

背景重力波の非等方性を探す

LIGO-Virgo (ライゴ・ヴィルゴ) の重力波検出器ネットワークは、連星ブラックホール合体 GW150914 の最初の重力波検出以来、多くの連星ブラックホール合体といくつかの連星中性子星合体からの重力波を観測してきました。しかし、これらの現象は、宇宙で起こっている連星ブラックホール合体と連星中性子星合体の総数のごく一部にすぎません。検出器の現在の感度* (*の語には用語解説あり) の制限により、弱くて遠く離れた合体現象からの重力波信号を個別に検出することができないのです。ただし、これらの弱い連星合体信号の重ね合わせにより、背景重力波が発生します。これは、LIGO や Virgo などの重力波検出器のネットワークを使用して検出できると予想されます。また、相転移* や原始ブラックホール* の合体など、初期の宇宙で発生した可能性のあるさまざまな現象による背景重力波も予想されます。これらの異なる背景重力波は、異なる周波数依存性を持つと予想されるため、それらを区別できるはずで

私たちは、さまざまな背景重力波の等方性を調べた結果を論文発表しました。等方性とは、空のさまざまな方向を見たときに背景重力波がどれほど似ているのかを示す指標です。宇宙には銀河や銀河団などの構造があるため、これらの弱い重力波信号の発生源は、これらの構造があるところに多く分布していると期待されます。そのため、背景重力波の観測に異方性(方向依存性)が生じると予想されます。背景重力波は宇宙マイクロ波背景放射(CMB)* に類似しています。CMB が最初に発見されたとき、CMB はすべての方向で一様(で等方)であることを示唆しましたが、後の詳細な研究では方向依存性(異方性)が明らかになりました。CMB の異方性は、宇宙論における重要な発見と見なされており、宇宙における銀河団やその他の構造形成を説明します。背景重力波にも同様の方向依存性が見られるものと予想されます。観察されれば、これらの異方性は私たちに初期宇宙の解明へのヒントを与え、近傍の宇宙に物質がどのように分布しているかを説明することになるでしょう。

この論文では、2 つ以上の検出器からのデータを相互相関させて、背景重力波の異方性を調べました。2 つの検出器からのデータの類似性をチェックする相互相関* は、重力波検出器のノイズから非常に弱い信号を抽出できるようにする手法の 1 つです。重力波放射測定* 法を用いて、天球のさまざまな方向から来る背景重力波信号を探しました。放射測定では、特定の方向を調べるために、検出器の 1 つからのデータの取得時刻を少しずらしてから、2 番目の検出器からのデータと相互相関させます。この方法では、天球上の各方向は、一つ検出器のデータと他の検出器のデータの検出時刻差に対応します。

使ったデータは、LIGO および Virgo 検出器の第 3 期観測

期間* までのものです。第 1 期(O1) は 2015 年 9 月から 2016 年 1 月まで、第 2 期(O2) は 2016 年 11 月から 2017 年 8 月まで、そして第 3 期(O3) は 2019 年 4 月から 2020 年 3 月までのものです。背景重力波についての仮定はほとんどせずに、任意の方向から来る可能性のある広帯域重力波(20 Hz~1726 Hz の周波数)を探査しました。私たちは、背景重力波についての明らかな証拠は見つけられませんが、全域から来る背景重力波の強さに上限* をつけることができました(図 1 を参照)。

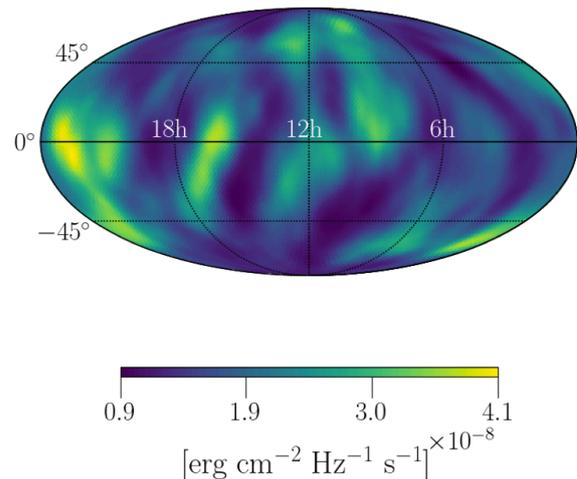


図 1: 連星ブラックホールと連星中性子星の合体による重力波信号モデルを用いて描いた背景重力波のエネルギー流束の上限値。天球面上の各方向について、95% 信頼区間* の上限値を示している。

これらの上限値は、これまでに私たちの解析方法では検出されなかったことから得られた背景重力波の最大振幅に対応しますが、背景重力波のさまざまなモデルを制約するためにも使用できます。今回の解析で得られた上限値は、以前の制限よりも約 3 倍も厳しいものです。

また、私たちは、天体物理的に興味深い、超新星 1987A*、さそり座 X-1*、天の川銀河中心* の天球上の 3 箇所からの狭帯域重力波信号も探しました。これら 3 箇所は、重力波信号を放出する波源となっていることが期待されます。ただし、これらの波源から来る重力波信号の強度も周波数も不明です。これらの波源から、狭帯域背景重力波を 20 Hz ~ 1726 Hz の周波数帯にわたって探索しました。重力波放射の証拠は見つからなかったため、これらの 3 つの波源からの背景重力波の強度に上限がつけられました(たとえば、さそり座 X-1 からの重力波の上限については図 2 を参照してください)。

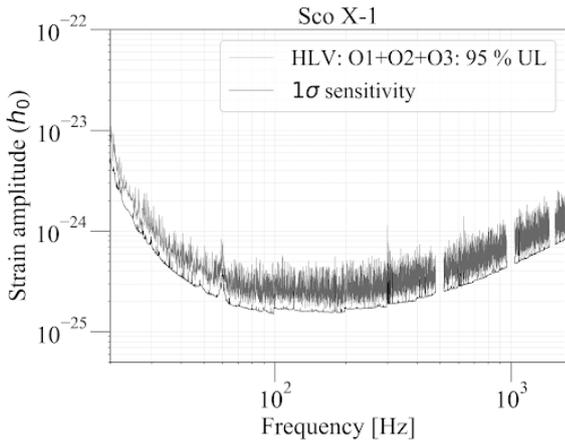


図 2: 灰色の曲線は、さそり座 X-1 の方向に関する狭帯域重力波信号の強さの 95% の信頼区間の上限値を示す。黒い曲線は、解析のノイズレベルに対応している。

上記の 2 つの探査に加えて、私たちは、天球面上で重力波信号に空間的に異なるパターンがあるかどうかを解析しました。今回は、天の川 * 銀河面などのように、広がりをもった領域からの背景重力波信号を探しました。その結果、特に天球面上でパターンが見られるような強力な証拠はなかったことから、背景重力波のさまざまな角度サイズに上限をつけることができました (図 3 を参照)。

今回の論文における解析では、重畳データおよび Python ベースの計算パイプラインを初めて使用し、計算コストを 100 分の 1 に削減しました。現在の重力波検出器の改良が行われれば、将来的には背景重力波の異方性を検出できることが期待されます。CMB と同様に、将来的にはこうした異方性の観測は、宇宙の進化を理解するのに役立つことになるでしょう。

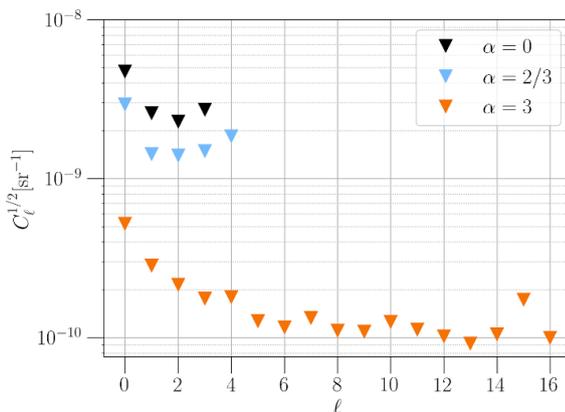


図 3: 天球面の背景重力波の角度相関についての信頼区間 95% の上限値を示す。横軸の数字が小さいほど、天球面上の大きな角度で相関を見ていることに相当する。図には、背景重力波の周波数依存性について 3 つの異なるモデルを考えたときの上限値を示している。たとえば、 $\alpha = 2/3$ は、重力波周波数 f が $f^{2/3}$ の依存性をもつモデルである。

用語集

- **感度 (sensitivity)**: 信号を検出する検出器の能力を示す指標。ノイズレベルの低い検出器は、弱い信号を検出できるため、感度が高い (優れている) と言われます。
- **相転移 (Phase transition)**: 水が凍ると氷になるような、ある状態から異なる状態への熱力学的な遷移。宇宙初期の相転移についての短い紹介は [ここ](#)。
- **原始ブラックホール (Primordial black holes)**: ビッグバンの直後に形成されたブラックホール。詳しくは [ここ](#)。
- **宇宙マイクロ波背景放射 (CMB; Cosmic Microwave Background)**: 宇宙の初期段階から発生した電磁波で、「ビッグバンの残り火」としても知られています。より詳しくは [ここ](#)。
- **相互相関 (cross-correlation)**: 2 つ (またはそれ以上) のデータのセットの類似性の測定。2 つの別の重力波検出器からのデータが相関していることがわかった場合、(相関させる可能性のある他の要因が除外されているならば) 背景重力波が存在することを示している可能性があります。
- **信頼度 (credible level)**: ある確率を決めたとき、その確率で生じる不確実なパラメータの値が取りうる値の範囲。
- **観測期間 (Observing run)**: 重力波干渉計がフル稼働し、後に解析するためのデータを取得している期間。第 3 期観測 (O3) は 2019 年 4 月 1 日から 2019 年 10 月 1 日まで行われ、その後も 2019 年 11 月 1 日から 2020 年 3 月 27 日まで継続されました。
- **放射測定 (Radiometry)**: 天球面のさまざまな方向から来る放射の分布を特徴付ける手法。
- **上限 (Upper limit)**: 実験や観測で除外できなかった測定量の最大値。
- **重畳データ (Folded data)**: 地球が自転することによって、24 時間後の天球面はほぼ同じようになります。この時間的な対称性を用いて、数百日分のデータを 1 日分の (恒星) 日のデータとしてまとめることができます。この圧縮されたデータのことを指します。

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/



このリーフレットの英語版は [ここ](#)。

日本語版への翻訳: 真貝寿明, 山本貴宏