

# 突発的重力波カタログ-4.0: コンパクト連星合体の母集団の特性

宇宙にはあらゆる質量の星々があります。多くの星は太陽と同じ程度の質量をもちますが、その数十倍も数百倍も大きな質量をもつ星々が存在することも知られています。大質量星がその一生を終え、残骸として残す中性子星やブラックホールなどの天体もまた、広範囲の質量分布をもちます。これらの天体がどのように誕生し、進化し、その一生を終えるのかを明らかにするために、LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) 共同研究グループが運営する地上のレーザー干渉計でコンパクト天体を含む連星の合体から生じる重力波を調べることから、知見を得ることができます。一般的に、個々のコンパクト連星合体に着目するより、その母集団全体を調べる方がより有益な情報を得ることができます。この要約では、現在発行されている中で最大の突発的重力波カタログ GWTC-4.0 に含まれる 161 個のコンパクト連星合体の母集団の特性を解説します。

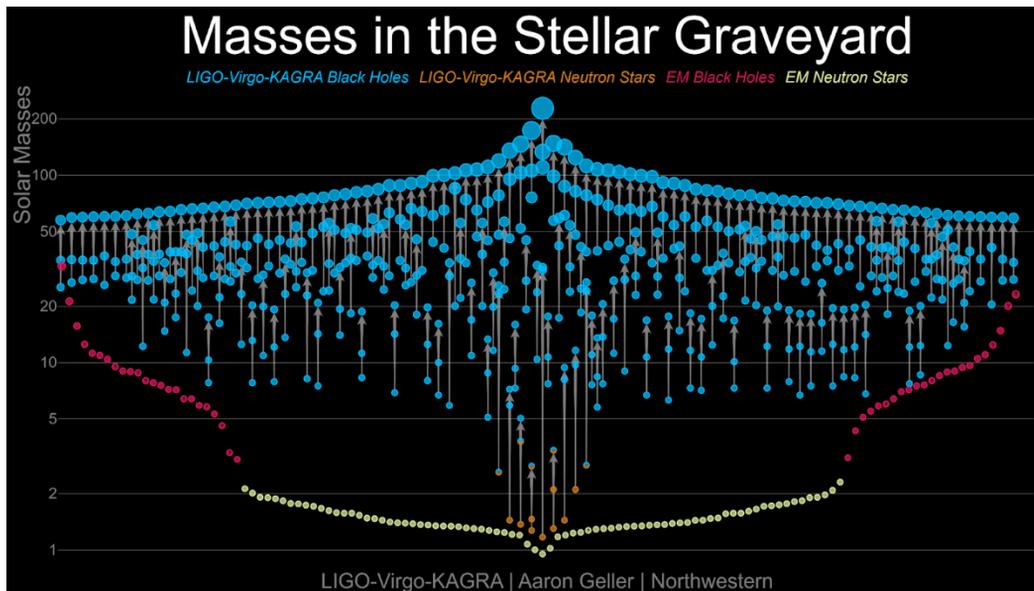


図 1: LIGO-Virgo-KAGRA の突発的重力波カタログ GWTC-4.0 に含まれるブラックホール (青) と中性子星 (オレンジ) を、電磁波で観測されたブラックホール (赤) と中性子星 (黄) と並べて表す。(縦軸は太陽質量を単位にした天体の質量を表す。横方向はデザインの関係的に並べたもの。) この図は、コンパクト天体の質量が幅広い範囲に及ぶこと、ブラックホールと中性子星の質量に重なる領域があること、いわゆる「低い方の質量ギャップ」内にも天体が存在していることなどを示す。疑問符がついた電磁波による観測結果はその質量が未確認または不確かさが大きいものを表す。

[クレジット: LIGO-Virgo-KAGRA/Aaron Geller/Northwestern]

コンパクト連星の形成過程には主に2種類のシナリオがあると考えられます。1つは「孤立連星進化」と呼ばれ、その一生の間、他の天体との相互作用がほとんどないような大質量星の対を指します。これらの大質量星は崩壊し、ブラックホールや中性子星を残骸として残します。もう一方は「力学的形成」と呼ばれ、球状星団など高密度に星が存在する環境で、多くの天体が相互作用するなかで形成される連星を指します。

もっと知るには:

ウェブサイト: [www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/)



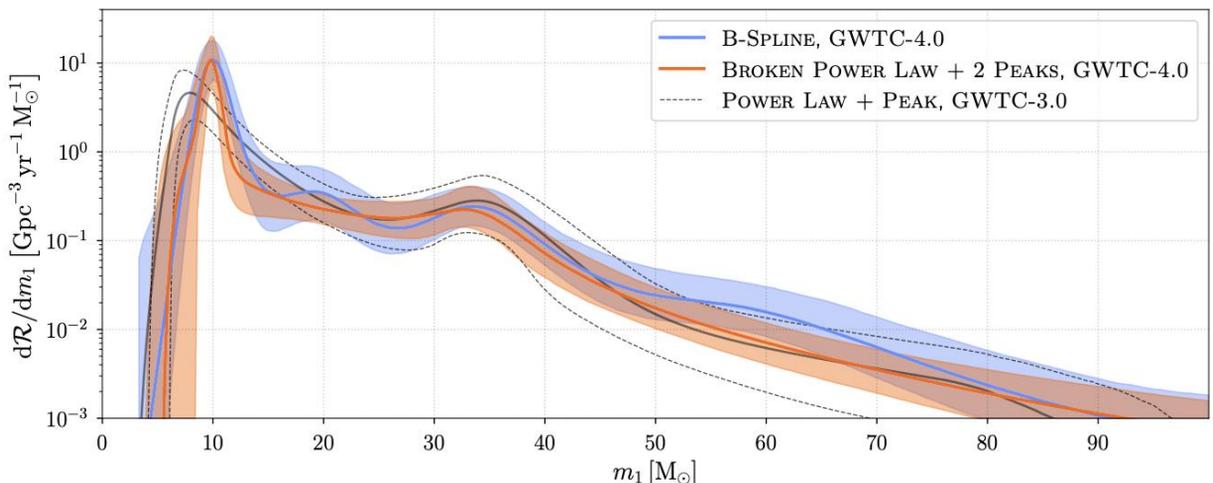
## 手法

本論文は連星中性子星 (BNS)、中性子星・ブラックホール系 (NSBH)、そして連星ブラックホール (BBH) の合体を扱っています。私たちは、これらの天体の対が[宇宙年齢](#)の間にどのように形成され、合体したのかを描き出します。本論文で扱う解析は、つい最近発行されたLVK共同研究グループの突発的重力波カタログ (GWTC-4.0) の観測結果を使いました。GWTC-4.0 は LVK が2023年5月から2024年1月にかけて行った第4期観測運転期間の第1部 (以下、O4a という) 中に観測した重力波イベントが含まれる過去最大のカタログです。本論文の研究では、雑音由来の信号が混入することを極力避けるため、連星ブラックホールの重力波イベントは[誤警報率](#) (FAR) が  $1 \text{ yr}^{-1}$  未満であるもの、中性子星を含む重力波イベントでは  $0.25 \text{ yr}^{-1}$  未満であるものを抽出しました。よって、O4a のデータからは新たに84個の連星ブラックホールと1個の中性子星・ブラックホール系 ([GW230529](#)) がサンプルに加えられ、解析に使われた連星ブラックホールは合計153個になりました。

母集団の特性を推定するには「[選択効果](#)」を加味した修正が必要になります。選択効果は観測天文学の多くの分野に共通する課題です。私たちの重力波検出器は遠くの軽い連星合体に比べ、近くの重い連星合体に対しては感度が高いので、そのことを解析を行う際に考慮しなければなりません。コンパクト連星から生じる重力波信号は[一般相対性理論](#)によって高い精度で予測されます。また、重力波は電磁波とは異なって、物質と非常に弱くしか相互作用しません。このため、私たちは重力波の選択効果を正確かつ高い精度で評価することができます。私たちは、何百万もの (波源が取り得る質量、[角運動量](#)、そして[赤方偏移](#)の分布をもつ) シミュレートされた重力波信号を検出器で得られたデータに挿入し、複数の[探索パイプライン](#)を使って (その擬似信号を検出できる割合を示す) 検出効率を測定しました。シミュレートされた重力波信号を使うことで選択効果を修正し、私たちが観測した重力波源の母集団に限らず、宇宙全体に存在する重力波源の母集団の質量、角運動量、赤方偏移について、偏りのない推定を行うことができました。私たちは正確度と精度の兼ね合いが異なる複数のモデルを使い、得られた結果を多角的に検証しました。

## 結果

[GWTC-3.0の解析](#)で見られたいくつかの特徴は継続して見られます。特に、質量が  $1\text{--}2 M_{\odot}$  (以下、 $M_{\odot}$  は[太陽質量](#)を表す) である天体が多く存在することがわかりました。これは連星中性子星や中性子星・ブラックホール系に含まれる中性子星によると考えられます。[図2](#)に見られるように、ブラックホールの質量分布 (ブラックホールの質量ごとの相対的存在比率) は、なだらかとはかけ離れた分布をしています。その分布は (低質量領域では傾きが小さく、大質量領域では傾きが大きい2つの[べき乗則](#)で表され、 $10 M_{\odot}$  付近と  $35 M_{\odot}$  付近は (べき乗則に従った分布より) 密度が高いことがわかります。 $20 M_{\odot}$  付近も密度が高い特徴が見られます。また、 $35 M_{\odot}$  程度の質量をもつブラックホールは他の質量をもつブラックホールより、同じような質量をもつブラックホールと合体する確率が高いこともわかりました。



**図2:** 私たちが観測した連星ブラックホールにおける、重い方のブラックホールの質量分布。GWTC-4.0の解析で使用されたモデル (青・オレンジ) は GWTC-3.0の解析で使用された「べき乗則+ピーク」モデル (黒い破線) を改善したもので、 $10 M_{\odot}$  付近と  $35 M_{\odot}$  付近の特徴をより強く捉えている。

ブラックホールを特徴づけるのは、質量だけではありません。天体がどれくらい速く回転しているかを示す**角運動量**（天体の自転軸の方向や連星の公転面に対する互いの自転の向き）も特徴量です。これらの角運動量は（その天体の質量と独立に、または合わせて）その天体が誕生した環境、形成、進化についての情報をもたらします。ブラックホールの角運動量はさまざまな形成過程が存在することを示唆します。図3はGWTC-4.0から推定されるブラックホールの自転角運動量の分布を示します。分布は広範囲に及びますが、ブラックホールの自転角運動量のうち、90%が一般相対性理論で許される理論上の最大自転角運動量の0.57倍未満であることがわかります。図4は**実効角運動量**の分布を表します。0の値を対称とせず、正の値に偏っていることがわかります。ブラックホールのうち、20–40%は負の値の実効角運動量を持ちます。実効角運動量が負である場合、連星は力学的形成過程を経た可能性が高くなります。これは連星が孤立して進化してきたのではなく、2つの天体がそれぞれ独立な進化を経た後で、互いの重力で引き合っただけで連星系を形成したと考えられるからです。

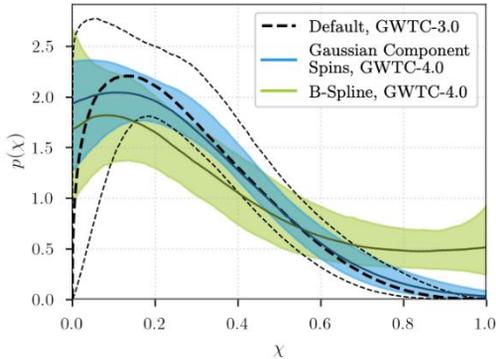


図3: 個別のブラックホールの自転角運動量の大きさ ( $\chi$ ) の分布。ここで  $\chi$  は無次元値で、一般相対性理論で許される最大値に対する比を表す。GWTC-4.0で使われたモデル（青と緑）はGWTC-3.0で得られた結果（黒い破線）より自転角運動量の平均値が低く、広い分布を持つことを示している。

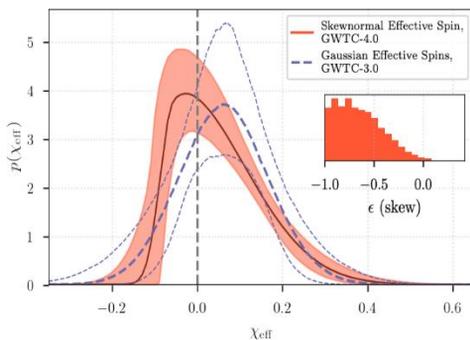


図4: 実効角運動量 ( $\chi_{\text{eff}}$ ) の分布。GWTC-4.0 (赤) は非対称の分布傾向があり、GWTC-3.0 (青) は対称的なガウス分布を描く。挿入図は歪度 ( $\epsilon$ ) の分布を表す。

## 結論

GWTC-3.0に含まれる重力波イベント数に比べて倍増したGWTC-4.0を調べることで、データに含まれる新たな特徴を発見しつつ、既知の特徴の有意性を高めることができました。コンパクト連星のカタログは第4期観測運転の残りの期間や計画されている第5期観測運転の観測によってさらに大きくなります。そのカタログを調べることで、私たちは既存の特徴の有意性をより高め、ギャップを埋め、コンパクト連星の一生の過程を迎えるようにする準備を整えています。これらの結果がコンパクト連星の形成と進化の過程を解き明かす鍵となり、宇宙年齢に及ぶ宇宙物理学的過程を解き明かすことができるようになるでしょう。

日本語訳：左近喜音、真貝寿明

GWTC-3.0で私たちは、コンパクト連星を成す2つの天体の質量が同程度でないコンパクト連星の実効角運動量の平均値が、同程度の質量をもつコンパクト連星の実効角運動量より大きい傾向があることを示しました。この論文でも**質量比**（軽い方の天体の質量を重い方の天体の質量で割ったもの）と実効角運動量の関係に同じ傾向が見られましたが、依然としてこの関係が平均値のずれに起因するのかが角運動量の分布が広がったことに起因するのかわかりません。加えて、30–40  $M_{\odot}$  の範囲外にあるブラックホールの自転角運動量の分布は0の値を対称としない傾向があるのに対し、この範囲内にあるブラックホールは上記の傾向を示さないことがわかりました。このような量的な違いは異なる物理的メカニズムがブラックホールの質量と角運動量の関係を定めている可能性を示します。

GWTC-4.0の解析を通して、近傍の宇宙でのコンパクト連星の推定合体率を更新することができました。連星中性子星の合体率は8–250  $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 、中性子星・ブラックホール系の合体率は9–84  $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ 、連星ブラックホールの合体率は14–26  $\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ であることがわかりました。GWTC-3.0で得られた結果に比べ、連星中性子星の合体率の上限は低くなりましたが、連星ブラックホール合体率の不確かさは半減しました。加えて、赤方偏移が大きいほど単位体積あたりの連星ブラックホールの合体率が高いことがわかり、赤方偏移の増加によって連星ブラックホールの合体率が変わらない、または減少する、という可能性は排除されました。

もっと知るには：

ウェブサイト：

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)  
[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)  
[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/)

論文の無料プリプリント：

[こちら](#)または [arXiv](#)

GWTC-4.0の論文（プリプリント）：

- 導入の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)
- 手法の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)
- 結果の論文：[こちら](#)または [arXiv](#)

• GWTC-4.0のデータは Gravitational-Wave Open Science Center から：  
<https://gwosc.org/GWTC-4.0/>

• 本要約の英語版は [こちら](#)