

LIGO-Virgo-KAGRA の第 4 期観測運転から得られた 等方的背景重力波放射の上限

背景重力波 (GWB) は、さまざまな波源から発生する多数の弱く独立した重力波の重ね合わせです。LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 重力波検出器の 10–1000 Hz の周波数帯を含む広い周波数帯域で、持続的かつ非干渉信号として存在すると考えられています。背景重力波の波源には「宇宙論的」なものと「天体物理学的」の 2 つが考えられています。

天体物理学的な重力波源としては、重力崩壊型超新星、自転する中性子星、分離不可で微弱なコンパクト連星合体 (CBC) の重ね合わせなどがあります。私たちの近傍で観測されている CBC の分布を高赤方偏移の領域まで外挿し、合体率のモデルも十分に理解されていると仮定するならば、CBC 背景波の強さは、現在では良い近似値で予測されていると考えられます (図 1 参照)。

これに対して宇宙論的な重力波源としては、宇宙ひも、インフレーション、一次相転移などに由来するものが考えられ、これらは、直接観測することのできない宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の放射以前の宇宙のはじまりの時代についての情報を与えてくれることになります。

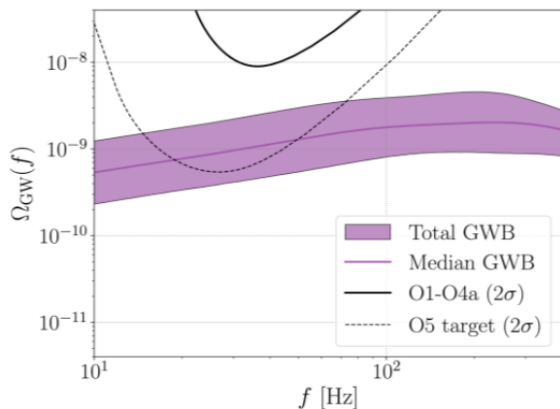


図 1: 過去の第 3 期観測運転までと現在の第 4 期観測運転第 1 部 (O1-O4a) の解析から得られた背景重力波の感度を周波数の関数として黒の実線で示す。将来の第 5 期観測運転での目標感度を黒の破線で示す。紫の実線は、(連星ブラックホール、連星中性子星、および中性子星-ブラックホール系による) 全背景放射の中央値推定値を示す。紫色の網掛け帯は、予測される背景放射の強度を 90% の信頼区間として示している。

背景重力波の検出は科学的に大きな節目となり、天体物理学的現象と宇宙論的現象の両方について深い知見をもたらすことになります。ナノヘルツ (つまり 10^{-9} Hz) の周波数帯域では、NANOGrav (北米)、EPTA (欧州)、PPTA (オーストラリア)、InPTA (インド) といった複数のパルサータイミングアレイが、共通スペクトル信号に対して高い有意性で確率的背景重力波背景放射 (SGWB) の証拠を見つけた、と報告しています。これらの波源は、LVK による重力波望遠鏡で感度がある周波数帯域の信号とは異なる種類の重力波源であると思われます。

私たちの分析では、Advanced LIGO と Advanced Virgo による過去 3 回の観測運転期間 (O1–O3) 中に収集されたデータと、Advanced LIGO の 2 台の干渉計のみが稼働していた第 4 期観測運転の最初の期間 (O4a) からのデータを用いました。私たちは背景重力波の周波数依存性に注目し、重力波信号が、長時間の観測の極限として、等方性 (つまり、すべての方向で等しい)、非偏極性 (つまり、全体的な振動の優先方向がない)、定常性 (つまり、統計的特性が時間とともに変化しない)、ガウス性 (つまり、それらの統計的特性が平均と分散のみで説明できる) の性質をもつものとしてモデル化しました。また、重力波信号は、検出器の感度に比べて弱いものと仮定しました。この探索では、少なくとも 2 つの重力波検出器 (例: LIGO-Hanford と LIGO-Livingston) からのデータが相互に相関することで検出器に生じるノイズを低減し、その一方で各検出器に共通して存在する重力波信号に対しては感度が向上します。一般にノイズは検出器どうして相関がありませんが、確率的背景重力波は、検出器の間の距離を光速で移動する時間だけずれた相関信号として、また、重複低減関数の予測をみだす信号として観測されることが考えられます。

今回の解析では、LVK 共同コラボレーションで開発された Python ベースのライブラリである pygwb を確率的背景重力波探索に初めて使用しました。pygwb は計算効率が向上し、分析をカスタマイズする柔軟性もあります。私たちの分析技術は、機器、地質学的、人為的要因などによる環境ノイズに起因する相関信号は、私たちの知る限り、存在しないということが、保証されます。さらに、時間軸で各グリッチを除去するゲーティングと呼ばれる手法を用いて、大きなグリッチの影響を軽減しました。検出器からのデータは相互に相関し、べき乗モデルを用いて信号が周波数によってどのように変化するかを特徴付けました。次に、べき乗則スペクトル指数 α の値を固定するか、この値で平均化 (「周辺化」と呼ばれる) するか、のいずれかにより、ベイズ推定法を用いて、背景重力波の基準振幅 Ω_{ref} の上限を 95% 信頼水準で決定しました (表 1 参照)。

α	O1-O4a	O1-O3	Improvement
0	2.8×10^{-9}	5.8×10^{-9}	2.1
2/3	2.0×10^{-9}	3.4×10^{-9}	1.7
3	3.2×10^{-10}	3.9×10^{-10}	1.2
Marginalized	2.9×10^{-9}	6.6×10^{-9}	2.3

表 1: 対数一様事前分布を仮定した背景重力波の振幅 Ω_{ref} の上限値を 95%信頼水準にて示したものの、右端の列は前回の解析に対してどれだけ改善したかを示している。

確率的背景重力波を検出することはできませんでしたが、O4a の最新データを含むことによって、**確率的背景重力波の強度**に対して、これまで報告していたよりも厳しい**上限値**をつけることができました。

私たちは、**シューマン共鳴**に起因する地球全体で相関するノイズを調べるため、各干渉計付近のセンサーから得られた磁場データを解析しました。この共鳴は、干渉計内の鏡を制御する磁石などの高感度部品に影響することで、重力波信号と似た鏡の変位を引き起こすため、確率的重力波背景と誤認する可能性をもたらします。このようなデータ汚染のリスクを評価するために、2つの LIGO 観測所の外部（シューマン共振が予想される場所）と内部に特殊な磁力計を設置し、高精度の磁場測定を行いました。これらの測定がどのように連動しているか、また建物内部の磁場が鏡の動きとどのように連動しているかを慎重に調べました。

個々の周波数ビンにおける磁気汚染の大きさを相互相関解析を行って推定しました。また、複数の周波数帯における磁気汚染の複合効果が感度の閾値を超える可能性があるかどうかを検証しました。結論として、相関磁気ノイズの測定推定値は、個々の周波数においても、複数の周波数にわたる和においても、O4a で達成した感度をはるかに下回っています（図 2 参照）。さらに、ベイズ推論に基づいて、データ中の背景重力波とシューマン共鳴を同時に特定する枠組みを実装しました。他の手法と同様に、背景重力波またはシューマン共鳴からの信号を示す証拠は見つかりませんでした。

アインシュタインの**一般相対性理論**においては、重力波はテンソル**偏極モード**のみ存在し、スカラーモードやベクトルモードのは「禁止された」偏極です。私たちは、背景重力波について、これらの偏極モードの上限値を求めました。テンソルモード以外の偏極を観測することは、アインシュタインの理論を修正する必要があることを示唆することになります。この解析は、より多くの検出器を用いて重力波観測することで、異なる偏極をより識別できるようになります。

今回の解析では、これらの「禁止された」偏極の証拠は見つかりませんでした。ベイズ推論の結果からも、テンソル偏極を背景とする（一般相対論に従う）重力波モデルが、ベクトル偏極、スカラー偏極、混合偏極を持つ背景重力波よりも依然として好ましいことが示唆されました。

論文では、最後に、多数のコンパクト連星の合体から期待される天体起源の背景重力波の上限値について検討しました。遠方の連星ブラックホール、連星中性子星、および中性子星・ブラックホール系について、最新の**合体率**と分布モデルを用いて、連星系から生じるエネルギー密度スペクトルの推定値を新たに計算した結果、**LIGO A+** および **Advanced Virgo Plus** として計画される、近い将来のアップグレードされた検出器に

よって、そのような背景重力波が検出できる可能性があることが分かりました（図 1 参照）。

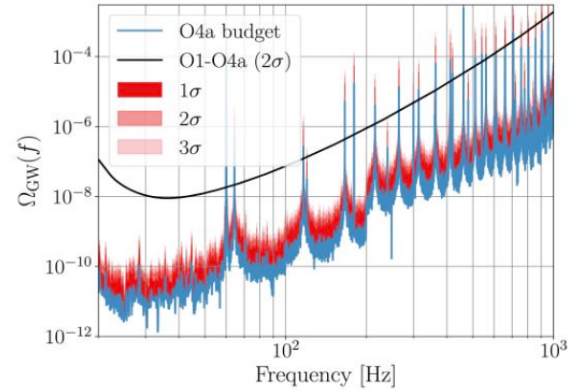


図 2: 相関した磁気信号の背景重力波への影響を O4a budget というラベルで示す（干渉計における相関信号を重力波のエネルギー密度 Ω_{GW} で表される量に換算したもので、干渉計における相関信号から推定されるもの）。計算された磁気ノイズの背景重力波への影響を青で示す。1 σ , 2 σ , 3 σ の不確実性を濃淡で示す（赤色の濃淡が徐々に薄くなる）。黒色のべき乗則総和感度曲線は、O1-O4a 2 σ とラベルづけされ、複数の周波数帯にわたる磁気ノイズの蓄積に対する解析感度を示している。赤色の帯域は、重複減衰関数と 60Hz 電力線の高調波によってもたらされる狭帯域特性を除き、この黒色の感度曲線をはるかに下回っていることがわかる。

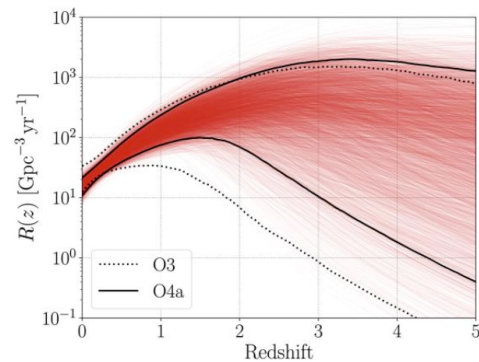


図 3: 連星ブラックホール合体率を赤方偏移の関数として推定したもの。GWTC-4 における連星ブラックホールの直接検出データと背景重力波の上限値を用いて階層的に求めた結果である。赤の実線は赤方偏移による進化を推定するものになった個々のサンプルを示し、黒の実線は 90%信頼区間の範囲を示す。黒の点線は、以前のカタログ GWTC-3 で得られた 90%信頼区間を示す。

最新の突発性重力波カタログ GWTC-4 に掲載された個々のコンパクト連星の観測と、背景重力波を統合した解析も行いました。背景重力波は、個々に検出可能なコンパクト連星よりも遠距離での連星合体に敏感なので、背景重力波の測定によって初期宇宙における連星ブラックホールの合体率の測定が改善される可能性があります。確率的背景重力波の解析結果と GWTC-4 の個々のコンパクト連星の観測を組み合わせて推定された、宇宙時間全体にわたる連星ブラックホールの合体率（つまり、1 年あたり単位体積あたりの合体数）を図 3 に示します。比較のために、以前のカタログ GWTC-3 での連星ブラッ

クホール合体の解析から得られた 90% 信頼区間を黒い点線で記入しています。新しい結果は以前の推定値と一致していますが、合体率の増加傾向は以前の範囲の上限付近にあることがわかります。O4a の新しいデータを追加することで、高赤方偏移での合体率に対する制限は改善されましたが、個々のサンプルが広く分散していること（図 3 の赤い線）からもわかるように、まだその制限は不十分です。



- 重力波に関する一般的な情報は[こちら](#)（英語）。
- 重力波を複数の検出器で観測する利点については[こちら](#)（英語）。
- 一般相対性理論で「禁止された」される偏極モードについては[こちら](#)（英語）。
- コンパクト連星合体については[こちら](#)（英語）。

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/>

本発表の論文は

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500349>

（日本語訳：真貝寿明，譲原浩貴）

用語集

- **ベイズ推定 (Bayesian inference)** : すでにある何らかの知識や信念（事前予測）を利用して、得られたデータから関連する事象の発生確率を計算する方法。より詳しくは [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](#)。
- **信頼区間 (Credible interval)** : 不確実なパラメータ値の範囲を、特定の確率で含まれる区間として表したもの。
- **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）背景重力波が存在することを示している可能性がある。
- **周波数ビン (Frequency bins)** : 時間ではなく周波数に関して数学関数や物理的信号を分析するときの周波数サンプルの間隔。
- **グリッチ (Glitch)** : 重力波データに見られるノイズのバースト（破裂）のことで、スピーカーから聞こえる破裂音に似ている。これは、時に本物の重力波信号と混同されたり、本物の重力波を隠したりすることがある。より詳しくは [ここ](#)。
- **重力波の偏極 (Gravitational-wave polarization)** : 重力波の伝播によって引き起こされる時空の伸縮および体積変化の幾何学的形状。この [リンク](#) にある図 5 がわかりやすい。
- **観測運転期間 (Observing run)** : 重力波検出器が天体物理的な観測のためにデータを取得している期間。第 4 期観測運転 (O4) は、2023 年 5 月に開始された。
- **重複低減関数 (Overlap reduction function (ORF))** : 背景重力波の観測で、特定の検出器のペアを考えたときの感度をあらわす際の周波数に依存した係数。ORF は検出器ペアの相対的な位置、すなわち検出器間の距離と相対的な向きに依存する。詳細は [こちら](#)。
- **シューマン共鳴 (Schumann resonances)** : 雷によって生成される超低周波の電波で、地球の表面と電離層（高度約 60 km から始まる大気層）の間に捕捉されたままになるもの。
- **感度曲線 (Sensitivity curve)** : 重力波検出器の感度は、多くの物理現象（地面振動や電氣的なノイズなど）に起因する多くのノイズ源によって決定される。これらすべてのノイズ源の合計が、各周波数での検出器の感度を決定し、その感度曲線を示す。
- **背景重力波の強さ (Strength of the GWB)** : 重力波のエネルギー密度。宇宙の全エネルギーのうち、重力波の形でもつエネルギーの割合で表される。