



LIGO  
Scientific  
Collaboration



LIGO-Virgo Science Summary (2020年10月28日)

<https://www.ligo.org/science/outreach.php>

## GWTC-2: 重力波の新しいカタログ

米国ライゴ (LIGO) と欧州ヴィルゴ (Virgo) が 2015 年に初めて重力波を検出してから、第3期観測の前半 (O3a 期) までの期間に得られた重力波イベントをすべて掲載したカタログを公開します。以下ではこのカタログを「突発的重力波カタログ2 (Gravitational-Wave Transient Catalog 2; 略して GWTC-2)」と呼びます。O3a 期は、2019年4月1日から10月1日までの期間に実施され、11個の重力波イベントを記録していた前回のカタログ GWTC-1 に対して、新たに39の重力波イベントを追加することになりました。O3a 期の検出は、連星ブラックホール (binary black holes; BBHs)、連星中性子星 (binary neutron stars; BNSs)、ブラックホール・中性子星 (NSBH) 連星からの重力波を含み、広い範囲での宇宙物理学的なパラメータの取得を可能にしました。

O3a 期の検出は、以前の2つの観測期間 (O1 期と O2 期) を合わせた場合よりも約3倍の数の重力波イベントを高い確度で報告することに注目してください。さらに、ヴィルゴ検出器が、O3a 期の全期間にわたってライゴの2つの検出器と共同で観測することができました。このことによって、半年間のうち、約97%の時間で少なくとも1つの検出器が観測を実施し、約82%の時間で少なくとも2つの検出器が同時観測を実施しました。O3a 期で得られたイベントの中でも特に興味深いものに、2回目の検出となる連星中性子星合体による重力波があり、明らかに質量の異なる連星による最初のイベントがあり、太陽の質量の約150倍の総質量を持つ非常に大きな連星ブラックホールによるイベントがあります。この要約レポートでは、これらの発見を成し得たライゴとヴィルゴの改良点について、天体物理学の分野におけるこれらのイベントの重要性について説明します。

### 重力波の検出

O3a 期の39個の発見は、ライゴとヴィルゴの両検出器の改良、データの質の強化、およびさまざまな重力波検索方法の結果です。最近の改善として、より強力なレーザーの導入、新しく改良された鏡の設置、より良い散乱光の制御などが実施され、ノイズを低減し、装置の感度を向上させることができました。これらの改良によって、観測可能な周波数範囲と距離範囲の両方が3つの検出器すべてで増加し、私たちの宇宙における視野が広がりました。図1に示すように、典型的な連星中性子星合体を観測可能な距離の中央値\* (用語説明あり) は O2 期から O3a 期に3つの検出器の平均として約63%増加しました。

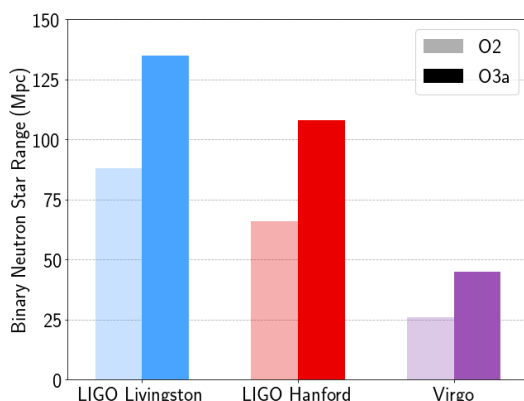


図1: O3a 期の観測期間と、O2 期の観測期間中での各検出器の連星中性子星の観測可能距離の中央値。1メガパーセク (Mpc) は約326万光年に相当する。(クレジット: LIGO Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee)

重力波源を発見するためのもう1つの重要なステップは、検出器から得られるデータをどれだけ精緻化できるか、ということです。このデータ調整プロセスには、データの較正 (calibration, ゼロ点設定)、ノイズの低減化やグリッチの除去が含まれます。最初に、私たちは各検出器からの光の強度変動をほぼリアルタイムで無次元のひずみに較正します。そして初期の重力波検出をします。その後、データを再較正して系統的誤差を減らし、ノイズを低減して重力波源を検出できる範囲をさらに広げ、データ内に隠れている弱い信号を見つけ出すのです。

重力波データの分析で、私たちが遭遇する最も一般的なデータ品質の問題はグリッチです。グリッチとは短時間に生じるノイズであり、その原因の一部として、機械的なカメラシャッターやレーザービームからの光散乱などによるものが知られています。ただし、ブリップと呼ばれる短時間で広い周波数にまたがるグリッチなど、他の多くのグリッチの原因は不明です。ライゴやヴィルゴのデータの不具合を特定して分類する1つの方法として、Gravity Spy (重力スパイ) と名付けられたプラットフォームがあります。これは、数千人の市民科学者の助けを借りるものです。(読者のあなたがどうやってグリッチを見つけて私たちを助けられるのか、Gravity Spyのページをご覧ください)。データ中の重大なグリッチを特定した後に、図2に示すように、データからグリッチ除去を行い、重力波候補とされたものからグリッチだったものを外します。O3a 期で観察された39のイベントのうち8つは、パラメータ推定\* 分析の前の前処理ステップとしてグリッチ除去の恩恵を受けました。

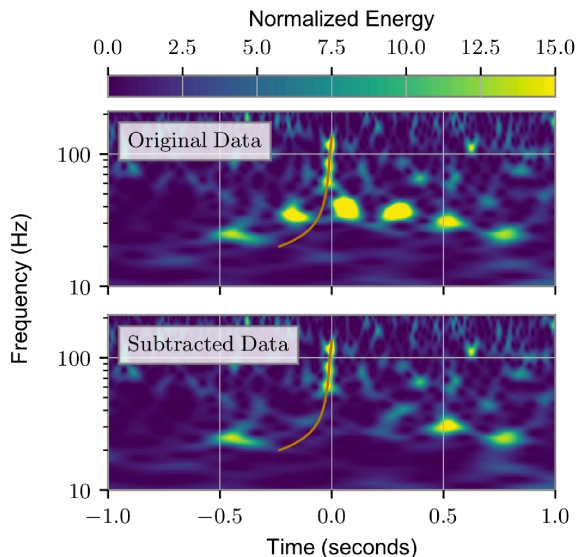


図 2: 重力波イベント GW190701 について、グリッチを取り除く前と後の時間・周波数図。ライゴのリビングストーン検出器では光の散乱によって 40 Hz 以下の周波数でノイズの超過する形でグリッチが生じていた。(今回発表した論文の Fig. 5 を加工した。)

重力波検出のプロセスでは、候補イベントの判定は 2 つのタイムスケールで行われます。まず、複数の検索パイプラインがデータを即座に処理し、[公開検出速報](#)を数分以内で生成することを目標としています。その後、改めてデータ較正を行い、データの質を評価し、および統計的有意性を計算するための改善された方法を使用して再解析し、今回のカタログのような重力波イベントのリストを作成します。重力波候補イベントのうち認定しないことを決める基準は、同様の候補イベントがノイズによって偶然発生すると予想される率として計算される誤警報率 (false alarm rate) の値が 1 年間に 2 回あるかどうか、というものです。O3a 期の 39 個の重力波イベントのうち、GWTC-2 で報告された 26 個は以前にほぼリアルタイムの検出アラートで報告されていましたが、13 個は今回の GWTC-2 論文で初めて報告されるものです。

## 宇宙物理学的なパラメータの測定

私たちは、パラメータ推定と呼ばれる手法を用いて、それぞれの重力波イベントに固有の数多くの宇宙物理的性質の値を明らかにすることで、それぞれのイベントの宇宙物理的な性質を調査しています。例えば、パラメータには、観測者から重力波の発生源までの距離、天球面上での発生源の位置、観測者の視点から見た連星軌道の傾きなど、地球上の私たちと連星との関係を表す外的なパラメータがあります。さらに、連星を構成する

コンパクト天体\* それぞれの質量やスピンなどの性質を表す内的なパラメータを測定します。これらのパラメータから、時間変化する重力波の波形\* を計算します。そして、この予想される重力波波形とライゴ・ヴィルゴで得られたデータとを比較し、各検出器に存在するノイズを調べます。これらのパラメータ推定技術により、私たちは 90% の信頼区間として、データと矛盾のない重力波源のパラメータの範囲を特定しています。

今回の 39 個のイベントをみると、波源の質量は広い範囲に渡っていて、宇宙全体のブラックホールや中性子星の形成や進化に関する豊富な情報を含んでいます。連星合体のかなり前に発生する重力波信号は、主にチャープ質量 (chirp mass)\* と呼ばれる個々のコンパクト天体の質量の特別な組み合わせの量に依存しています。他の重要な質量パラメータとしては、連星の全質量 (2 つのコンパクト天体の質量の合計)、軽い方の天体と重い方の質量比\* があります。

## O3a 期に得られた特別な発見

図 3 は GWTC-2 での質量分布の広がりイラストにしたものです。太陽質量\* の 1.4 倍程度の中性子星から 150 倍程度のブラックホールまで広がっています。図 4 と 5 は、8 個のイベントを選んだものです。これらのうち 4 個はそれぞれ独立した論文として詳細が発表されています。

- [GW190412](#): 初めての発見となった質量比の大きな連星ブラックホールの合体に伴うもので、重力波の高次のモーメント成分も検出されました。
- [GW190425](#): 連星中性子星の合体を波源とする重力波で、[GW170817](#) に続く 2 番目の検出となりました。
- [GW190426](#): 中性子星とブラックホールの連星、あるいは連星ブラックホールからと考えられる質量の小さな波源からの重力波でした。
- [GW190512](#): O3a 期の中でもっとも実効的スピン角運動量 (effective aligned spin) の小さなブラックホールの連星による重力波でした。
- [GW190517](#): O3a 期の中でもっとも実効的スピン角運動量の大きなブラックホールの連星による重力波でした。
- [GW190521](#): 全質量が太陽質量の 150 倍を超える連星ブラックホールによる重力波でした。
- [GW190814](#): 質量比が極端に大きな連星を波源とするもので、詳細は不明です。1 つは太陽質量の 23 倍の大きさのブラックホールですが、もう 1 つ

は太陽質量の2.6倍のもので、後者はこれまでに見つかっているブラックホールのうちで最小のものか中性子星のなかで最大のものかどちらかです。

- GW190924: もっとも小さな連星ブラックホールによる重力波で、太陽質量の3倍を超える程度の2つのブラックホールの合体が波源でした。

このほかにも、GWTC-2では、太陽質量の2.5倍から5倍

の範囲に相当する、いわゆる「低い領域での質量ギャップ」からの重力波イベントもありました。長い間、宇宙物理学者等は、この領域の質量をもつ天体は存在しないことを予想して「質量ギャップ」と命名してきました。しかし、O3a期の観測ではGW190814やGW190924の軽い方の天体が「質量ギャップ」のものであることを発見しました。

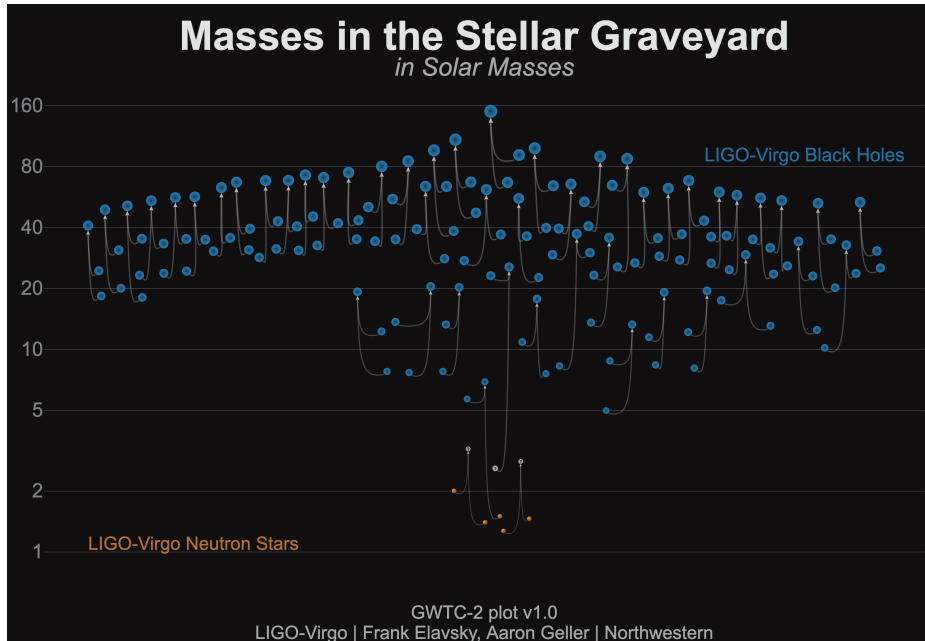


図3: コンパクト天体の質量分布の図。重力波観測から得られたブラックホール(青)、中性子星(オレンジ)、および正体不明なコンパクト天体(灰色)を示しています。1回の連星合体では、2つのコンパクト天体が合体して1つの天体となるため、3つの天体として対応して描いています。(クレジット: LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern)。

図4に示すように、GW190521はO3a期観測の中で最大の質量をもつ天体からの重力波であり、その大きさはGWTC-1のカタログにあった最も重い連星ブラックホールGW170729の約2倍の質量です。しかも、GW190521を構成していたブラックホールは太陽質量の90倍以上を持つものと考えられ、これは、重力波観測史上最大です。GW190519, GW190602, GW190706を含め、いくつかのイベントでは全質量が太陽質量の100倍を超えるものがあると考えられます。

GWTC-2では、GWTC-1で紹介されたどの天体よりも非対称な質量を持つ天体からの重力波がありました。例えばGW190412やGW190814は、どちらもブラックホールと軽い伴星との合体を起源とするものでした。GW190412の報告に示したように、質量比の大きな連星合体では高次のモーメント成分をもつ重力波が増幅されることが知られています。今回更新されたカタログには、この他にも重力波天文学に進展を促すようないくつかの特徴がみられます。O3a期の観測では、これまでに検出された中で最も遠方の天体を含む9つのイベン

トが、天球面全天の1%以下の面積の部分から届いているのです。

天体のスピン(自転による回転角運動量)の情報は、コンパクト天体の連星の進化の過程をさらに明らかにすることができます。スピンの大きさは、ゼロ(自転していない)から最大値になるものまでさまざまな値を取ります。私たちは「実効的スピン角運動量」と呼ばれるパラメータを用いてスピンを測定します。実効的スピン角運動量は、合体前のそれぞれのコンパクト天体をもつ自転角運動量の軌道角運動量と平行な成分の組み合わせから計算されるパラメータです。図5は、チャープ質量を横軸として実効的スピン角運動量を示しています。実効的スピン角運動量が負の値になることは、天体の自転角運動量が軌道角運動量と逆向きになっていることを示していて、その連星が球状星団のような密集した環境で形成された可能性が考えられます。図5で強調されているように、GW190517は最大の実効的スピン角運動量を持っているようです。逆にGW190514は最小の実効的スピン角運動量を持っているようですが、

GWTC-2 全体では実効的スピン角運動量が負の値を確実に示すものは得られませんでした。この他にも、実効的スピン角運動量は連星の **軌道歳差** の証拠も明らかにすることができます。GWTC-2 には、GW190412 や GW190521 のように、軌道歳差を示すような兆候を示すイベントが含まれています。

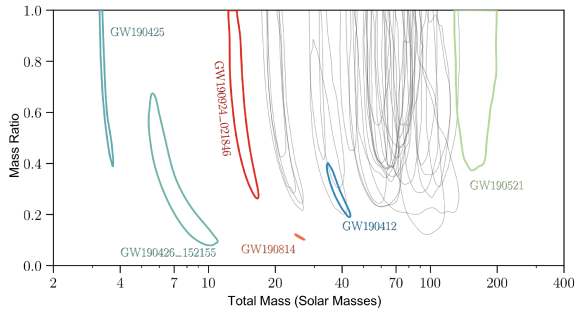


図 4: O3a 期のすべての重力波イベントについて、質量比と全質量のパラメータを示したもの。等高線は 90% の信頼区間を示す。6 つの特徴ある重力波イベントの部分の色をつけて示している。(今回発表した論文の Fig. 6 を加工した。)

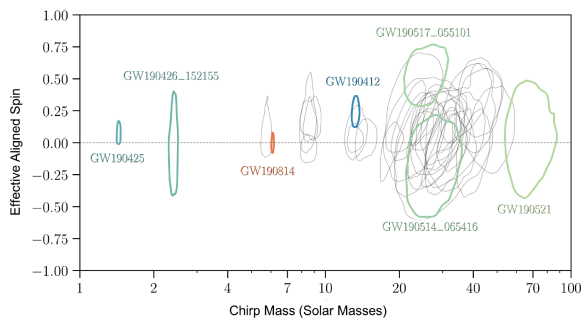


図 5: O3a 期のすべての重力波イベントについて、実効的スピン角運動量とチャープ質量のパラメータを示したもの。等高線は 90% の信頼区間を示す。(今回発表した論文の Fig. 7 を加工した。)

## 重力波天文学の明るい将来

2015 年 9 月の **初検出** からわずか 5 年ですが、重力波の検出は今では当たり前になっています。現在で重力

波イベント検出数は 50 個になり、宇宙全体のブラックホールと中性子星の統計を取れるようになりました ([関連リンク](#))。重力波検出が増えることは、一般相対性理論の理解を深めます ([関連リンク](#))。

重力波天文学の未来は今後も大いに期待されます。O3 観測期の最初の 6 か月で 39 の重力波イベントが追加されましたが、O3 期の後半 (O3b 期と呼ばれる) の分析は現在進行中であり、重力波カタログはさらに拡張されていきます。O3 期に続いて、第 4 期の観測期間を目指して各検出器は改良され、観測可能な範囲をさらに拡大 (したがってより一層過去の宇宙を観測) できるようになります。機器の改良計画とともに、新しい検出器の建設プランもあり、重力波コミュニティはブラックホールと中性子星を明らかにしながら宇宙全体を探索しつづけることになるでしょう。

## 用語集

- **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。
- **ひずみ (strain):** 重力波の通過によって時空がゆがみ、検出器の腕の長さが変化する。その腕の長さの変化を、全体の長さで割った値。
- **パラメータ推定 (parameter estimation):** 重力波信号から天体物理的パラメータを導く統計的手法。
- **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。
- **重力波波形 (gravitational waveform):** 重力波が時間によって変化していくさま。
- **チャープ質量 (chirp mass):** 連星のそれぞれの天体の質量の組み合わせとして計算される量。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。
- **質量比 (mass ratio):** 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。
- **太陽質量 (solar mass):** 太陽の質量で、天文学では質量を表す共通の単位。  $2 \times 10^{30}$  kg。

## さらに詳しく調べるために

- ライゴとヴィルゴのウェブサイト: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)
- 本発表の元となる論文 <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>
- O3a 期の 39 個の重力波データは、GWOSC のサイトから取得できます。  
<https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/>  
GWOSC のサイトには、背景の説明、プログラム例、データ解析の簡単な説明なども掲載しています。

<https://dcc.ligo.org/P2000381-v7>