間の突発的重力波の振幅が制限できるのです。そして、宇宙における円軌道から外れた連星合体の発生率についても宣言をつけることができました (図3を参照)。得られた制限は、**前回の解析**よりも約2倍改善されています。検出できることが望ましいとはいえ、私たちは上限値から、これらのエキゾチックな系の存在率を知ることができるのです。O4では、重力波の新しい天体物理学的波源を見つけることを楽しみにしています。

用語集

- **降着円盤 (Accretion disk):** ゆっくりと周回しながら中心の巨大な天体に向う軌道運動中の (円盤の形状の) 物質の塊。
- **アドホックモデル (Ad-hoc models):** パイプラインの機能と感度を特徴づけるためだけに使用される非物理的な波形。
- **帯域制限 (Band-limiting):** 周波数領域で、信号の広がり制限すること。
- **コンパクト連星合体 (Compact binary coalescence):** 中性子星やブラックホールのように、密度の大きくて小さな天体2つが互いを周回していた連星の合体
- **信頼度 (Credible level):** 決められた区間に、真の値がどれだけ期待されるのかを示すパーセンテージ。
- **離心率 (Eccentricity):** ある軌道が完全な円からの程度外れているかを定義するパラメータ。
- **マグネター (Magnetar):** 極度に強い磁場をもつ中性子星の一つの種類。
- **メガパーセク (Megaparsec, Mpc):** 天文学における距離を測る単位の一つ。1パーセクは、およそ3.26光年あるいは約9.46兆kmであり、メガパーセクは、その100万倍である。
- **中性子星 (Neutron star):** 燃え尽きた星の崩壊した中心部分。典型的なものは太陽の1.4倍程度の質量をもつが、直径は20kmほどであり、非常に密な天体である。
- **非ガウスの (Non-Gaussian):** 正規分布 (ガウス分布) からのズレを生じさせるプロセス。重力波検出器の場合、データは一般的に、環境や検出器の効果で顕著なズレをもったガウス分布になる。
- **パイプライン (Pipeline):** 重力波候補を探索するのに使われるアルゴリズム。

- **ひずみ (Strain)** : 重力波によって生じる, 長さの相対的变化 (例えば, 重力波干渉計の腕の長さ) を無次元量で示したもの.
- **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.

より詳しくは

ウェブページを訪問してください.

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu

- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



- 科学論文の原稿 (プレプリント) は [ここから](#), あるいは arXiv.org のサイトから.
- この解析の [science summary for the observing period O1](#) (2017) 版.
- この解析の [science summary for the observing period O2](#) (2019) 版.

(日本語版への翻訳: 真貝寿明, 山本貴宏)