

## GW190521: 観測史上もっとも大質量となるブラックホール合体

### 何が観察された?

2019年5月21日、LIGO (ライゴ) と Virgo (ヴィルゴ) の検出器は、異常とも言えるほど大きな質量をもつブラックホールが合体して発生した重力波信号を観測しました。GW190521 と名付けられたこの信号は、これまでに観測されたどの連星ブラックホール合体に比べても、短い持続時間で、かつ低い周波数でピークをもつものでした。

連星ブラックホール合体による重力波信号が、Virgo と LIGO の観測可能な周波数帯域にて検出される持続時間は、連星系の総質量に反比例します。GW190521 の場合、この持続時間はわずか約 0.1 秒で、これは例えば初めて検出された連星ブラックホール合体である GW150914 に比べても著しく短い時間です。同様に、連星ブラックホール合体による重力波信号が最大に達する周波数も、連星系の総質量に反比例します。今回の GW190521 では、このピーク周波数は約 60 Hz で、GW150914 の場合よりもはるかに低い値でした。そのため、LIGO と Virgo が、非常に大きな質量のブラックホールの存在を示したことは、観測された直後から明らかでした (図 1 参照)。

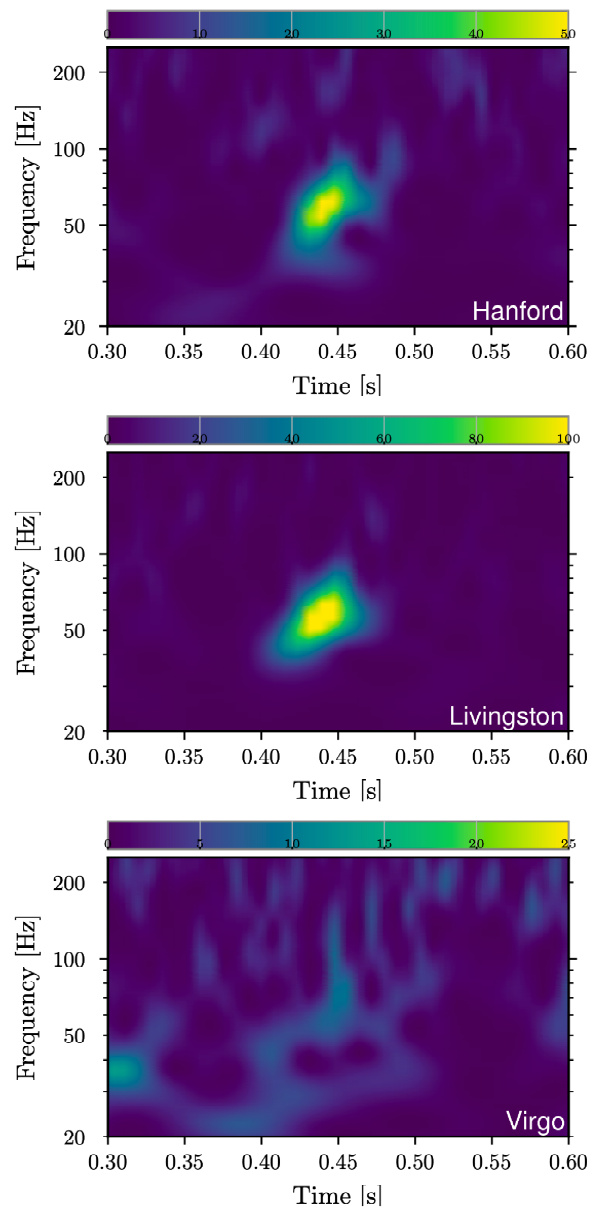


図 1: GW190521 の重力波信号を時間・周波数図として表したものの。上から順に、LIGO のハンフォード観測所、LIGO のリヴィングストン観測所、Virgo でのデータを示す。時刻は、2019年5月21日の世界標準時 (UTC) 03:02:29 との相対値を示す。各セルでの色は、パレットに示してある値のように、エネルギーの大きさを示している。今回の信号はとても短い継続時間で、かつピーク周波数も 60 Hz に過ぎなかった。(GW190521 発見報告の論文の Fig. 1 を用いている)。

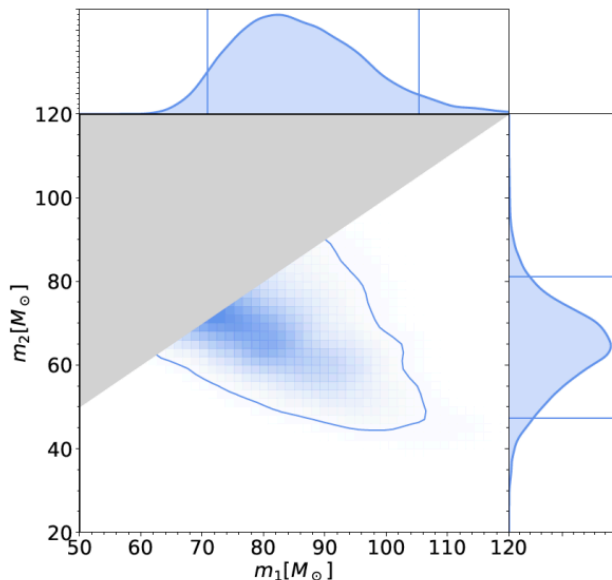


図 2: GW190521 の重力波信号を生じさせた連星ブラックホールの各々の質量予想値を確率分布として示した図. LIGO-Virgo グループの解析によれば, 中央部の濃い青色の等高線の内側に真のブラックホールの質量が存在する確率は 90% になる (2つのブラックホールの質量の組み合わせとしての予測値である). 図の右側と上側にある実線で囲まれた山形の曲線も同様で, 各々のブラックホールの質量として予測される確率分布を示す. 灰色で塗りつぶされた領域は, 「第一の (primary)」ブラックホール質量を  $m_1$ , 「2 番目の (secondary)」ブラックホール質量を  $m_2$  として, 前者は必ず後者よりも大きな値であるとする, と定める LIGO-Virgo の定義によって外される部分である. (GW190521 発見報告の論文の Fig. 2 を改変した).

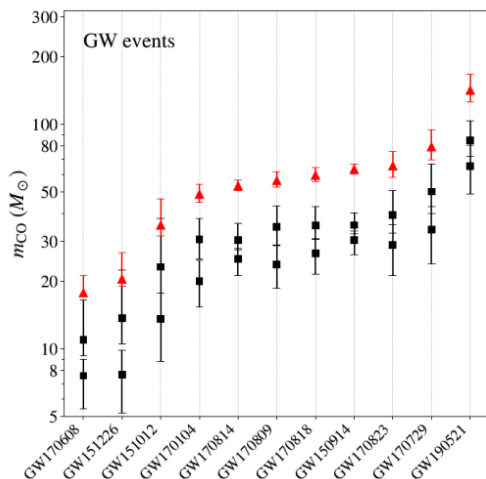


図 3: LIGO と Virgo による第一観測期・第二観測期 (O1, O2) に観測された連星ブラックホールの質量を今回の GW190521 (一番右) のものと比較する図. 各観測について, 黒い四角で示されたものは, 合体前のブラックホールの質量を示し, 赤い三角形で示されたものは, 合体後のブラックホールの質量を示す. 縦方向の線は予想される質量の誤差範囲を示す. GW190521 の質量が大記録であることはこの図から明らかになる. (今回発表された GW190521 の宇宙物理学上の意味に関する論文の Fig.10 を元にした図である).

図 2 は, GW190521 を発生させたブラックホールの質量を測定したものです. 2つのブラックホールのうち, 大きい方のブラックホールは太陽質量 (記号  $M_{\odot}$  で示されています) の約 85 倍であり, 小さい方のブラックホールは  $66 M_{\odot}$  に近い値を記録しています. これらの値はどちらも, これまでに Virgo と LIGO によって検出された合体前のブラックホールよりもはるかに質量が大きいものです. 小さい方のブラックホールでさえも, これまでに知られている合体後に形成された「残骸」ブラックホールのほとんどより大きな値です (図 3 参照).

GW190521 では, 合体後の残骸ブラックホールの質量は  $142 M_{\odot}$  に達し, LIGO-Virgo の巨大ブラックホールのリスト中でも最高値となりました. 今回は, 合体前の 2つのブラックホールの質量の和にくらべて, 残骸ブラックホールの質量は, 約  $8 M_{\odot}$  少なくなっていて, この質量差が重力波信号のエネルギーに変換されたこととなります.

## GW190521 が注目を集める理由は?

GW190521 の発生源となったブラックホールの尋常ではない大きさは, 単なる自慢話では終わりません. ブラックホールがどのように形成されていくのか, という私たちの理解に挑戦してくるものであり, 重力がどのようにはたらくのか, といった基本的な問題を解決する, たぐい稀なる実験室を提供してくれるのです.

## 巨大ブラックホールをつくる

天文学者はブラックホールを質量によって分類しています. これは, ブラックホールの形成過程がまったく違えば, 違う領域の質量をもつブラックホールになることから, 理にかなった分類です.

すべてではないにしても, ほとんどの大きな銀河の中心には, 太陽の数十万倍から数十億倍の質量を持つ「超巨大」ブラックホールが存在しています.

私たちの銀河系の中心には, 太陽の約 400 万倍の質量を持つブラックホールがあります. これらの怪物ブラックホールがどのようにして形成されたのかは, いまだに謎に包まれています. しかし, ブラックホールの形成は宇宙がもっと若かった頃から始まっていた可能性が高く, そのためにブラックホールがこのように大きくなるまでの成長時間があった, と考えられます.

質量分類のもっとも小さいところにあるのは, 恒星質量ブラックホールです. これらは, 超新星爆発の際

に質量の大きい星のコアが崩壊してできたと考えられています。恒星質量ブラックホールは、太陽の数倍から数十倍の質量を持ち、LIGO-Virgo がこれまでに観測したブラックホールの合体は、これらの天体のペアで構成されています。

恒星質量と超巨大ブラックホールの間には、太陽の100倍から10万倍の質量を持つ「中間質量」ブラックホールという謎の領域があります。現在のところ、中間質量ブラックホールの決定的な観測は行われていませんが、どのようにして形成されるかについては、いくつかの異なるシナリオがあります。望遠鏡や重力波検出器の観測能力が向上した最近では、中間質量ブラックホールの探索が期待されるようになってきました。

大質量星の内部構造の理解や、ブラックホールの形成条件に関する理論的な考察によれば、太陽質量の約65倍から120倍のブラックホールは、星の重力崩壊によってできないと考えられています。今回のGW190521は、この分類に当てはまりません。連星系の大きいほうの（第一の）ブラックホールの質量は、星の重力崩壊ではつくられないはずのない領域にぴったりと収まっています。そして、さらに合体後の残骸ブラックホールの質量は中間質量ブラックホールの領域に合致しているのです。

LIGO-Virgo のGW190521の観測は、恒星が大質量ブラックホールを形成する可能性があったのか、あるいは別の方法で形成されたものであることを示唆しています。おそらく、小さなブラックホールのペアが合体した結果、さらに大きなブラックホールを形成したのかもしれませんが。このような多重合体のシナリオが成り立つためには、十分な数のブラックホールが近くに存在するような特別な環境が必要となります。このような特殊な環境の例として、天文学者は、星の密集した星団や活動銀河の円盤などを挙げています。

GW190521の観測は、中間質量ブラックホール領域の一部に恒星質量ブラックホールの合体の残骸が存在している可能性を示唆しています。同様に、超巨大ブラックホールもこのように形成されている可能性があります。

## 重力に対する私たちの理解を検証する

重力がどのようにはたらくか、という理論的な理解は、アインシュタインの一般相対性理論によってよく説明されています。物理学者は一般相対性理論を使って、ブラックホールの合体による重力波信号を予測しています。その予測は、LIGO-Virgo のデータを分析するのに使われます。その一方で、重力波信号の観測は、

理論自体による予測をテストしたり、予測と不一致なものがあれば、一般相対性理論の修正理論の兆候がみられないかどうかの検証に使われます。

重力波を物理学の実験室として使うことは古くから行われてきました。過去にも、LIGO-Virgo ブラックホール合体の観測データから、一般相対性理論の検証が行われています。それでは、GW190521は何が違うのでしょうか？

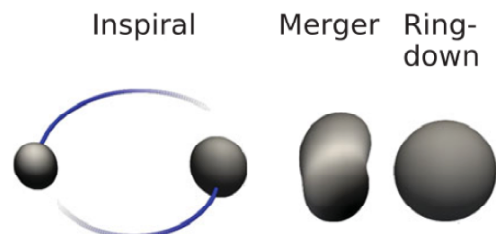


図4: 2つのブラックホールが合体するときに観測される重力波の3つの時期「インスパイラル」「合体」「リングダウン」を図示したもの。

2つのブラックホールの衝突からの重力波の信号は、観測される時間順に、3つの異なる波形に分けられます（図4参照）。最初は「インスパイラル」と呼ばれるもので、2つのブラックホールが十分に離れて、互いの周りを公転している状態からの重力波です。次に、2つのブラックホールが「合体」する瞬間の重力波、そして最後に「リングダウン」と呼ばれる波形です。合体してできた（残骸）ブラックホールが、鐘の音が収まっていくときのように、次第に安定した最終状態に向かって「鳴る」波形です。

先に述べたように、ブラックホールからの重力波信号は、LIGO-Virgo のデータとしては、ブラックホールの質量に応じて、異なる長さで観測され、異なる周波数でピークを迎えます。その結果、検出器は連星の質量に応じて重力波信号の異なる部分に敏感に反応します。質量の小さいブラックホールからの信号は、ブラックホールのインスパイラル期と合体期に、よりはっきりと観測されます。一方、GW190521を生成したブラックホールの質量がはるかに大きいことから、重力波信号の合体・リングダウン期を研究する絶好の機会となりました。

これまでに観測された他のすべてのブラックホール信号と同様に、一般相対性理論はGW190521でのテストに合格しました。そのようなテストの一つは、重力波信号のリングダウン部分を、インスパイラル部分と合体部分から分けて分析し、それらが互いに一致しているかどうかをチェックするものでした。また、いく

つかの重力の修正理論で予測されている特徴的な重力波信号が含まれているかどうか、あるいは発生源について（例えば、ブラックホールの合体ではない、とするような）他の仮説についても検証しました。これらのテストのいずれも、従来の解釈を否定することには至らず、結果として、GW190521 は一般相対性理論で説明されている物理学にしたがった2つのブラックホールの合体を起源とする重力波である、と結論することになりました。

## まとめ

GW190521 は、ブラックホールがどのようにして形成されるかについての我々の知識を押し広げ、重力を極限まで研究する新しい方法を提供する、記録的な重力波観測でした。また、今後の LIGO (LIGO-India を含む) Virgo そして日本の KAGRA を加えた観測でも大質

量ブラックホールの合体が多数発見されるであろうことを示唆しています。

恒星質量ブラックホールがどれくらい重いものまで存在するかを調べることで、ブラックホールが形成される過程や、ブラックホールが存在する環境をより明確に把握することができるようになります。GW190521 は、これまでに観測されたブラックホールの中で最大のブラックホールのペアとして、その観測結果を楽しむことができますが、ここで満足してはいけません。LIGO, Virgo と KAGRA は、さらに改良された感度で重力波のために空を探索し続け、将来の検出器は、特に、より多くの重いブラックホールが隠れているはずの低周波数側で、より強力なものになるでしょう。すでに計画されている新しい検出器には、地上に建設する計画として、[アインシュタイン望遠鏡 \(Einstein Telescope\)](#) や [コズミック・エクスプローラー \(Cosmic Explorer\)](#)、あるいは宇宙に打ち上げられる予定の [LISA](#) 計画があります。記録は破られるためにあるのです！

さらに情報を得るためには

LIGO-Virgo のウェブサイト:

<http://www.ligo.org> <http://www.virgo-gw.eu>



GW190521 の発見についてのプレスリリース資料:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW190521/>

<http://www.virgo-gw.eu/GW190521>

GW190521 の発見についての専門的な論文:

<https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

GW190521 の宇宙物理上の意味についての専門的な論文:

<https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

重力波オープンデータサイエンスセンター (GWOSC) で公開されている GW190521 の [データ](#).