

GW190425: 観測史上最も重い連星中性子星系か?

2020年1月6日付

PDF版は [こちら](#) (英訳)。

今回の発見について

LIGO-Virgo 共同チームは、2019年4月25日に2つのコンパクト天体の合体からの重力波が検出されたことを報告し、この信号を GW190425 と命名しました。米国の重力波望遠鏡 [Advanced LIGO](#) (Laser Interferometer Gravitational Observatory) は、[ワシントン州ハンフオード](#) と [ルイジアナ州リビングストン](#) にある2つの検出器から構成されています。観測当時、ハンフオード検出器は一時的に観測を止めていたため、リビングストン検出器のみで強い信号が検出されました。一方、イタリアのカッシーナにある重力波望遠鏡 [Advanced Virgo](#) でもデータを取得していました。ただし、LIGO よりも装置の感度が低く、特に GW190425 の波源は Virgo から見て死角の方向にある可能性もあり、信号の強さは検出には不十分なものでした。それでも Virgo からのデータは、GW190425 のパラメーター推定に役立ち、この連星系の総質量は、太陽質量の 3.3~3.7 倍であることがわかっています。この質量範囲を考えると、2つの中性子星が地球から約 5 億 2000 万光年離れた地点で衝突した可能性が高くなります。この連星系の質量は観測されたどの連星中性子星系よりも著しく大きなものでした。

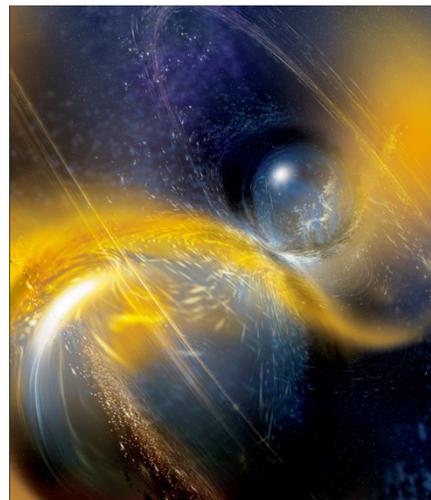


図 1: GW190425 の波源となった連星中性子星合体のイメージ図

Credit: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.

背景

GW190425 は、LIGO および Virgo の第三期観測(O3)にて検出されました。O3 は 2019 年 4 月 1 日に始まり、2020 年 4 月 30 日に終了を予定しており、過去には O1(2015 年 9 月 – 2016 年 1 月) および O2 (2016 年 11 月 – 2017 年 8 月) が行われています (詳細は [こちら](#))。各観測時期の間には、検出器は新たな観測技術にアップグレードされ感度を向上させています。

O2にて、LIGO-Virgo 共同チームは、[GW170817](#)として知られる連星中性子星系からの重力波の観測を初めて行いました。さらにこの重力波源からは、電磁波のあらゆる周波数帯において[対応天体](#)も観測されました。GW190425は、おそらく重力波で観測された連星中性子星合体として2例目となります。今までのところ、GW190425に関連する電磁波信号またはニュートリノ信号は確認されていません。おそらく最大の要因は、GW190425の到来方向の精度が不十分だったためです。実際、今回の精度では空全体の約16%に相当する領域にしか波源の方向を制限できず、従来の望遠鏡が探索するには広すぎる領域でした。また、波源の位置がGW170817よりも遠いため、予想される電磁波信号が弱くなることを考えると、対応天体の未検出は不思議ではないと言えます。

GW190425 の天文学的起源の裏付け

研究チームは様々な方法でコンパクト連星の合体からの重力波信号を探索していますが、いずれも [matched filtering](#) と呼ばれる手法を用いるのが一般的です。これは、[一般相対性理論](#)によって予測された理論波形と観測データを比較する手法です。今回の探索では、LIGO-リビングストン検出器からのデータの中にGW190425の信号を特定しました。次にこの信号の統計的有意さを推定するのですが、これはデータに含まれる雑音によって同一の信号が偶然に発生する頻度、つまり、誤警報率により見積もられます。これを推定するには、LIGO-リビングストン、LIGO-ハンフォード、Virgo 検出器がそれぞれ取得した O1 と O2(169.5 日間)および O3(50 日間)のデータから作成された背景分布と、GW190425 の信号強度を比較する必要があります。結果としてGW190425 の誤警報率は、69,000 年に 1 回であることがわかりました。図 2 は、合計 219.5 日間で得られた背景データにおいて、すでに検出されたGW170817とともに、GW190425 が明らかに際立っていることを示しています。

以上の探索に加えて、[以前のイベントと同様のチェック](#)をGW190425でも実行しました。特に、LIGO-リビングストンで起こる稀な機器雑音による過渡現象がGW190425の原因かどうか調査されましたが、そのような周辺環境または機器による障害は見られませんでした。

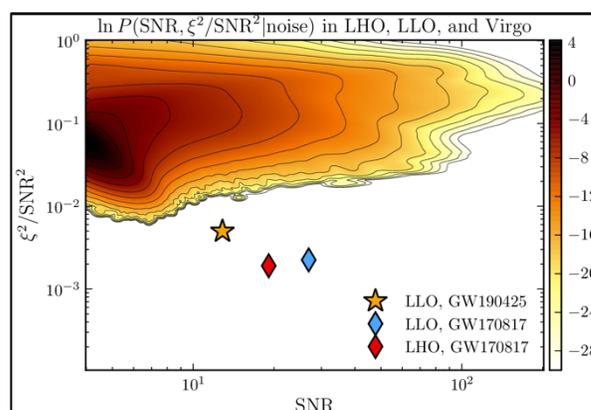


図 2: この図は LIGO-ハンフォード (LHO)、LIGO-リビングストン (LLO) および Virgo 検出器の雑音が生み出す SNR (信号対雑音比) と ξ^2 空間上での分布を表しています。SNR は雑音と比べた信号の強さを示し、 ξ^2 は SNR の時間変化がコンパクト連星から予想される重力波とどれだけずれるかの検定に用いられる量です。図内の濃淡は、連星中性子星合体からの信号を探索した際の背景分布であり、O1 と O2(169.5 日) および O3(50 日) のデータを使用して構築されました。GW190425 (黄の星マーカー) の位置に背景雑音は存在していないことがわかります。比較のために、LIGO-ハンフォードおよび LIGO-リビングストン検出器で記録された GW170817 信号を、青と赤の菱形で付記します。

GW190425 から得られた知見

2つのコンパクト天体のうち一つは太陽質量の1.61から2.52倍、二つ目は太陽質量の1.12から1.68倍の質量を持つことがわかりました。これらの質量は、他の中性子星の測定された質量、および超新星爆発シミュレーションから予想されるものとおおよそ一致しています。特に電磁波観測で知られている最も重い中性子星 ([PSR J0740+6620](#)) は、太陽の質量の2.05~2.24倍と測定されています。

GW190425の場合、一方または両方の天体がブラックホールである可能性を除外することはできませんが、最も自然な解釈は、これらの天体が中性子星であるということです。もしそれが事実ならばGW190425について以下のような知見を得ることができます。

まず、GW190425は銀河内の他の連星中性子星系とは異なる点があります。今回検出された連星系の各質量はすでに知られている中性子星のものと似ていますが、総質量は著しく異なります。図3は、宇宙年齢内に合体すると予想される銀河系内の連星中性子星系の総質量を10サンプル示しています。図内の正規分布はこれらのサンプルに対してフィッティングされ、平均質量は太陽質量の約2.69倍です。一方、GW190425の総質量は太陽質量の約3.4倍であり、銀河系内のサンプルの平均から5標準偏差以上離れています。これは、GW190425が既知の銀河系内の連星中性子星系とは異なった形成過程を辿った可能性を示唆しています。

連星中性子星系を形成すると期待されているシナリオが主に2つあります。1つ目は「[共通外層\(common envelope\)](#)による孤立連星進化」と呼ばれ、連星系内の2つの星がそれぞれ超新星爆発を引き起こし、他のコンパクト天体から孤立した環境で連星系が形成されるものです。2つ目は、「[動力学的な多体相互作用による捕獲](#)」と呼ばれ、中性子星または[主系列星](#)を含む連星が既に存在する状況で、別の中性子星が捕獲され、それが低質量星を弾き出し、結果として2つの中性子星を含む連星が残ります。ただし、このシナリオは連星系合体の全体数の僅かしか占めないため、GW190425はこの力学的形成起源ではなさそうです。一方で、GW190425が孤立連星として形成された場合、これは中性子星が低[金属量](#)の星から生まれた可能性があります。または、最初の超新星爆発によって1つ目の中性子星が形成されたときに、(まだ超新星に至っていない) 伴星

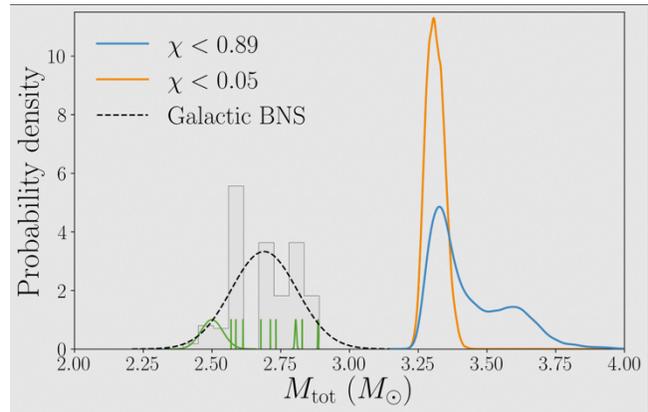


図3: この図は、コンパクト天体の個々のスピンの異なる二つの異なる仮定 (青と橙の曲線) の下で、GW190425から推定される総質量の分布を示しています。これに加え、宇宙年齢内に合体すると予想される銀河系内の連星中性子星系の総質量を10サンプル分示しています。各サンプルの質量分布は同じ軸の高さ1で規格化された緑の曲線として表されています。破線の黒い曲線はこれら10サンプルに対してフィッティングされた[正規分布](#)です。

からの質量が最初の中性子星に移動して重くなった可能性もあります。いずれにせよ、GW190425 の発見は、1 時間未満の軌道周期をもち、現在の電磁波探査では検出できない連星中性子星系の種族が存在する可能性を示唆しています。

次に中性子星の回転速度を決定できるかも調査しましたが、残念ながら今回得られた結果からは中性子星のスピンの情報は得られませんでした。それでも、宇宙年齢内に合体すると予想される 2 つの連星中性子星系、PSR J0737-3039A / B および PSR J1946 + 2052 に含まれる高速回転する中性子星と矛盾はしません。特にこの後者の連星系には、17ms ごとに 1 回転するパルサーが含まれています。

GW190425 を連星中性子星系とみなすと、この結果をもう一つの連星中性子星系 (GW170817) と組み合わせて、宇宙で 1 年当たりに合体する連星中性子星系の数を推定することもできます。この合体頻度は、立方ギガパーセクあたり毎年 250~2810 回であることがわかっています。

以上のように GW190425 は、史上 2 番目の重力波による連星中性子星系の観測であると考えられ、この奇妙な天体に関するより興味深い情報を与えてくれました。

関連リンク:

- ウェブサイト URL: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu
- LIGO のプレスリリースはこちら: ligo.caltech.edu/news/ligo20200106
- 原論文 URL: [Astrophysical Journal Letters](#).

用語解説

- **コンパクト天体:** 中性子星やブラックホールなどの高密度で小さい天体を指す一般総称。少なくとも太陽ほどの質量を持っており、それが数 km もしくは数十 km まで凝縮された天体である。
- **連星:** お互いの周りで周回軌道を描いている二つの天体を持つ系。
- **中性子星:** 大質量星の崩壊の後に残る非常に高密度な天体。
- **ブラックホール:** 質量が高密度になることで生じる時空領域であらゆる物質も脱出できない。
- **スピン:** 物体がどれだけ早く回転してるかを示す量。例えば、地球は 24 時間当たり一回転する。
- **パルサー:** 電磁放射のパルス (通常は電波帯域内) で観測された中性子星。存在が予想される中性子星の大部分は、パルサーとして観測することはできない。なぜなら、中性子星が十分に強力な電磁波を放出しない、またはそれらの電磁波が地球の方向に放射されないからである。