

コンパクト連星合体の最新の観測による一般相対性理論の検証

アインシュタインの一般相対性理論は、現在、重力の理論として広く受け入れられています。アインシュタインが一般相対性理論を提唱してから 110 年の間、この理論はさまざまな方法で徹底的に検証され、そのすべての試験に見事に合格してきました。しかしながら、この理論は引き続き精査が必要です。重力波は一般相対性理論が直接予言する現象であり、2つのブラックホールの合体現象が 2015 年 9 月に初めて直接観測されたことで確認されました。恒星質量ブラックホールの合体直前の螺旋運動と合体の観測は、強く、そして非常にダイナミックな重力の領域においても一般相対性理論が依然として成立するかどうかを検証するまたとない機会を提供します。

過去 10 年以上にわたって、LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループは、重力波観測データを用いて一般相対性理論を継続的に検証してきました。これらの検証により、一般相対性理論からのずれが存在するとしても、それは非常に小さく、検出器の測定能力では確認できないことを報告しています。しかし、より多くの重力波イベントが観測されるにつれて、私たちの検証はますます厳格になってきています。現在も続く第 4 回観測運転の第 1 期 (O4a) で新たに検出された 42 個の高い有意性を持つブラックホール合体を含めて、一般相対性理論の妥当性を再検証しました。

どのようにして一般相対性理論を検証するのでしょうか。一般相対性理論は、重力を記述するための確立された理論的枠組みを提供しています。近年では解析的にも数値的にも大きな進展があり、コンパクト連星の合体か

ら放射される重力波を高精度にモデル化できるようになっています。一般相対性理論の検証は、(1) 合体の異なる段階にわたって理論の内部整合性を評価する方法、または (2) 一般相対論の破れを示唆する特定の重力波信号の「歪み」を探索する方法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ずれは、重力波の生成または伝播中に発生する可能性があります。また、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ではない場合も考えられます。しかし、これらの検証は慎重に解釈する必要があります。機器ノイズの変動や、計算効率の高い（ただし精度はやや劣る）重力波波形を使うことに起因する限界が、一般相対性理論からのずれと見間違える可能性があります。真の物理的効果と慎重に区別する必要があります。

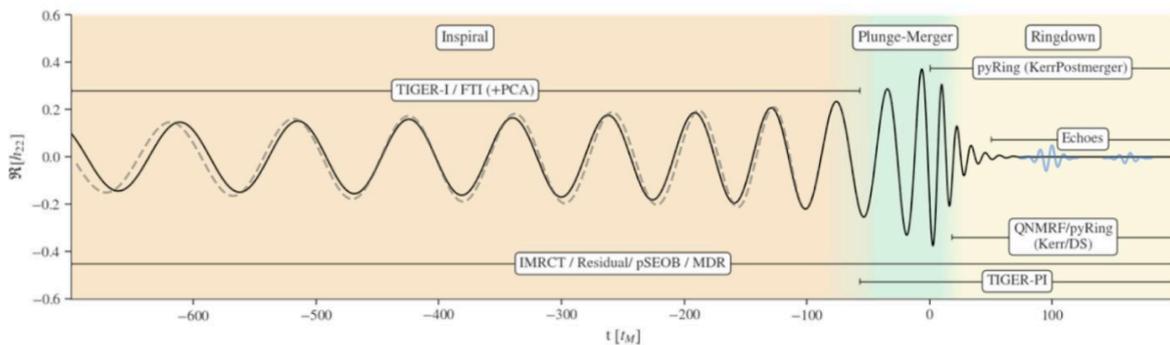


図 1: 連星ブラックホール合体による重力波信号。この図は、一般相対性理論のさまざまな検証に用いられる、信号の螺旋運動期（インスパイラル期）、衝突・合体期、リングダウン期を示しています。検証の名称と、各検証が適用される時間領域も示されています。一般相対性理論の予測からずれるような仮説的な歪んだ信号を破線で示しています。合体後の残存天体がブラックホールではなかった場合に予想される「エコー（こだま）」を青で示しています。

豊富な検証

利用可能な重力波観測データの数の増加と質の向上により、LVKの研究者は一般相対性理論の幅広い検証を行うことができます。以下で詳しく説明する検証に加え、論文では、重力波信号の（副次モードとして知られる）微弱な特徴の整合性を探ったり、ブラックホールが予想通り自転によって変形しているかどうかを検証するなど、他の複数の検証を報告しています。さらに、連星系の重心が加速の兆候を示しているかどうかを検証しました。これは天体物理学的効果であり、適切に考慮されなければ、一般相対性理論からのずれと誤解される可能性があるからです。

ここで取り上げる一連の検証の最初のもは、ブラックホール連星系の進化、そして重力波の放出と伝播が、アインシュタインの予測から逸脱しているかどうかを直接検証することです。例えば、一般相対性理論では、重力波は光速で伝わり、物質と非常に弱い相互作用をすると予測されています。対照的に、重力に関するいくつかの代替理論（例えば、質量を持つ重力子やダークエネルギーを扱う理論）では、重力波は光速とは異なる速度で伝播し、分散を起こす可能性があることを示唆しています。つまり、電波がプラズマ中を伝わる際に分散するのと同様に、異なる周波数の波が、わずかに異なる時刻に到達する現象です。この検証は、代替理論の効果を表すように、重力波信号モデルにパラメータを追加することで可能です。観測されたデータが、追加されたパラメータ値をゼロと整合することを示唆するならば、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。そうでなければ、検証結果は一般相対性理論を超えた新しい物理学を示唆することになります。

別の検証として、観測された重力波信号と一般相対性理論の予測との全体的な整合性、あるいは信号の異なる部分の内部整合性を調べるものがあります。

全体的な整合性は、観測データから一般相対性理論に基づく最も適合する重力波波形を差し引き、残差を解析して、それらが期待される装置ノイズと一致するかどうかを調べることで検証できます。この検証に用いる観測データは、少なくとも2台、多い場合は3台の検出器によって得られているため、観測地点間の光の伝播時間を考慮したうえで、検出器間の残差の一貫性を確認することが、追加の検証手段となります。真の重力波信号であれば、複数の検出器に相関した成分として現れるはずですが、装置ノイズはそれぞれの検出器で無相関であるはずです。

内部整合性は、信号を明確に区分された複数の部分に分け、それぞれを個別に解析することで検証できます。一般相対性理論が正しい場合、信号の異なる部分から推定される重力波のパラメータは一致するはずですが、例え

ば、LVKで検出される重力波信号には、連星ブラックホールの合体過程における三つの段階、すなわち二つのブラックホールの螺旋運動（インスパイラル）、合体、そして最終的な残存ブラックホールのリングダウンに対応する情報が含まれています。「インスパイラル・合体・リングダウン」整合性テストでは、低周波数のインスパイラル段階から推定される残存ブラックホールの質量と自転の大きさを、高周波数の合体後段階から推定される値と比較することで、一般相対性理論の自己整合性を検証します。

光の波と同様に、一般相対性理論では「プラス」と「クロス」と呼ばれる2つの横方向偏光モードのみが許されます。偏光テストでは、重力波が一般相対性理論で予測されるこの2つの偏光状態のみを持つのか、それとも重力場がより一般的な形で振動するのかを調べます。一方、代替的な重力理論では、最大で6つの独立した偏光モードを持つことが可能です。追加の偏光モードの存在は、複数の検出器を用いた観測によって検証することができます。（詳細は、GW170814の論文概要の図5を参照してください。）

連星の合体によって形成されたブラックホールは、合体時の激しい力学的過程によって初期には歪められています。打たれた鐘が振動を音として放出するように、ブラックホールは重力波を放射します。この重力波は、最終的なブラックホールの質量と自転の大きさによって決まる特定の周波数と特定の減衰時間を持ちます。これがいわゆる「ブラックホールの脱毛定理」の基礎となります。つまり、ブラックホールの歪み、すなわち「毛」と呼ばれる情報はすべて放射によって失われ、最終的には質量と自転角運動量の二つのパラメータだけで完全に記述される状態が残ります（情報が失われることを、髪の毛が抜けることと掛けたネーミングの定理です）。歌の終わりに合唱の音が次第に消えていくように、ブラックホールの個々の「声」、すなわちリングダウンにおける倍音成分は、重力波の発生源であるブラックホールの詳細な情報を届けてくれます。したがって、リングダウン信号の周波数の強さと減衰時間を解析することで、ブラックホールの質量と自転角運動量を推定することができます。通常は単一の調和成分しか検出されませんが、合体前および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できます。ブラックホールの最も重要な特徴は「事象の地平面」です。この地平面の内側からは、いかなる信号も外へ逃れることができません。これは、反射する「鏡」のように振る舞って「エコー（こだま）信号」を生じうる硬い表面とは異なります。研究者たちは、このような合体後のエコー信号の存在についても探索を行っています。

では、アインシュタインは正しいのか？

検討したすべての重力波信号について、残差はノイズと整合しており、重力波信号は一般相対性理論によってよく記述されていることを示しています。波形の低周波数部分と高周波数部分から推定される最終的なブラックホールの質量と自転は互いに矛盾がありません。

また、信号の形状の分析から、重力波の発生と伝播のいずれにおいても、一般相対性理論の予測からのずれを示す証拠は見つかりません。同様に、一般相対性理論によって予測される偏光モード以外のモードの存在も示唆されていません。今回の解析は、図2に示すように、一般相対性理論からのずれの可能性について、これまで以上に厳密な制限を示しています。

同様に、リングダウン期の解析でも、一般相対性理論に基づいて推定された残存ブラックホールの質量と自転の値と整合する結果となりました。また、残存天体がブラックホールでない場合に予想される合体後のエコーの兆候も見つかりませんでした。

LVK 共同研究チームは最近、本研究には含まれていない非常に大きな2つの重力波信号を用いて一般相対性理論の検証を行いました。1つは、これまで検出され

た中で最も大きな信号（LIGO リビングストーン観測所でのみ観測）であった **GW230814**、もう1つは信号強度の新記録保持者である **GW250114** です。**GW230814** は当初、一般相対性理論の検証に有望視されていましたが、他の検出器からの同時観測データがなかったため、機器ノイズの過剰度合いを相互チェックすることができず、複数の検出器による観測の重要性が改めて浮き彫りになりました。一方、LIGOの2つの観測所で検出された **GW250114** は、ホーキングの「面積増大定理」の直接検証や、**ポストニュートン**期および**リングダウン**期の波形のずれに関するこれまでで最も厳しい制限を与えるなど、一般相対性理論の高精度な検証を可能にしました。しかし、この重力波信号は第4回観測運転の後半に発生したため、本研究で検討されているデータセットには含まれていません。

まとめると、これらの結果は、一般相対性理論が重力波観測と整合し続けていることを示しており、理論の修正や新たな物理学の適用は必要としません。さらに、新たに検証された42の重力波信号と以前の検出結果を組み合わせることで、一般相対性理論からのずれの可能性について、より厳密な制約を課すことができました。

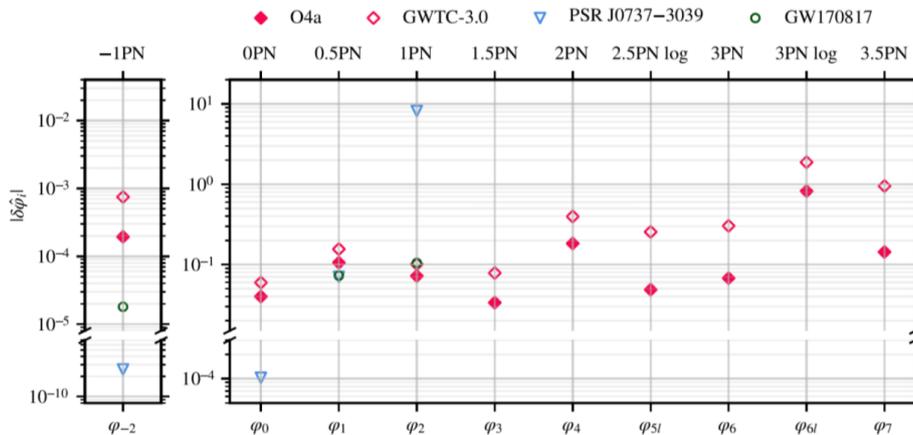


図2: 重力波信号の位相を決める、いわゆる**ポストニュートン近似**の展開係数に対する制約を示す。これらの係数は、連星進化のさまざまな段階（合体前の遠く離れた段階（左側）から合体直前の最終段階（右側）まで）における一般相対性理論からのずれの可能性を示す。今回の解析では、これらのずれに関する許容値が以前の結果と比べて大幅に厳しく（より低い値）になっている。

さらに興味のある方へ

- 私たちのウェブサイトでも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/>



- この解説は、次にあげるLVKグループによる3つの論文の要約です。

GTWC-4.0: Tests of General Relativity I. Overview and General Tests. <https://dcc.ligo.org/P2500065/public/>, あるいは <https://arxiv.org/abs/2603.19019>

II. Parametrized Tests. [P2500066](https://arxiv.org/abs/2603.19020), [arXiv:2603.19020](https://arxiv.org/abs/2603.19020)

III. Tests of the Remnants. [P2500067](https://arxiv.org/abs/2603.19021), [arXiv:2603.19021](https://arxiv.org/abs/2603.19021)

- 解説に登場した次のデータは [Gravitational-Wave Open Science Centre](https://www.gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/) にて公開しています。

GW230814: <https://doi.org/10.7935/amj3-kd70>

GW250114: <https://doi.org/10.7935/Ig4j-2028>.

(日本語訳：真貝寿明，武田紘樹)