

## GWTC-2.1 : LIGO と VIRGO による第 3 期観測期間の前半に観測された連星合体の拡張カタログ

LIGO および Virgo 検出器による第 3 期観測期間の前半\* (O3a) に収集されたデータによる、重力波候補のカタログを更新しました。GWTC-2.1 (Gravitational Wave Transient Catalog 2.1, 突発性重力波カタログ 2.1) と呼ばれるこの最新版のカタログは、[GWTC-2](#) と同じ観測期間 (2019 年 4 月 1 日に開始され, 2019 年 10 月 1 日に終了) に対応しますが、マルチメッセンジャー検索を支援するために統計的有意性が低い候補イベントが含まれている他、データ処理および分析方法の改善を行った結果となっています。

### まず、一番はじめに

天体物理学的イベント (通常は 2 つのコンパクト星の衝突) によって重力波が放出されると、重力波は宇宙を伝播し、最終的には地球を通過して、重力波検出器の鏡をわずかに移動させます。重力波検出器は、この動きの検知に優れています。しかし、重力波以外の多くの現象でも鏡が移動する可能性があるため、弱い重力波信号のように見える小刻みな振動を見つけたとしても、実際にはそうではないことがあります。同様に、真の重力波信号は他の多くのノイズに埋もれていることが多く、そうしたデータを真に天体物理学起源であると自信を持って識別することは困難です。このため、最初のうちは、重力波信号として明確に識別され得るような強い信号 (「候補イベント」または単に「イベント」と呼ばれることが多い) に注意を向けます。

有意性の高い特定のしきい値を超える重力波イベントは、突発性重力波カタログ (Gravitational Wave Transient Catalogs, または GWTC) として公開されます。LIGO と Virgo の研究グループは、2020 年に 2 番目のカタログである [GWTC-2](#) をリリースしました。そのカタログには、以前の [GWTC-1](#) からのすべての重力波イベントと、第 3 期観測期間の前半 (O3a) に見つかった、偽警報率\* (FAR) が年間 2 未満となるイベントが含まれています。このカタログでは、O3a からの合計 39 個の新しい重力波信号が識別され、その中にはいくつかの**例外的なイベント**が含まれています。

### それで、GWTC-2.1 とは？

弱い信号であっても、科学研究の余地はたくさんあります。一部の天体物理学的イベントは、重力波に加えて、電磁波 (光) やニュートリノなどの複数の種類の信号を放出します。これらの信号が観測された時刻や方向に一致するような重力波候補を見つけたとしたら、

それは一つの同じイベントがこれらの信号を放出したことを意味します。今回、カタログを更新した目的はこうした重力波候補を発見する確率を高めることです。発見されたとすれば、2017 年に重力波と光の両方で検出された有名な連星中性子星の合体現象に続く、新しい**マルチ・メッセンジャー**の発見となることでしょう。(2017 年のエキサイティングな発見の詳細については、[ここ](#)をご覧ください。) 重要度の高いイベントよりも重要度の低いイベントの方が多くデータに埋め込まれているため、まれなマルチ・メッセンジャー・イベントを見つける可能性は高くなります。これが、弱い信号を調べる主な理由です。

しかし、弱い重力波のデータを調べることは、かなりのノイズがあり、その一部は信号のように見えるため、困難を伴います。この最新のカタログでは、データおよびデータ分析手法に多くの改善を行いました。たとえば、この更新されたカタログでは、ゼロ点更正 (キャリブレーション) とノイズ減算の両方の点で優れたデータをもとにしています。候補信号の識別は、3 つの検出器すべて (LIGO ハンフォード, LIGO リビングストン, および Virgo) からのデータを使用して 3 種類の整合フィルタリング\* アルゴリズムで行われました。GWTC-2 の際には、3 つの検出器すべてのデータを使用したものの、1 種類のアルゴリズムで行っていたので、大きな前進です。

GWTC-2.1 には、FAR が 1 日に 2 回以下となる候補をすべて含んでいます。FAR を 1 年あたり 2 回以下と設定した GWTC2 よりもはるかに多い候補イベントが含まれます。これらのそれぞれの候補について、探索アルゴリズムは、天体物理学的起源である確率 ( $P_{\text{astro}}$ ) あるいは、地上起源である確率 ( $P_{\text{terr}}$ , 単なるノイズであることを意味する) を計算します。実際の天体物理学的イベントである可能性が高いと判定される (3 種類のアルゴリズムのいずれかによって  $P_{\text{astro}} > 0.5$  が与えられたことを意味する) 候補イベントは、その天

天体物理学的起源をより良く決定するために追解析されます。

カタログ GWTC-2.1 は 1201 の候補が掲載されています。実際、これらの候補のほとんどはノイズである可能性が高いと予想しています。しかし、この GW カタログと望遠鏡からのデータを使用して、天文学者は潜在的なマルチメッセンジャーイベントを特定することができます。1201 の候補イベントのうち、44 は天体物理学的起源である確率が 50 % を超えています。そのうち 36 は GWTC-2 ですすでに報告されており、残りの 8 つは新しいものです。これら 8 つの最も有望な新しい候補を図 1 に示します。

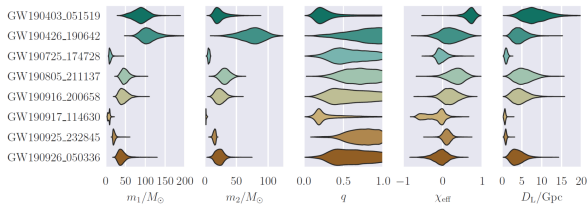


図 1: (論文の Figure 2) このカタログ中で、より重要なイベント候補とされる 8 つの信号から推測されるパラメーター。左から順に、主星の質量  $m_1$  と伴星の質量  $m_2$  (それぞれ太陽質量  $M_\odot$  の単位)、質量比  $q$ , 実効インスピラルスピ  $\chi_{\text{eff}}$ 。そして光学的距離  $D_L$  (ギガ・パーセク) を示しています。各色付き領域の垂直方向の幅は、パラメーターが水平軸上に対応する値を持つ確率に比例します。

### 最も有望な 8 つの新しい候補重力波源の概要

以下では、8 つの新しい候補の天体物理学的特性について、それらがすべて本物の重力波信号である、つまりノイズの変動によるものではないと仮定して説明します。すべての新しい候補イベントは、連星ブラックホール (BBH) の合体として考えて矛盾しませんが、そのうちの 1 つは (最新の O3b データから最近発表された 2 つのイベントのように) 中性子星とブラックホール (NSBH) の合体だった可能性もあります。大部分のイベントは、ほとんど同じ質量 (質量比  $q \sim 1$ ) のコンパクト天体でできた連星からのものですが、いくつかの例外もあります。図 2 は、8 つのイベントの質量比を示しています。GW190917\_114630 ( $P_{\text{astro}} = 0.77$ ) は潜在的な NSBH イベントであり、図の左下の方にはっきりと見られます (この図では、左下は質量が等しくない軽い連星を意味します)。

連星ブラックホール合体イベントのうちの 2 つは、非常に大きな質量のものがああります。特に GW190426\_190642 ( $P_{\text{astro}} = 0.75$ ) は、それが天体物理学的である場合、総質量が太陽質量の約 185 倍だった連星が合体し、合体後は太陽質量の約 175 倍になったものと考えられます。以前の最も大きな連星ブラックホールである GW190521 (総質量 164, 合体後質量 156) に取

て代わる、最も大きな質量の連星ブラックホール合体です。

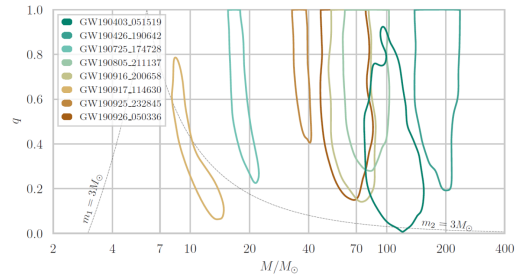


図 2: (論文の図 3): 新しく報告されたすべてのイベントの総質量 (太陽質量  $M_\odot$  の単位) と質量比  $q$ 。色付きの各輪郭はそれぞれのイベントを表し、その総質量と質量比が 90 % の確率で含まれる領域を示す。図 1 で使用されているのと同じ配色に従っている。破線は、連星の主星/伴星の質量がそれぞれ  $3M_\odot$  未満になる可能性がある領域を示す。

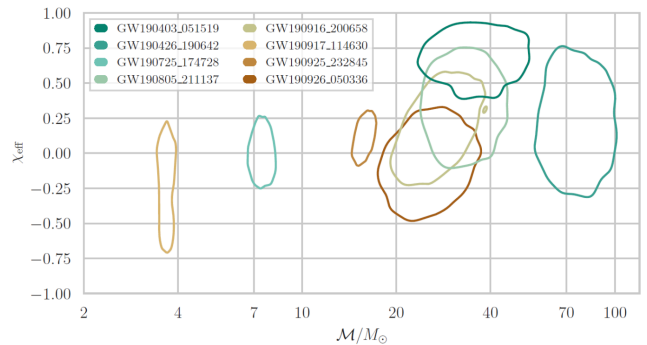


図 3: (論文の図 4): チャープ質量  $M$  (太陽質量の単位  $M_\odot$ ) と実効インスピラル・スピ  $\chi_{\text{eff}}$  の値を、すべての新しいイベントについて示す。色付きの各輪郭は特定のイベントを表し、そのチャープ質量と実効スピ  $\chi_{\text{eff}}$  が 90 % の確率まで低下する領域を示す。

新しいイベントのもう 1 つの興味深い側面は、スピ  $\chi$  (自転の速さ) に関連するものです。まず、このカタログのほとんどの新しいコンパクト天体のスピ  $\chi$  の大きさは、GWTC-2 の場合と同様に、ゼロと考えて矛盾しない値になります。興味深いことに、GW190403\_051519 ( $P_{\text{astro}} = 0.61$ ) と GW190805\_211137 ( $P_{\text{astro}} = 0.95$ ) はどちらも、少なくとも 1 つの BH が無次元スピ  $\chi > 0.8$  ( $\chi = 1$  は、ブラックホールが持つことができる最大スピ) 持つ確率が 50 % を超えています。ただし、個々のスピ  $\chi$  の大きさの特定精度は、2 つの天体のスピ  $\chi$  の特定の組み合わせ、いわゆる実効インスピラルスピ  $\chi_{\text{eff}}$  ほどではありません。これまでの重力波検出では、 $\chi_{\text{eff}} > 0$  となる連星合体が多数派であることが示されていますが、この傾向は新しいイベントにも見受けられます (図 3 を参照)。

## 天体物理学への示唆

重力波信号から学ぶことができる天体物理学の多くは、検出の母集団統計に依存しています。たとえば、「連星ブラックホール系はいくつありますか?」、「それらの質量分布は何ですか?」、「ブラックホール形成率は宇宙の進化に伴ってどのように進化しましたか?」などの質問に答えるためには、重力波カタログを充実させていく必要があります。今回の新しいカタログは、以前から知られているセットに新たな候補イベントを追加することで、上記のような質問に答える可能性、または少なくともより良い推測を行う能力を向上させます。さらに、望遠鏡のデータと組み合わせることにより、マルチ・メッセンジャー天文学観測へとつながる可能性を提供します。

一方、個々のイベントでも、天体物理学と宇宙論についての興味深い手がかりを与えることがあります。上記のように、このカタログは、天体物理学起源の信号とした場合、非常に大きな質量を持つ2つのイベント、GW190426\_190642とGW190403\_051519を報告しています。どちらの場合も、主星\*の質量(つまり、連星2つの天体のうちの大きい方の質量)は、いわゆる**対不安定型質量ギャップ**を破っています。この質量ギャップとは、太陽質量の約65~120倍の範囲を指し、通常の星がその寿命の終わりに崩壊しても、この範囲の質量のブラックホールを形成できないことが多くのモデルで示されています。この範囲の質量を持つブラックホールがあるという事実は、星の崩壊以外の手段でそれらを説明するか(たとえば、かつて合体した連星ブラックホールの残存物だと考える)、またはそのような大きい質量のブラックホールを形成できるように恒星進化モデルを再検討する必要があることを示しています。カタログGWTC-2には、すでに、「禁止」領域にあるブラックホールが連星の主星だったデータ(GW190521)がすでに含まれていることにも注目してください。

## 新しく報告されたイベントのハイライト

(以下のリストは、8つの新しい候補が天体物理学的起源であることを前提としていることに注意してください。)

- 対不安定型質量ギャップに質量を持つイベントが2つ。
- 1つのイベントは中性子星・ブラックホールの連星合体となる可能性もあったが、連星ブラックホールの可能性が高かった。
- 大多数の連星質量比 $q$ は1に近い値であるが、2つは非対称な質量を持つ。
- ほとんどの天体は、スピンの小さなブラックホールである。

- 2つの候補イベントでは、大きなブラックホールスピン、 $\chi > 0.8$ 、となっている可能性が高い。
- すべてが正の実効スピンを持っている。

## 用語集

- **観測期間 (Observing run)**: 重力波検出器が天体物理的な観測のためにデータを取得している期間。
- **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天体によって生じる時空の領域。
- **中性子星 (Neutron star)**: 寿命を迎えた大質量星の遺物。大質量の星が核燃料を使い果たすと、超新星爆発として知られる劇的な最期を迎え、中性子星が形成されることがよくある。あまりにも質量が大きくて密度が高いため(ブラックホールほどではないが)、原子は地球上で通常観測されるような状態を保てず、中性子の塊になる。中性子星は太陽とほぼ同じ大きさの質量をもつにも関わらず、半径は十キロメートル程度しかない。
- **コンパクト天体 (Compact object)**: ブラックホール、白色矮星、中性子星など、極端に密度の高い天体の総称。
- **連星ブラックホール (Binary Black hole; BBH)**: 2つのブラックホールが互いのまわりを周回運動する天体系。(wikipedia)
- **中性子星・ブラックホール (Neutron Star - Black Hole; NSBH)**: 中性子星とブラックホールが互いのまわりを周回運動する天体系。(ここも参照)。
- **質量比 (Mass ratio)**: 連星系において小さなコンパクト天体の質量を大きなコンパクト天体の質量で割った値。
- **偽警報率 (False-Alarm Rate; FAR)**: 検出器のノイズによる揺れが、どのくらいの頻度で重力波候補信号と誤ってしまうかを示す値。この値が小さいほど、重力波検出された候補はより確実に天体物理起源であると言える。
- **実効インスパイラルスピン (Effective Inspiral Spin)**: 個々のブラックホールのもつ回転角運動量(スピン)を質量比で平均した量をブラックホール連星の軌道面に垂直な成分で表したもので、重力波信号から最も精度良く抽出できる天体の回転パラメータである。

- **チャープ質量 (Chirp mass):** 連星のそれぞれの天体の質量を組み合わせて計算される量. 合体前の重力波波形で, 周波数が増加していく様子から直接測定することができる.
- **光学的距離 (Luminosity Distance):** 観測者と天体との距離のことで, 天体の見かけの明るさと天体の元の明るさ (既知となることを仮定) によって算出されるもの. [wikipedia](#) も参照.
- **整合フィルタ (Matched-filter):** 雑音にまみれたデータから信号を抽出する方法の一つ. 一般相対性理論を用いて計算された重力波の波形サンプルをたくさん用意し, 元のデータと合致するかどうかを照合していくことによって, 重力波信号を検出する.
- **太陽質量 (solar mass):** 太陽の質量 (約  $2 \times 10^{30}$  kg). 天文学では質量を表す一般的な単位.

## さらに詳しく知るためには

我々のウェブサイト:

- [www.ligo.org](http://www.ligo.org)



- [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- 科学論文の無料プレプリント [こちら](#). 図についての詳しいなども.
- 関連するデータ公開は [ここ](#), [ここ](#) あるいは [ここ](#).

---

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