

## Advanced LIGO と Advanced Virgo の第 3 観測期までの観測データから得られる等方的背景重力波に対する上限値

宇宙マイクロ波背景放射\* (用語解説あり) は、私たちが測定できる最も古い電磁放射であり、宇宙の起源に関する情報を提供してくれています。これと同様に、背景重力波 (GWB; Gravitational Wave Background) が存在します。さまざまな天体物理的および宇宙論的な波源によって生成された重力波の重ね合わせで、重力波 (GW) は物質との相互作用が弱いため、CMB よりもさらに時間を遡った情報が得られることができると期待されています。天体物理起源の重力波には、個別に区別できないコンパクト連星の合体 (CBCs; compact

binary coalescences) や重力崩壊型超新星が含まれます。現時点で、遠方の CBC に由来する GWB の強度についてはある程度の範囲の予測がつきませんが、重力崩壊型超新星に由来する GWB については、確かに存在するものの、振幅については不明です。これらに加え、宇宙論的な起源のものとして、宇宙ひも、インフレーション、一次相転移などの重力波源も考えられています。これらの GWB のいずれかを検出することは、大きなブレイクスルーになり、天体物理学や宇宙論の進化への基本的な洞察を提供することになります。

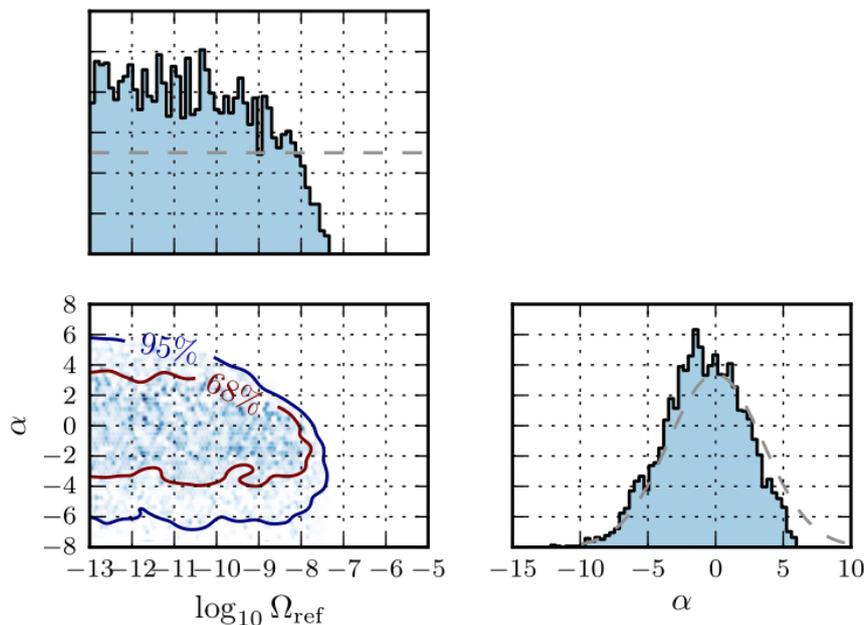


図 1: 背景重力波 (GWB) の振幅  $\Omega_{\text{ref}}$  と、振幅を  $\Omega_{\text{ref}} (f/25\text{Hz})^\alpha$  と表現したときのスペクトル指数  $\alpha$  の確率分布を示す。この式表現は、GWB の周波数  $f$  への依存性について私たちが仮定したもので、考えられる複数の重力波源の周波数依存性を含めたものである。この分布から、データが  $\Omega_{\text{ref}}$  の低い値となる確率が高いことがわかる。灰色の破線は、これらのパラメータに関する事前の仮定を表している。68%と 95%の曲線の内側は、これらの数値で与えられる全確率の領域を示している。

私たちは、Advanced LIGO（アドバンスト・ライゴ）と Advanced Virgo（アドバンスト・ヴィルゴ）の最初の3つの観測期間\*（O1, O2, O3）のデータを分析しました。GWBの検出までには至りませんでした。最近のO3のデータを含めることによって、GWBの強さ\*に対して、これまでよりも厳しい上限をつけることができました（図1を参照）。観測データに見られる飛び出したノイズを除去する手順を適用して、検出の感度を向上させました。この手順を通じて、私たちは、検出器や地面振動または人間に由来する環境ノイズからの相関信号がないことを（私たちの知る限りではもっとも確実に）確認しました。さらに、CBC検出では標準的に使われていたゲーティングと呼ばれる手法をGWBの検出でははじめて応用することにより、大振幅のグリッチ\*の影響を軽減しました。これは、時間領域\*に見られる各グリッチを消去する手法です。また、今回、GWBを探索するときに、2つのLIGO検出器に加えて、はじめてVirgo 干渉計からのデータを含めました。これらの干渉計データの相互相関\*をとり、ベイズ推定\*手法を用いて、95%の信頼度\*でGWB振幅の上限値を決めました。干渉計間で相関がないと仮定することにより、データを相互相関させることで、環境ノイズを取り除いた解析をすることができました。同じ位置に同じ向きに配置された複数の検出器であれば、GWBに最も敏感ですが、局所的なノイズ源にも敏感です。そのため、同じ位置・同じ向きに配置されている状態に最も近いLIGO検出器のペアによるGWBに対する感度が感度の上では支配的になります（最大感度よりはだいぶ低くなりますが）。Virgo検出器は、LIGO検出器と比較して距離と方向が異なるため、感度への寄与はわずか数パーセントです。干渉計を改善するすべての科学者の絶え間ない努力のおかげで、今回得られた上限値は、以前の結果と比較して約5倍良くなりました。単に大量のデータを解析したことで制限値が厳しくなった面もありますが、改善の大部分は感度の増加によるものでした。干渉計がO2と同じ感度で動作していた場合、O3のデータを使っても、上限値の改善は2倍未満になっていたはずでした。

今回、私たちは、3つの干渉計の近くに磁場測定専用センサーを設置して、シューマン共鳴\*として知られる全地球レベルで相関がある磁気

ノイズを探索しました。シューマン共鳴は背景ノイズとして重力波信号を「汚染」する可能性があるため、特定する必要があるからです。磁場は干渉計の主要な部分に影響を与えます。例えば干渉計の先端にある鏡を制御するために磁石が使われているので、干渉計全体の制御にも影響します。磁場の影響が大きいと、鏡を動かし、偽の重力波信号を発生させてしまうかもしれません。結果として、シューマン共鳴が高い相関を引き起こし、GWB検出を誤って主張する結果になる可能性も生じます。磁気汚染の可能性を予測するためには（図2参照）、2つの重要な要素が必要です。1つ目は、専用センサーを使用した正確な磁場測定です。2つ目は、これらの磁場が干渉計にどのように影響を与え、「偽の重力波信号」として入力される可能性があるかを測定することです。この影響の大きさを決定するために、コイルを用いて干渉計の近くに強い磁場を生成し、磁場を正確に測定しながら、人工的に挿入した重力波のテスト信号への影響を観察しました。私たちは、磁気汚染を2つの方法でテストしました。まず、個々の周波数帯域\*で磁気汚染を探しました。次に、異なる周波数帯域での磁気汚染の和が蓄積して、干渉計の感度を超える結果になってしまう可能性を探しました。結果として、磁気ノイズ相関の推定値は、個々の周波数でも複数の周波数帯域の和を考慮しても、O3で達成された感度をはるかに下回っていました（図2を参照）。さらに、私たちは、ベイズ推論に基づいて、GWBとシューマン共鳴の同時探索を行うプログラムを開発しました。他の手法と矛盾なく、GWBからの信号もシューマン共鳴からの信号も見つかりませんでした。ですが、この新しく開発された手法は、今後、感度がさらに向上していく中で、将来の検出で非常に役立つと期待されています。

私たちは、GWBのスカラー・モード、ベクトル・モードと呼ばれる偏極\*成分についても解析し、その上限を求めました。一般相対性理論では、テンソル・モードの重力波だけが許されるため、これらは「禁じられた」成分とも言えます。もし、これらが検出されたならば、アインシュタインの一般相対性理論を、より複雑なものに修正する必要が出てきます。重力波検出器の数が多いほど異なる偏極を区別することができるため、一般相対性理論を超える偏極成分の探索が可能に

なったのは、Virgo のデータが追加された成果です。私たちの解析では、これらの「禁じられた」偏極成分の証拠は見つかりませんでした。他の重力波観測でも、とくに連星中性子星からの重力波信号 **GW170817** の観測の結果でも、純粋にテンソル成分のみを持つ重力波だけを考えればよい結果になっていて、矛盾しません。

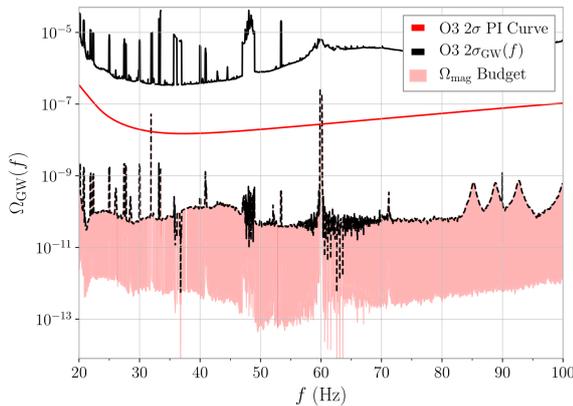


図 2:  $\Omega_{\text{Mag}}$  見積もりと呼ばれる相関磁気信号の効果 (干渉計で得られた相関信号  $\Omega_{\text{GW}}$  から推測される重力波のエネルギー密度で表したものを周波数帯で示したもの (黒い破線) と複数の周波数帯で積分されたもの (赤い帯). 赤い帯の上部 (黒い破線) は、 $2\sigma_{\text{GW}}(f)$  と呼ばれる黒線の感度曲線\* の下にあり、これは磁気汚染が個々の周波数帯の感度をはるかに下回っていることを示している。  $2\sigma$  PI Curve と呼ばれる赤い感度曲線は、複数の周波数帯にわたる磁気ノイズの蓄積に対する検出の感度を示している。赤い帯がこの赤い感度曲線をはるかに下回っている。これらより、相関磁気ノイズの測定値は、個々の周波数の場合でも複数の周波数の合計を考慮した場合でも、O3 で達成される感度をはるかに下回っている。

また、私たちは、コンパクト連星からの **GWB** を予測するモデルも試しました (図 3 を参照)。これは、[以前の論文](#) で議論したように、LIGO と Virgo が検出できるであろう最初の **GWB** であると考えられているものです。LIGO-Virgo による最新の [突発的重力波カタログ 2 \(GWTC-2\)](#) からのデータを用いました。そして、**GWB** は、将来計画となっている **LIGO A+** および **Advanced Virgo Plus** の検出器のレベルに到達すれば、実際に検出される可能性があることがわかりました。また、**GWB** の探査と個々のコンパクト連星の観測とで共同解析を行いました。**GWB** は、個別に検出可能なコンパクト連星の観測よりも遠い距離での連星合体に影響を受けやすいため、**GWB** の測定により、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。今回の O3 期

の観測には当てはまりませんが、**GWB** が将来の観測に役立つ可能性があることを示しています。

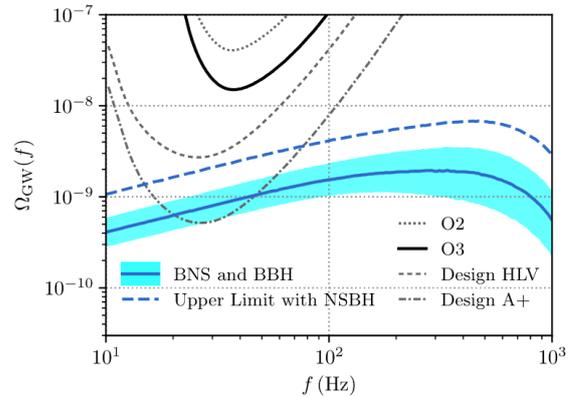


図 3: 現在まだ判別できていないコンパクト連星合体 (CBC) によって生じる背景重力波 (**GWB**) の予測について、現在および将来の観測での感度を比較した図。ここでの CBC は、連星中性子星 (BNS) と連星ブラックホール (BBH) の合体を想定している。青い線は BNS と BBH による **GWB** 強度の中央値の推定であり、水色の帯はその線が 90% の不確実性でこの領域まで動くことを示しています。さらに、O2 と O3 (第 2 と第 3 の観測期間) に対応する感度と、将来の A+ 検出器時代 (で LIGO-Virgo ネットワークを仮定したとき) の設計感度も示してある。青い破線は、中性子星とブラックホール (NSBH) の合体を含めたときに予測される CBC 背景の 95% 信頼区間の上限値を表している。NSBH 合体を確認した検出はまだ存在しないため、その発生率は、BNS または BBH の発生率よりも不確実である。

今回私たちは **GWB** の検出を「まだ」主張することができませんでしたが、この解析は私たちの分野における大きな前進となりました。3 番目の干渉計からのデータの組み込み、グリッチを除去するためのゲーティングの使用、一貫性のあるベイズ推定の枠組みでのシューマン共鳴適合値の積分、そしてコンパクト連星の引き起こす **GWB** を予測するモデルの応用など、今回はじめて用いた解析が多々あります。これらの新たな試みは、将来、背景重力波検出を宣言できる感度に達したときに、威力を発揮することになるでしょう。

## さらに詳しく知るために：

ウェブページを訪ねましょう。

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)
- 今回の報告のもとになった論文は [こちら](#)。
- 重力波の一般的な概念について、より詳しく説明しているのは [こちら](#)。
- [複数の重力波干渉計が必要となる理由](#) について。
- [一般相対性理論で「禁じられた」偏極](#) について。
- [コンパクト連星合体 \(CBCs; compact binary coalescences\)](#) について。

## 用語集

- **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](#)。
- **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日まで継続された。
- **背景重力波 (GWB) の強さ** : 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。
- **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ます。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ります。より詳しくは [ここ](#)。

- **時間領域 (time domain)** : 時間変化する数学関数や物理的信号の解析のこと。
- **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。
- **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](#)。
- **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。
- **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。
- **周波数帯域 (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。
- **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。
- **感度曲線 (sensitivity curve)** : 重力波検出器の感度は、多くの物理現象 (地震動または電子ノイズなど) に起因する多くのノイズ源によって決定されます。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、その感度曲線を示します。

<https://dcc.ligo.org/G2100142>