

## GW230529: 中性子星と未知なるコンパクト天体の合体の観測

2015 年, [GW150914](#)と命名された**重力波**(GW) が初めて直接検出され, 天文学の新たな時代の幕が開けました。それ以来, さまざまなタイプの天体を起源とする, より多くの重力波が検出されています。そのすべてが, **中性子星**や**ブラックホール**からなる**コンパクト連星合体**です。ここでは, 2023 年 5 月 29 日に **LIGO-Virgo-KAGRA コラレーション**の第 4 期観測 (O4a) の開始直後に観測されたコンパクト連星合体である[GW230529 の検出](#)を報告します。GW230529 の波源となった連星の片方は, 中性子星と考えるとその質量は予想されている上限値よりも大きく, ブラックホールと考えるとその質量は予想されている下限値よりも小さいという, 謎の特徴をもっています。

### どんな方法で検出されたものか?

私たちは, **整合フィルタリング法**を用いて, 各検出器のデータを解析します。これは, 検出器の信号データと予測される重力波波形を比較して, 最もよく一致する波形を見つける方法で, 実際の重力波信号が信号データに隠れている場合でも有効です。この方法によって, 信号強度の推定値が時間の関数として, あるいは信号対雑音

比 (S/N 比) の時系列データが得られます。もし検出器のデータに天体物理学的な信号が本当にあれば, S/N 比は高くなり, そうでなければ低くなります。

この手法は, 検出器データ内の微弱な重力波信号を特定するのに有効であることが証明されていますが, 確実なものではありません。さまざまなノイズ源が, 私たちの測定を妨害したり, 重力波信号を模倣することさえあるのです。

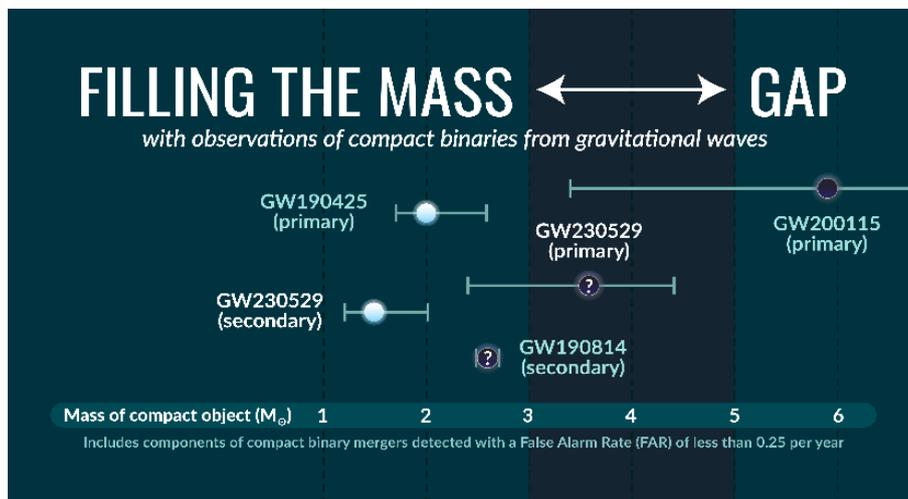


図 1: 重力波の波源となった連星合体の星の質量のうち, 「(低いほうの) 質量ギャップ」と呼んでいる太陽質量の 3 倍から 5 倍の範囲にあるものを図にしたもの。primary とは連星の主星, secondary は伴星を示す。薄く青い丸印は中性子星, 黒い丸印はブラックホールを示す。黒い丸で疑問符が付いているものはおそらくブラックホールと考えられるが中性子星かもしれない。GW230529 の主星の質量はこの質量ギャップにある。(画像クレジット: S. Galaudage, Observatoire de la Côte d'Azur.)

## GW230529 が本物の現象であることを 確信できた理由

多くの場合、私たちは異なる検出器において、検出時刻と重力波源を特徴づけるパラメータの両方が一致する信号を探します。しかし、複数台の検出器で一致する事象だけが探し出されるわけではありません。私たちは、たとえ1台の重力波干渉計のデータだけでも信号を発見できたと確信できるような解析の技術を開発してきました。この開発が功をなして、今回、使用可能だったのが [LIGO-Livingston](#) からのデータだけでしたが、GW230529 を例外的な事象として検出することができました。GW230529 の検出を報告したのは、3つの独立した **探査パイプライン**（または探査アルゴリズム）です。これらのパイプラインはすべて **整合フィルタ** 技術を使用していますが、その実装方法は異なっており、天体物理現象をノイズから識別する強力なツールとなっています。これらの成熟した探査パイプラインによって、私たちは自信を持って結果をクロスチェックすることができるようになっています。したがって、検出器のノイズがGW230529 のような信号を模倣した可能性は極めて低いこととなります。

GW230529 は、検出器の観測時間中に検出され、観測期間の終わりにも検証されました。この事象の **偽警報率** は、1000年に1回以下と報告されました。これは、検出器のデータの中にコンパクト連星合体の信号が含まれなかったとき、今回のような解析結果がノイズによって偶然得られるのは1000年に1回以下しか起こらないことを意味します。この事象が他の候補からどのように際立っているかを図2に示します。

### この事象の興味深いところ

数年前から科学者たちは、コンパクト天体の質量分布において、 $3\sim 5 M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量を示す) の間にコンパクト天体はほとんど存在せず、**質量ギャップ** が存在することを報告してきました。しかし、最近の **電磁波** や重力波による連星観測から、連星の候補天体として質量ギャップの範囲にある質量を持つものが報告されています。例えば、[GW190814](#) の軽い方の天体の質量は、非常に高い確率で、 $2.50 M_{\odot}$  から  $2.67 M_{\odot}$  の間にあると見積もられています。この値は中性子星としては重すぎ、ブラックホールとしては軽すぎる値です。

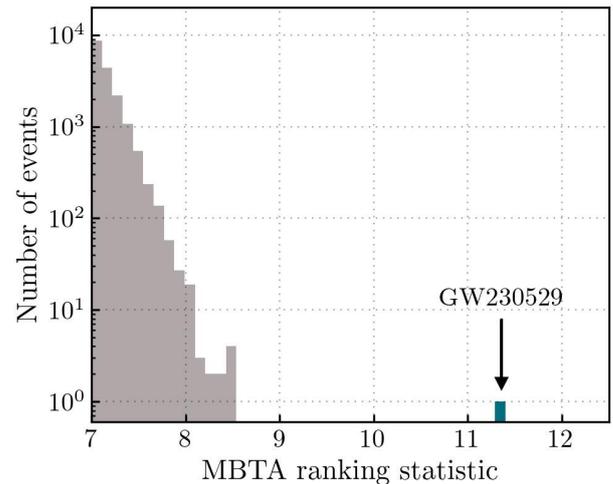


図2: 第4期観測の最初の2週間における、LIGO Livingstonの全候補事象に対する探査パイプライン (MBTA と呼ばれる) のランキング統計量分布。横軸はランキング統計量の値で、探査パイプラインが示す候補天体の確からしさを示すもので、ノイズと重力波信号を区別するさまざまな検定の目安にもなる。ランキング統計量は、信号雑音比から導出されるもので、その値が大きいほど重力波事象としては明確で、天体起源の信号として無矛盾であると考えられる。灰色の分布は天体物理起源であると分類されるほど重要でなかった事象。青いピンはGW230529のもの。GW230529の順位統計量は11.4と他の事象よりも非常に大きく、順位統計量が約8.5より大きい事象は他に検出されていない。

GW230529 は、主星の質量が約  $3.6 M_{\odot}$  と推定され、図3に見られるように、質量ギャップの中に主星質量を持つ最初の連星候補です。中性子星とブラックホールの質量分布に対する現時点での理解からすると、主星質量は  $5 M_{\odot}$  より小さい質量のブラックホールと (99%の確率で) 一致します。しかし、天体物理学的な質量分布からだけではなく、最近の原子核物理学の理論と実験から、主星が中性子星である可能性も指摘されます。主星が中性子星である確率は小さいけれどもゼロではないのです。ある仮定のもとでは数パーセントに達することもあり、このシナリオを棄却することはできません。一方、GW230529の伴星質量は、90%の確率で  $1.2 M_{\odot}$  と  $2.0 M_{\odot}$  の間にあり、ほぼ確実に中性子星といえます。

### この事象が示唆すること

中性子星とブラックホールの合体はまれな現象です。そのため、検出されることは非常に貴重で、ブラックホールと中性子星の特徴を見い出すだけではなく、重力波天文学の目標の1つである合体率の研究も進みます。つまり、質量分布の形状を推測し、ブラックホールの最小質量と中性子星の最大質量を導き出し、回転するコ

コンパクト天体とその質量の関係が解明されていくこととなります。GW230529 だけを用いた場合、類似の事象の合体率は、約  $3.5 \times 10^{28}$  立方光年の体積中で 1 年あたり約 39 と推定されます。第 3 期観測 (O3) で検出された中性子星-ブラックホール連星候補事象を含めると、同体積中で 1 年あたり約 61 となります。さらに、あまり重要でない候補を加えた別の解析では、同体積中で年間約 95 の合体率が得られました。これらの解析から、GW230529 と同じような連星系に対して推定される合体率は、O3 の間に推定された、主星が疑いなくブラックホールであるときの合体率に匹敵することがわかりました。これは、GW230529 の主星がブラックホールであるという仮説を補強するものです。中性子星-ブラックホール連星の合体率の確率分布を図 4 に示します。

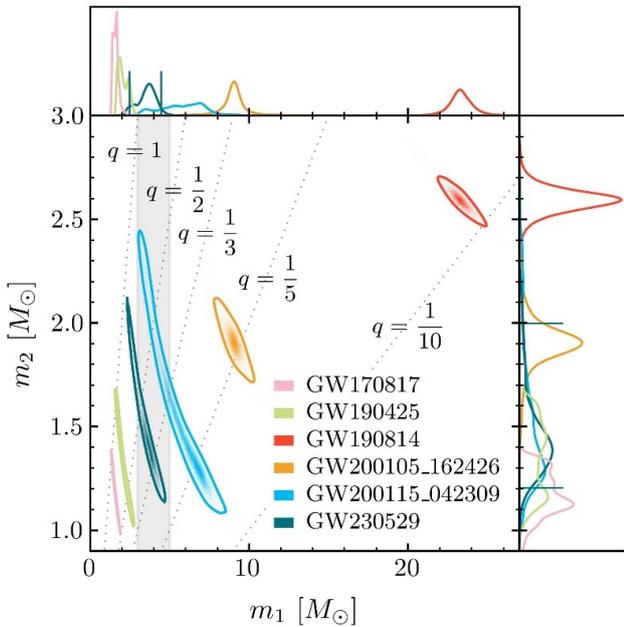


図 3: いくつかの連星系の質量の確率分布。最も可能性の高い質量の値を、確率分布関数のピークによって示している。上のプロットは主星質量の射影分布、右のプロットは伴星質量の射影分布を示し、破線は質量比  $q = m_1/m_2$  が一定の箇所を示す。GW170817 (ピンク) と GW190425\_081805 (緑) は連星中性子星と一致した。GW200105\_162426 (オレンジ) と GW200115\_042309 (青) は中性子星-ブラックホールの連星と一致した。GW190814 (赤) の伴星質量は、ブラックホールか中性子星の可能性がある。3~5  $M_\odot$  の間の質量ギャップをグレーの斜線で示す。GW230529 (青緑色) は、2 つの連星中性子星系と 2 つの中性子星-ブラックホールの連星系のちょうど中間にあり、その主星質量は質量ギャップ領域にあることがわかる。

GW230529 は、その主星質量が質量ギャップの中にある可能性が高いため、分布モデルを改良するための有力な候補です。GW230529 の観測によってどのような影響を受けるかを調べるために、3 つの分布モデルを検討しました。最初の 2 つのモデルはすべてのタイプのコンパクト天体連星 (連星中性子星+連星ブラックホール+中性子星・ブラックホール連星) を含み、3 つ目のモデルは中性子星・ブラックホール連星の集団だけを考えます。GW230529 を最初の 2 つのモデルに含めても結果は大きく変わりませんが、3 番目のモデルは図 5 に示すように大きく変化します。この場合、低質量のブラックホールの存在量が増加し、ブラックホールの最小質量が低い値に向かっていることがわかります。GW230529 を含めると、このモデルの最小質量はこれまでの約  $6.04 M_\odot$  から約  $3.36 M_\odot$  になります。

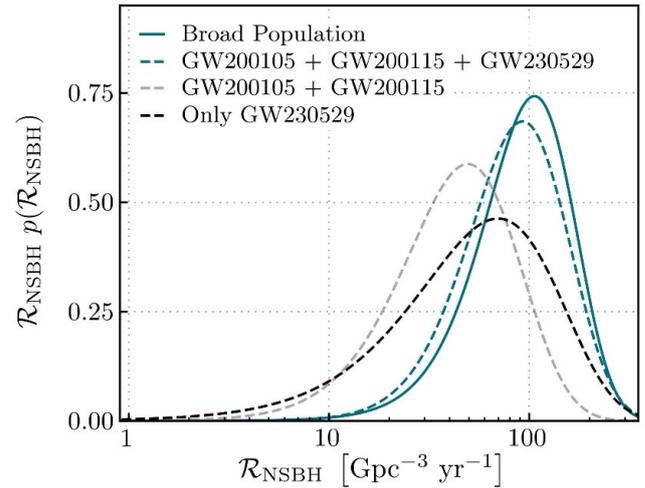


図 4: 中性子星-ブラックホール連星の合体率の確率分布。確率分布関数は、合体率の最も可能性の高い値でピークに達する。破線は凡例に事象名が示されている中性子星-ブラックホール連星のみの分布モデルを使用して導出されたもの。「広い分布」として示される実線は、本文で説明されているように、重要度の低い事象を含んだ分布モデルから導出されたもの。どの分布も比較的近いピーク値を示していることから、すべての分布がある程度重なっていることとなります。特に、GW230529 のみを使用して検出されたピーク値は、他の中性子星-ブラックホール連星事象を含めた場合に検出されたピーク値と同程度になります。(論文に掲載された図より)

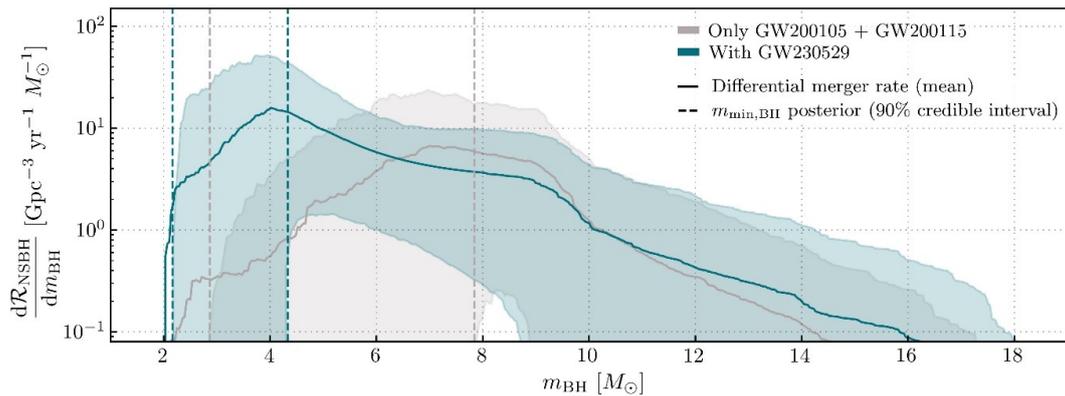


図 5: 実線は、中性子星・ブラックホール連星の合体率（縦軸）をブラックホールの質量（横軸）の関数として示す。2 本の実線はそれぞれ異なるモデルによる合体率であり、影付きの領域は各モデルの不定性を表す。破線は、ブラックホールの最小質量の予想範囲を 90% の確率で示す。灰色は GW230529 を除いた中性子星・ブラックホール連星のみの集団モデルを考えた場合、青色は GW230529 を含んだ場合を示す。GW230529 を含めることで、低質量のブラックホールを含む連星の存在量が増加するだけでなく、ブラックホールの最小質量がより低い値に向かうことがわかる。

GW230529 の形成過程は不明です。連星の質量が小さいため、主星の起源として、大質量星における **コア崩壊型超新星爆発** を考えることは好ましくありません。より妥当なシナリオとしては、超新星爆発後にコアの残留物質が降着してブラックホールが形成された領域へ **再降着** する、というものがあります。最近の数値シミュレーションは、このメカニズムによって  $3\sim 6 M_{\odot}$  のブラックホールの形成が可能であることを示しています。ヘリウムが燃焼する星のコア崩壊のシミュレーションでは、 $5 M_{\odot}$  以下の質量のものは少ないものの、中性子星の最大質量と同程度のブラックホールの質量になり得るようです。コア崩壊のモデルは、最終的に形成される天体に関して現在でも大きな不確かさを抱えており、コンパクトな天体の質量限界を正確に決定することは難しいのです。したがって、GW230529 はこれらのモデルを制約するための貴重な事象になります。

主星が形成されるもう一つのシナリオは、連星中性子星の合体です。この場合、伴星はかつての三重連星系や四重連星系のメンバーであるか、若い星団や活動銀河核で進化している間に主星に捕獲されたと想像できます。また、**原始ブラックホール** のような恒星以外の起源も否

定できません。

GW230529 のような質量ギャップ系をさらに調べることで、ブラックホールと中性子星の分布統計についての理解を深めることができることでしょう。そしてその結果、コンパクト連星の形成メカニズムや、中性子星についてはその内部構造をよりよく理解できるようになるはずです。

## 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/>

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



本発表の論文

<https://dcc.ligo.org/P2300352/public/>

## 用語集 (登場順)

- **中性子星 (Neutron star):** 原子が圧力に耐えられず、ほとんどすべてが中性子で構成されている (陽子と電子が少量残る) 非常に高密度でコンパクトな天体で、コア崩壊型超新星爆発 (core-collapse supernova) と呼ばれるプロセスに続く大質量星の崩壊によって生じる。中性子星の最大質量はおよそ  $3 M_{\odot}$  と考えられている。
- **ブラックホール (Black Hole):** 光速以上の脱出速度でしか逃れられないほどの重力をもつ密度の高いコンパクトな天体 (領域)。この領域からの光は私たちに届かないため、黒い空間領域として見える。
- **コンパクト連星合体 (Compact binary coalescence):** 一般に CBC と略され、2つのブラックホール、2つの中性子星、あるいはブラックホールと中性子星の組で構成された連星が、互いに周回しながら最終的に合体すること。すべての過程で重力波が生成され、連星が互いに近づき加速するにつれて、周波数と振幅が増加する。合体によって生じる天体は、初期状態に応じて、中性子星またはブラックホールのいずれかになる。連星を構成する天体のうち、主星 (primary component) とは質量が大きい方の天体、伴星 (secondary component) は質量が小さい方の天体を指す。
- **ライゴ-ヴィルゴ-かぐら (LIGO, Virgo and KAGRA):** それぞれ米国、イタリア、日本にある [重力波の検出を可能にする装置](#)。それぞれの基本構造は、「L」字型を形成する数キロメートルの2本の腕で、その両端には鏡があり、その間をレーザービームが往復する。レーザーを使用して、重力波が地球を通過するとき生じる腕の長さの相対的な変化を測定する。各検出器の腕の間の距離は常に測定されていて、重力波の痕跡を探索するためのデータを構成する。
- **整合フィルタ (Matched filtering):** 連星合体の重力波信号を検出する方法の一つで、重力波検出器からのデータを解析するのに使われているもの。検出器からのデータを、連星系のパラメータに依存する理論的に予測された重力波信号と常に比較して、相関するものを探し出す。実際の重力波が地球を横切るとき、検出器のデータと予測された信号の間で強い相関が見つかるはずである。
- **探査パイプライン (Search pipeline):** いくつかのプロセスから構成される計算プログラム。データの解析のために、検出器のデータにフィルタをかけたり、さまざまな量を計算することによって、できるだけ多くのノイズ事象を排除し、候補となる天体物理現象の重要性を推定する。観測と同時並行で実行されるパイプライン、後の時間に実行されるオフラインのパイプライン、さらにその両方で使われるパイプラインもある。詳細は、[IGWN 公開警報ユーザーガイド](#)を参照のこと。
- **偽警報率 (False-Alarm Rate; FAR):** 重力波信号とみなしたものが、実はノイズによって引き起こされたものである可能性を定量化するために使用される量。ノイズから発生したものが重力波検出と誤って判断する場合をシミュレートし、その信号強度を調べることによって計算され、誤報とする確率の分布を信号強度の関数として導き出すことによって与えられる。より具体的には、信号の偽警報率が1日あたり1件である場合、検出器のノイズによってそのような信号がほぼ毎日1回発生すると考えられることを意味する。そうであれば、私たちは自信を持って重力波信号とは言えなくなる。
- **オフライン解析 (Offline search):** 通常、メンテナンスやアップグレードのために検出器が動作していない期間に、それ以前の観測期間のデータに対して実行される解析。これらは、観測と同時並行で実行されるリアルタイム解析 (オンライン解析とも呼ばれる) を補完する。
- **太陽質量 (solar mass,  $M_{\odot}$ ):** 太陽の質量で、天文学では質量を表す標準の単位。およそ  $2 \times 10^{30}$  kg。
- **(低い方の) 質量ギャップ (Lower mass gap):** コンパクト天体が存在しないか、ほとんど存在しないと予想される質量範囲。大まかに中性子星の最大質量の  $3 M_{\odot}$  から、ブラックホールの最小質量の  $5 M_{\odot}$  までを指す。
- **光年 (Light-year; ly):** 距離の単位。光が真空中を1年間かけて進む距離。およそ 9.5 兆 km。
- **分布モデル (Population model):** 連星パラメータの任意の組み合わせの関数として、コンパクト天体の存在量を与える理論モデル。
- **コア崩壊型超新星爆発 (Core-collapse supernova):** 恒星では、そのガスの圧力がその中心からの重力とつり合った状態になっている。星の寿命が近づくときガスの圧力が低下し、星は重力に耐えられなくなり、中心に向かって非常に急速な重力崩壊が起こる。その後のシナリオにはいくつかの可能性が考えられる。突然の崩壊によって星の内部に非常に高い圧力が生じ、超新星爆発が起こる可能性があり、それは「コア崩壊超新星」と呼ばれる。超新星はその後、[中性子星](#)を形成するか、あるいは[再降着](#)があると[ブラックホール](#)を形成する可能性がある。恒星がそもそも重すぎた場合、超新星段階を経ずにブラックホールに直接崩壊する。
- **再降着 (fallback):** コア崩壊型超新星爆発のシナリオでは中性子星が形成され、その中性子星に向かって物質が「再降着」する。この物質降着によって、中性子星の質量が支えられる最大値を超えると、ブラックホールが形成され得る。
- **原始ブラックホール (Primordial black holes):** 宇宙初期、ビッグバンの直後に形成されたと考えられる仮想的なブラックホール。予想される質量の値は広く、 $10^{-18} M_{\odot}$  から  $10^{36} M_{\odot}$  までの可能性がある。

本解説のオリジナルは、<https://www.ligo.org/science/Publication-GW230529/> にあります。

(日本語訳: 真貝寿明, 山本貴宏)