

## ライゴ・ヴィルゴの第3期前半までの観測でわかったコンパクト天体の姿

典型的なブラックホールはどのようなものでしょうか？ いくつあるのでしょうか？ 宇宙が進化するにつれて、ブラックホールの数は変化したのでしょうか？ 重力波を使って連星ブラックホールの形成過程についてどんなことが分かるのでしょうか？

ライゴ (LIGO) およびヴィルゴ (Virgo) 重力波天文台の第3期観測 (O3) が終了し、その前半 (O3a と表記) に検出された多くの重力波イベントを含んだ新しい**カタログ** (突発的重力波カタログ2, GWTC-2) が公開されました。この新しいカタログでは、以前のカタログ (GWTC-1) で自信を持って特定された重力波イベントに比べて、数が4倍以上になりました。以前のカタログでは、それまで電磁波による観測から私たちが得ていたブラックホールの姿とは異なる新しい集団がいることが明らかになり、同時にそれらの起源についての問題も生じました。今回の新しいカタログも、天体の分布の理解に対して新たな問題を提起するとともに、現在までに最良とされている連星ブラックホール形成理論に挑戦状を突き付けます。

宇宙に存在するブラックホールは、質量とスピン (自転角運動量) という2つの特性によって説明されます。同じく**連星**ブラックホールは、さらに連星の**軌道面**に対する個々のブラックホールの自転の方向や連星までの距離などのパラメータを持ちます。距離が分かれば、重力波が**光の速さで伝播**することから、連星が合体したときの**宇宙時間**が分かります。

研究者たちは、連星ブラックホールの形成シナリオとして、これまでに、「フィールド内」、ダイナミカル、原始起源の3つの可能なシナリオを提案しています。連星**原始ブラックホール**は、恒星を經由しないブラックホール形成です。**ビッグバン**直後の、宇宙の初めの数分間に生じる**密度ゆらぎ**によって作られた、とするものです。「フィールド内」連星は、恒星が燃え尽きて重力崩壊することによってできたブラックホールを起源とするものです。ダイナミカル連星は、互いに遠方でできたブラックホールが、後に密度

の大きな場所に集まって合体することによって形成される、というものです。それぞれのシナリオは、連星のパラメータに異なる分布を予言します。つまり、連星ブラックホールを多数観測することで、連星の起源のシナリオの違いを区別できることを意味します。例えば、ダイナミカル連星シナリオは連星の自転軸が揃っていないことを予言しますが、「フィールド内」連星は揃っていることを予言します。

今回のカタログで報告された連星ブラックホールは、以前のカタログで報告されたものよりも質量分布が広がっています。下端では、最も重い中性子星とブラックホール分布の間の不可解な「**質量ギャップ**」に入るものがあります。上端では、いわゆる**対不安定型超新星** (pair instability supernova) 爆発によって予言される質量上限を超えるものがあります。カタログに掲載されたスピンの値は、有意にゼロではなく、少なくとも**全角運動量**とは逆向きのものも存在していて、母集団の中にはダイナミカルに形成されたものが存在することをうかがわせます。この他にもこのカタログから、宇宙に占める連星ブラックホールの集団に対する疑問を解決するか、あるいは新たに問題を提起するような発見がありました。

## 突発的重力波カタログ2 (GWTC-2)

アドバンスド・ライゴとヴィルゴ重力波検出器を用いて検出された O3a 期のデータは、2019年4月から10月に収集されました。この間に、39個の新しい連星合体が観測されました。そのうちの1個は連星中性子星、36個は確実に連星ブラックホールからのもので、2個の中性子星とブラックホールの連星の可能性が高いと考えられています。

す。GWTC-1で得られている11個の合体を含め、GWTC-2では、50個の観測例が揃い、そのすべてが、誤警報率 (false-alarm-rate) が1年に2回未満のもので、今回の解析では、より精度を増すために、誤警報率が1年に1回以下のものを選択しました。これにより、サンプル数は47になりました。

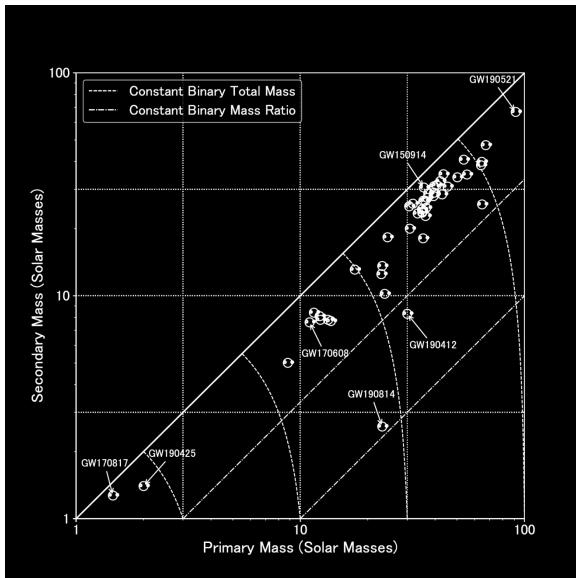


図 1: 今回の論文の解析で母集団の特徴を推測するために使用された、O1, O2, および O3a 期で観測した連星コンパクト天体の質量。選択した個々のイベントが強調表示されている。(クレジット: LIGO-Virgo Collaboration / IGF AE / Thomas Dent)

## 質量分布

ほとんどのブラックホールは、恒星の重力崩壊とそれに続く超新星爆発の残骸であると考えられています。恒星にはべき乗則の質量分布があるので、ブラックホールのべき乗則の質量分布も期待できます。

GWTC-1 では、基礎となる質量分布は、指数がおおよそ 0.1 ~ 3.1 のべき乗則で、範囲がおおよそ  $7.9M_{\odot}$  から  $42.0M_{\odot}$  程度のもので、よく説明されていました。範囲の下限がもつ意味は不明で、確かな制限ではありませんでした。範囲の上限値は、対不安定型超新星の開始条件によって説明されました。非常に重い星が電子-陽電子対を形成するほど高密度に到達し、星の内部の圧力が急激に低下したときに生じると考えられている超新星です。これは、崩壊と爆発につながり、星を消滅

させ、ブラックホールの残骸を残しません。対不安定型超新星は、 $50-150M_{\odot}$  程度の質量のブラックホール形成を妨げると考えられています。

GWTC-2では、上記のすべてが変更されました。最も軽いブラックホールは、これまでに信じられていた下限値 (GW190814の小さい方の天体が中性子星であれば  $6M_{\odot}$ , そうでなければ  $2.3M_{\odot}$ ) よりも小さく、最も大きなブラックホールはより大きく (ブラックホールの1つが  $85M_{\odot}$  程度の質量を持つ異常なイベントであるGW190521を含めると  $80M_{\odot}$ , 含まないならば  $55M_{\odot}$ ) になりました。もっとも適する分布は、指数が 2.00 ~ 2.73 のべき乗則になりました。また、質量範囲では鋭い上限値がある一方で、 $28.0M_{\odot}$  と  $38.0M_{\odot}$  の間のどこかにピークをもつような「正規分布」を追加するとより良く適合する分布になります。このようなピークはどう説明すればよいでしょうか? 球状星団のコア内のような高密度の環境であれば、連星ブラックホールの重力ポテンシャルを乱して近づく第3のブラックホールを考慮ことができ、連星はより近づいて合体率を高めることができるでしょう。このような連星は、ダイナミカルな相互作用を通じて合体した、と言えます。

ダイナミカルな相互作用は、合体するブラックホールの質量とスピンの分布に特徴を生じさせます。運動量の保存則より、合体後、より大きな質量になれば、より小さな速度となり、より小さな質量であれば、より大きな速度となります。したがって、星団の中心部には、大きな質量の天体が集まってくることになるでしょう。したがって、質量の大きい連星は相対的に密度の高い環境にあり、ダイナミカルな相互作用を受ける機会が高くなるため、合体するブラックホールの質量分布を底上げします。ダイナミカル合体によってできたブラックホールが、後に別のブラックホールと合体する場合 (いわゆる第2世代連星)、対不安定性のギャップとされる質量領域でのブラックホールができるかもしれません。原始ブラックホールのような他の形成メカニズムも、1つまたは複数の正規分布形の質量分布をつくる可能性があります。

あるいは、対不安定型超新星の兆候であると予測された鋭い質量上限が滑らかになるならば、ダイナミカルな相互作用を必要とせず、大質量連星の積み重ねを説明できます。さまざまな形成シナリオは、べき乗則分布の上に正規分布を追加す

ることで説明されます。もし、複数の世代が存在する場合は、より大きな質量で正規分布を追加することによってモデル化できます。図2は、テストしたさまざまな天体物理学的分布を示しています。

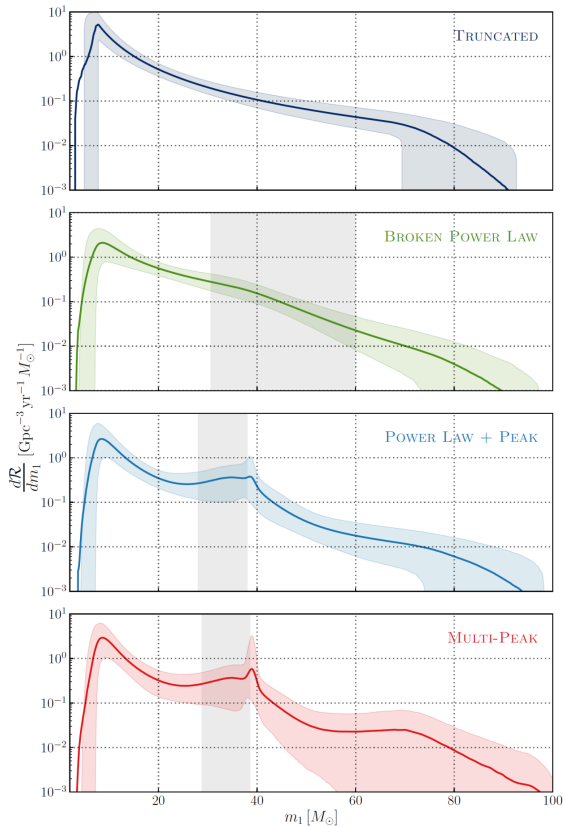


図2: ブラックホールの質量分布の形状として4つ異なる仮定をした場合に、ある質量のブラックホールが測定される確率をそれぞれ示す。実線の曲線は平均的予測であり、影付きの領域は90%の信頼区間を示す。カタログデータは、ピークが1つあるモデルともっともよく合った。(今回発表した論文の図3より)。

GWTC-1での連星に登場していた質量は非常に似かよっていましたが(つまり、質量比が1に近かった)が、GWTC-2では、GW190814とGW190412の2つのイベントで、質量比は1と明確に異なります。GW190814は、一方の質量の小ささも質量比も異常であるため、新しいカテゴリーに入るのかもしれませんが。

## スピン分布

重力波の波形は、実効的歳差スピンと実効的スピンの2つの現象論的パラメータで表すと便利です。実効的歳差運動スピンは、連星軌道面がスピ

ンによって引き起こされる歳差運動を表し、実効的スピンは、ブラックホールのスピンの角運動量に揃うかどうかによって連星合体がどのように加速または減速するかを表します。

連星として形成された「フィールド型」の連星ブラックホールは、それぞれがほぼ揃ったスピンを持つと考えられていますが、ダイナミカルに合体した連星では、そのようにスピンの揃うとは考えられません。そのため、ダイナミカルな合体は、歳差運動を起こすと予想され、それらの約半分は逆向きのスピンを持っているはずで

す。GWTC-1の連星ブラックホール候補では、このような相対論的スピン歳差運動の証拠は見られませんでした。しかし、GWTC-2では歳差運動の兆候が見られます。さらに、全体として軌道角運動量と揃った小さなスピンとなる傾向をもち、2%から50%の連星ブラックホールが逆向きのスピンを持っています(これは、すべてのカテゴリーで大きく規格外となるGW190814を除いた場合でも同じ結論になります)。

合体を経て形成された連星ブラックホールでは、それらのスピンの値として、以前の連星の軌道角運動量を引き継いでいるものと期待されます。したがって、ダイナミカル形成シナリオの決定的証拠となるのは、質量成分が違えば、スピン分布が異なることとなります。しかし、そのような証拠は見つかりませんでした。

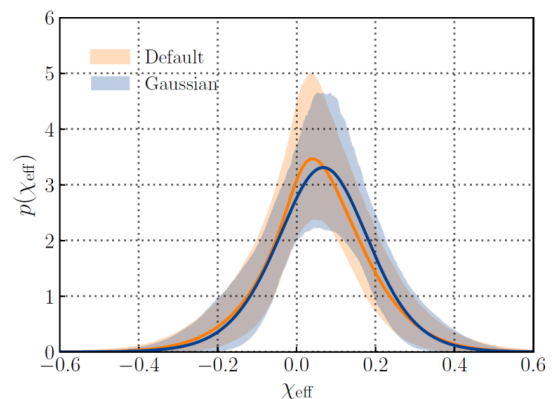


図3: 2つの異なるモデルで計算された実効的スピン  $\chi_{\text{eff}}$  の分布を示す。ほとんどのスピンは軌道角運動量と同じ向きとなるが、スピンの一方が反対方向を向いている例がかなりの数あることがわかります。(今回発表した論文の図11より)。

## 赤方偏移と合体率の変化

宇宙は**一様に膨張する**と考えられており、ビッグバン以来ずっとそうなっています。宇宙膨張は、電磁波や重力波を含めて、その中のすべてのものを引き伸ばします。波が伸びると、その周波数が変化します。可視光の場合、青から赤へと変化する「**赤方偏移**」となります。天体が遠方にあるほど宇宙膨張は大きくなり、赤方偏移も大きくなります。したがって、赤方偏移は距離を測るもう1つの尺度であり、光速と重力波の伝播速度が一致することから、時間の尺度にもなります。合体する連星の赤方偏移が大きいほど、連星は過去のものといえます。

連星ブラックホールの合体率を、赤方偏移を変数として測定し、それを星形成率と比較することで、コンパクト連星がどのように形成されたのかをよりよく理解することができます。**アンドロメダ銀河**までの距離の1000倍の辺を持つ立方体の大きさを考えると、そこには毎年11個の連星合体があるでしょう。図4が示すように、この割合は、宇宙時間にわたって進化しない連星の分布を考えたとしても、星形成率を部分的に仮定する分布を考えたとしても、矛盾がありません。また、観測時間を長くしても、連星中性子星合体が1つしか増えなかったことから、同じサイズの立方体での連星中性子星合体の数は151であり、GWTC-1の場合よりも少ないことがわかります。

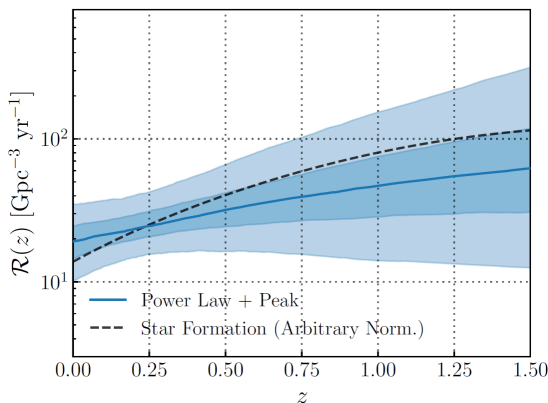


図4: べき乗則の進化モデルと合うモデルでの、連星の合体率密度を赤方偏移の関数として表したものの。実線は合体率密度の中央値を示し、暗い(明るい)影付きの領域は「1-シグマ」(「2-シグマ」)の信頼区間を示している。カタログのデータは、この合体率の赤方偏移進化をよく合致するが、一様分布を仮定したとしても矛盾しない。(今回発表した論文の図14より)。

## これからの課題

コンパクト連星の母集団について、より明確な姿が浮かび上がってきていますが、まだ重要な疑問が残っています。もともとのブラックホールの質量分布がべき乗則からずれている状況をどのように最もよく特徴付けられるのか、そして、新しく得られる特徴を説明する物理的なメカニズムは何か、ということです。大質量側のギャップにおける連星ブラックホールの合体の起源は何か、すなわち、階層的な合体、あるいは対不安定型超新星理論から予想されるよりも重い残骸を生成する恒星の存在、あるいは他の何かがあるのだろうか? スピンの向きが逆向きの連星の発見は、ダイナミカルな合体を示唆しているのだろうか? この仮説は、ダイナミカルな連星合体から期待されるような、離心率の大きな連星の観測で結論されることでしょうか。(大質量と大スピンを特徴とする)階層的合体現象を明確に検出できれば、ライゴ・ヴィルゴの観測可能な周波数帯における階層的合体の役割の決定的な証拠となるだろう。

## 用語集

- **スピン (spin):** 重心の周りのブラックホールの回転速度と方向(つまり、回転角運動量)。
- **超新星爆発 (supernova explosion):** 巨大な恒星の進化の最終段階で発生する、明るくて短期間の恒星の爆発。
- **質量分布のべき乗則 (power-law mass distribution):** 与えられた質量にブラックホールが存在する確率のモデルは、あるべき乗の質量に相当する質量  $m$  を決めたときのブラックホールが存在する確率  $p(m)$  が、べき乗則  $p(m) \propto m^\alpha$  (ここで、 $\alpha$  はべき乗則の傾き、すなわち、質量の増加に伴って確率がどの程度急落するか) にしたがう、とするモデル。
- **太陽質量 (solar mass)  $M_\odot$ :** 太陽の質量。太陽質量は、天文学で質量を表すための一般的な単位。1太陽質量 =  $1.989 \times 10^{30}$  kg。

## 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)
- 論文を無料でオンラインで読む論文.
- GWTC-2 カタログの論文を無料でオンラインで読む[here](#).
- GWTC-2 を使いた一般相対性理論の検証に関する論文を無料およびオンラインで読む[here](#).
- [重力波オープンサイエンスセンター](#)にあるGWTC-2 カタログデータ.



<https://dcc.ligo.org/G2001858-v1>