

宇宙における持続的重力波の探査

LIGO, Virgo, KAGRA の第 4 期観測運転の最初の期間 (O4a と呼ばれる) のデータを用いて、全天空面にわたる連続重力波を探索しました。これは、特定の既知の発生源からのものだけでなく、未知の信号として可能性も考えられる背景重力波の探索も対象としています。どちらの信号も検出されませんでした。このような重力波の強度に関してこれまでで最も厳しい制限 (従来の制限を最大で 2 倍ほど強い制限) をつけることができました。

持続的重力波を探索する理由？

重力波は時空のさざ波です。多くの場合、質量の大きな天体が高速で移動することによって生成されます。ブラックホールや中性子星の合体による短時間の重力波が検出されている一方で、長時間持続する (「持続的な」) 重力波信号も存在する可能性があります。これらは、回転する中性子星、高密度の星団、あるいは初期宇宙のプロセスに由来する可能性があります。これらの信号が多数重なり合うと、背景重力波を形成します。重要なのは、この背景が一様である可能性は低く、発生源の位置によってその強度が天空面上で変化する可能性があるということです。

これらの持続的で方向性のある信号を探索することで、私たちは近傍宇宙と遠方宇宙への新たな窓を開き、中性子星、銀河団、さらには宇宙ひもやインフレーションといった初期宇宙の未解明の現象を明らかにすることを目指しています。

どのような探索が行われた？

O1 から O4a までの観測運転期間の LIGO のデータと、第 3 期観測運転期間の Virgo のデータを用いて、持続的な信号を探索しました。重力波放射計と呼ぶ技術 (検出器間のデータの相互相関をとり、全天における重力波の強度を推定する技術) を用いました。

今回の探索には、4 つの相補的な解析が含まれています。

- 全天全周波数探索：全天および全周波数範囲にわたって連続的な信号を検出します。
- 狭帯域標的探索：さそり座 X-1 や銀河中心など、特定の天体位置に焦点を当てて探索します。

- 広帯域探索：点状波源からの広周波数重力波背景を探します。
- 非点状の波源探索：球面調和関数を用いて、広がりのある拡散した波源を探します。

何がわかったか？

いずれの解析においても、持続的重力波の証拠は見つかりませんでした。しかしながら、この種の信号に対して、これまでで最も厳しい上限値を設定できました。

- 全天探索 (図 1)：実効的なひずみ振幅の上限値は、 2.6×10^{-26} に制限されました。
- 標的探索 (図 2)：さそり座 X-1 や SN 1987A といった主要な天体については、歪み振幅は 1.1×10^{-25} 程度から 6.5×10^{-24} の範囲に制限されました。
- 広帯域探索：エネルギー流の制限値は、これまでの結果と比べて 1.4–1.7 倍改善されました。
- 非点状の波源探索 (図 3)：重力波の角度強度スペクトルに対する制限も最大 2 倍に強化されました。

これらの結果は、新たな持続的な重力波源の探索と分析技術の改善に基づいており、将来の発見の土台を築くものとなります。

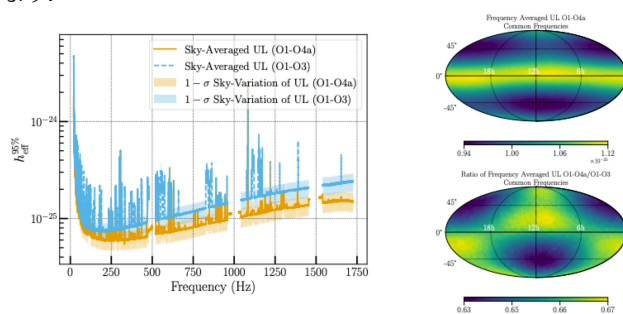


図 1: 左：O1-O4a および O1-O3 データセットを用いた全天全周波数探索によって得られた全天平均された上限値 (UL)。淡色で塗られた部分は、観測方向による上限値のばらつきを示す。

右上：O1-O4a データを用いた周波数平均された上限値の天空面分布。観測されたパターンは、LIGO2 台の干渉計が優勢なときのネットワークの典型的な全天感度を反映している。

右下：O1-O4a の周波数平均された上限値と O1-O3 の周波数平均された上限値の比を示す天空図。

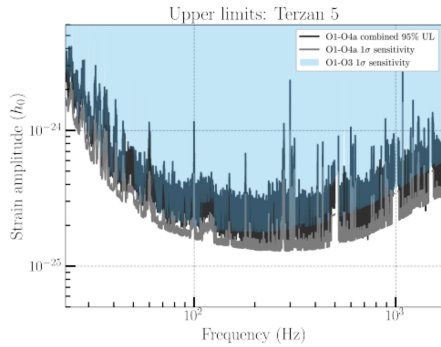


図 2: 本研究で新たな探査対象とした球状星団テルザン 5 (Terzan 5) に対する, O1-O4a のデータセットを用いた狭帯域重力波探索から結論される歪み振幅の上限値. 黒の実線はベイズ推定による上限値を示し, 灰色の線は信号が存在しないという仮定のもとでの感度推定値を示す.

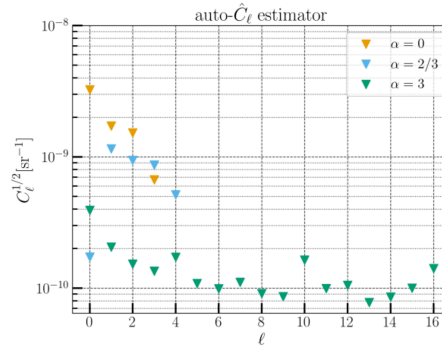


図 3: O1 - O4a データセットを用いた非点状重力波源探索における角度強度スペクトルの 95% 信頼区間の上限値. 異なる色は, それぞれ, 3つのべき乗則スペクトルモデルによる結果を示していて, 各モデルは解析できる最大角度スケールが異なる.

これから

LIGO, Virgo, KAGRA が向上した感度で観測を継続するにつれ, 持続的重力波の検出確率が高まると期待されます. 今後の解析では, より多くのデータを用いて解析を行い, この持続的背景重力波に関する制約をさらに精緻化していきます.

(日本語訳: 真貝寿明, 黒柳幸子)

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/xxxx/public/>

あるいは<https://arxiv.org/abs/xxxx>

用語集

- **ベイズ推定 (Bayesian inference)**: すでにある何らかの知識 (事前予測) と, 新たに得られたデータを組み合わせ, 関連する事象の発生確率を計算する方法. この組み合わせにより, 現在の知識が更新され, 確率として表されることになる (事後確率).
- **ブラックホール (Black hole)**: 重力が非常に強いので, 光を含むすべてのものが逃げるのでできない時空の領域. ブラックホールにはさまざまなサイズがある. 恒星質量ブラックホールは, 恒星の崩壊でできるもので, 質量は太陽質量の数倍から約 65 倍の範囲のもの. 中間質量ブラックホールは, 太陽質量の約 100 倍から 10^5 倍までの質量をもつもの. 3つめの超大質量ブラックホールは, 太陽質量の 10^5 倍以上から 10^9 倍以下の範囲のもの.
- **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) 背景重力波が存在している可能性がある.
- **エネルギー流 (Energy Flux)**: 単位面積あたり単位時間あたり検出器にどれだけのエネルギーが到達しているのかを示す量. 例えば, エネルギー流の単位は, $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{s}$ となる. この定義は, 検出器が得る全エネルギーがそのサイズ (面積) と時間に比例することから, 検出器が波源から遠く離れているときに有用になる. しかし, 突発性天体現象に対するエネルギー流は, 1秒にも及ばない短い時間でしか存在しないことになる.
- **中性子星 (Neutron star)**: 寿命を迎えた大質量星の遺物. 大質量の星が核燃料を使い果たすと, 超新星爆発として知られる劇的な最期を迎え, 中性子星が形成されることがよくある. あまりにも質量が大きくて密度が高いため (ブラックホールほどではないが), 原子は地球上で通常観測されるような状態を保てず, 中性子の塊になる. 中性子星は太陽とほぼ同じ大きさの質量をもつにも関わらず, 半径は十キロメートル程度しかない.
- **ひずみ振幅 (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.
- **上限 (Upper limit)**: ある量の推定に関して, 非検出と整合しつつ取り得る最大値. 典型的に 95% の信頼上限を用いる. つまり, データが与えられた場合, その量がこの限界を下回る確率は 95% である.