

## 最新かつ最強の信号を伴うコンパクト連星合体観測による一般相対性理論の検証

2026 年 7 月, LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループは, 中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体の合体から発生する重力波信号を用いた一般相対性理論の検証に関する最新の結果を発表しました. 第 4 回観測運転期間 (O4) で新たに得られた 77 個の高有意信号 (後半の O4b から 72 個, 前半の O4a から 5 個) と, これまでに検証された 91 個の観測を組み合わせた今回のデータは, アインシュタインの理論を検証するために用いられたデータとしては過去最大かつ最高品質のものです. すべての検証において一般相対性理論は再び合格し, 理論からの逸脱の許容範囲は以前よりも大幅に狭くなりました. (この要約で使用されている一部の専門用語の定義については, [用語集](#)をご覧ください)

アインシュタインの一般相対性理論は, 現在, 重力に関する標準的な理論として受け入れられています. アインシュタインがこの理論を提唱して以来 111 年の間, さまざまな方法で徹底的な検証が行われてきましたが, 常に極めて良好な結果を示してきました. しかし, この理論は絶えず厳しい検証の対象であり続けています. たとえわずかなものであっても理論からの逸脱が観測されれば, [量子重力理論](#)や[ダークエネルギー](#)の性質といった, アインシュタインの理論の枠組みを超えた「新しい物理学」への手がかりとなる可能性があるからです. 重力波は一般相対性理論が直接的に予言する現象であり, [2015 年 9 月に連星ブラックホールの合体による重力波が直接観測されたこと](#)でその存在が裏付けられました. 恒星質量ブラックホールの接近 ([インスパイラル](#)) と合体の観測は, 重力が極めて強く, かつ急速に変化する極限環境下においても一般相対性理論が妥当であるかどうかを検証する, またとない機会を提供してくれます.

過去 10 年にわたり, LVK 共同研究グループは重力波観測を用いて一般相対性理論の検証を継続的に行ってきました. これらの検証により, 一般相対性理論からの逸脱が存在するとして

も, それは検出器の測定能力の限界を下回るほど極めて微小なものであることが確認されています. 観測される重力波信号 (以降, イベントと訳す) の数が増えるにつれ, 検証の精度や厳密さも高まっています. 今回報告するのは, 最新の[観測運転期間](#)の後半 (O4b) で得られた, 統計的有意性の高い 72 件のブラックホール合体信号と, 前半 (O4a) で得られたものの未解析だった 5 件の信号に関する結果です. これらを過去の観測で検証された 91 件のイベントに加えることで, 一般相対性理論の検証に用いられたものとしては史上最大規模のデータセットが構築されました. このデータセットは質的にも極めて優れており, 驚くほど高い[信号対雑音比](#)で観測された多数の信号が含まれています. それらの鮮明な波形は, 新たな検証を可能にするとともに, 既存の検証の精度をさらに高めるものです. 特筆すべきイベントは「[GW250114](#)」であり, これはこれまでに観測された中で最も強い重力波信号です. あらゆる検証において一般相対性理論は再びその妥当性が確認され, 理論からの逸脱の許容範囲はさらに厳しく制限されることとなりました (O4a までのデータに基づく検証結果については, 以前の科学的成果の[概要](#)をご参照ください).

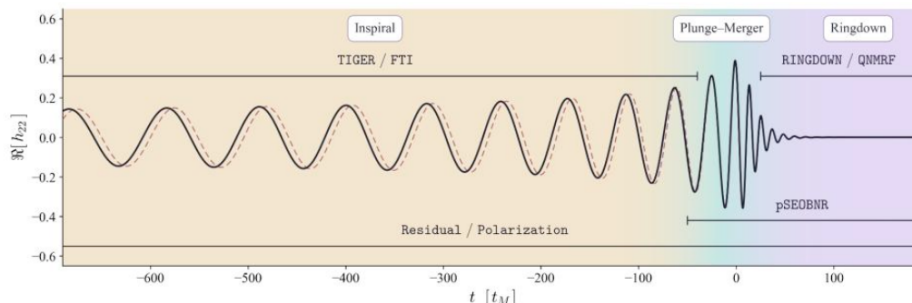


図 1: 連星ブラックホール合体から生じる重力波信号の模式図. 横軸は時間, 縦軸は波の振幅を表す. 信号は「インスパイラル (軌道収縮)」「急接近・合体」「リングダウン (減衰振動)」の 3 つの領域に分けられ, 各領域はそれぞれ異なる一般相対性理論の検証手法を用いて調べられる. 図には検証手法の名称と, それによって検証される信号の領域も示している. 一般相対性理論の予測から逸脱する仮想的な信号が, 破線で重ねて示されている.

一般相対性理論はどのように検証されるのでしょうか。アインシュタインの理論は重力を記述するための確立された枠組みを提供しており、近年の研究では、コンパクト連星の合体から生じる重力波を正確にモデル化する技術が飛躍的に進歩しています。一般相対性理論の検証は、(i) 合体プロセスの各段階における理論の内部整合性を評価すること（図1を参照）、あるいは(ii) 一般相対性理論からの逸脱として考えられる事象に起因する、重力波信号の特定の「歪み」を探索すること、のいずれかに基づいて行われます。

一般相対性理論からの逸脱が生じる要因としては、重力波の生成過程や伝播過程における影響、あるいは合体する天体が一般相対性理論で記述されるブラックホールとは異なるものである可能性などが挙げられます。ただし、こうした検証結果の解釈には注意が必要です。装置ノイズの変動や、解析に用いられる信号モデルの精度の限界が、一般相対性理論からの逸脱のように見える現象を引き起こす可能性があるため、それらを真の物理的效果と慎重に区別しなければなりません。

## 多岐にわたる検証

利用可能な重力波観測の数の多さと質の高さにより、LVKの科学者たちは一般相対性理論に対する多種多様な検証を実施することができます。

もっとも基本的な検証は、観測された重力波信号が一般相対性理論の予測と全体として整合しているかどうかを確認することです。これは、一般相対性理論が予測する最も適合する信号をデータから差し引き、その差分（残差と呼ばれます）を解析して、予想される装置ノイズと比較することで行われます。ここで扱う観測は少なくとも2台、多くの場合は3台の検出器によって行われるため、検出器間での残差の一貫性（観測地点間の光の到達時間の差を考慮したもの）を調べることも、さらなる検証になります。真の重力波信号であれば検出器間で相関のある成分として現れるはずですが、各検出器の装置ノイズは互いに相関しないためです。

第二の検証は、信号の偏光成分を調べるものです。光の波と同様に、一般相対性理論における重力波は「プラス」と「クロス」と呼ばれる2つの横波偏光モードしか持ちません。しかし、修正重力理論では最大6つの独立した偏光モードを持ちうるとされています。偏光の検証では、データが一般相対性理論の予測する2つのモードのみと整合するか、それとも重力場がより一般的な形で振動しているかを確認します。追加の偏光モードの有無は、複数の検出器による観測を用いて検証できます（詳しくは[GW170814の要約](#)の図5をご覧ください）。

その他の検証では、連星ブラックホール系の進化や重力波の放出・伝播が、アインシュタインの予測から逸脱していないかを直接調べます。伝播の検証では、宇宙を長い距離にわたって伝わってきた重力波が、検出器に届くまでに変化していないかを確認します。たとえば一般相対性理論は、重力波が光速で伝わり、物質とはごく弱くしか相互作用しないと予測しています。これに対し、質量を持つグラビトン（重力子）やダークエネルギーを想定するいくつかの代替理論では、重力波が異なる速度で伝播し、分散を起こす可能性が示唆されています。これは、プラズマ中を伝わる電波が分散するのと同様に、周波数

によって到達時刻がわずかにずれることを意味します。重力波の生成に関する検証では、連星のインスパイラル（軌道収縮）と合体の様子が一般相対性理論の予測と一致するかを調べます。これは、代替理論の効果を模した追加パラメータを重力波波形モデルに導入することで検証できます。データがこれらのパラメータをゼロと矛盾しないと示せば、アインシュタインの理論は検証に合格したことになります。そうでない場合、その結果は一般相対性理論を超えた新しい物理学の手がかりとなる可能性があります。

最後に、合体後に残された最終的なブラックホールに焦点を当てた一連の検証が行われます。合体時の激しい力学的作用によって一時的に歪んだ残存ブラックホールは、叩かれた鐘が振動を音として放出するように重力波を放射します。この段階は「リングダウン」と呼ばれます。放射される波の特定の周波数や減衰にかかる特徴的な時間は、いずれも残存ブラックホールの最終的な質量と自転角運動量（スピン）によって決まります。これこそが「脱毛定理（あるいは無毛定理, no-hair theorem）」の根拠となっています。つまり、ブラックホールのあらゆる歪み（ここで言う「毛」）は放射によって失われ、最終的にはわずか2つのパラメータ（質量と回転運動量）で記述される<sup>1</sup>状態だけが残るのです。曲の終わりに合唱の声が消え入るように、ブラックホールが発する個々の「声」—すなわちリングダウンの倍音成分 (overtone) と高調波成分 (harmonics あるいは higher-tone) — は、その発生源に関する詳細な情報を運んでいます<sup>2</sup>。そのため、科学者はリングダウンの周波数スペクトルや減衰時間を分析することで、ブラックホールの質量やスピンを知ることができます。通常は単一の倍音/高調波が検出されますが、それによって合体前や合体中に推定されたパラメータとの整合性を確認することが可能です。さらに、複数の倍音/高調波を検出し、それぞれから推定されるブラックホールのパラメータの整合性を確認することは、「脱毛定理」の直接的な検証につながります。

## それで、アインシュタインは正しい？

検討されたすべての重力波イベントにおいて、残差はノイズと整合しており、重力波信号が一般相対性理論によって適切に記述されていることが示されました。

アインシュタインの理論で予測される2つの偏極モード以外のモードを示す兆候は見られず、重力波の生成過程において一般相対性理論からの逸脱を示す証拠も確認されませんでした。ただし、図2に示すように、今回の解析によって、起こり得る逸脱に対する制限は従来よりも大幅に厳しくなりました。

また、新たに形成されたブラックホールの最終的な振動である「リングダウン」についても詳細な解析を行いました。いずれの事例においても、測定された周波数と減衰時間は一般相対性理論におけるブラックホールの予測値と整合しており、リングダウンから推定された残存ブラックホールの質量やスピンは、信号の他の部分から推定された値と一致しています。

今回の最新の検出事例は、単にサンプル数を増やしただけでなく、質的に新しい検証を可能にするものも含まれています。最も注目すべきは、これまでに観測された中で最も強い重力波信号である「[GW250114](#)」です。この事象により、リン

<sup>1</sup> ここではブラックホールの持つ電荷を無視している。天文学的な現象では、電荷はすぐに中性化されるので、質量と回転運動量のみが残残るからである。

<sup>2</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) と呼ぶ。その次の成分として  $(2, 2, 1)$  のモードは、倍音/第2音 (first overtone, secondary tone)、 $(4, 4, 0)$  のモードは、第2高調波基音/第3音 (higher-frequency secondary tone, third tone) と呼ばれる。

グダウンにおける逸脱に対して最も精密な制限を課すことが可能になりました（過去の科学的概要 [1] [2] も参照のこと）。GW250114 および GW240621 の双方において、リングダウ解析により、主要な振動モードに加えて副次的な高調波モードが特定されました（図3参照）。これは、一般相対性理論に基づくブラックホールの振動として予測されるものと整合しています。一方、GW241011 は、一方のブラックホールが他方よりもはるかに重く、かつ高速で回転している連星系からの信号であり、これまでに観測された多くの系とは異なる特徴を持っ

ています。この事象は、インスパイラル（合体前の軌道収縮過程）における理論修正の可能性に対して強力な制限を与えるものです。また、最も強い信号の一つである GW240925 は、検出器の較正（キャリブレーション）に不確かさが残る状況下で記録されました。この事象を解析に含めるためには、重力波源の特性と同時に装置の較正状態も推定する必要がありましたが、これは重要な検証プロセスとなりました。較正誤差を一般相対性理論からの逸脱と誤認する可能性があるためです。

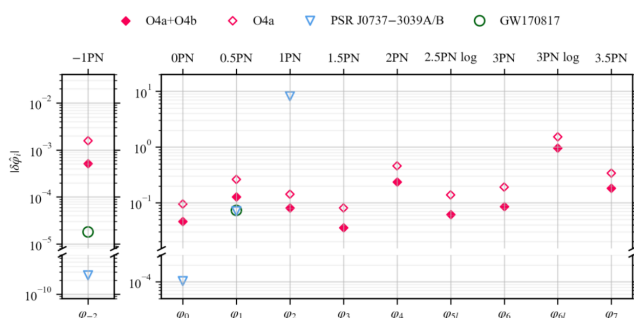


図2：重力波信号の位相を決定づける、いわゆるポスト・ニュートン係数に対する制約。横軸には係数が並べられており、左側の軌道間隔が広い段階から右側の合体直前のインスパイラル（軌道収縮）後期段階に至るまで、信号に寄与する順序に従って配置されています。縦軸は許容されるずれの大きさを示し、プロットの位置が低いほど制約が厳しいことを意味します。今回の解析結果（赤色の塗りつぶし菱形）は、従来の結果（赤色の白抜き菱形）に比べて、大幅に厳しい制約を与えています。最も低次の係数については、比較対象として、連星パルサー PSR J0737-3039A/B（青色の三角形）および連星中性子星合体 GW170817（緑色の円）から得られた制約も示されています。

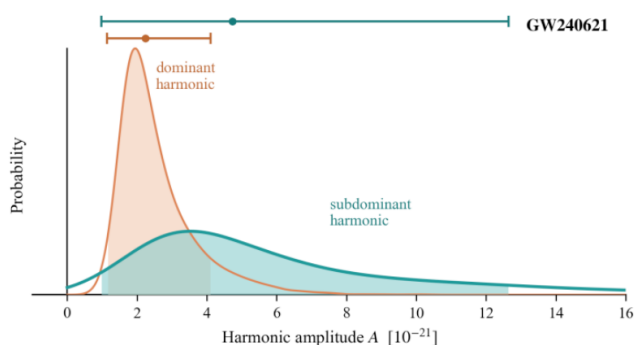


図3：GW240621の合体直後（約1.5ミリ秒後、すなわち最終的なブラックホールのサイズに相当する距離を光が進むのに要する時間の約2倍に相当する時点）に同時に測定された、主要な（オレンジ色）および副次的な（青緑色）リングダウ高調波（ハーモニクス）の振幅に関する確率分布。横軸は振幅を表し、単位は検出器における重力波の典型的なスケールである  $10^{-21}$  である。網掛けされた帯状の領域は、各振動モードの90%信頼区間（確率の90%を含む最も狭い範囲）を示している。曲線の上のマークは、各振動モードの振幅の中央値（塗りつぶされた点）と、その信頼区間を併せて示している。いずれの領域もゼロを含んでいないことから、主要な振動に加えて副次的な高調波も確実に測定されたことがわかる。副次的な高調波は主要なものよりもはるかに速く減衰するため、合体直後のこの時点ではその振幅が主要な振動の振幅と並ぶか、あるいはそれを上回ることもあるが、主要な振動が持続する一方で、副次的な高調波は急速に消えていく。

全体として、これらの結果は、一般相対性理論が修正や新しい物理を必要とすることなく、重力波観測の結果と整合していることを裏付けています。さらに、今回新たに検証された77のイベントを以前の検出事例と組み合わせることで、一般相対性理論からの逸脱の可能性に対して、より厳しい制限を課すことができました。LIGO-Virgo-KAGRA 検出器の性能向上に伴い、次回の観測期間では、さらに強い信号の検出や、アインシュタインの理論に対するより精密な検証が可能になると期待されています。

## さらに詳しく知るために

- 私たちのウェブサイトをご覧ください  
<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/>  
<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>（KAGRA）



- 論文の無料プレプリントはこちらから閲覧できます：  
“Tests of General Relativity with the signals from the GWTC-5” <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500781/public/> または Arxiv: <https://arxiv.org/abs/2607.19293>
- GWTC-5.0 の重力波公開データは、Gravitational-Wave Open Science Centre にて公開されています：  
<https://gwosc.org/GWTC-5.0/>

（日本語訳：真貝寿明）