

## ライゴ-ヴィルゴ第3観測期前半の重力波観測から一般相対性理論を検証

ブラックホール合体による重力波が検出されるまでは、アインシュタインによって100年前につくられた一般相対性理論の厳しい検証試験はできませんでした。実験室でも太陽系でも検証は不可能でした。ブラックホール\*(用語解説あり)合体は、一般相対性理論によって描かれる最も強くても最も動的な重力場をつくり出します。これまでに、ブラックホール合体の観測から、一般相対性理論が予言していた2つの事実-重力波の直接検出とブラックホール合体の存在-が確認されましたが、はたしてこれらの重力波やブラックホールはアインシュタインの予言するものだったのでしょうか。それとも違う理論からの予言の方が合うのでしょうか。激しい時空の変動の痕跡を運ぶ重力波から私たちは何を学ぶことができるのでしょうか？

ライゴとヴィルゴのグループは、これまでに、カタログGWTC-1に記載されているすべての重力波イベント、および最近のイベント GW190425, GW190412, GW190814, および GW190521について、一般相対性理論の検証を行ってきました。そして、これまでのところ、アインシュタインはすべてのテストにパスしています！今回、新しい重力波カタログ2(GWTC-2)ができ、これまでの数の2倍以上のブラックホール合体現象が追加されました。そこで、GWTC-1と同じテストを実行し、さらにいくつかの新しいテストも実行しました。

一般相対性理論との違いを探すために、方程式に項を追加したりパラメータを追加するなど、一般相対性理論とは異なる理論を仮定して、その仮定のもとでこれまでよりもデータを説明する良いモデルになるかどうかを確認しました。信号処理に統計解析を組み合わせました。最終的にデータの統計的尺度を取得し、それを一般相対性理論からの期待される値と比較します。違いがあったとすると、3つのケースが考えられます。(1)我々は常に重力波信号に検出器ノイズ\*が加わったデータを使っているが、使ったデータにノイズが多い。(2)ほとんどの場合、一般相対性理論からどのような信号が得られるのかを決定するために近似を行っているが、一部の重力波イベントについては、この近似が必ずしもベストなものではない。(3)一般相対性理論は完璧な理論ではなく、連星ブラックホールのような究極の天体

については修正する必要がある。これらのことから、もし違いを見つけたとしても、ノイズや近似誤差による要因も考えられるため、簡単に一般相対性理論に矛盾があるとは結論付けることができないことになります。しかし、今回私たちが報告するのは、一般相対性理論は観測結果と矛盾しない、という結論です。

以前の解析で、GWTC-1 カタログを用いた一般相対性理論の検証のときにも説明しましたが、一部のイベントはいくつかの検証ではうまく一致しませんでした。しかし、今回は、選択できるイベントが増えました。ブラックホール合体を検出するかどうかは、重力波の周波数と検出器が敏感な周波数がどれだけ一致しているかに依存します。より重いブラックホールは、より低い軌道周波数で合体するため、より低い重力波周波数を発生させます。これらの周波数は、宇宙の膨張によって地球へ到達するまでにさらに低下します(赤方偏移)。そのため、周波数によっては、各イベントがすべてのテストに適しているとは限りません。

### 一般相対性理論から期待される信号と一部の重力波データの比較

一般相対性理論は、ブラックホールがどうあるべきかについて予言します。たとえば、実在するブラックホールは質量とスピン\*(自転角運動量)の2つの物理量を持ち、それ以外の物理量を持ちません。互いに周回している連星ブラックホー

ルは、それぞれに質量とスピンを持ちます。これらに加えて、スピンの回転軸の方向と連星ブラックホールがどれだけ離れているか、という量があります。これらの値を設定すると、モデルが決まります。連星は、初期の配置から、重力波放出によってエネルギーを失い、軌道を次第に速く周回しながら、軌道を近づけていきます。これがインスパイラルと呼ばれる状態です。そして、2つのブラックホールが合体すると、質量とスピンを持つ1つのブラックホールになります。しかし、この合体直後のブラックホールはゆがんだ形で形成されます。一般相対性理論によると、このゆがみは重力波を生成し、ゆがみを運び去り、質量とスピンだけを残します。最初のインスパイラルするブラックホールの状態から最終状態が予測できることから、私たちは、この一連の過程をテストすることができます。さらに、ゆがんだ形が消失してゆく過程（リングダウン\*と呼ばれる）の詳細も一般相対性理論によって決まります。

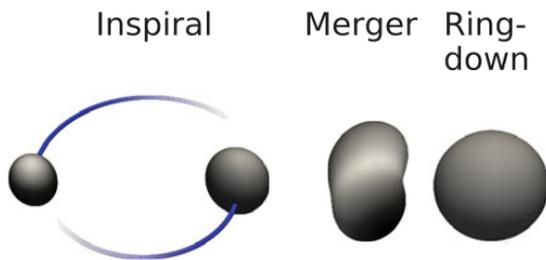


図 1: 連星ブラックホール合体の3つの段階、インスパイラル、合体、リングダウン。GW150914 検出を報告した論文の図2から。

重力波信号のインスパイラル部分とリングダウン部分の強度が同じ程度であれば、それらを別々に解析して、一方が他方を予測するかどうかを調べることができます。一般相対性理論によれば、インスパイラル部分の詳細があれば、リングダウンを推測できます。ですから、両者が一致するかどうかを調べれば良いのです。ノイズと近似の限界により比較は完全ではありませんが、一般相対性理論と矛盾しないことがわかりました。結果については、図2を参照してください。合体してできたゆがんだブラックホールは、打たれたベルのように振る舞います。ベルを叩くと、ベルの共鳴周波数である純音の組み合わせが聞こえます。しかし、ベルの性質によって決まる短時間で、音は減衰して消えてゆきます。同様に、一般相対性

理論では、ブラックホールは特定の周波数と減衰時間のリングダウン重力波を放出します。そこで、ゆがんだブラックホールから観測されたリングダウンの特性を、イベントのインスパイラル部分から予測したものと比較するのです。精度はまだあまり良くありません（将来の検出でより良くなるとは思います）が、結果は一般相対性理論と矛盾するものではありませんでした。

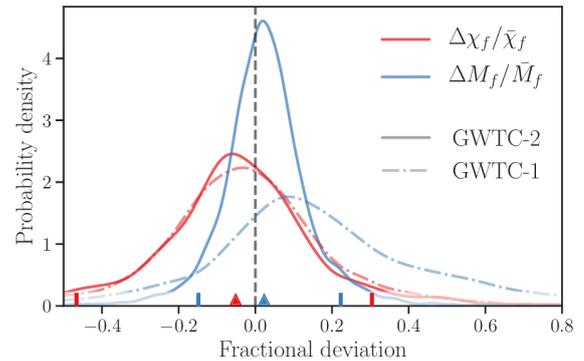


図 2: 最終的なブラックホールの質量（青） $M_f$  とスピン  $\chi_f$ （赤）について、合体前の値から予想される値と、合体後の測定から推測される値を、比較した図。実線は GWTC-2 のカタログデータを用いたもので、一点鎖線は GWTC-1 カタログによる比較を示している。縦の破線は一般相対性理論から期待される値。新しいデータを用いた質量についての比較は、一般相対性理論の値に近い値となって大幅に改善されているが、スピンによる比較はあまり改善していない。（今回の論文の図4から）。

## いくつかのブラックホールは、ニセモノか？

ブラックホールの合体は、大量の重力波を生成し、多くの場合、宇宙の他の部分よりも（瞬間的にですが）エネルギーを放出します。重力波は、一般相対性理論によるブラックホールから発生しているように見えていますが、実際には別のものが発生させている、という可能性はないでしょうか。ニセモノのブラックホール（擬態ブラックホール\*）と呼ばれている可能性があります。いくつかのタイプの擬態ブラックホールが提案されています。それらは真のブラックホールと同じように、小さな体積の中に大きな質量を持っていますが、実態は何か異なっている、というものです。ニセモノの場合、一般相対性理論のブラックホールの場合に得られるような、すべてが質量とスピンに依存するという関係がないため

に、正確に予測ができなくなります。たとえば、ブラックホールの**事象の地平線**では、一方通行になることはよく知られていますが、ニセモノではそうはならないかもしれません。いくつか提案されたニセモノでは、鏡のような表面が事象の地平線に取って代わります。通常はブラックホールに落ち込む重力波が跳ね返って元の信号の**エコー\***（繰り返すやまびこ）を生成するかもしれません（これがどのように現れるかは、図3を参照してください）。私たちは、この可能性を調べましたが、これエコーの実質的な証拠は見つかりませんでした。

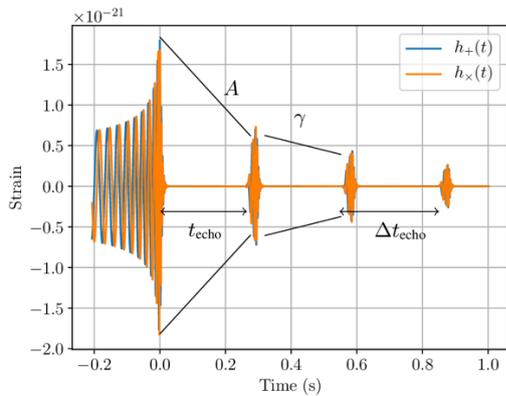


図 3: 擬態ブラックホールから発生するかもしれないエコーの重力波。図では右側に行くにしたがって時間が経過する。もとの重力波信号が擬態ブラックホールの鏡のような表面で跳ね返り、何度も波形を変えながら時間差で到着する可能性が指摘されていた。(Courtesy R.K.L. Lo.)

このほかにも、一般相対性理論には当てはまらない擬態もいろいろ考えられています。たとえば、事象の地平線は存在しても、ブラックホールのような物体の形が異なるものが考えられます。私たちは回転する物体は扁平な形状になることを知っています。これは地球にも当てはまり、小さな望遠鏡を通して見た木星でも明らかです。この扁平化は、一般相対性理論が重要でない場合であっても重力によって生じます。回転する天体がブラックホールの場合、扁平な形状はブラックホールの質量とスピンによって正確に決まります。この事実は、異なる形状を持つことができる擬態天体では必ずしも当てはまりません。私たちは、多くのブラックホールの合体について、この違いが存在するかどうか調べましたが、重要なものは見つかりませんでした。

## 重力波が私たちに届くまでには長い時間がかかる

虹の色は日光に隠れていて、雨滴が光を分散させるとはじめて明らかになります。それでは、時空は重力波の「色」（つまり周波数）を明らかにすることができるのでしょうか。一般相対性理論はできないと言っています。しかし、他の理論では、重力波の分散につながる可能性のある質量がゼロではない**重力子\***（グラビトン）を許すものがあります。私たちは何十億年も時間をかけて伝播してくる重力波を観測しています。重力子に質量があるならば、分散を生じさせる機会が長期間存在することになります。このことは、たとえ重力子のもつ質量が非常に微小であったとしても、その痕跡を検出できることを意味します。また、すべてのイベントからの情報を組み合わせることで、データに潜んでいる可能性のある重力子の質量効果を見つけることができるかもしれません。最新のデータの解析から、重力子の質量が  $1.76 \times 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ （単位について用語解説あり）より大きい場合、その差を発見できることになるだろうと結論づけました。実際には発見できなかったことから、重力子の質量の上限値に制限がつけられました。この制限は、従来の値を 2.7 倍改善しました。比較のために値を記しておく、私たちが知っている最小の質量を持つ特定のタイプのニュートリノは、少なくとも  $0.009 \text{ eV}/c^2$  の質量を持っています。今回ついた重力子の質量に対する制限により、そのような質量を预言するような重力理論がさらに制限されたことになります。

## まとめ

結局のところ答えは何だったのでしょか。アインシュタインは正しかったのでしょうか。一般相対性理論は正しい重力理論なのでしょうか。

新たに発見されたブラックホール合体のデータを用いて、私たちは測定結果を検証しました。そしてこれまで既知のすべてのイベントについても新しい検証を行いました。ほとんどの場合、さまざまなイベントの結果を組み合わせ、結論を強化することができます。肝心なのは、ノイズと近似の不正確さを考慮に入れると、すべての結果が一般相対性理論と矛盾しないということです。図

に示すように、一部のテストではあまり強力な結果が得られません。将来的には、より明確な答え

を出すのに役立つ、より多くのブラックホール合体を検出することを期待しています。

## 用語集

- **ブラックホール (black hole):** 重力が非常に強いために光を含むあらゆるものが脱出することができない、非常にコンパクトな質量によって引き起こされる時空の領域。
- **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。
- **スピン (spin):** 天体がどれだけはやく回転しているのかを示す量。
- **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。
- **擬態ブラックホール (black hole mimicker):** 連星合体による重力波によって検出されるようなブラックホールと非常に似ているが、注意深く調べると一般相対性理論から予言されるすべての特性を満たさない、時空の領域。
- **エコー (echo):** 跳ね返る音 (エコー) に類似した、擬態ブラックホールの表面からの反射によって引き起こされる重力波信号のコピー。
- **重力子 (graviton):** 光子が光の波を構成するのと同じように、重力波を構成すると考えられている粒子。一般相対性理論では、光子の質量がゼロであるように、重力子の質量もゼロであることが必要。
- **$eV/c^2$ :** 質量の単位。電子ボルト (eV) は、たとえば、原子から電子を取り去るために必要なエネルギー量を表すときに一般的に使用されるエネルギーの単位。アインシュタインが言うように  $E = mc^2$  (ここで、 $E$  はエネルギー、 $m$  は質量、 $c$  は光速) なので、eV で測定されたエネルギーを  $c$  の 2 乗で割ると質量になる。

## さらに詳しく調べるために

- ライゴとヴィルゴのウェブサイト: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- 本発表の元となる [論文](#)。
- 重力波のイベントに関する [記事](#)。
- 今回、同時にリリースされたブラックホール合体の O1, O2, O3a 期の特徴をまとめた [論文](#)。
- ブラックホール合体のカタログ [GWTC-2](#) は、[Gravitational Wave Open Science Center](#) のサイトから。



<https://dcc.ligo.org/P2000436-v2>