

## 興味深い GW190814 : 恒星質量ブラックホールと謎のコンパクト天体の合体

2019年8月14日、3つの重力波検出器による史上初の観測として重力波信号 (GW170814) を検出してからちょうど2年後、ワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リビングストンにある米国の2つのアドバンスド・ライゴ (Advanced LIGO) 検出器とイタリアのカシーナにあるアドバンスド・ヴィルゴ (Advanced Virgo) 検出器は、もうひとつの、おそらくさらに興味をそそられる波源からきた重力波信号を観測しました。当時、LIGO-Virgo の検出器は、第3期観測 (O3) を行っている最中で、この信号はとてとても明瞭なものでした。この重力波は、2つのコンパクトな天体\*の合体現象によって発生したのですが、1つはブラックホール\*、他方は未確定の天体です。

GW190814 は2つの特徴を持っています。第一に、重い方の天体は軽い方の天体の約9倍の質量を持っており、これまでに重力波で観測された中で最も非対称な系となっています。第二に、軽い方のコンパクト天体の質量を測定したところ、これまでに発見された中で最も軽いブラックホールか最も重い中性子星\*のどちらかと考えられますが、どちらなのかはわかりません。これらの特徴は、コンパクト天体が持つことのできる質量と、それらがどのようにして合体していくのかについて、私たちの理解が試されています。

### 重力波信号

検出器によって記録されたデータの中から重力波の信号を探すには、適合フィルタリング法 (マッチド・フィルタリング法) の技術が用いられます。これは、アインシュタインの一般相対性理論に基づく信号の予測値と観測データを比較する手法です。このような解析により、GW190814 が検出器に生じるランダムなノイズと間違われる確率は1万年に1回以下となりました。GW190814 は、現在までに観測された中で、GW170817、GW150914 に次いで3番目に大きい振幅をもつ重力波です。これは、信号の周波数が時間の経過とともにどのように変化するかを示したスペクトログラム (図1) で、肉眼でも確認できるほどの大きさです。

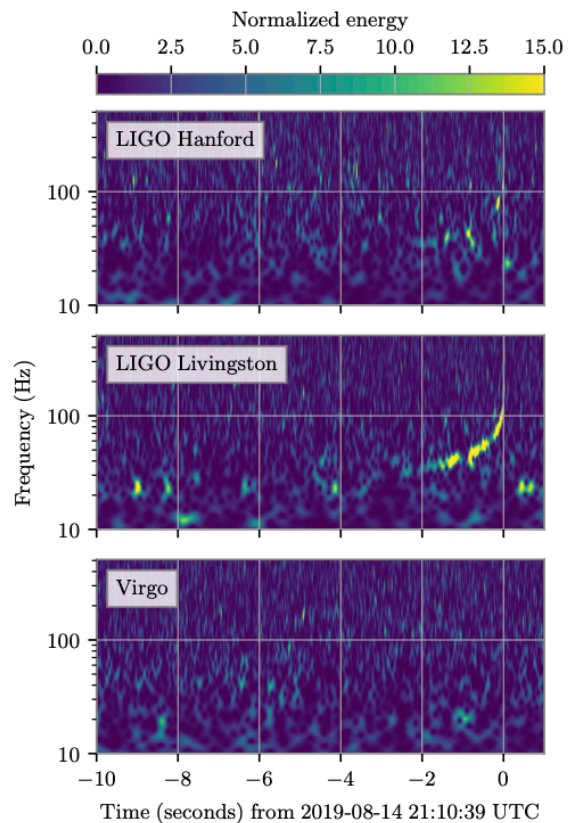


図1: LIGO ハンフォード (上), LIGO リビングストン (中), Virgo (下) の各検出器で観測された GW190814 を含むデータの時間・周波数グラフ。時間はイベントの10秒前から表示されています。それぞれの時間・周波数での色はカラーパレットで示されているようなエネルギーを示します。中央の図 (LIGO リビングストンのデータ) では、「チャープ」信号がはっきりと見られ、信号が最も大きくなっています。

第3期観測 (O3) を通して、LIGO-Virgo コラボレーションは、リアルタイムで[公開アラート](#)を発表し、潜在的な重力波の検出について発信してきました。これらの公開アラートには、[発生源の分類](#)という形で、重力波源の予備的な情報も含まれています。GW190814 は、検出から 20 分以内に「[質量ギャップ](#)」(Mass Gap) という分類で公開されました。これは、少なくとも 1 つのコンパクト天体の質量が太陽質量 (以下では  $M_{\odot}$  の記号で表す) の 3 倍から 5 倍であると推定されることを意味します。この「質量ギャップ」の定義は、質量が約  $5M_{\odot}$  以下のブラックホールの観測が少ないことに起因しています。ブラックホールの質量分布のこの部分は、「下の」質量ギャップとして知られています。

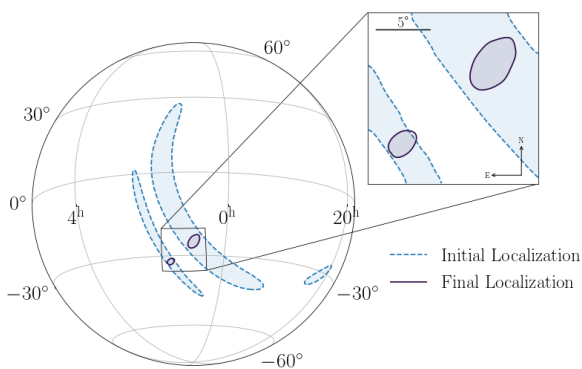


図 2: GW190814 の重力波源が存在すると考えられる天空上の領域。青色の領域は初期のオンライン解析によるもので、紫色の領域は最終的に絞り込まれた位置を示しています。

さらなる信号解析によって、より正確な質量の推定が可能となり、11 時間後に[更新された公開アラート](#)では、コンパクト天体の一つが中性子星の最大質量の目安である  $3M_{\odot}$  以下の質量を持っていることを意味する「[NSBH](#)」に変更されました。また、この天体は約 20 平方度の小さな空の領域に局在していました (図 2)。この情報をもとに、GW170817 の場合と同様に[電磁波](#)や[ニュートリノ](#)を使った探索が行われましたが、重力波に対応するものは見つかりませんでした。しかし、GW190814 は GW170817 よりもはるかに遠く、また、測定された天体の性質 (下記参照) が強い電

磁波放出を好まないことから、これは特に予想外のことではありません。

## 重力波源の特徴

この系の重い方の天体の質量は約  $23M_{\odot}$  で、これまでに LIGO や Virgo で観測されたブラックホールのデータと整合しています (図 3 参照)。軽い方の天体の質量は  $2.5\sim 3M_{\odot}$  で、最も重中性子星である [MSP J0740+6620](#) よりも上にあり、電磁波観測で間接的に検出されたブラックホールの典型的な質量よりも下にあります。しかし、GW170817 で観測された 2 つの中性子星が合体してできたコンパクトな天体 (ブラックホールと思われる) に匹敵する質量を持っています。

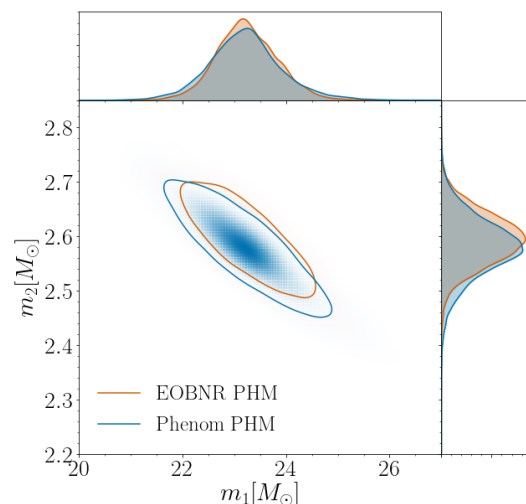


図 3: GW190814 の重力波源として推定される 2 つのコンパクト天体の質量。横軸は重い方の天体の質量、縦軸は軽い方の天体 (中性子星とブラックホールのどちらの可能性もある) の質量を表しています。等高線と網掛けの領域は、データと一致する質量の組み合わせを示しています。上と右のパネルの曲線は、それぞれの質量の可能性を示す確率分布を示しています。2 つの色は、どちらも一般相対性理論によって計算された、2 つのわずかに異なるモデルの予測を示しています。

大きな質量と小さな質量の非対称性を利用することで、重力波源の特性をより正確に測定することができます。非対称性が大きいほど、重力波信号の基本周波数の「高調波\*」の痕跡が強くなります。

今回の重力波と同じように不等質量ブラックホール合体が波源だった [GW190412](#) の場合と同様に、等質量連星ならば曖昧にしか決められないはずの、波源までの距離と連星系の傾きの組み合わせは、高調波に含まれる追加情報によって部分的に解析できるようになります。その結果、GW190814の重力波は8億光年\*ほど離れたところで発生していたことが明らかになりました。

中性子星やブラックホールのようなコンパクトな天体は**自転**していると考えられます。これらの天体の自転の大きさ（スピン）は、質量ほど重力波信号に強く影響しないために測定することは難しいです。しかし、GW190814は10秒以上もの長い信号を検出器で観測できており（図4）、信号の強さと相まって、これまでの重力波測定の中で最も精度良くブラックホールのスピンを測定できました。一般相対論で許されている最大スピンの7%以下です。また、この連星系は、**歳差運動**\*をしていなかったこともわかりました。

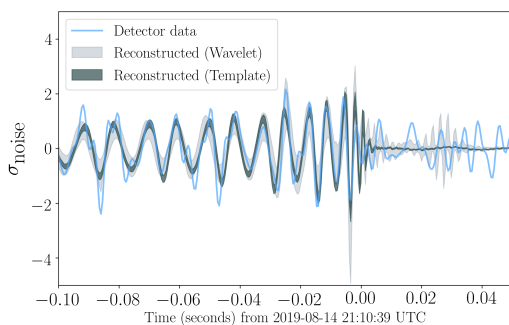


図4: 実際の検出器のデータ（青の曲線）を横軸に時間をとって表したものに、予測される信号を重ねて示したもの。濃い灰色の帯は、一般相対性理論における信号のモデル予測を表し、薄い灰色の帯は、基礎となる重力理論についての仮定を最小限にして信号を再構成したものを表しています。縦軸は、データに見られるノイズによる揺らぎの典型的なレベルを1とするスケールで表しています。

## アインシュタインとハッブルをテストする

GW190814は、科学的な議論を行うための非常に豊かな環境を提供してくれます。GW190814は[GW190412](#)よりも連星系の非対称性が高いので、重力波信号の中に「高調波」つまり重力放射の「多極子」が存在する強い証拠を見つけることができ

ました。これは、重力放射の多極子構造を予測する一般相対性理論の素晴らしい検証です。

GW190814を用いて、一般相対性理論の検証をいくつか行ったところ、このシグナルは2つのブラックホールの合体現象によってよく記述されていることがわかりました。その結果、軽い天体が中性子星やもっと**エキゾチック**な何かのような、ブラックホール以外の何かであることを示唆する証拠は何もありませんでした。

また、GW190814によって、現在の宇宙の膨張率である**ハッブル定数**  $H_0$  を重力波に基づいて新たに測定することができました。GW190814は、現在までのところ、我々が観測した中で（電磁波やニュートリノに対応するものが観測されていないものの中では）最も方向が特定できた重力波源です。 $H_0$ を測定するためには、原理的には、その天体が所属する銀河（ホスト銀河）の**赤方偏移**\*の観測が必要です。しかし、ホスト銀河を一意に特定するような追観測がない場合、代わりに、GW190814の波源がある領域に存在するすべての既知の銀河をホストの可能性があると考えることができます。ハッブル定数を決定するために、それぞれの銀河がホスト銀河である確率で重み付けされた赤方偏移を、重力波距離の測定値と組み合わせます。この結果より、誤差はあるもののハッブル定数  $H_0$  はメガパーセク\*あたり毎秒約75 km になりました。この値は、これまでに対応する電磁波観測がなかった重力波観測のときと同程度です。

## 軽い方の天体は、ブラックホールか？中性子星か？

軽い方の天体の質量は、非常に重い中性子星か、異常に軽いブラックホールのどちらかであることを示しています。通常ならば、重力波信号にみられる潮汐力の痕跡から中性子星の存在を推測することができます。中性子星を含む連星合体では、月によって地球上に押し上げられる海の潮汐のように、伴星の及ぼす重力が中性子星に潮汐として作用します。しかし、GW190814のような巨大で非対称な系では、**潮汐の影響**を測定するには小さすぎます。今回の場合、GW190814が2つのブラックホールの合体だったのか、ブラックホールと中



性子星の合体だったのかどうかは、潮汐力の測定ではわかりません。

一方、中性子星物質の理論モデルや電磁波による中性子星の観測から、中性子星が到達できる最大質量を推定することができます。これらの予測は、軽い方の天体は中性子星としては重すぎてブラックホールである可能性が高いことを示唆しています。しかし、GW190814 が特に重い中性子星が含まれていた可能性を排除することはできません。もしそうであれば、中性子星の最大質量の推定値を大幅に見直すことになるでしょう。

### 波源の話：どうやってこの連星が形成された？

軽い方の天体の質量は中性子星とブラックホールの間にあり、伴星の質量はその約9倍であるため、GW190814はこれまでにLIGOやVirgoで観測されたどのような連星合体にも似ていません(図5)。また、これまでに得られたコンパクトな天体の合体シミュレーションの結果とも異なります。このような系は、2つのブラックホールや2つの中性子星による典型的な合体よりも、はるかに少ない頻度で起こると予想されています。このような理由から、この連星系の形成過程を説明することは現在のどのモデルを使っても難しいのです。

GW190814の性質と合体率を、これまでに天文学者たちが検討してきた恒星進化の理論的なモデルに基づく予測と比較したところ、**球状星団\***よりも、**活動的銀河核\***の周りにある若くて密な**星団**や**円盤**の方が、このような重力波源のホストとして有望であることがわかりましたが、いずれのモデルも修正を迫られることもわかりました。今回の重力波源は、おそらく孤立した連星系の進化によって説明されると思われませんが、この理論は、採用されている仮定やコンパクト天体形成モデルに大きく依存します。軽い方の天体は、それより前の合体を経た第二世代の残骸として形成されていた可能性も考えられます。そのような軽い天体は、球状星団のような高密度の恒星環境では重力相互作用を介してブラックホールと連星となる可能性があります。しかし、このような過程がメカニズムとして主流であるとは考えられません。

GW190814は、コンパクト天体の質量とその合体に至る過程について、魅力的な疑問を投げかけています。今後の重力波観測は、非対称質量の連星合体がどれだけあるのか、といった点に光を当てる(というか重力波を探す!)ことになるでしょう。GW190814はその最初の例になりました。

### 用語解説

**コンパクト天体 (Compact Object):** 白色矮星、中性子星、ブラックホールなど、星の進化サイクルの終着点を示す高密度天体。

**ブラックホール (Black Hole):** 光が逃れられないほどの重力をもつ密度の高いコンパクトな天体(領域)。

**中性子星 (Neutron star):** 大質量星が崩壊した後に残る非常に密度の高いコンパクトな天体。

$M_{\odot}$ : 太陽質量。天文学における標準的な**質量の単位**のひとつ。およそ  $2 \times 10^{30}$  kg。

**質量ギャップ (Mass-gap):**  $2.5 \sim 5M_{\odot}$ の質量を持つコンパクト天体の観測が不足していることから、ブラックホールの質量統計に生じている溝のこと。

**高調波/多重極子 (Higher Harmonics/Multipoles):** 重力波の放出は、**球面調和関数**の展開として記述することができる。重力波として支配的な四重極の項を超えた高次の展開項の重力波成分を高調波とよぶ。

**歳差 (Precession):** ブラックホールが連星の軌道とは異なる方向に回転している場合、角運動量保存則により、軌道面は全角運動量の方向を中心に回転(歳差)する現象。

**光年 (Light-year; ly):** 光が1年間かけて進む距離で、天文学における長さの単位の一つ。約9.5兆km。

**メガ・パーセク (Megaparsec; Mpc):** パーセクは、天文学における長さの単位の一つで3.26光年。メガ・パーセクは、その100万倍。

**赤方偏移 (Redshift):** (音、光、または重力波の)波源が観測者から遠ざかる運動をすることによって波長が増加すること。**宇宙膨張**のために、銀河などの天体は私たちから遠ざかりつつあり、遠方の銀河から届く電磁波ほど波長が長くなっている。

**球状星団 (Globular Cluster):** 銀河の周りを周回している、密度の高い星が集まった球状の星団。球状星団には100万個の星が含まれていることもある。

**活動銀河核 (Active Galactic Nuclei):** 多くの銀河の中心部にある、非常にコンパクトで非常に明るい領域。宇宙で最も強力に安定したエネルギー源の一つ。

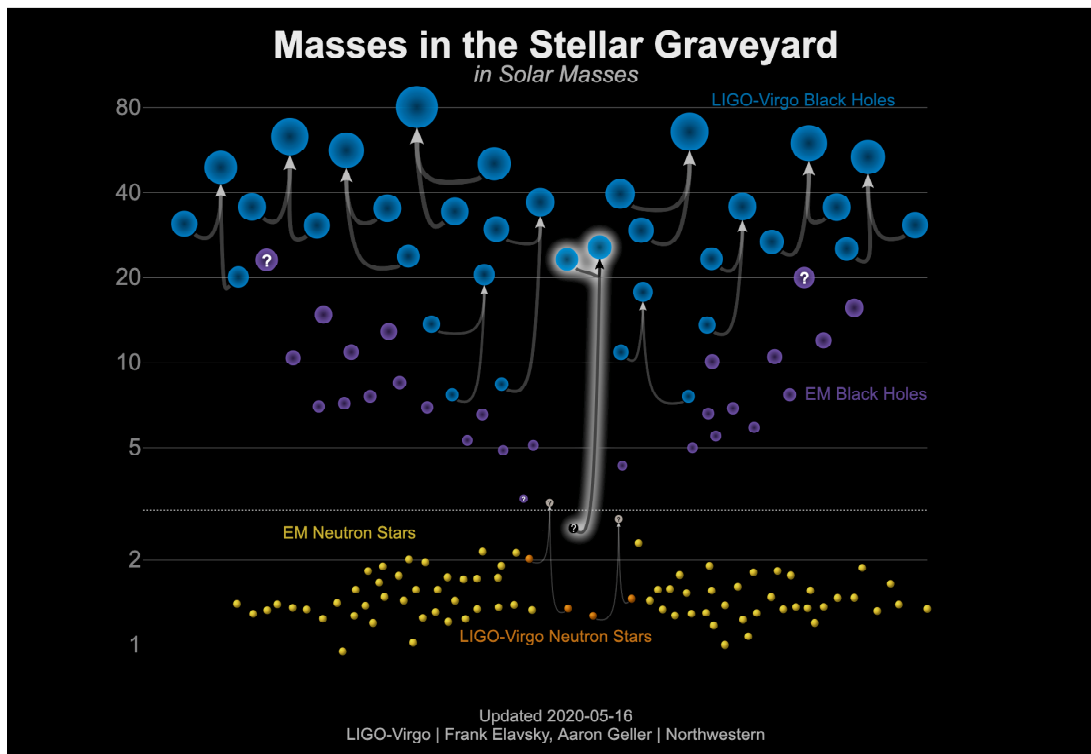


図 5: 重力波と電磁波観測で観測された中性子星とブラックホールの質量を表したもの。電磁波観測で得られた中性子星を黄色、ブラックホールを紫で示しています。重力波観測で得られた中性子星をオレンジ色、ブラックホールを青で示しています。今回観測された GW190814 を図の中央に示します。ブラックホールと太陽の 2.6 倍の質量を持つ謎の天体が合体して、一つのブラックホールが誕生したことを表しています。