

GW190412: 質量比の大きな連星ブラックホール合体の初観測

何を発見できたか？

2019年4月12日、重力波干渉計LIGO（ライゴ）とVirgo（ヴィルゴ）の研究グループは、連星ブラックホール*が合体して生じる重力波を観測しました。GW190412と命名されたこのイベントは、LIGOが所有する2つの重力波検出器（1つはワシントン州のハンフォード（Hanford）に、もう1つはルイジアナ州のリヴィングストン（Livingston）にある）と、Virgoがイタリアのカッシーナに建造した計3つの検出器で観測されました。GW190412は、LIGOとVirgoのグループが、2019年4月1日からスタートさせたO3と呼ばれる共同観測の初期に観測されたものです。O3は、第3観測期間（Observation 3）を意味し、2020年4月末まで続けられる計画です。

2つのブラックホールの質量は、これまでに観測されたブラックホールの質量と同程度ですが、GW190412は、2つのブラックホールの質量が明らかに不均等な — 一方が他方の3倍以上も重い — 連星ブラックホールの合体を初検出したという点が特徴的です。この質量の非対称性は、重力波の波形を変形させるため、これまでの観測よりもより精度良くさまざまなパラメータを決定することができました。例えば、この連星ブラックホールまでの距離や軌道傾斜角*、重いブラックホールのスピン（回転角運動量）、そして連星系の歳差運動*の大きさなどです。これらに加えて、GW190412の連星の質量の不釣り合いは、アインシュタインの一般相対性理論が予言する基本的な予測を検証可能にします。すなわち、重力波が、多重極放射*と呼ばれる、基本的な周波数よりも多くの成分を含んでいる「信号」になっているだろう、という予言です。

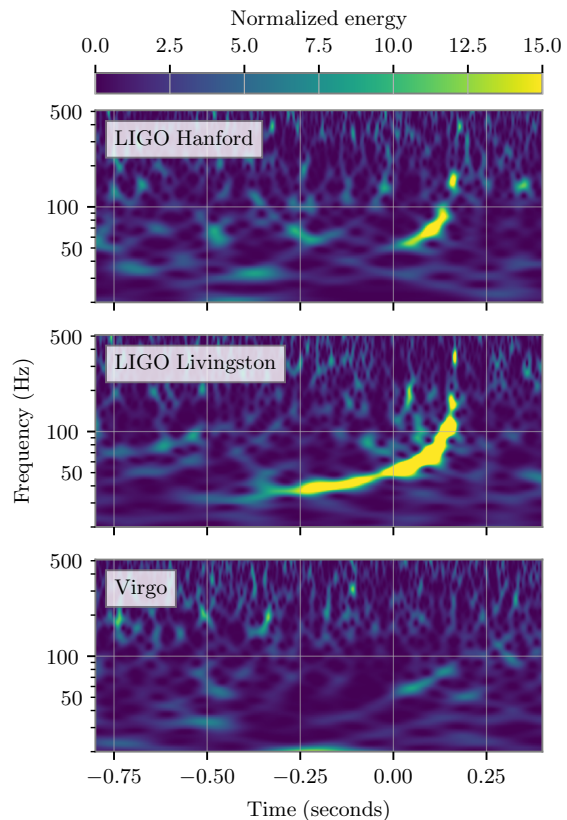


図 1: 3つの重力波検出器でのGW190412のスペクトログラム。横軸は時間、縦軸は信号の周波数を示しています。色は区切られた短時間・周波数領域でのエネルギーの強さを示します。時間と共に周波数が上昇していく形の、良く知られた「チャープ」信号が見られます。これは、連星ブラックホールが（「インスパイラル」運動と呼ばれる）互いを回転しながら次第に近づいて合体していくときに、重力波放出を強めていくことから生じる信号です。

どのようにして GW190412 が本物の重力波であるとわかったのか？

GW190412 は、稼働している3つすべての干渉計で見えるほど、大きな信号でした。3つの検出器は互いに数千キロメートル離れているため、すべての検出器でこの信号をほぼ同時に見るということは、検出器の雑音ではなく、宇宙から届く信号であろうことを示しています。図1に、GW190412の時間・周波数グラフを示しています。これは、スペクトログラム*として知られる図です。

GW190412 はハンフォードおよびリヴィングストンの検出器からのデータで、「目で」見えるほど十分に強力ですが、重力波信号であることを確実にさせるために、さまざまなアルゴリズムを使って解析し、結論を導きました。ほとんどの手法は、適合フィルタリング法*（マッチド・フィルタリング法）を用いています。これは、観測されたデータを一般相対性理論から予測されたシミュレーション波形*と比較する方法です。

検出器の雑音を誤って重力波信号の検出としてしまう確率を誤警報率として計算します。4月8日から4月18日までのデータを使用して計算すると、誤警報率は、3万年に1回(!)となりました。この誤警報率は、O3期の他の期間のデータ分析が進むと、さらに小さくなると考えられます。また、私たちは、その他に考えられる検出機器の雑音源や、周囲環境の雑音源のチェックも行いましたが、GW190412の検出や分析に大きな影響を与える可能性のあるものはありませんでした。

GW190412 の特徴

GW190412の2つのブラックホールの個々の質量は、これまでの観測で観測されたものと矛盾するものではありません。1つのブラックホールは太陽質量の約30倍で、もう1つは太陽質量の約8倍でした。しかし、軽いブラックホールと重いブラックホールの質量との比率である質量比に関しては、GW190412はこれまでに検出された他の連星ブラックホール合体とは異なります。これまでのO1, O2期の観測で報告された10個の連星ブラックホールの合体では、連星を構成する両方のブラックホールの質量はほとんど同じでしたが、GW190412の大きなブラックホールの質量は、小さなブラックホールの質量の3倍以上あったのです。

GW190412の質量が等しくないため、重力波放射が非対称になり、この連星系のパラメータをより正確に推測できるようになります。実効的スピン*は正であることがわかりましたが、これは少なくとも

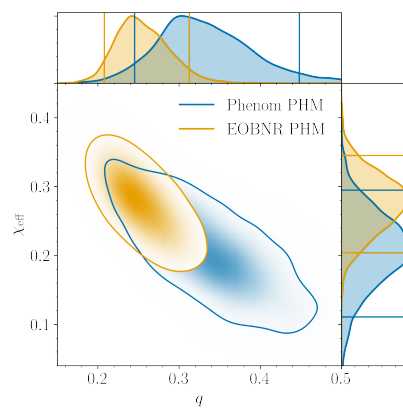


図2: GW190412について、推定される質量比(q)と実効的スピン(χ_{eff})を示します。オレンジ色と青色の等高線は、2つの異なる波形モデルを使って得られたパラメータの分布を示します。一般相対性理論を正しいものとしてモデル化された2つのモデルですが、近似方法が少しだけ違うモデルを使用しました。

も1つのブラックホールが、連星ブラックホールの軌道面に近い向きで回転していることを示しています。特に、GW190412の質量比が大きいことから、大きなブラックホールの回転の大きさに初めて強い制限をつけることができました。一般相対性理論によって許容される最大回転の約40%で回転している、という結果です。GW190412で推定される質量比と実効的スピンを図2に示します。また、連星系が歳差運動をしているという兆候もわずかに見られますが、歳差運動の影響は明確に主張できるほど強くはありません。さらに、質量比が大きいことは、連星系までの距離と連星の軌道傾斜角を分離して決定する際のあいまいさを解消し、両方のより良いパラメータ測定を可能にします。GW190412は地球から約25億光年離れた場所で発生したことが分かりました！

高調波の和音を聞く

GW190412のまれな特徴から、重力波の基本的な性質を観測できることになりました。連星合体から生じる重力波については、アインシュタインの先駆的な研究から始まり、後にニューマン、ペンローズ、ソーンおよび他の多くの人々によって研究されてきており、重力波の波形は四重極*モードが最も強いことが示されています。この四重極放射は、ギターで弦を弾いたときに響く音のようなものです。多くの楽器がそうであるように、重力波も高い倍音を含んでいると予測されています。これらの高調波あるいは多重極と呼ばれる成分は、質量がほぼ等しい連星ブラックホールの場合、重力波信号から抽出するのが非常に難しくなります。GW190412の質量が非対称であることから、この微妙な重力波信号を、よりよく「聞く」ことができました。解析した結果、重力波には、1000分の1の強度を超える高調波があるという仮説が正しそうなことがわかりました。将来的には、高次の多重極の相対強度が、ブラックホール合体の特性を解き明かすのに役立つことになるでしょう。

GW190412が一般相対性理論の予測と一致するかどうかを判断するために、一連のテストも実行されました。私たちは一般相対性理論と矛盾しないことを確認し、アインシュタインの重力理論をサポートする実証例をまたひとつ追加することになりました。

不等質量の連星ブラックホールの形成

LIGOとVirgoのネットワークによる観測が進むごとに、連星系の存在に新しく刺激的な洞察がもたらされています。今回のGW190412は、質量比が大きな連星ブラックホールの初観測として、連星ブラックホールの形成がどのように行われているのかを知る重要な観測例になります。この一例から、質量が等しくない連星ブラックホールは比較的普通に存在し、今後さらに多くのこのような観察がなされることが予想されます。

星の進化の詳細な物理学に基づいて、宇宙でどのように連星ブラックホールが形成され、どのような質量分布をするか等のモデルが構築されています。ほとんどのモデルでは、質量がほぼ等しい連星系がより一般的であると予測していますが、質量が明らかに異なるGW190412のような連星系もかなりの数

存在するだろうと予言するモデルも多く提唱されていて、そのような連星系は等質量のものの10分の1以上の頻度で形成されるとの数字もあります。今回の観測は、ちょうど10例の連星ブラックホール合体を報告した後のもので、大きな質量比を持つものが観測されることは、ある意味予想の範囲内でした。今後、重力波検出器の感度を高め、コンパクト連星系の検出数を多くしてカタログを構築していけば、恒星の進化、連星系の形成、および基礎物理学についての知見を、より深く理解できるようになっていくでしょう。

用語集

- **ブラックホール (Black Hole)**: 大きな質量が小さな体積に集中することによって、大きな重力のために光さえも脱出できなくなった領域のこと。
- **コンパクト連星 (Compact Binary)**: 中性子星やブラックホールなど、小さくて大きな質量をもつ天体からなる連星系。
- **実効的スピン (Effective Spin)**: 個々のブラックホールのもつ回転角運動量（スピン）を質量比で平均した量をブラックホール連星の軌道面上の成分で表したもので、重力波信号から最も精度良く抽出できる天体の回転パラメータである。
- **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。
- **多重極 (Higher Multipoles)**: 重力波の放射は、[球面調和関数](#)による展開式で表すことができる。もっとも支配的なのは四重極であるが、それより高次のものを多重極と呼んでいる。
- **軌道傾斜角 (Inclination)**: 地球から見たときの連星の軌道面の傾斜角。
- **適合フィルタ (Matched Filtering)**: 雑音にまみれたデータから重力波信号を抽出する方法の一つ。一般相対性理論を用いて計算された重力波の波形サンプルをたくさん用意し、元のデータと適合するかどうかを照合していくことによって、重力波信号を検出する。
- **歳差 (Precession)**: 角運動量保存則によって、ブラックホールの回転が連星軌道面とは異なる方向を向いていると、軌道面自身が全角運動量の方向のまわりを回転（歳差）する。
- **四重極 (Quadrupole)**: コンパクト連星から放出される重力波の最も強い多重極成分。重力波を「時空の音波」に例えるなら、四重極は基本振動音に相当する。波の放射量は方向によって異なり、その伝播パターンから命名されている。ちなみに、ラジオの電波（電磁波）で最も強い成分は、双極子（二重極）である。
- **スペクトログラム (Spectrogram)**: 時系列データを、時間と周波数とエネルギーで表現したグラフ。周波数ごとの強さは色で表現される。