

巨大モンスターのシンフォニー： LIGO と VIRGO の 第3期観測で中間質量連星ブラックホールを探查

中間質量ブラックホール(以下、IMBH)の探查は、長年にわたって天文学者の注目を集めてきました。アドバンスド LIGO (ライゴ) とアドバンスド Virgo (ヴィルゴ) 検出器は、2015年から2017年にかけての2回の観測期間(O1とO2)において、および IMBH は検出できなかったことを発表しています。第3期観測(O3)の前半では、連星系から生まれた IMBH を初めて検出しました。2020年に発表した GW190521* のイベントです。このような重力波源をさらに見つけるために、私たちは、O3のデータから IMBH に特化した探查を行いました。この新しい探查では、GW190521 をより確度の高いイベントとして再び発見しました。また、IMBH の候補が他にもいくつか見つかりましたが、いずれも確度はそれほど高いものではありませんでした。しかし、この結果から、私たちは、IMBH 連星の合体率についての理解を向上させることができました。

中間質量ブラックホール (IMBH) : 恒星質量ブラックホールと超巨大ブラックホールを結ぶ謎に満ちた橋

宇宙にあるブラックホール(BH)は、その質量に基づいて大きく3つのカテゴリーに分類されます。恒星質量BH、超大質量ブラックホール(SMBH)、および IMBH です。3つの中で最も軽いのは、恒星質量BHです。これらは太陽質量(M_{\odot})の100倍までの質量を持つもので、 $20M_{\odot}$ を超える星が最期におこす大爆発によって形成されます。現在までに、アドバンスド LIGO とアドバンスド Virgo の検出器は、コンパクト連星の合体からの重力波信号としておよそ50の観測があったことをカタログ GWTC-1 および GWTC-2 として報告しています。

SMBH は $\sim 100,000M_{\odot}$ を超える質量をもつものです。いくつかの理論では、これらのBHは、大質量のBHまたはIMBHが複数回衝突する結果として形成されることが示唆されています。星が密集した環境では、コンパクトな天体が第1世代の合体をしたあと、その生成物がさらに合体して、より質量の大きな第2世代のBHを形成する可能性があります。このプロセスはさらに続いて世代を伸ばしていく可能性があります。階層的合体シナリオと呼ばれるモデルです。これまでの、電磁波による観測(光学望遠鏡による観測)によれば、宇宙のほとんどの銀河の中心にはSMBHがあるようです。電磁波観測からSMBHの合体する証拠がいくつか挙げられていますが、LIGO-Virgoの観測周波数帯での観測は期待されていません。その理由は、より低い周波数帯の重力波が発生するため、将来の宇宙での重力波観測ミッション LISA など、SMBHの合体を超長距離で検出できるような観測機の登場まで待たなければなりません。

その名前が示すように、3番目のカテゴリーであるIMBHは、恒星質量BHとSMBHの間にあります。その質量は、およそ $100M_{\odot}$ から $100,000M_{\odot}$ の範囲のものです。いくつかの理論では、低金属含有のポピュレーション III と呼ばれる第1世代の恒星のうち、重いものが直接的なコア崩壊をすることでIMBHが形成されることを示唆しています。また、その他にも、若い密集した星団の中で恒星が階層的に合体する

ことでIMBHが形成されることが示唆されています。いずれにせよ、直接観測されるまでは、IMBHの存在自体が謎のままです。現在、電磁波スペクトルのX線部分の観測から、最も強いIMBH候補とされるのが HLX-1 です。推定質量は $3000M_{\odot}$ から $300,000M_{\odot}$ とされています。IMBHは、アドバンスド LIGO と Virgo で直接観測できうる重力波を放出するはずですが、より具体的には、IMBHを含む連星の合体か、あるいは連星合体で形成されるIMBHが重力波源になると想定されます。

IMBH 探查はなぜ重要か？

IMBHを含む系は、一般相対性理論(GR)をテストするための完璧な実験室になります。この質量帯での連星は、等質量ではない(非対称的な)場合が多いと考えられます。一般に、非対称質量の連星は、重力波の基本周波数の他に、楽器に見られるのと同じように、より高い高調波を生成します。これらの高調波は、高次モードとも呼ばれます。最近のLIGO-Virgoによる検出の1つである GW190412 は、これらの高次モードの存在を示しました。科学者たちがBH合体のシンフォニーとして、このときはじめて完全五度の和音を聞いたのです。このような非対称連星を検出することで、私たちは、脱毛定理によって予言されるブラックホールが持ち得る3つの量(質量、スピン、電荷)に対して、基本的な理解を広げることができます。IMBH連星を研究するもう1つの利点は、大質量恒星の進化についての情報が得られることです。一方で、IMBH連星だけの研究から、恒星質量BHとSMBHの間の進化的なつながりがわかるか、と言われれば難しいでしょう。LIGOとVirgoの検出器は、さらに重いSMBHからの重力波を観測できないため、より確実な描像を得るには、LISAによるSMBH合体の観測を待つ必要があるでしょう。

IMBH 連星の探查方法は？

中性子星やBHのようなコンパクトな連星の合体から生成された重力波は、干渉計のまわりの時空を伸縮したりねじっ

たりします。このような伸縮やねじりによって生じる変形は、LIGO および Virgo 検出器の干渉法を用いて正確に測定されます。これらの検出器は、重力波信号を捕捉するだけでなく、地上および機器から来る多くのタイプのノイズも検出します。その中には、重力波信号自体よりもはるかに「大声」の信号もあります。これらのノイズの多いデータに埋め込まれている天体物理的な重力波信号を見つける方法として、科学者は「マッチドフィルタリング」法と呼ばれる特別なテクニックを用います。一般相対性理論から計算された重力波信号モデルを使用して、データ内の同様のパターンを探すのです。その他にもモデルに依存しない手法として、各検出器に生じた大きな信号の発生時刻に注目する方法があります。発生時刻の差が、検出器の場所の違いによる重力波到着時刻の違いとして考えられる程度であれば、それらの信号は実際に重力波によるものであると期待できるからです。

一般的な重力波信号モデルは、インスパイラル、合体、およびリングダウンの3つの部分(図1を参照)によって表され、その信号の長さは重力波源の質量などに依存します。連星が重いほど、放出される重力波信号は短くなります。ノイズの多いデータからそのような短い信号を抽出することは実に困難であり、地上または機器の人工的なノイズが実際の信号をカムフラージュすることで、難易度がさらに高くなる可能性があります。したがって、実際の重力波信号のみを最もよく識別できるように、検出技術を慎重に調整することが不可欠になります。

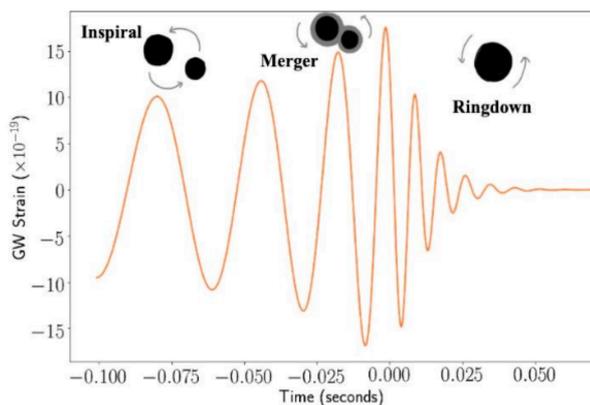


図1: 大質量連星ブラックホールからの重力波信号を模式的に描いたもの。インスパイラル期(合体直前に連星が周回運動しているとき)、合体、リングダウン(合体後1つのブラックホールとなって落ち着いてゆくとき)の三段階に分けられる。縦軸は無次元量の重力波振幅(時空のゆがみ)であり、横軸は時間である。

第3期観測期間(O3)では、モデルベースのマッチドフィルタリング法とモデル非依存の検出法を組み合わせた方法で、IMBH連星の検出が行われました。2つの方法を組み合わせると、複数の検出器で検出されたIMBH連星の有力な候補リストが生成されます。これらの候補の中から、合体後の質量

が $100M_{\odot}$ を超え、さらに、主質量(連星のうち重いBHの質量)が $65M_{\odot}$ を超えるものを拾い出しました。後者の質量は、ペア不安定性によるマスギャップと呼ばれる質量空白帯の下限です。また、候補の絞り込みには、偽警報率(FAR)が低いもの、という条件をつけました。これは、単純な背景ノイズが引き起こす似たような大きさのノイズ信号を検定の誤りとして入り込むのを防ぐためです。

何を発見できた？

これらの選択基準に基づいて、私たちは、この組み合わせ探査によって、GW190521が最も重要なIMBH候補であることがわかりました。GW190521の発見は2020年9月2日に発表され、この信号特性は論文報告がなされています。この重力波イベントは、 $66M_{\odot}$ と $85M_{\odot}$ の2つのBHの合体によって、 $\sim 142M_{\odot}$ のBHが形成された、というものです。今回の研究で、以前の解析よりもこのイベントはより確度が高いものとなりました。

今回のIMBH検出法は、大質量連星に適しているため、重い連星ブラックホール系の再調査に最適です。今回の検出により、GWTC-2で見られる他の重い連星ブラックホールからのGW信号も再検出しましたが、新しい重要なIMBH信号の検出には至りませんでした。

IMBH連星の合体率について言えることは？

宇宙空間の与えられた体積内で与えられた時間内にIMBH連星が合体する頻度(いわゆる「合体率密度」)を推定するには、IMBH連星からの信号をどの程度観測できるのかという観測感度を理解しておく必要があります。これを調査するために、私たちは、実際のデータに人工的な重力波信号を「注入」するシミュレーションを実行しました。まず、アインシュタイン方程式を数値的に解くことによって重力波信号を生成する数値相対論モデルを使い、最大 $800M_{\odot}$ の総質量までのIMBH連星合体を、質量比(パラメータ q)が1対1のものから、1対10のものに対して用意しました。次に、これらの信号を天空上の位置、連星軌道面の傾斜角、および共動体積座標系に対して一様に分布させ、それらを複合検出によってどれだけ検出できるのかを調べました。与えられた体積あたり観測時間あたりで復元できた信号から、私たちは検出の感度を特定することができ(図2を参照)、また図3に示すように、重力波源となるIMBH連星の合体率の上限をつけることができました。

今回の研究によって、総質量が $200M_{\odot}$ でスピンの0.8の等質量IMBH連星の合体率は、1年あたり1ギガパーセク立方あたり0.06であることがわかりました。この上限値は、以前のO1およびO2観測でのIMBH探査で報告された値よりも3.5倍低い値です。この率は、球状星団の典型的な存続期間中(100億年と仮定)に0.2回の合体と換算されます。また、GW190521のような重力波源の合体率は、1年あたり1ギガパーセク立方あたり、0.08に修正されました。

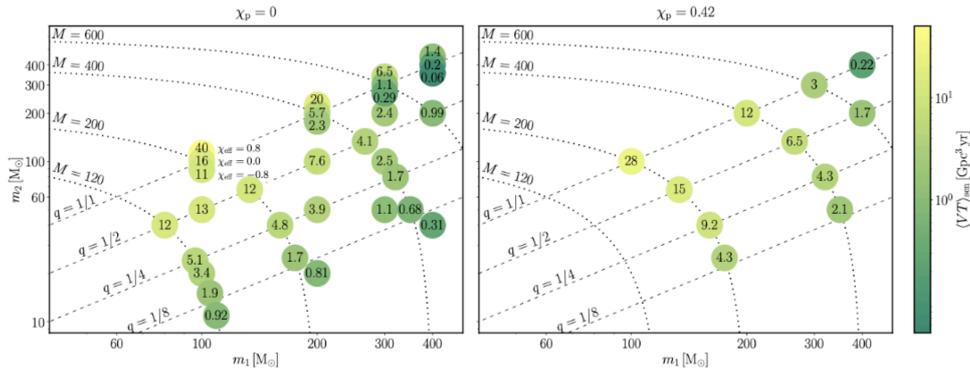


図 2: (論文の Figure 1 より) ギガパーセク立方 (Gpc³) あたりの平均感度体積時間 $\langle VT \rangle_{\text{sen}}$ を, IMBH 連星の歳差運動をしていないもの(左)と歳差運動しているもの(右)についてプロットしたもの. 各円は指定された質量を持つ IMBH 連星に対応する. 歳差運動をしていない IMBH 連星の場合, 一定の質量比 (q) をもつ連星系では総質量 (M) が増加するほど, IMBH 検出の感度は低くなる. 歳差運動している連星 (連星系の実効的歳差スピ χ_p がゼロでない連星) の場合, 検出感度は χ_p がどれだけ大きな正の値をもつかに直接相関する.

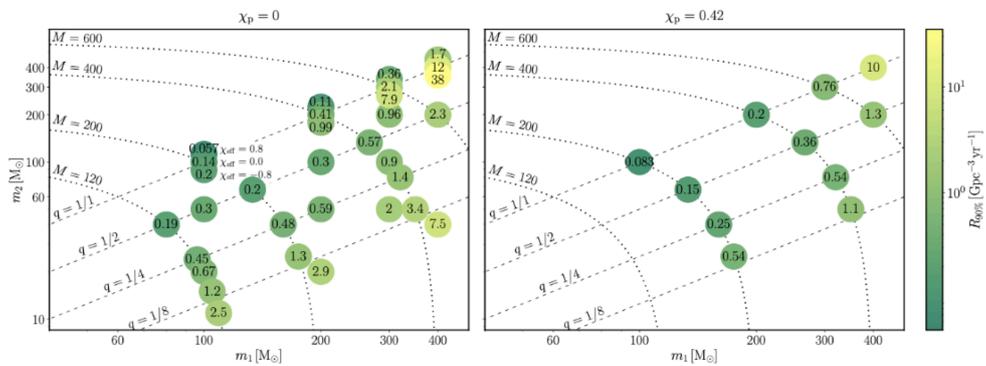


図 3: (論文の Figure 3 より) IMBH 連星の歳差運動をしていないもの(左)と歳差運動しているもの(右)について, 1 ギガパーセク立方あたり 1 年あたりの合体率密度の上限値を 90% 信頼区間として示したもの. 各円は, 図 2 と同様に, 指定された質量をもつ IMBH 連星に対応する.

用語集

- **ブラックホール (Black Hole):** 光が脱出できないほど重く, 密度が大きな天体.
- **高次モード (Higher-order-modes):** 重力波は **球面調和展開** での四重極項がもっとも強いが, それ以外の項の成分を指す. 四重極項は音波の基本振動に相当する.
- **質量比 (mass ratio):** 軽い方の天体の質量を重い方の天体の質量で割った値. ($q = m_2/m_1$)
- **ギガ・パーセク (Gigaparsec; Gpc):** 10 億 **パーセク** の距離. およそ 30 億光年あるいは, 3×10^{22} km.
- **歳差運動する連星 (Precessing binaries):** 連星系のなかで, それぞれの星の回転方向成分が軌道**角運動量**の向きとずれているもの. 「実効的整列スピン」と呼ばれる χ_{eff} は, 連星合体前の 2 つのコンパクト天体のスピンから計算される量で歳差運動の大きさを特徴付けるパラメータである. χ_{eff} が負であれば, 連星系の軌道角運動量に対して逆向きの角運動量を持つことを示す. 「実効的歳差スピン」と呼ばれる χ_p は, 個々のスピンの別の組み合わせで定義されるパラメータで, どのくらいの **歳差運動** が連星系でどれだけ生じるかを示す. 値が大きいほど歳差運動が大きいことを示す.
- **感度体積時間 (Sensitive volume-time):** 感度を与えることで決まる, 重力波源の検出が可能となる時空の体積.

- **太陽質量 (Solar mass) M_\odot :** 太陽の質量. 1 太陽質量 = 1.989×10^{30} kg.
- **上限 (upper limit):** 観測結果を与えるのものにもっともらしい物理量の値の上限値.

さらに詳しく知るために

ウェブサイトはこちら.

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/



論文は [こちら](#) から.

GW190521 の発見についての論文は [こちら](#) から.

GW190521 のもつ天体物理学的な示唆については [この論文](#) から.

このリーフレットの英語版は [ここ](#).

日本語版への翻訳: 真貝寿明, 山本貴宏