

LIGO と Virgo の第 3 観測期間のブラックホールと中性子星の母集団の統計

Introduction

ブラックホールや中性子星のような、コンパクト天体で構成される連星の合体による個々の重力波イベントからは、固有の重力波源の特性を明らかにすることができます。しかし、これらの連星系が宇宙全体でどのように形成され進化してきたかを明らかにするためには、多くの重力波イベントを観測して母集団の統計を明らかにすることが必要です。コンパクト天体の質量とスピンの分布を測定することは、連星系の形成過程を明らかにすることにつながるため、私たちは、特に注目しています。

科学者たちは、コンパクト天体の連星系が宇宙で形成される可能性として 2 つの方法に焦点を当ててきました。以下では 2 つの「チャンネル」と呼ぶことにします。孤立した連星進化チャンネルでは、巨大な恒星がつくる連星が共に進化し、それぞれが最終的に爆発して、中性子星またはブラックホールになったコンパクトな連星が形成された、と考えます。動的形成チャンネルでは、球状星団や中心核星団のような密集した環境で、中性子星やブラックホールが結合して連星系を形成する、と考えます。これらの形成チャンネルはどちらも、重力波で検出されるコンパクト天体の観測可能な量に独自の特徴を残します。LIGO によって検出可能な重力波源は、太陽質量（記号 M_{\odot} で表します）の 1 倍から 100 倍の範囲を広くカバーすると予想されます。しかし、天体物理学的プロセスが異なると、この質量の範囲全体で、ブラックホールや中性子星が検出されない領域が生じる可能性があります。たとえば、X 線と重力波による最近のコンパクト天体の観測では、3~5 M_{\odot} の範囲に低い質量ギャップが存在し、最も質量の大きい中性子星と最も質量の小さいブラックホールの間に空白があることが示唆されています。この空白は、巨大星がどのように死ぬかを支配する物理的メカニズムによって説明される可能性があります。また、脈動対不安定型超新星の理論によって、ブラックホールには、約 50 から 120 M_{\odot} の範囲で、高い質量ギャ

ップがあることが予測されています。この場合、瀕死の星の外層が放出され、質量の小さいブラックホールが残るか、残骸がまったく残りません。したがって、これらのギャップのどちらかまたは両方が存在すれば、私たちは、巨大な星がどのように一生を終わらせるかについて学ぶことができます。

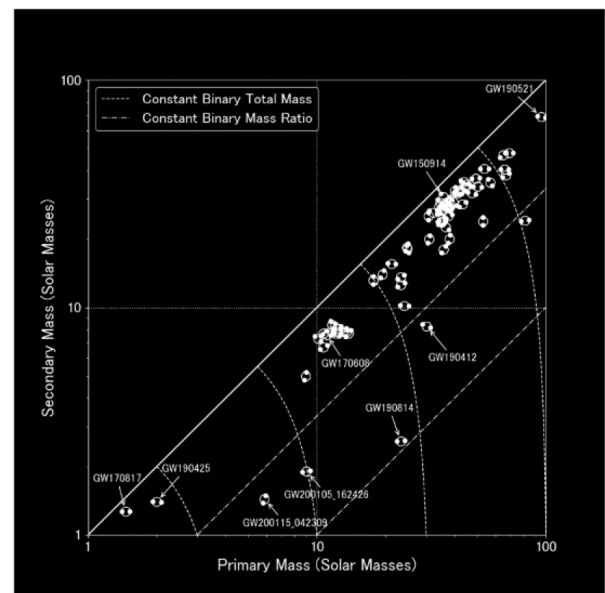


図 1: 私たちの論文で統計解析された連星系の母集団。横軸に大きい方の天体の質量、縦軸に小さい方の天体の質量を表す。関心を引く個々のイベントをマークしている。また、連星の質量比と総質量の線も示す。(Credit: LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration / IGFAE / Thomas Dent.)

コンパクト連星系の形成史を解くもう 1 つの重要な特徴は、構成天体の自転（スピン）軸の公転軌道軸に対する方向です。たとえば、地球が、太陽の周りの公転軸に対して、自転軸をわずかに傾けていることが、季節の原因になっています。孤立して形成されたコンパクト連星では、通常自転軸が軌道の公転軸と同じ向きを向いているのに対し、動的に形成された連星は自転軸がランダムな方向を向いている可能性があります。重力波で調べることができる 3 番目の重要な観測可能な

量は、連星合体が発生した場所までの距離です。これは、[ハッブルの法則](#)から得られる **赤方偏移** によって表現されます。赤方偏移の分布は、宇宙の進化のさまざまな時点での **星形成率** と **宇宙の組成** (どの元素があり、それらの相対的な比はどれだけか) について教えてくれます。これは、星の組成が、最終的に合体するコンパクト天体への進化の速さに影響を与えるためです。したがって、コンパクト連星合体の質量、スピン、および赤方偏移の分布を、これらのパラメータ間の可能な相関とともに測定することは、重力波天文学の重要なターゲットです。

モデルと方法

今回の論文では、第3期観測期間の終わりまでに LIGO・Virgo で識別された 74 個のコンパクト連星合体のデータを使いました。このデータの内訳は、70 個の連星ブラックホール (BBH) イベント、2 個の連星中性子星 (BNS) イベント、および 2 個の中性子星・ブラックホール (NSBH) の連星合体のイベントです。これらは、天体物理学的なイベントではない検出器のノイズで誤った統計にならないように、検出されたデータの信頼性に基づいて選択されたものです。コンパクト天体の母集団の全体的な特性を制約するために、私たちはまず、個々のイベントのパラメータ (質量、スピン、および赤方偏移) の推定値を取得し、次に個々のイベントの測定値の不確実性を考慮してそれらをまとめました。次に、質量、スピン、赤方偏移の分布についていくつかの異なるモデルを母集団全体に適用して、データに最適なモデルを決定しました。一部のモデルは、天体物理学的プロセスに直接さかのぼることができるパラメータによって説明できるものです。例えば、ブラックホールの最小質量で、これは、低い質量ギャップの有無について示唆を与えてくれます。他のモデルは、データの予期しない特徴に対応するようにより柔軟性をもつものですが、そのパラメータがすべて天体物理学的現象に必ずしも関連しているわけではありません。

私たちが重力波検出するコンパクト天体は、宇宙で生成された母集団の公正なサンプルではありません。重力波信号の強度は、連星系の質量とともに増加し、距離 (または赤方偏移) とともに減少するため、大質量の連星合体ほど遠方のものまで観測できます。この「[マルキスト・バイアス](#)」に対して、私たちは、ランダムなパラメータを使用して重力波源の母集団からの信号を

シミュレートし、どのパラメータのものが検出されやすいかを検証しました。これにより、観測で生じたバイアスを修正できます。

コンパクト天体の母集団

すべてのコンパクト天体の合体を、個別にではなくまとめてモデル化すると、宇宙で生じる連星合体の頻度は、1 ギガ・パーセク立方あたり年間 71~2200 であると推定されます (1 ギガ・パーセク = 10 億パーセク、1 パーセクは約 3.26 光年に等しい距離の単位です)。中性子星とブラックホールの境界を $2.5 M_{\odot}$ とすると、1 年間で 1 ギガ・パーセク立方あたりの頻度として、BNS は (13.0 - 1900.0)、NSBH は (7.4 - 320.0)、BBH は (16.0 - 130.0) の範囲になります。私たちは、BBH を、他の 2 つの種類よりもはるかに多く観測していますが、実際には宇宙ではそれほど一般的ではないと考えられます。その理由は、連星系の合体率がそれらの質量の減少関数であるため、より大質量な連星系ほど合体は稀にしか起こらないからです。ただし、単一のべき乗則では、最も軽い中性子星から最も重いブラックホールまでの連星母集団全体にわたる合体率と大きい方の質量の関係を説明することはできません。私たちのデータは、中性子星の質量を超えるところでの合体率の低下を示唆していますが、ブラックホールの質量範囲の前に明確なギャップがあるかどうかは明らかではありません。この特徴が本当に存在するかどうかを明確に判断するには、さらに多くのデータが必要になります。

中性子星の質量分布

次に、重力波で検出された中性子星の質量分布を推定します。これまでの推定は、私たちの銀河内で見つかった [パルサー](#) としての中性子星の観測データを使用していました。パルサーは、高速回転と強い磁場により、一定の間隔で電波や X 線を放出する天体です。パルサー観測の結果では、質量分布に 2 つのピークを持つものが好まれましたが、重力波で観測された中性子星では、銀河系内の分布と比較してより大きな質量のものに偏った単一ピークの分布が好まれます。このことは、重力波で観測された銀河系外の中性子星の母集団が、パルサーとして観測された銀河系内の分布とは異なる可能性を示しています。中性子星の最大質量は 1.8 から $2.3 M_{\odot}$ の範囲で、これは、パルサー観測による結果と一致しています。

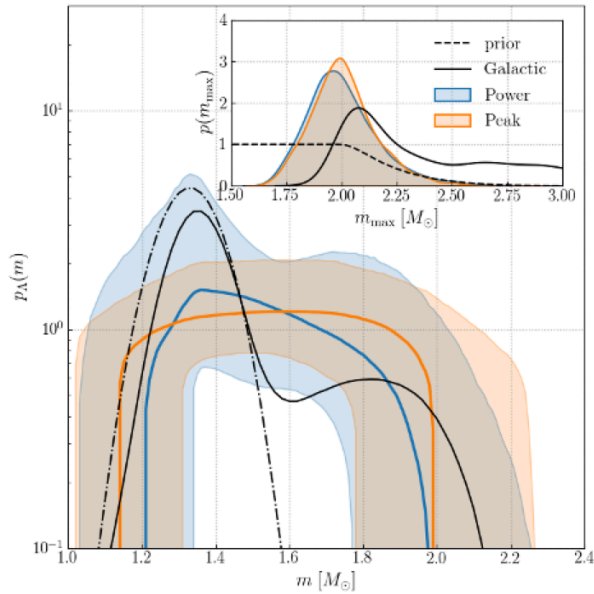


図 2: 重力波で観測されたコンパクト天体の連星合体における中性子星の質量分布. 横軸に中性子星の質量を太陽質量で示し, 縦軸はその質量をもつ中性子星を観測する確率を示します. 青とオレンジの実線の曲線は, 2つの異なるモデルの下で推定された分布を示して, 明るい影付きの領域は, 測定の 90% の不確かさを示しています. 黒い一点鎖線は銀河系内の連星中性子星系から推定された分布を示し, 黒い実線はすべての銀河系からの中性子星を含む分布を示しています. 挿入図は, 同様の配色で中性子星の最大質量の確率分布を示しています. この挿入図の縦軸は中性子星の最大質量の相対確率を示します. 黒い破線は, データが分析される前の最大質量の事前確率を示しています. (論文の図 7)

ブラックホールの特徴

以前に得られたブラックホールの質量分布と比較すると, 母集団としては, より多くの不等質量連星が好まれ, 低質量のブラックホールの割合が高くなりました. 私たちの設定した, より柔軟なモデルでは, 連星をつくる大きな方の (プライマリとも呼ばれる) ブラックホールの質量について, これまでに知られていた約 $35M_{\odot}$ のピークに加えて, 約 $10\text{--}18M_{\odot}$ にもピークがあることを示唆しています. 孤立した連星進化モデルでは, $8\text{--}10M_{\odot}$ の範囲の集団の説明できますが, この追加のピークの起源はまだ理解されていません. 「コンパクト天体の母集団」の節で説明した低い質量ギャップと同様に, 連星ブラックホールの高い質量ギャップの存在を自信を持って特定することはできません. 対不安定型超新星から予測されるような, 約 $50M_{\odot}$ に鋭い区切りがないことは, 孤立した連星進化から形成されない集団の構成要素が存在する可能性があることを示唆しています. 動的な連星形成シナリオでは, 一度合体してできたコンパクト天体が, さらに他の天体と

合体していくような階層的合体を含みます. これにより, 低い方と高い方の両方の質量ギャップにも質量分布が広がる可能性があります. あるいは, ガスの多い環境にある連星では, 連星を構成するブラックホールが (周囲のガスを飲み込むことによって) 降着によって質量を増加させるため, 高い質量ギャップを埋める可能性もあります.

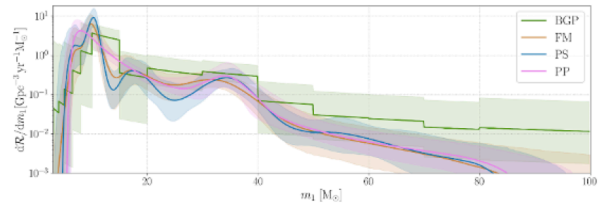


図 3: 3つの異なる色で示されている 4つの異なるモデルを仮定して推定された連星の大きな方の天体の質量分布. (ピンクを除く) 3つのより柔軟なモデルは, 約 $10M_{\odot}$ と $35M_{\odot}$ に有意なピークがあり, さらに約 $18M_{\odot}$ に別の暫定的なピークがあります. 縦軸は, 横軸に示された質量をもつ連星が合体する頻度を示し, 影付きの領域は, 各測定の不確かさを示しています. 縦軸の値が高いほど, それらの質量がより一般的であることを意味します. (論文の図 11)

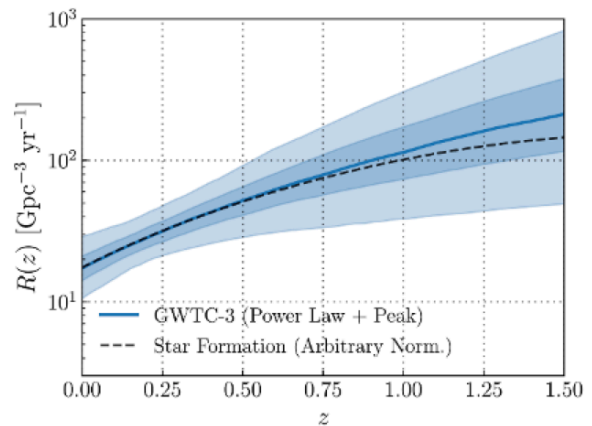


図 4: 連星合体頻度を赤方偏移の関数として示したものの. 青い実線は中央値を示します. 暗い陰影は測定の 50% の不確かさ, 明るい陰影は 90% の不確かさの領域を示しています. 赤方偏移による星形成率の変化も黒い破線で示しています. (私たちの論文の図 13)

結論

新たに発表されたコンパクト連星のカタログは多数のデータを含み, 重力波で検出されたブラックホールと中性子星の特性をこれまでになく正確に調べることができました. 私たちは, LIGO で検出可能なコンパクト天体の形成と進化の過程を掘り下げ始めています. 将来の観測による多くのデータで, 私たちは最終的に質量ギャップの有無を確認し, 私たちが今発見した予期

しない特徴をよりよく理解することを期待しています。これは、星がどのように死ぬか、コンパクト天体がどのように動的に結合するか、そして宇宙が何でできているかなど、天体物理学的現象に新しい直接的な制約を課すのに役立つことでしょう。

用語集

- **ブラックホール (Black hole):** 重力が非常に強いために光を含むあらゆるものが脱出することができない、非常にコンパクトな質量によって引き起こされる時空の領域。
- **中性子星 (Neutron star):** 大質量星が超新星爆発を起こした後に残された、ほとんど中性子でできた非常に密度の高い天体。
- **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。
- **スピン (Spin):** コンパクト天体の自転角運動量のこと、中性子星の回転や、ブラックホール周囲の「回転」する時空の性質を指す。
- **孤立した連星進化 (Isolated binary evolution):** 2つの天体が誕生してから合体するまでずっと2体のままでいる連星系の進化
- **動的な連星進化 (Dynamical formation):** 密度の高い環境で、2つのコンパクト天体が重力によって引き合うことで連星を形成する進化
- **低い質量ギャップ (Lower mass gap):** 中性子星の最大質量とブラックホールの最小質量の間にコンパクト天体がほとんど観測されていない空白のこと。太陽質量のおよそ3倍～5倍の範囲。
- **高い質量ギャップ (Upper mass gap):** 不安定対超新星のために、太陽質量のおよそ50倍～120倍の範囲のブラックホールが観測されないこと。

- **赤方偏移 (Redshift):** 宇宙のハッブル膨張によって放射の波長が長く（赤い方向へ）引き延ばされることから、宇宙論的な距離を測る量として使われる。
- **星形成率 (Star formation rate):** 宇宙論的な時間の中で、ガスから星が生まれていく割合。
- **降着 (Accretion):** 重力系の中心へ向かってガスや物質が落下していくプロセス。
- M_{\odot} (**太陽質量**): 太陽の質量（およそ 2×10^{30} キログラム）。太陽質量は天文学でよく用いられる質量の単位である。

さらに興味のある方へ

論文を読む:

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2100239/public/main>

GWTC-3 に関するニュース:

<https://www.ligo.org/news.php>

<https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>

<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>

GWTC-3 のデータリリース:

<https://www.gw-openscience.org/>

私たちのウェブサイト:

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



本解説のオリジナルは、<https://www.ligo.org/science/Publication-03bAstroDist/> にあります。

(日本語訳: 真貝寿明, 山本貴宏)