

GW230814: LIGO リヴィングストン単独で検出された大きな重力波信号

LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究グループは、LIGO リヴィングストン検出器を用いて、特別に大きな重力波信号を観測しました。GW230814 は、2023 年 8 月 14 日 23 時 9 分 01 秒 (UTC) に検出されました。この重力波信号は、2 つのブラックホールの合体によって発生した可能性が高いと考えられます。

信号の検出

GW230814 は、第 4 期観測運転の第 1 部 (O4a) に観測されました。観測当時は、LIGO リヴィングストン検出器のみがデータを取得していました。1 つの検出器のみで観測されているにもかかわらず、この信号は非常に大きいものでした。図 1 は、GW230814 の信号の異なる表現を示しています。

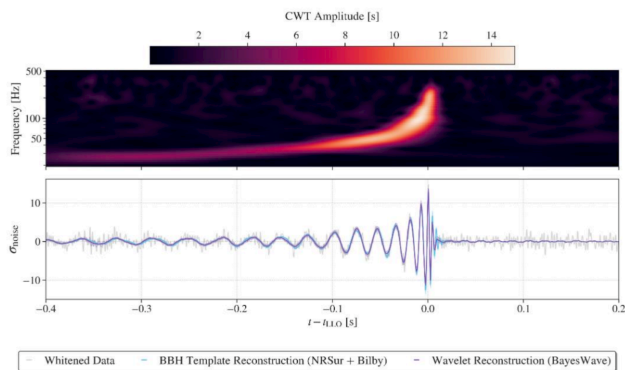


図 1: GW230814 の重力波信号。上図は時間-周波数平面で信号を示したもので、明るい領域は振幅が大きいことを示している。下図は、時間軸で表された信号を表す。青と紫の線は、それぞれ信号の波形の再構築に用いられた 2 つの異なる手法を示している。信号はコンパクト連星の合体であることは確実で、リングダウン部分に至るまで、(本文で述べたとおり) 信号データは再構築された結果とよく一致していることがわかる。

「大きな信号」の意味？

重力波観測で取得されるデータには、(宇宙から来る) 重力波の信号と (検出器とその周囲環境から来る) ノイズが混在しています。重力波信号の「大きさ」は、**信号対雑音比 (SNR)** と

いう性能指数を用いて表します。この数値は、データ内のノイズと比較して信号がどれだけ大きいかを表します。GW230814 の単独検出器 SNR は約 42 です。ちなみに、いちばん最初に観測された重力波 **GW150914** も SNR が 24 と大きな信号でした。

GW230814 のもとになった連星ブラックホールの合体

GW230814 は、**連星ブラックホール**の合体から生じた信号と一致しています。この信号の波源となった連星の特徴 (ブラックホールの質量や**自転**の大きさなど) をより詳しく知るため、私たちはデータをアインシュタインの**一般相対性理論**に基づくシミュレーションで得た波形と比較しました。その結果、GW230814 は、太陽の 34 倍と 28 倍の質量を持つ 2 つのブラックホールの合体から生じた可能性が高いことがわかりました。これは、最初の観測である GW150914 と驚くほど類似しています。

この宇宙規模での事象は地球から約 300 **メガパーセク**、つまり約 10 億光年離れた場所で発生しました。しかし、観測した検出器は 1 つだけであったため、GW230814 が天球上のどの方向から来たのかを特定することはできません。約 8 年前の **GW170817** の場合のように信号が非常に長くない限り、通常、短時間のみの重力波の波源の方向を正確に特定するには、少なくとも 3 つの検出器による同じ信号の共同観測が必要です (ただし、それで必ずしも十分ではあるとも限りません)。

謎のある信号：一般相対性理論の検証へ

重力波信号は、アインシュタインの一般相対性理論を検証するために用いることができます。LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究チームは、重力波信号が一般相対性理論から予測されるものと整合しているかどうかを確認するために、さまざまな検証を行っています。読者の方は、過去 1 世紀にわたり何度も検証されてきた一般相対性理論を、なぜ今でも検証するのか疑問に思うかもしれません。他の物理理論と同様に、一般相対性理論は、まだ発見されていないより包括的な理論の近似であるかもしれないからです。1 世紀前、アインシュタインの一般相対性理論がニュートンの重力理論を拡張して、ニュートンの法則では説明できない現象を説明できるようになったとき、まさにこのようなことが起こりました。

重力波を用いて一般相対性理論を検証する場合、通常は 2 つ以上の検出器で観測された大きな信号のみを使用します。しか

し、GW230814 は特に大きな信号であったため、非常に興味深い事例となっています。信号をより深く理解するには、合体するブラックホールから発生する重力波信号のさまざまな段階について考える必要があります。

コンパクト連星の合体から発せられる重力波信号は、図2に示すように、3つの段階に分けられます。

- ・ **インスパイラル**と呼ばれる段階は、2つのブラックホールが螺旋状に公転しながらゆっくりと接近していく状況です。この段階では、重力波信号の**周波数と振幅**はどちらも増加していきます。
- ・ 衝突・合体とは、2つのブラックホールが合体する過程で、重力波の振幅が最も大きくなる段階です。
- ・ **リングダウン**とは、衝突・合体の後、新たに生まれたブラックホールが重力波を放出して落ち着く段階です。このとき、重力波の振幅は徐々に減少していきます。鐘をつくことを想像してみてください（衝突・合体に対応します）。鐘は鳴らされた後も音を発し続け、やがて静かになります。これがリングダウンです。

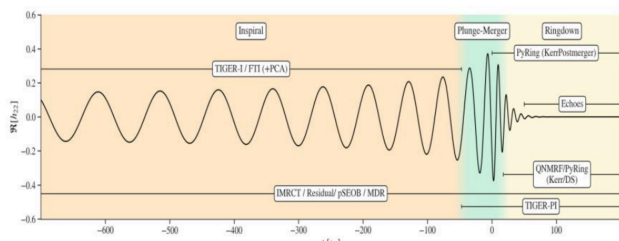


図2: 合体するコンパクト連星から発せられる重力波信号の典型的な変化。この図は、信号の振幅（縦軸）と時間（横軸）の関係を示している。信号の様子は、インスパイラル（オレンジ）、衝突・合体（薄緑）、リングダウン（黄色）の3つに分類される。また、一般相対性理論のさまざまな検証の専門用語と、それらが対象とする信号の部分も示している。詳細は論文を参照のこと。

LIGO-Virgo-KAGRA 共同グループによる一般相対性理論の検証では、信号のさまざまな部分が調べられています。GW230814 のインスパイラル部分に焦点を当てた検証では、信号が一般相対性理論の予測と整合していることが示されています。しかし、衝突・合体・リングダウン部分に焦点を当てた検証では、不可解な様相が浮かび上がります。GW230814 のリングダウン波は、一般相対性理論の予測よりも急速に減衰しています。図3に示したように、合体直後の波のピークは一般相対性理論の予測よりも小さくなっているのです。

データと一般相対性理論の予測のこの差はなぜ生じるのでしょうか？これまでさまざまな調査方法が検討されてきました。その一つとして、リングダウン波の準優勢モードが原因である可能性が検討されました。重力波信号におけるリングダウン波の準優勢モードは、音声波の**高調波**に似ています。この他にも、重力波の波形が、**重力レンズ**の影響を受けた可能性も検討されました。しかし、どちらも、不一致の原因とするには説得力に欠けている、という結論になりました。

2つ目の可能性は、この見かけ上の矛盾は、一般相対性理論からの実際の逸脱ではなく、一般相対性理論に基づく**重力波形モデル**の精度の限界によるものである可能性です。GW230814 のような大きな信号は、重力波の詳細が明らかになるにつれて、このような不正確さが明らかになる可能性が高くなりま

す。私たちの検証は、波形精度の限界が、この見かけ上の矛盾の信頼できる説明になり得ることを示しています。

もう一つの可能性は、この矛盾はデータ内のランダムな**ノイズ**変動によるものであるというものです。重力波のリングダウン部分と同時にランダムノイズ変動が発生する場合、信号は一般相対性理論と矛盾しているように見えるかもしれません。この仮説を検証するために、サイコロを何度も振って細工がないかどうかを検証するのと同じように、私たちは確率シミュレーションを行いました。ブラックホールを必要に応じて合体させることはできないため、コンピュータが一般相対性理論をもとにして合体の重力波を生成します。GW230814 のような模擬重力波信号を多数作成し、それらに現実的な（ただしランダムに変動する）ノイズを加えます。そして、それぞれの模擬データを用いて一般相対性理論の検証を再度行います。その結果、ランダムなノイズ変動が一般相対性理論との見かけ上の矛盾の原因である可能性も示唆されました。

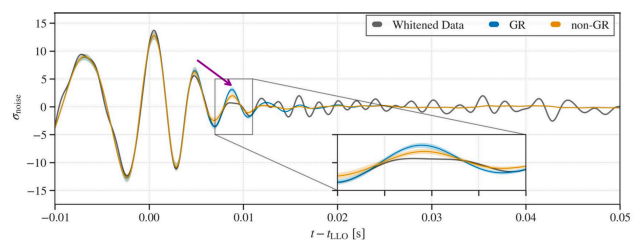


図3: GW230814 のデータ（灰色で表示）と、一般相対性理論に基づく波形モデル（青）および一般相対性理論とは違う理論に基づく波形モデル（オレンジ）を比較した図。紫色の矢印は、観測されたデータの振幅が一般相対性理論から予想される値よりも低い信号部分（挿入図の枠内に拡大表示）を示している。横軸が 1/6 秒（時刻=0 は衝突・合体段階に相当）しかカバーしていないことに注目してほしい。重力波研究はまさに精密な時代に入ったのだ！

検出器ネットワークの重要性

重力波検出器は、ネットワークとしてこそ最も効果的に機能します。複数の独立した検出器で検出された重力波信号は、信号の検証、発生源の特性パラメータのより正確な推定、そして信号発生源の天球面上での特定を可能にします。

（ちょうど6年前に検出され、3つの干渉計で初めて同時観測された連星ブラックホールの合体、GW170814 の例から学べるように）GW230814 の事例は、検出器ネットワークの重要性を浮き彫りにしています。1つの検出器からのデータのみでは、測定可能な範囲が制限され、その精度も著しく低下します。研究者たちは地球規模の検出器ネットワークという目標の達成に向けて懸命に取り組んでいますが、ネットワークのすべてが24時間365日稼働することは期待できません。したがって、ネットワークは大規模であるほど良いのです。2025年現在、LIGO-Virgo-KAGRA ネットワークには4つの検出器が含まれています。米国にある LIGO の2つの検出器、イタリアにある欧州 Virgo、そして日本の KAGRA です。3つのグループは、重力波探索による科学的成果を最大化するために、世界規模でネットワークを運用しています。

明るい（そして大きな）未来

LIGO-Virgo-KAGRA 共同研究チームが連星ブラックホールの合体からの重力波を初検出してから 10 年を迎えます。検出器ネットワークの感度向上に伴い、今後さらに多くの大きな信号が観測されることが期待されます。こうした事象は、ブラックホールの特徴を探るさらなる機会を提供するだけでなく、アインシュタインの一般相対性理論のさらなる検証にも繋がるでしょう。

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



本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/LIGO-230814/public>

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>

GWTC-4.0 のカタログのデータは [GWOSC](#) から。

（日本語訳：真貝寿明，内瀬那美）

用語集 (ABC 順)

- **ブラックホール (Black hole)** : 重力が非常に強いので、光を含むすべてのものが逃げることのできない時空の領域。ブラックホールにはさまざまなサイズがある。恒星質量ブラックホールは、恒星の崩壊でできるもので、質量は太陽質量の数倍から約 65 倍の範囲のもの。中間質量ブラックホールは、太陽質量の約 100 倍から 10^5 倍までの質量をもつもの。3つめの超大質量ブラックホールは、太陽質量の 10^5 倍以上から 10^9 以上の範囲のもの。
- **連星ブラックホール (Binary black hole; BBH)** : 2つのブラックホールが互いのまわりを周回運動する天体系。
- **一般相対性理論 (General Relativity)** : アルバート・アインシュタインによって 1915 年に提案された重力理論。物質やエネルギーの存在によって空間が柔らかい織物のように曲がり、物体が曲がった空間を進むことが重力の根源である、とする理論。
- **重力波 (Gravitational waves)** : 中性子星やブラックホールの合体など、宇宙で最も激しい現象によって生成される時空の波紋。
- **インスパイラル (Inspiral)** : 重力波の放出の影響により、連星の軌道がゆっくりと縮小する現象。連星の合体過程における最初の段階であり、最も長い期間にわたる。
- **ノイズ (Noise)** : さまざまな機器や環境の影響による重力波測定信号の変動。重力波検出器の感度は、ノイズによって制限される。
- **リングダウン (Ringdown)** : ブラックホール合体の最後の段階のことで、合体で形成されたゆがんだブラックホールが重力波を放出し、歪みが消えていく過程。
- **信号対雑音比 (Signal-to-noise ratio (SNR))** : 目的の信号のレベルと背景ノイズのレベルを比較する、科学および工学で使用される尺度。
- **太陽質量 $M_{\odot}$ (Solar mass $M_{\odot}$)** : 太陽の質量で、天文学では質量を表す標準の単位。およそ 2×10^{30} kg。