

## GWTC-3, 重力波イベントのカタログ第3版

### はじめに

GWTC-3 (突発的重力波カタログ, Gravitational-Wave Transient Catalog-3) は, ライゴ (LIGO), ヴィルゴ (Virgo), および KAGRA (かぐら) から提供される, 3 番目の突発的重力波カタログです. GWTC-3 は, 2019 年 11 月から 2020 年 3 月まで続いた第 3 期観測期間の後半 (O3b) で検出された重力波イベントをこれまでのカタログに加えて更新したものです. その結果として, GWTC-3 は, 現在までに観測されたイベントをすべて集めた最大の重力波カタログです.

まずは, これまでの重力波カタログの復習からはじめましょう.

- **GWTC-1** は, 第 1 期と第 2 期の観測期間 (O1 と O2) で検出された 11 個のイベントを含んだカタログでした.
- **GWTC-2** は, O1, O2, と第 3 期前半 (O3a) で得られた全部で 50 個のイベントを含んだカタログでした.
- **GWTC-2.1** は, O3a 中に検出されたイベントの定義を見直した結果, 新たに 8 個のイベントを加え, GWTC-2 の 3 個のイベントを除いたカタログでした. ここでは, 天体物理学的な信号である確率が 50% より小さなイベント候補を除くことにしました (以下の「重力波の検出」の項を参照してください). 結果として全部で 55 個のイベントを含んだカタログになりました.
- **GWTC-3** (今回のカタログ) では, O3b 中に検出された 35 個のイベントを追加し, 現在までに観測されている合計 90 個ものイベントを含むカタログになりました. (以下の図 3 は, 膨大に増えてきた検出イベントの質量分布を示しています.)

O3b の最後 (2020 年 4 月) には, KAGRA が LIGO と Virgo に加わりました. KAGRA は, ドイツにある GEO 600 との共同観測を 2 週間実施しました. この観測の結果については, 別に報告します.

これまでの私たちの重力波観測はすべて, ブラックホールや中性子星からなる連星の合体を波源とするものです. これらをコンパクト天体と呼び, 私たちは, これらが巨大な星の残骸であると想定しています. 重力波のイベントには, 連星ブラックホールの合体, 連星中性子星の合体, 中性子星-ブラックホールの合体の組み合わせがあります. 私たちの検出器の感度がより上昇するにつれて, 重力波イベントの発見効率は劇的に改善されてきました. 2015 年に最初の検出を行ってからの, 長い道のりの成果です.

この要約には, データの収集方法, 検出方法, 連星合体イベントの特徴の推定方法, GWTC-3 のハイライト, および将来計画されている観測について書かれています.

### 重力波検出器

長年にわたる検出器の改良とデータの質の向上, そして解析手法の改善の組み合わせにより, LIGO と Virgo の感度は向上してきました. 重力波検出器の感度を測定する方法はいくつかあります. 1 つは, 検出器が典型的な連星中性子星の合体を検出できるおおよその距離を推定することです. 検出可能な距離が大きいほど,

より遠くの信号を検出できるため, より多くの検出が期待できます. O3 は O3a と O3b の 2 つの観測期間に分かれており, その間の 2019 年 10 月に 1 か月の休止期間がありました. この 1 ヶ月の休止期間中に, 多くのアップグレードと修理が行われました. その中には, LIGO のリヴィングストン (Livingston) 検出器での鏡のクリーニング, LIGO のハンフォード (Hanford) 検出器での真空装置の交換, Virgo でのレーザー強度の増大な

どが含まれます。これらの作業と観測期間中の継続的なメンテナンスによって、検出器の感度を維持または向上させることが可能になります。図1は、各検出器での連星中性子星の観測可能距離の中央値の変化を示しています。O3aとO3bの間で、連星中性子星の観測可能距離の中央値は、Virgoで13.3%、LIGOハンフォードで6.5%増加し、LIGOリヴィングストン（最も感度の高い検出器）では1.5%低下しましたが、ほぼ同じ感度を維持しました。

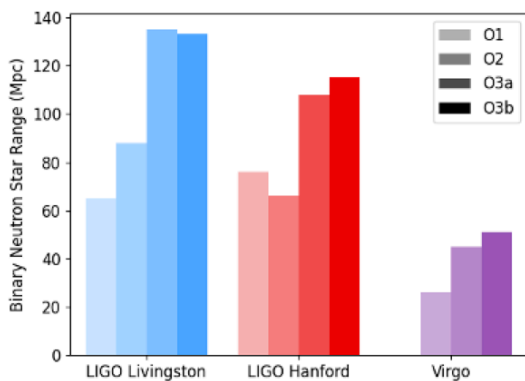


図1: O1 観測期, O2 観測期, O3a 観測期, O3b 観測期でのそれぞれの検出器の感度を観測可能な連星中性子星合体の距離で示したものです。距離の単位はメガ・パーセクである。Credits: LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Hannah Middleton/OzGrav.

重力波検出器からの生データは、干渉計の出力で測定されたレーザー光の時間変化する強度から得られます。対応する重力波ひずみ振幅を取得するには、この生データを**校正**する (calibration) 必要があります。校正は慎重に行う必要があります。その方法の一つは、レーザー光を使用して鏡を正確に押し、干渉計の出力がどのように変化するかを測定する方法です。初期校正はほぼリアルタイムで行われます。必要に応じて、後に再校正と長時間ノイズの除去を行い、解析で使用される最良のひずみデータを生成します。

校正とノイズ除去の後、データの質をチェックする必要があります。連星合体による信号のデータ品質を評価するときには発生する最も一般的な問題は、データ内の短時間（数秒から数分）の突発性ノイズである**グリッチ**です。一部のグリッチについては、**光散乱**などが原因であることが分かっていますが、原因が謎であるグリッチも多数あります。グリッチは重力波信号と重なることがあり、このような場合、図2に示すように、データからグリッチを除去してから解析を行いま

す。グリッチ除去は、最初に発見された連星中性子星からの重力波信号 **GW170817** や、GWTC-3 で重要な部分でした。35 個のイベントのうち7つでグリッチ除去が必要でした。グリッチについてより詳しく知りたい人、グリッチを理解する活動に参加したい人はコミュニティサイエンスプロジェクトである **Gravity Spy** にアクセスしてください。

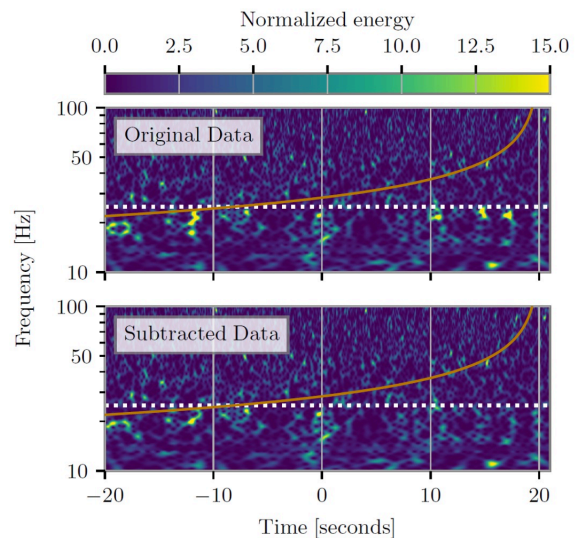


図2: (論文の図14) グリッチ除去の例。図は、重力波イベント GW200115\_042309 の時間-周波数データで、色は時間-周波数の各領域でのエネルギーの強さを示している。上の図は除去前のデータで、下の図はノイズ除去後のもの。想定される重力波信号はオレンジ色の線に沿ったもの。

## 重力波の検出

O3a と O3b を通して、重力波候補の検出に関して、候補検出後すぐに**公開速報** (public alert) を報告しました。迅速な公開速報により、天文学のコミュニティは**電磁波望遠鏡**と**ニュートリノ**検出器を用いて、マルチメッセンジャー信号の探査をすることが可能になります。O3b の期間では、公開速報は通常、検出されてから数分以内にリリースされました。後の重力波データ解析によっては、いくつかのイベントが撤回されたり、さらなるイベントが発見される可能性もあります。GWTC-3 で提示される最終的な解析は、観測期間全体を通じたデータ校正、データの質、およびデータ解析手法の改善を経て得られたもので、候補天体が興味深いものかどうかを評価するために役立つことでしょう。O3b では、39 件の公開速報が報告され、そのうち18件は再解析後も存続し、50% を超える確率で本物である候補として GWTC-3 に含まれています。さらに17のイベントが、GWTC-3 に向けた解析で追加報告されました。

重力波の候補を探すために、私たちは2種類の解析を行います。テンプレート探索と最小限モデル探索です。テンプレート探索では、シミュレーションによって得られた連星合体の重力波信号（またはテンプレート）を使用します。実データとテンプレートがその時間変化を含めて合致したものを選び出します。最小限モデル探索は、信号を精密に検出しようとするものではありませんが、同じ信号が複数の検出器に表示されるかどうかを判定します。テンプレート探索は通常、連星合体信号を検出するのに優れています（どのように見えるかがわかっているため）が、最小限モデル探索を併用することによって、適切なテンプレートがないために見逃してしまうことを防ぐことが保証されます。候補信号が実際の重力波信号である可能性があるかどうかを評価するとき、ランダムなノイズが偶然に候補信号のように見える可能性がどの程度あるかを計算します。通常、信号が検出器間で無矛盾であるほど、それが本物であると確信できます。

GWTC-3では、少なくとも50%の確率で本物である（ノイズではない）と推定されるすべての候補をリストします。この推定は、検出器のノイズを理解するだけでなく、重力波信号を検出器で観測できるであろう頻度にも依存しています。合体するコンパクト天体について、私たちは統計を取り始めたばかりであるため、どのくらいの頻度なのかは不確実です。将来、より多くの観測を行うことで統計を得られれば、現在確信が持てない候補信号を再び確認することができます。

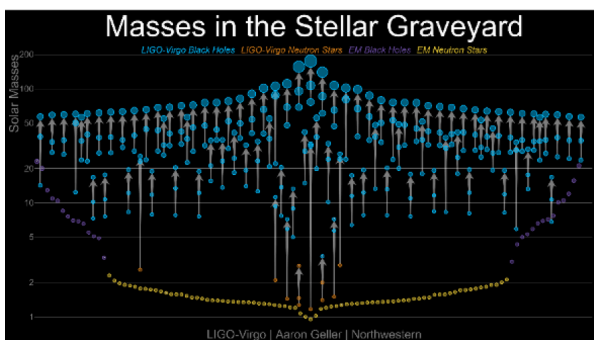


図3: GWTC-3に含まれるイベントの質量分布。各円は異なるコンパクト天体を表し、縦軸は質量を太陽質量の倍数として示す。青い円はブラックホールを表し、オレンジ色の円は中性子星を表す。半分青で半分オレンジ色の円は、分類が不確かなコンパクト天体である。それぞれの連星合体では、2つの連星と合体後の天体の計3つのコンパクト天体が描かれる。矢印は、どのコンパクト天体が合体して、どのような残骸が生成されたかを示す。Credits: LIGO Virgo Collaboration/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern.

さらに、GWTC-3には、実際の重力波信号である可能性が50%のしきい値を超えなかった弱い信号のリストが含まれています。GWTC-2.1の場合と同様に、GWTC-3の次点リストには、偽警報率が1日あたり2回以下となる1048の候補信号があります。そのほとんどはノイズであると予想されますが、このリストは、天文学者が潜在的なマルチメッセンジャーイベントを特定するのに役立つであろうと考えます。

## 重力波の命名について

重力波の名前は、信号が検出された日時を協定世界時(UTC)を用いて表されています。以前のいくつかのイベント名には日付のみが含まれていますが、検出器の感度が向上したため、1日に複数のイベントを検出する場合があります。そのため、GWTC-2およびGWTC-2.1で行ったように、名前に時間を追加して、名前をより簡単に区別できるようにしました。例として、GW200208\_222617は、2020年2月8日の22:26:17UTCに観測されました。

## 重力波源の特徴

私たちの重力波観測には、波源となった連星の特徴を表す情報が含まれています。その特徴には、「固有の」(intrinsic)なもの、「外的な」(extrinsic)なものがあります。固有の特徴は、コンパクト天体の質量やスピンなど、波源自体を記述するものです。外的な特徴は、イベントが地球からどのように観測されたかを表し、天球面上の位置や地球からの距離、2つのコンパクト天体の軌道公転面の傾きなどが含まれます。

パラメータ推定を行うことによって、これらの連星の特徴がわかります。これは、観測データと合致する可能性のある（異なる特徴を持つ）多くの重力波波形と比較する統計手法です。比較により、（実際の重力波信号であると仮定したうえで）波源の特徴としてどの値がデータと一致しているかがわかります。そして、これらの範囲から90%の信頼区間を選択します。これは、連星の特徴を示す値がその範囲内にあることを90%で確信していることを意味します。

図4の等高線は、連星の総質量と質量比の2つの特徴の90%領域を示しています。総質量は、連星系が全体としてどれほど重いかを示しています。質量は、太陽質量 $M_{\odot}$ の単位で測定されます。質量比は、合体した2つのコンパクト天体の質量がどれほど非対称であったかを示しています。質量比が1に近いということは、

2つのコンパクト天体が同じ質量に近いことを意味します。

全体を通じて統計的に特徴を見ることは、連星系がどのように形成されたかについて研究することに役立ちます。また、これらの観測データを使用して、アルバート・アインシュタインの一般相対性理論を検証したり、宇宙が膨張する速度を測定することもできます。O3b 期からのハイライトとなるイベントを以下に要約します。

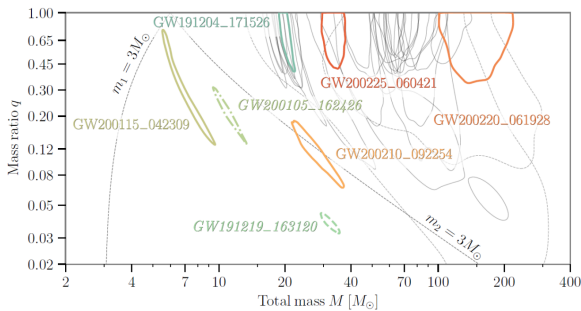


図 4: (論文の図 8) O3b 期のすべてのイベントの総質量 ( $M$ ) と質量比 ( $q$ ) の推定値。各等高線は異なるイベントを表し、90% の確率 (90% の信頼区間) でパラメータの最も可能性の高い値を囲む。興味深い特性をもついくつかのイベントは、色で強調表示されている (本文と論文を参照のこと)。

## GWTC-3のハイライト

GWTC-3 にリストされた新しい 35 のイベントの特徴に基づくと、それらのうちの 32 は連星ブラックホール合体である可能性が高く、3 つは中性子星-ブラックホール合体の可能性があります。質量が  $3 M_{\odot}$  未満である可能性が高いコンパクト天体は、中性子星の候補として考えられます。O3b では連星中性子星の候補はありませんでした。図 5 は、8 つのイベントを選択し、3 つの主要パラメータの推定値をまとめたものです。

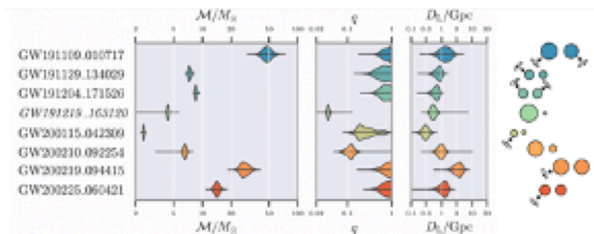


図 5: GWTC-3 から 8 つの連星合体を選び、3 つの主要なパラメータ (連星のチャープ質量  $M$ 、質量比  $q$  (質量の小さい成分と質量の大きい成分の比)、光度距離  $D_L$ ) の推定値を示した図。各連星のイメージは図の右側に示され、円の大きさは質量の大きさを反映しており、それぞれのスピンの向きが示されている。Credits: LIGO-Virgo-KAGRA Collaborations/Isobel Romero-Shaw/OzGrav.

## 中性子星-ブラックホール合体のハイライト

中性子星-ブラックホール合体の可能性がある 3 つのイベントは次の通り。

- GW191219\_163120 は極端に非対称な質量をもつ中性子星-ブラックホール合体。ブラックホール質量は  $31 M_{\odot}$  であり、中性子星の質量は  $1.2 M_{\odot}$ 。この中性子星は観測された中でもっとも小さな質量である。
- GW200115\_042309 はすでに報告された中性子星-ブラックホール合体の 1 つ。ブラックホール質量はおおよそ  $6 M_{\odot}$ 、中性子星の質量は  $1.4 M_{\odot}$  と推定される。
- GW200210\_092254 は、中性子星-ブラックホール連星である可能性がある。重い方の天体の質量は  $24 M_{\odot}$  で確実にブラックホールであると考えられるが、軽い方は  $2.8 M_{\odot}$  であり、これが重い中性子星なのか軽いブラックホールなのかは判別できない。このイベントは、O3a 期の GW190814 と似ている。中性子星の特徴を考慮すれば、GW200210\_092254 は連星ブラックホールである可能性があるが、確実に判定することはできない。

熱心な重力波ファンは、以前の論文で GW200115\_042309 と一緒に報告された GW200105\_162426 がないことに気付くかもしれません。O3b 期のすべてのイベントを全体で検討すると、GW200105\_162426 が実際の天体物理学的な信号である確率は 36% であり、カタログに含めるための 50% のしきい値を下回っています。詳細については、以下の用語集の GW200115\_162426 を参照してください。GWTC-3 のしきい値を超えていないにもかかわらず、このイベントは背景ノイズに対して際立っているため、間違いなく興味深いイベントと見なします。GW200105\_162426 が実際の重力波の場合、その波源は  $9 M_{\odot}$  のブラックホールと  $1.9 M_{\odot}$  の中性子星で構成されると推定しています。

## 連星ブラックホール合体のハイライト

連星ブラックホール合体からいくつかのハイライトとなるイベントを以下に紹介します。

- GW200220\_061928 は、おそらく O3b 期のなかで最も大きな質量をもつ連星合体である (ただし、O3a 期の GW190521 や GW190426\_190642

には及ばない). 2つのブラックホール質量の合計は  $148 M_{\odot}$  ( $87 M_{\odot}$  と  $61 M_{\odot}$ ) である. 合体後に形成されたブラックホールの質量は  $141 M_{\odot}$  であり,  $100 M_{\odot}$  を超えていることから, 中間質量ブラックホールであると分類される.

- **GW191204\_171526** は, 実効インスピラルスピンの値が正であることが確実な連星ブラックホール. 実効インスピラルスピンは, 重力波信号から測ることが容易なパラメータの1つで, その値が正であることは, 少なくともブラックホールの1つは回転していて, 全体の回転は軌道回転の方向と一致していることを表す. 回転の情報は, 連星系の形成を紐解くための鍵となる. 実効インスピラルスピンの値が正になる連星系は, **GW151226** で初めて報告された. **GW191204\_171526** のブラックホール質量は,  $12 M_{\odot}$  と  $8 M_{\odot}$  で, 合体後の質量は  $19 M_{\odot}$ .
- **GW191129\_134029** は, O3b 期の観測の中で, もっとも質量の小さい連星ブラックホールのイベント. 全質量は,  $17.5 M_{\odot}$  ( $10.7 M_{\odot}$  と  $6.7 M_{\odot}$ ). 合体後の質量は  $16.8 M_{\odot}$ .
- **GW191109\_010717** は, 実効インスピラルスピンの値が負である可能性が高い連星ブラックホール. これは, ブラックホールのスピン全体が軌道角運動量と反対方向に向いていることを示す(これは, 2つのコンパクト天体が連星系での軌道運動と反対方向に回転している可能性があることを意味する). このイベントで, スピンが負になる確率は 90% となる. これまでの観測で, 実効インスピラルスピンの値が負となるのは珍しい. **GW191109\_010717** の各ブラックホールの質量は  $65 M_{\odot}$  と  $47 M_{\odot}$  であり, 合体後のブラックホールは  $107 M_{\odot}$  と推定され, 大きな質量をもつ連星系の1つでもある. この質量の値は **GW200220\_061928** の質量に近いので, 図 4 では, もう一つの負の実効インスピラルスピンをもつ可能性が高い (およそ 85%) **GW200225\_060421** を強調して表示している.

## 将来への展望

LIGO・Virgo コラボレーションにより, 宇宙には重力波源が豊富に存在することが明らかになりました. こ

れまでに 90 件のイベントを観測しました. GWTC-3 は, 35 のイベントを追加し, その中には中性子星とブラックホールの合体の候補を含みます. 今後も, より多くのイベントを観測し続けるにつれて, 波源となる天体についてますます理解が深まり, それらの特徴の統計を得ることになり, 一般相対性理論の検証を続けていくことになるでしょう. 多くのイベントを検出すれば, 変わった種類の天体を発見する可能性も高まります.

LIGO と Virgo の検出器は現在, 次の第 4 期観測 (O4) の準備として, 改良のために休止しています. O4 は, **2022 年の後半** に開始される予定です. 日本の **KAGRA** 検出器も, O4 の全期間に参加します. 重力波観測ネットワークに新たに検出器が加われば, 波源の天球面上の位置を特定することに役立ちます.

それまでの間, 私たちはデータを解析し続け, コンパクト天体の観測から学ぶとともに, まだ発見されていないタイプの重力波である, 連続重力波, 確率論的背景重力波, そして未知のタイプの重力波を探します!

## さらに興味のある方へ

私たちのウェブサイトでニュースを更新しています.

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

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

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

本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main>

GWTC-3 の重力波データは GWOSC のサイトから

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

## 私たちのウェブサイト:

• [www.ligo.org](http://www.ligo.org)

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

• [gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)



## 用語集 (ABC 順)

- **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](#))
- **連星中性子星 (Binary Neutron Star):** 2つの中性子星が互いのまわりを周回運動する天体系. ([wikipedia](#))
- **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極端に曲げられた時空の領域.
- **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る計算される量 (式は [wikipedia](#) を参照のこと). チャープ質量は、連星合体前の重力波信号の周波数増加を特徴づける量である.
- **コンパクト天体 (Compact object):** ブラックホール、中性子星、[白色矮星](#)など、極端に密度の高い天体の総称.
- **実効インスパイラルスピ (Effective Inspiral Spin):** 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、連星系のそれぞれのブラックホールの回転角運動量 (スピ) が軌道角運動量とどれだけ同じかどうかを示す量 (スピと軌道の向きがどちらも時計回りが反時計回りか、などを知ることができる).
- **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、検出された重力波候補はより確実に天体物理起源であると言える.
- **重力波波形 (gravitational waveform):** 重力波が時間によって変化していきさま.
- **GW200105\_162426:** [以前に報告](#)された、中性子星-ブラックホールの合体を波源とする可能性のあるイベント. この候補信号は、実際の天体物理学的信号である確率が 36% となった. 以下の2つの理由から、解析が特に難しい波源です. 1つ目は、LIGO リヴィングストンによる単一検出器の観測であるということ. このイベントの観測時、LIGO ハンフォードはデータを取得していませんでした. Virgo ではデータを取得していましたが、そのような信号は識別できませんでした. ある検出器では見えるが別の検出器では見えないイベントは予期しないものではなく、検出器の相対感度と重力波信号の波源の天球面上の位置に依存して起こります ([GW170817](#) のときも似たような状況でした). 1つの検出器からのデータしかない場合、信号の重要性を推定することは常に困難です. 第二の理由は、現段階では、中性子星-ブラックホール連星系はほとんど観測されていないということです. そのため、中性子星とブラックホールの合体を確実に分類することが困難になります. より多くの中性子星-ブラックホール連星系を観測するにつれて、これらの連星についてさらに学び、GW200105\_162426 のような候補信号を再びチェックすることができるようになるでしょう.
- **光散乱 (Light scattering):** レーザー光が光学部品に当たると、その一部が散乱する可能性があります (ランダムな角度で反射されます). 散乱光は他の表面で反射され、検出器のレーザービームに戻り、散乱光のグリッチを引き起こす可能性があります. これらのグリッチやその他の詳細については、[Gravity Spy](#) をご覧ください.
- **太陽質量  $M_{\odot}$  (solar mass):** 太陽の質量 ( $2 \times 10^{30}$  kg). 天文学では質量を表す共通の単位.
- **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.
- **中央値 (Median):** 分布の中央に相当する値. 分布の半数はこの値より大きく、分布の半数はこの値より小さい.
- **メガパーセク (Megaparsec, Mpc):** 天文学的距離の単位の一つ. 約 326 万光年に相当する.
- **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壊滅的な状態で死滅し、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、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、直径は数十キロメートルしかない.
- **中性子星-ブラックホール連星 (Neutron Star-Black Hole binary):** 1つのブラックホールと1つの中性子星が互いのまわりを周回運動する天体系. ([LIGO web](#) も参照のこと.)
- **観測期間 (Observing run):** 重力波検出器が天体物理学的な観測のために、データを取得している期間.
- **パラメータ推定 (parameter estimation):** 重力波信号から天体物理学的パラメータを導く統計的手法.
- **天体物理学的である確率 (Probability of being astrophysical):** 信号が実際の重力波である確率を定量化するもの. 背景ノイズと比較したときの信号の大きさに依存するとともに、波源が属する母集団を私たちがどれだけ理解しているかにも依存した値になる. 連星ブラックホールの観測が多く得られれば、連星ブラックホールの母集団の理解を助け、そのタイプの候補信号が天体物理学的である確率を計算するのに役立ちます. 中性子星とブラックホールの合体の観測が少ないため、この量を計算するのは難しく、観測が増えて統計について詳しくわかったら、現在の推定値を再検討する必要があるかもしれません.
- **スピ (Spin):** 重心の周りのコンパクト天体の回転速度と方向 (つまり、自転角運動量).
- **全質量 (Total Mass):** 連星系において、2つの天体の質量の和.

本解説のオリジナルは、<https://www.ligo.org/science/Publication-03bCatalog/> にあります.  
GWTC-3に関連した他の論文についての情報は、<https://www.ligo.org/science/outreach.php> から取得できます.

(日本語訳: 真貝寿明, 成川達也)