

## 新しい重力波源：中性子星とブラックホールの連星

### 私たちは何を発見したか？

2020年1月5日、米国ルイジアナ州リビングストンにあるアドバンスド LIGO (ライゴ) 検出器と、イタリアのアドバンスド Virgo (ヴィルゴ) 検出器は、これまで天文学的に知られていなかったまったく新しい波源からと考えられる重力波を観測しました。重力波は、宇宙で最も極端な2つの天体の「死への行進」によって生成されました。その2つとは、中性子星\* (\*は用語解説があることを示す) とブラックホール\* です。LIGO と Virgo は、半径を縮めながら周回運動(インスパイラル\*) する最後の数回の軌道を観測し、続いて中性子星とブラックホールの合体を観測しました。驚くべきことに、そのわずか10日後に、2番目となる中性子星とブラックホールによるインスパイラルと合体からの重力波信号が、2台の Advanced LIGO 検出器と Virgo 検出器の計3台で観測されました。中性子星とブラックホールの組み合わせから重力波が観測されたのはこれが初めてです(図1を参照)。この新しい発見の前までに観測された重力波は、ブラックホールのペアか、中性子星のペアの合体のどちらかでした。この新しいイベントは、GW200105, GW200115 と呼ばれます。

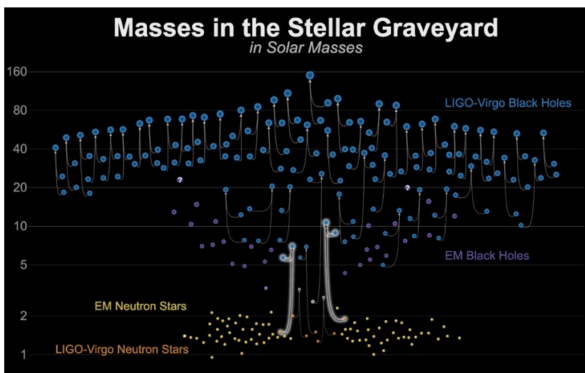


図1: 重力波観測や電磁波観測で測定された中性子星とブラックホールの質量。黄色と紫のマークは、それぞれ電磁波観測で測定された中性子星とブラックホールのを表し、オレンジ色と青色のマークは重力波観測で測定されたもの。今回の GW200105 と GW200115 の信号は、中性子星とブラックホールの合体として強調されています。(画像クレジット: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)

これらの2つの発見は、中性子星・ブラックホール(以下、NSBH)系の最初の検出です。数十年の間、NSBH系の存在は予測されていましたが、これまで説得力のある観測的な証拠はありませんでした。NSBHの観測により、ブラックホールと中性子星から形成される可能性のある3種類の連星すべてを確認できました。これら3種類の連星系はまとめて「コンパクト連星\*」として知られています。今回の新しい発見や、コンパクト連星の将来の観測によって、星の誕生、一生、そして死について、およびそれらが形成される環境について明らかになっていくことでしょう。

### 重力波信号の検出

検出器によって記録されたデータから重力波信号の検出するには「整合フィルタリング法\*」が使用されます。これは、ノイズの多い観測データを、アインシュタインの一般相対性理論\* から予測される波形と比較するものです。整合フィルタリング法は、オーケストラが奏でる演奏のなかで私たちが個々の楽器を区別できるのと同様の方法で、ノイズの多いデータから重力波信号を抽出できます。GW200115は高い信頼性をもって、天体物理学的な重力波であると考えられます。このデータのランダムノイズに起因する可能性は、**100,000年に1回**かそれ未満です。GW200105の場合は統計的には微妙ですが、これまで私たちが見ているノイズとは異なっていることは確かで、重力波信号をノイズと誤認する可能性は**2.8年に1回**起こる程度よりも低いと見積もられます。

NSBHの合体は、原理的に、さまざまな電磁スペクトル\* 帯の光を放出します。残念ながら、今回は重力波源の天球面上の方向を狭く特定することができませんでした。具体的には、満月の2,400倍から29,000倍の大きさに相当するサイズの空の領域にしか絞り込めませんでした。波源までの距離も大きかったため(以下でより詳細に説明します)電磁波で追観測される可能性は低く、実際まったく観測されませんでした。将

来の NSBH 合体の観測では、おそらく光でも追観測され、ブラックホールが中性子星を「潮汐破壊する」(引き裂く)様子が明らかになることでしょう。そうなれば、中性子星を構成する極限的な形態の物質に関する情報が得られることでしょう。

## 重力波源の特徴

重力波は、ブラックホールや中性子星の質量など、その起源に関する豊富な情報をもたらします。GW200105 を放出したブラックホールと中性子星は、それぞれ私たちの太陽の(太陽質量を  $M_{\odot}$  と表す)約 8.9 倍と 1.9 倍の質量を持っていました。GW200105 のイベントは約 8 億年前、地球に最初の恐竜が出現する数億年前に発生したものです。GW200115 では、ブラックホールと中性子星の質量はそれぞれ  $5.7 M_{\odot}$  と  $1.5 M_{\odot}$  程度であり、それらの合体は約 10 億年前に起こったと推定されています。質量は図 2 にまとめられています。

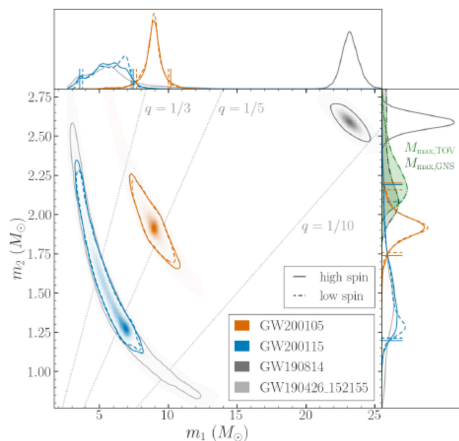


図 2: GW200105 と GW200115 を放出した天体のそれぞれの星の質量に関して得られた結果。横軸は重い方の天体(ブラックホール)の質量、縦軸は軽い方の天体(中性子星)の質量を表している。色の濃淡は、データと矛盾しない質量の組み合わせを示す。最初のイベントはオレンジ色、2 番目のイベントは青で表示している。陰影が濃いほど一致度が高い、つまり、そのような質量の組み合わせの確率が高いことを示している。上のパネルはブラックホールの質量に関する情報をまとめたもので、たとえば、GW200115 のブラックホールの質量が  $3.5 M_{\odot}$  と  $7.5 M_{\odot}$  の間のどこかにあることを示す青い曲線が示されている。右側のパネルは、中性子星の質量に関する情報をまとめたもので、たとえば、このパネルのオレンジ色の曲線は、GW200105 の中性子星の質量が  $1.75 M_{\odot}$  から  $2.2 M_{\odot}$  であることを示す。この右側のパネルの緑の陰影は、中性子星がどれだけ重いかについての現在の天文学的知識を要約したもので、今回観測された天体は中性子星になるのに十分小さい質量を持っていることを示しています。この図には、以前の 2 つの重力波の発見に関する情報も書き入れている。GW190814 は、おそらく  $23 M_{\odot}$  のブラックホールと  $2.5 M_{\odot}$  のブラックホール(これまで観測された中で最も軽い)の合体です。GW190426\_152155 は、NS-BH 系のように見えますが、非常に弱いため、天体物理学的な波源となっていたかどうかは不明です。

GW200105 のブラックホールの自転の大きさは、最大で持ち得る回転速度の 0 から 30% の間にあり、GW200115 のブラックホールについては、最大回転速度の 0 から 80% の間にあることがわかりました。私たちの測定は中性子星の自転については感度が悪いので、中性子星の自転について強い証拠はありません(図 3 を参照)。

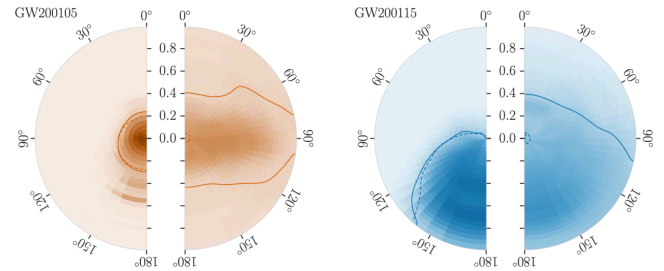


図 3: GW200105 と GW200115 のブラックホール(左半円)と中性子星(右半円)の自転の大きさと方向についての推定値。円の半径方向は自転の大きさを示し、範囲は 0 (自転なし) から 1 (ブラックホールの最大回転) としている。スピンの方向は角度方向で示していて、 $0^{\circ}$  (天体の自転が連星の軌道運動と同じ向き) から  $180^{\circ}$  (天体の自転が連星の軌道運動と反対向き) としている。影が濃い領域ほど対応する自転の大きさと方向が正しい確率が高いことを示している。一番左端の半円には、中央付近でピークとなる影があり、GW200105 のブラックホールの自転がおそらく小さいことを示している。右から 2 番目の半円の影が下に伸びているのは、GW200115 のブラックホールの自転が軌道運動とは反対の方向に回転している可能性があることを示している。

NSBH を観測したと考える理由は为什么呢？観測された重力波を生成するには、天体は典型的な星と比較して非常にコンパクトで高密度でなければなりません。そうでないと、天体は合体する前に裂けてしまいます。両方のイベントで、連星の重い方の天体の質量は  $8.9 M_{\odot}$  と  $5.7 M_{\odot}$  であり、この質量帯での既知の天体は、唯一ブラックホールになります。このブラックホールの質量は、星の形成と進化のモデルからの予測とも一致しています。軽い方の天体の質量は約  $1.9 M_{\odot}$  と  $1.5 M_{\odot}$  であり、既知のどのブラックホールよりもはるかに軽く、かつこの質量は中性子星と考えるのが整合的です。実際、天の川\*で観測された既知の中性子星も、または重力波の波源となった中性子星(例: GW170817)も同程度の質量を持っています。

## NSBH はどのように形成された？また、どのくらいの頻度で発生するのだろうか？

それでは、これらの NSBH 連星はどのように形成されたのでしょうか。主に 2 つの可能性があります。そのうちの 1 つは、すでに互いに周回している 2 つの恒

星から始まった、とするものです。恒星の1つは燃え尽きた後に最終的に超新星爆発を起こしブラックホールになるような質量で、もう1つの恒星は同様に中性子星になる質量だったと考えるものです。これは「孤立した連星進化」と呼ばれます。もう1つの可能性は、中性子星とブラックホールがそれぞれ別々に超新星爆発で形成され、その後に互いを発見して連星系となったというものです。これは「動的相互作用」と呼ばれ、球状星団\*などの高密度で星がある環境で発生する可能性があります。これら2つの可能性を区別するための強いヒントを与えるのは、ブラックホールの自転の向きです。孤立した連星進化では、ブラックホールの自転方向は連星の軌道運動と一致する傾向があります。つまり、中性子星はブラックホールの赤道面を周回すると予想されます。対照的に、動的相互作用のシナリオでは自転の向きは特に決まりません。したがって、中性子星の軌道は、ブラックホールの赤道面に対して任意の方向を持つことができます。

GW200105のブラックホールで推定される自転の大きさでは、これらの形成シナリオのどちらかを区別することはできません。しかし、GW200115の場合、ブラックホールの自転方向は、連星の軌道運動の方向とは反対になる可能性が高いことがわかりました。たとえば、中性子星がブラックホールの周りを時計回りに周回している場合、ブラックホールはその軸を中心に反時計回りに回転しているということです。これは、GW200115の発生源が球状星団などの高密度環境で形成された可能性であることを示唆しています。

さて、ある一定の期間内に、宇宙でいくつのNSBHが合体するのでしょうか？2つのNSBH系の観測から、10億光年の距離内で、年間5～15個の合体があると予想されます。また、この推定された合体率は、孤立した連星進化モデルでも、若い星団のみでの動的相互作用モデルによっても説明できるため、合体率だけではどちらの形成シナリオかを特定することはできません。

## 用語集

- **インスパイラル (Inspiral):** 中性子星やブラックホールなどによる連星系での天体の軌道運動。重力波を放出して連星系がエネルギーを失うと、中性子星とブラックホールはますます速く周回し、最終的には合体するまで接近し続ける。
- **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。

- **ブラックホール (Black hole):** 重力が非常に強いので、光を含むすべてのものが逃げるのでできない時空の領域。ブラックホールにはさまざまなサイズがある。恒星質量ブラックホールは、恒星の崩壊でできるもので、質量は太陽質量の数倍から約65倍の範囲のもの。中間質量ブラックホールは、太陽質量の約100倍から $10^5$ 倍までの質量をもつもの。3つめの超大質量ブラックホールは、太陽質量の $10^5$ 倍以上から $10^9$ 以上の範囲のもの。
- **コンパクト連星 (Compact binary):** 2つのコンパクトな星の残骸からなる連星系。中性子星やブラックホールが互いに非常に接近して周回運動する。
- **整合フィルタ (Matched filtering):** 雑音にまみれたデータから重力波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。
- **一般相対性理論 (General Relativity):** アルバート・アインシュタインによって1915年に提案された重力理論。物質やエネルギーの存在によって空間が柔らかい織物のように曲がり、物体が曲がった空間を進むことが重力の根源である、とする理論。
- **球状星団 (Globular Cluster):** 重力によって束ねられた非常に密度の高い星のグループ。
- **電磁スペクトル (Electromagnetic spectrum):** 可視光は赤から紫まで広がるが、私たちの目に見える範囲外でもこのスペクトルは続いている。赤色の先は赤外線、マイクロ波、電波があり、紫色の先には紫外線、X線、ガンマ線がある。これらを総称して電磁スペクトルと呼び、宇宙の解明のため天文学者はスペクトルの各部分を観測している。すべての電磁放射は、電場と磁場の波紋の形をとり、周波数または波長(波紋の長さ)が異なる。
- **光年 (Light-year):** 光が1年間に移動する距離で天文学的距離の単位の一つ。約9.46兆kmに相当。
- **太陽質量 (Solar mass)  $M_{\odot}$ :** 太陽の質量(約 $2 \times 10^{30}$ キログラム)。太陽質量は、天文学における質量を表す一般的な単位。
- **質量ギャップ (Mass-gap):**  $2.5 \sim 5M_{\odot}$ の質量を持つコンパクト天体がほとんど観測されていないことから、ブラックホールの質量統計に生じている空白のこと。

## もっと詳しく知るためには

ウェブページを訪ねてみよう。

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



無料で読める論文原稿は[こちら](#)

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