

宇宙で生じた衝突を用いた検出器の調整 2つの例外的なブラックホール合体を用いた天体物理学的較正

LIGO, Virgo, KAGRA (LVK) コラボレーションは、合体するブラックホールと中性子星から 300 以上の重力波信号を検出しています。それぞれの信号には、その発生源の情報と、衝突・合体を支配する極限的な物理に関する情報が含まれています。この情報を抽出するには、重力波観測所が重力波を正確に検出（信号を明瞭に「聞き取る」こと）するとともに、測定における不確かさを把握する必要があります。LVK コラボレーションは、新たに、GW240925 と GW250207 という 2 つの強い重力波信号を報告しました。これは、天体物理学的較正を行うことができた最初の例になりました。

これは悪いタイミングを驚くほど良いものに変えた実例です。2 つの強力な重力波信号を観測したとき（図 1 参照）、LIGO のハンフォードにある検出器は（比喩的に言えば）調子が狂っていたために、そのデータをどのように解釈すればよいのか正確には分からない状況でした。しかし、信号の大きさのおかげで、それらを分析し、同時に検出器の状態を直接測定することで、ハンフォード検出器を調整することが可能になりました。これは、検出器の不確かさがほとんど未知で、しかも時間変化する状態だった GW250207 の場合には特に重要なことでした。

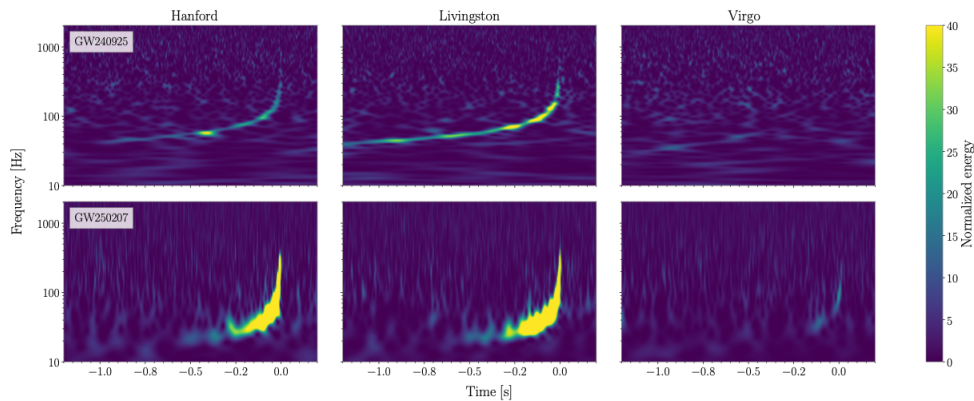


図 1: 重力波信号 GW240924（上行）と GW250207（下行）を示す。左列は LIGO ハンフォード、中列は LIGO リビングストン、右列は Virgo の各観測所で観測されたものである。スペクトログラムと呼ばれるこれらのプロットは、パワースペクトル（周波数ごとにおけるエネルギー）を時間の関数として示す。信号の強さは、時間（秒単位）と特定の周波数（ヘルツ単位）のどちらでも増加していく様子が、緑と黄色の帯で示されている。その形状は、重力波信号によって生成される特徴的なチャープ形状（鳥のさえずりのような音に対応）になっている。GW250207 の厚みと明るさは、その信号の強さを物語っている。

天体物理学的較正

重力波は通過する際に時空を伸縮したりねじ曲げたりします。LVK の検出器は、レーザー光を垂直に分岐する 2 本の光路（「腕」と言います）を往復させ、光の移動時間のわずかな差（腕の長さの変化を示す証拠）を検出することで、この変化を測定します。典型的な重力波は、腕の長さを 10^{-19} m ほど変化させますが、これは陽子の幅よりもはるかに小さい長さです。このような小さな変

化に敏感であり続けるために、フィードバック制御を用いた検出器のリアルタイムな調整が慎重に行われます。ここで、光の移動時間を信号に変換する過程だけではなく、制御自体が光の移動時間をどのように変化させたかを考慮する必要があります。これは、波が通過するにつれて検出器がどのように変化するか（制御ループも含む！）をモデル化する、慎重な較正手順が要求されます。一般的に、完璧なモデルを作成することはできません。作成したモデルと真の値との不一致を計算して測定を

補正する必要があります。これは、計算上の不確かさと誤差を調べることで実現できます。補助レーザーやセンサー、そして装置に関する詳細な知識を用いて、不一致を定量化していくのです。しかし、そうした追加情報が得られず、適切な較正が行えない場合はどうなるでしょうか？

較正が不正確であれば、推定される情報源に偏りが生じ、関連する物理現象について誤った結論を導き出す可能性があります。幸いなことに、重力波信号が十分に大きい場合、較正誤差から切り離すことができます。アインシュタインの一般相対性理論が信号の見え方を正し

く予測していると仮定すれば、結果に潜在するバイアスを軽減することができます。この手法は天体物理学的較正と呼ばれます。GW240925 と GW250207 の検出では、LIGO リビングストーン検出器と Virgo 検出器の較正誤差は通常の方法で推定できましたが、LIGO ハンフォード検出器の較正誤差は推定できませんでした。幸いなことに、どちらの信号も十分に大きく、天体物理学的較正を行う最初の有益な検証ができました！私たちが得た較正誤差の推定形状を図 2 に示します。両方の重力波信号の概要は表 1 に示す通りです。

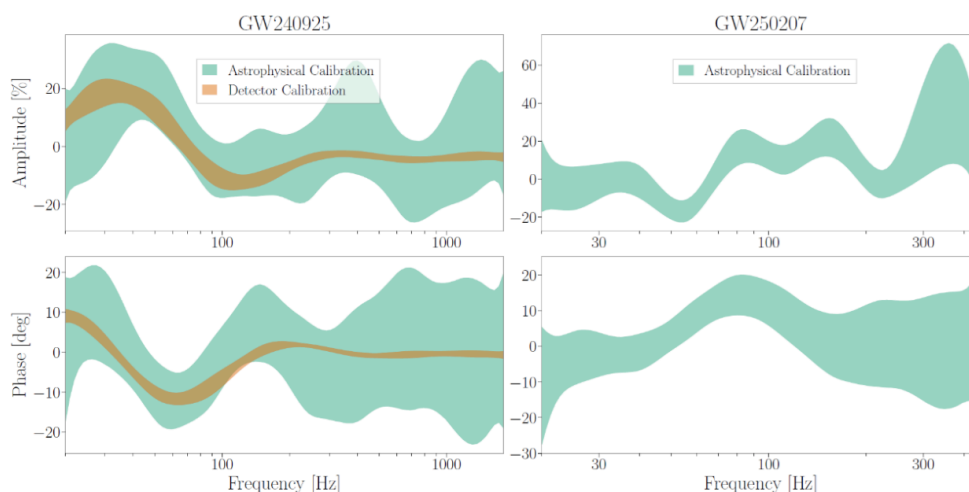


図 2: ハンフォード検出器の振幅と位相に対する較正誤差の推定形状を、周波数の関数として示した図。特定の周波数における網掛け領域が大きいほど、正確な値に関する較正誤差の不確かさが大きく存在することを示す。左側の GW240925 のグラフでは、緑色で初期データに対する天体物理学的較正の結果を、オレンジ色で検出器で測定された追加情報（「検出器較正」と呼ばれる）を使用して定量化された誤差を示している。緑色の領域がオレンジ色の部分を包み込んでいることがわかり、これは較正誤差の形状を正しく推定できていることを意味している。右側は、GW250207 の結果だが、緑色の網掛け領域のみである。これは、結果を照合するための追加の検出器情報がなかったためである。

表 1: GW240925 と GW250207 の観測状況の簡単なまとめ

GW240925	GW250207
<p>ハンフォード検出器の技術的な問題により、リアルタイムのデータには一時的な誤較正が発生したが、これは後ほど定量化されて修正された。結果として、正しく較正されたデータを後日には生成できるようになった。</p> <p>これにより、初期のデータに対して天体物理学的較正を行い、このデータと最終的に正しく較正されたデータの分析結果を比較することが可能になった。</p>	<p>この信号が観測されたとき、LIGO のハンフォード検出器は起動直後で不安定な状態だった。いくつかの補助センサーがデータを収集していなかったため、較正誤差を計算することができなかった。この重力波信号は、私たちがこれまでに観測した中で 2 番目に大きな信号であり、興味深い物理学の解明に新たな視点を提供するものだった。この検出ができたことは、較正誤差の天体物理学的較正測定ができた成果である。</p>

天体物理学的較正が重要な理由

正確な重力波データがあれば、重力波を発生させたブラックホールの特性（あるいはパラメータ）を推定できます。例えば、ブラックホールの質量、自転の有無、そして天球面上のどの方向から到来したか（到来方向推定）

などです。GW240925 は、地球から約 350 [メガパーセク](#) の距離にある、太陽の 9 倍と 7 倍の質量を持つブラックホールによって生成されたことが分かりました。また、GW250207 は、地球から約 200 [メガパーセク](#) の距離にある、太陽の 35 倍と 30 倍の質量を持つ 2 つのブラック

ホールによって生成されたことが分かりました。どちらの事象も、ブラックホールが高速で自転していたという証拠を十分に提供していません。較正の不確かさを適切に考慮しなければ、これらの推定値は真値ではない値に偏ってしまう可能性があります。そのため、データの信頼性を保証するためには、較正の不確かさの正確な値が必要なのです。

重力波データと推定された波源のパラメータを用いて、一般相対性理論の検証やハッブル定数の決定といった興味深い解析を行うこともできます。一般相対性理論はアインシュタインによる重力理論です。2つのブラックホールの合体といった極限状況でこれを検証することで、理論の予測と観測結果の間に矛盾があるかどうかを確認できます。一般相対性理論と観測結果の間に矛盾はまだ見つかっていませんが、一般相対性理論は完全な理論ではありません。観測結果が一般相対性理論の予測と異なる点を発見することで、より完全な新しい理論を導き出せる可能性があります。較正誤差を重力波信号そのものと誤認することはありませんが、一般相対性理論からのずれと誤認することがあります。つまり、一般相対性理論と観測結果の間に矛盾があるかどうかという結論は、較正誤差によって損なわれる可能性があり、データの解釈を信頼できないものにしてしまいます。GW250207のように一般的な較正方法が利用できなかった場合では、代わりに天体物理学的な較正を用いることで、データの信頼性を維持することができます。天体物理学的に較正されたデータを用いたところ、この事象においてアインシュタインの理論と観測結果の間に矛盾は見られませんでした。

LIGO ハンフォード検出器のデータを信頼できるよう天体物理学的較正を用いたことで、重力波の到来方向と考えられる天球面上の領域を絞り込むことも可能になりました。この到来方向推定は三角測量と同様で、検出に関与する検出器の数が増えるほど、信号の発生源と考えられる領域を絞り込むことができます。図3では、正しく較正されたLIGO ハンフォード検出器のデータを用いた場合、発生源と考えられる領域が改善されて、かなり縮小していることがわかります。

宇宙の膨張速度を示すハッブル定数を測定するには、天球面上の位置推定が重要な要素です。ハッブル定数の

決定には、宇宙的な距離を測定する必要があります。その主な方法は、超新星などの標準光源の明るさを測定することと、ビッグバンの名残りである宇宙マイクロ波背景放射のゆらぎを測定することです。しかし、現在、これら2つの方法では値が一致しておらず、ハッブル定数不一致問題（ハッブル・テンション）が生じています。重力波を用いてハッブル定数を測定することで、この不一致問題を解消できる可能性があります。GW250207は、天球面における位置と信号（音）の大きさから、ハッブル定数を測定するのに最適な連星ブラックホール信号の一つと考えられていますが、ハッブル定数を正確に測定するには、さらに多くの標準光源が必要となるため、これだけでは不一致問題を解消することはできません。第4回観測運転第1期（O4a期）で検出されたすべての標準光源の分析については、以前の Science Summary で取り上げています。

GW240925 と GW250207 のデータを用いて、はじめて天体物理学的較正の有益な検証ができました。これは、重力波検出器が不安定な状態のときでも可能な、データの信頼性を確信させる強い信号を用いた、新しい較正方法です。これを適用して、重力波源の特性を測定する能力を高め、アインシュタインの重力理論を検証し、重力波を使用して宇宙の膨張率を決定することができるようになるのです。

さらに興味のある方へ

- LVK 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/>



- 元の論文は [こちら](#)

(日本語訳：真貝寿明，山本尚弘)

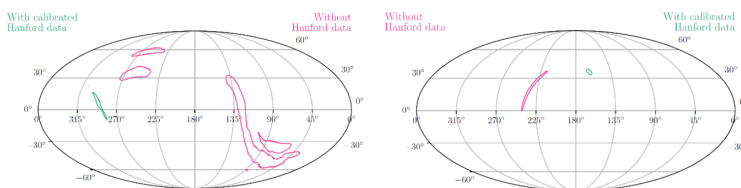


図3:GW240925 (左) と GW250207 (右) の天球面上の推定位置。ピンク色の領域は、LIGO リビングストン検出器と Virgo 検出器のデータを用いて得られたもの。天体物理学的に較正された LIGO ハンフォード検出器のデータを用いると、発生源の可能性のある位置は緑色の領域に縮小する。