

## GW250114 によるブラックホール分光分析と一般相対性理論の検証

### 重力波信号 GW250114 の検出

2025 年 1 月 14 日、LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究グループは、非常に強い重力波信号 GW250114 を観測しました。この信号は、ワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リヴィングストンにある LIGO 検出器によって、LIGO-Virgo-KAGRA による第 4 回観測運転期間の第 2 期 (O4b) 中に記録されました。

GW250114 は、これまで観測された重力波信号の中で最も明瞭な信号として際立っており、2015 年に初めて検出されたものの約 3 倍の強さを誇ります。ここで「より強い」とは、重力波信号が検出器の背景ノイズをどれだけ明確に超えているかを示す指標である信号対雑音比が高いことを意味します。この信号は、ほぼ等しい質量でほとんど自転していない 2 つのブラックホールが互いにらせん状に接近し、衝突・合体して、1 つのより大きなブラックホールに落ち着く際に予想されるものと一致しました。

Physical Review Letters 誌に最近掲載された別の論文では、GW250114 の検出報告と、ブラックホールの特性、およびいくつかの基礎物理学的な検証が示されています。本論文は、ブラックホール分光分析と一般相対性理論の精密検証に焦点を当てた、補足研究を報告します。

### GW250114 でアインシュタインの理論を検証する

GW250114 は、その並外れた信号の強さから、アルバート・アインシュタインの一般相対性理論の検証の絶好の機会を提供します。合体するブラックホール周囲の急速に変化する強力な重力場という、考えられるなかで最も究極な状態での検証です。この検証の目的は、観測された重力波信号がアインシュタインの予測と完全に一致するか、あるいは何らかのずれが存在し、それが一般相対性理論を超えた新しい物理学のヒントとなるかどうか、というものです。

この検証に重要なツールの一つが、ブラックホール分光分析です。この手法は、波形のリングダウン段階（合体直後、新しく形成されたブラックホールが安定状態に落ち着く段階）に焦点を当て、ブラックホールが発する独特の信号（音で例えれば音色）を研究します。打たれた鐘が独特の音色で響くように、新しく形成されたブラックホールは、一連の特徴的な準固有モードと呼ばれる重力波を放射します。

ブラックホール脱毛定理によれば、一般相対性理論におけるブラックホールは、質量、自転角運動量、電荷の 3 つの物理量によって完全に記述されます。しかし、天体物理学的環境

では、有意な電荷は極めて急速に中性化されるため、質量と自転角運動量のみが重要な量となると予想されます。これは、準固有モードの周波数と減衰時間が、これら 2 つの物理量によって一意に決定されることを意味します。

複数のリングダウンの音色のモードを検出し、それらが予想される周波数と減衰時間と一致するかどうかを確認することは、一般相対性理論の強力な検証となります。このような測定は、脱毛定理を検証するだけでなく、アインシュタインの予測からのずれが生じる原因を考察する機会を与えてくれます。つまり、生じる「ずれ」は、ブラックホールの特異な特徴に起因するものなのか、重力理論のより根本的な修正に起因するものなのか、という考察です。

一般相対性理論では、自転するブラックホールを記述する唯一の解はカーブラックホール計量です。したがって、私たちの分光分析は、GW250114 で形成された残骸天体が、カーブラックホールと整合するかどうかを検証するものです。現在の測定精度の範囲内で、残骸天体の特性は確かにカー解と一致しています。

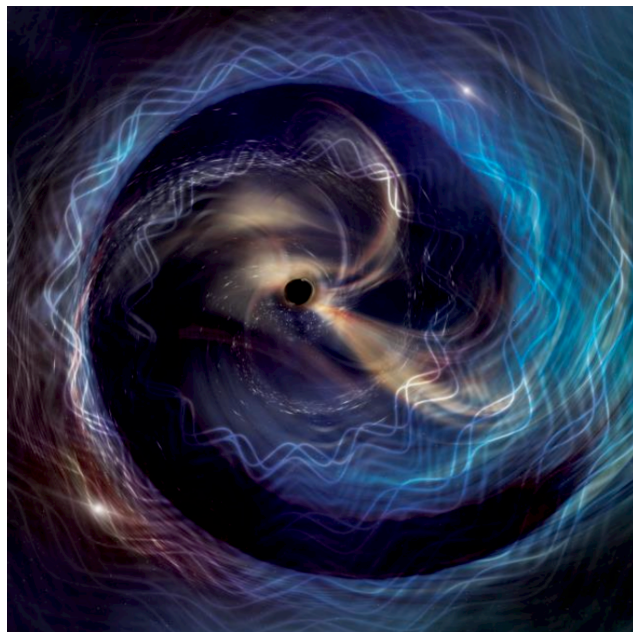


図 1: GW250114 の合体後のブラックホールを芸術的に表現したもの。新たに形成されたブラックホールが安定状態に落ち着くにつれ、鐘の音のような特定の周波数の重力波を放出する、というリングダウン段階をイメージしている。[画像提供: LIGO Scientific Collaboration/Sonoma State University/A. Simmonet]

## リングダウンを聴く：基音、倍音、そして高周波の第二基本音

ブラックホール合体後の信号部分のみを用いて、私たちは合体直前のインスパイラル段階からの情報を用いずに、リングダウン重力波を探索しました。データは、基音とその倍音（基音より、減衰が速い）<sup>1</sup>でよく表されることがわかりました。倍音は合体後約3ミリ秒間追跡できましたが、その後は検出器ノイズに埋もれて分解できなくなりました。同定されたリングダウン重力波の振幅と位相は、ブラックホール合体の詳細な数値相対論シミュレーションと一致しました。重力波信号の周波数と減衰時間は、測定の不確かさの範囲内で理論予測と整合することがわかりました。倍音の測定値を図2（赤色の網掛け部分）に示します。黒色のマーカーは、全信号解析（合体前後の重力波信号）から推定された質量と自転角運動量を持つカーブラックホールから予測する値、すなわち一般相対性理論の予言する値を示しています。

私たちは別の解析として、インスパイラル、合体、リングダウンの全過程を含む信号を、数値シミュレーションに較正されたモデルを用いて解析しました。このモデルでは、基音の周波数と減衰時間をカーブラックホールの予測で固定するのではなく、自由に変化させるようにしています。信号全体の情報を組み込むことで、リングダウンの特性をさらに正確に測定できます。この方法により、基音の周波数は約2%の精度で、減衰時間は約9%の精度で測定され、どちらも一般相対性理論の予言値と非常によく一致しています。この解析は、基音の約2倍の周波数で響く第2高調波基音についても初めての制約を与えることになり、これもまた理論予測と一致しています。これらの結果を図2に示しました。基音と第二音はそれぞれ緑色と黄色の陰影で示されています。

リングダウンのみの解析と全信号解析を組み合わせることで、相補的な検証が実現し、残骸となったブラックホールの特性が、カーブラックホールのものと矛盾ないことが示されたのです。

## インスパイラル・合体・リングダウン 信号全体にわたる無矛盾性

私たちは、リングダウン信号の他の部分についても、一般相対性理論の予測を検証しました。初期のインスパイラル段階（ブラックホールが最終的な合体時よりもゆっくりと互いを公転する段階）では、アインシュタインの予測からのずれを示す証拠は見つかりませんでした。また、信号の初期部分から推定された最終的なブラックホールの質量と自転角運動量を、後の合体とリングダウンの波形から推定された値と比較したところ、やはり一致しました。

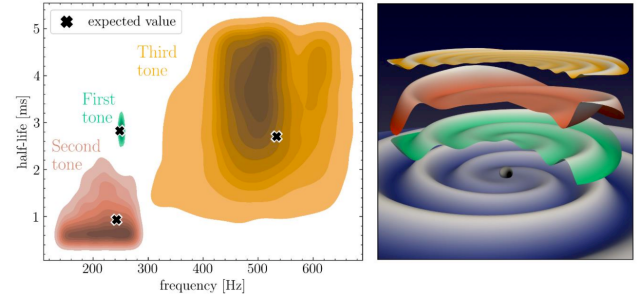


図2: 左図: GW250114の解析で、同定または制約されたリングダウン重力波の周波数と減衰時間（半減期）。色付きの領域は、準固有モードの周波数と減衰時間を自由に変化させた解析結果を示している。赤い領域はリングダウン重力波のみの解析で検出された倍音（第2音）に対応し、緑と黄色の領域は全信号解析から得られた基本波（第1音）と第2高調波（第3音）に対応しています。黒いマーカーは、一般相対性理論を仮定し、全信号解析から推定された質量と角運動量を持つカーブラックホールに対応する予測値を示している。濃淡は90%（最も明るい）から10%（最も暗い）までの確率領域を示している。右図: GW250114の測定パラメータを用いた数値シミュレーションで得られる重力波波形（下部渦巻き、青色）をさまざまな成分に分解したもの。残骸ブラックホールは下部の球面である。緑、赤、黄色の表面は、それぞれ第1音（基音）、第2音（倍音）、第3音に対応する。

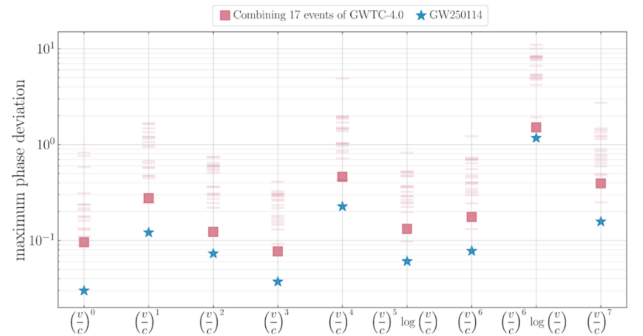


図3: 重力波信号のインスパイラル段階を、ポストニュートン展開で得られた波形と比較し、一般相対性理論からの可能なずれの90%の上限値を示したものの。ポストニュートン展開では、インスパイラル段階の波形を連星の軌道速度 ( $v/c$ ) のべき乗の級数として記述する。ここで  $c$  は光速であり、各係数は一般相対性理論によって一意に予測される。一般相対性理論は  $(v/c)^1$  項の係数が正確にゼロになると予測するため、上限値は絶対的なずれに対応する。その他の項の係数については、上限値はずれの割合を表す。青い星印は GW250114 から得られた制約値を示す。比較のために、薄い赤色の帯は GWTC-4.0 にある重力波信号のそれぞれの波形による結果を示し、赤い四角は17個の波形を用いて得られたカタログでの制約値を示す。すべてのポストニュートン展開の次数にわたって、GW250114の測定値は、複数の重力波イベントを組み合わせ得られたものよりも2-3倍厳しい上限を与えている。

<sup>1</sup> (訳註) リングダウン段階で一番強いモードとなるのは、球面調和関数のパラメータを用いて  $(\ell, m, n) = (2, 2, 0)$  であり、これを基音/第1音 (fundamental tone, first tone; 図2の緑色) と呼ぶ。本論文で報告しているのは、その次の成分として  $(2, 2, 1)$ ,  $(4, 4, 0)$  の検出である。  $(2, 2, 1)$  を倍音/第2音 (first overtone, secondary tone; 図2の赤色),  $(4, 4, 0)$  を第2高調波基音/第3音 (higher-frequency secondary tone, third tone; 図2の黄色) と訳した。

驚くべきことに、GW250114 の信号の強さにより、これまでに得られた一般相対性理論からのずれの可能性に対する制約をさらに強く課すことができました。この制約は、最新の**突発性重力波カタログ第4版**（GWTC-4.0）に含まれる数十の信号からの情報を組み合わせて得られた制約に匹敵するだけでなく、場合によっては2-3 倍も厳しいものになります。GWTC-4.0 には、LIGO-Virgo-KAGRA による第4 回観測運転第1 期（O4a）までの信号が含まれています。これらの改善点のいくつかは図3 に示します。

最後に、データから可能な限り最良の一般相対性理論波形を差し引いた結果、説明のつかないパターンが残るかどうかを調べました。結果は変わらず、残った信号は通常の検出器ノイズのように振る舞うことを確認しました。

## 堅固なアインシュタイン

あらゆる検証において、現在の観測精度の範囲内で、GW250114 の波形は一般相対性理論の予測と一致しています。この信号の強さと明瞭さは、アインシュタインのブラックホール合体理論をこれまでで最も正確に裏付けるものであり、他の重力理論がブラックホール合体理論とどれほど異なる可能性があるかという限界を大幅に狭めるものです。GW250114 の検出報告の論文では、ホーキングの**ブラックホール面積増大則**を検証し、残骸となったカーブラックホールの特徴を報告しましたが、本論文ではGW250114 によって進められた科学の広がり示しています。

LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究グループがブラックホール合体からの重力波を初めて検出してから10 年を迎えます。検出器の感度が劇的に向上したことで、GW250114 のような信号をかつてない明瞭さで記録することが可能になりました。こ

れらの新たな進歩によって、将来さらに強い信号が得られることになるでしょう。したがって、GW250114 は、今後の観測によって可能になる科学劇場の予告編です。より強力な検出によってブラックホールの特性がより詳細に明らかになり、アインシュタインの理論を究極の限界まで押し上げることになります。

## 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/P2500461/public>  
あるいは arXiv から。
- GW250114 検出の論文は  
<https://dcc.ligo.org/P2500421/public>  
あるいは arXiv から。
- GW250114 のデータは、Gravitational-Wave Open Science Center (GWOSC) の**ページ**から。
- GWTC-4.0 のデータは、GWOSC の**ページ**から。

（日本語訳：真貝寿明，中野寛之）