

GW231123: 重力波で観測された 観測史上最大質量の連星ブラックホール合体

重力波 GW231123 は 2023 年 11 月 23 日 13:54:30 UTC（世界標準時）に LIGO-Virgo-KAGRA (LVK、ライゴ・ヴィルゴ・かぐら) 共同研究グループによって観測され、LVK が観測した重力波としては観測史上最大の総質量をもつ連星ブラックホールの合体から生じたと考えられます。これらのブラックホールは非常に速く**自転**しており、また、各ブラックホールの質量は大質量星の進化過程についての既存の理論に疑問を投げかけるものです。

重力波信号の観測

この重力波は第 4 期重力波観測運転の第 1 部 (O4a) 中にワシントン州ハンフォードとルイジアナ州リヴィングストンにある LIGO の 2 つの検出器によって観測されました。信号が 2 台の検出器で一貫して検出されたことが、この重力波観測を確実なものとししました。図 1 に示すように、この重力波信号は 0.1 秒ほどの長さでしたが、検出器の通常の雑音分布に比べて **20 倍ほどの強さ**でした。この信号が観測データの大部分を占める雑音でないことを示すため、私たちは統計的な解析を注意深く行いました。数千年の長さに相当する擬似データのシミュレーションなどの手法を用いることで、雑音が GW231123 のような重力波信号を生じさせることは 10,000 年に一度より少ないことがわかりました。このことは重力波信号が天体由来であること、すなわち重力波源から生じたものであることを強く確証づけます。

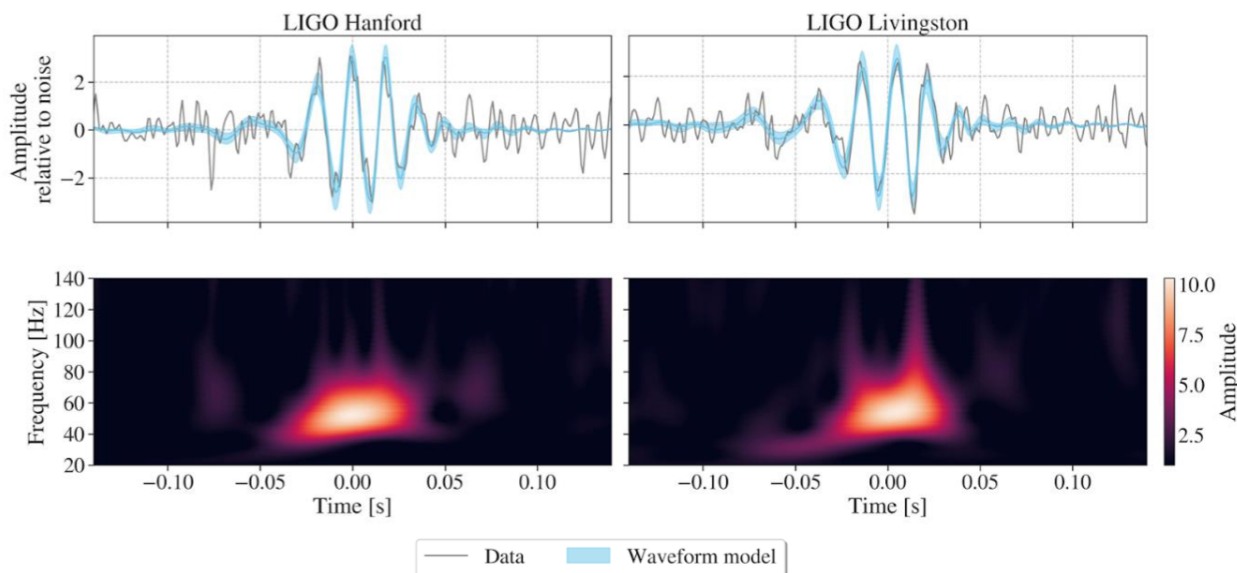


図 1: LIGO ハンフォード（左図）と LIGO リヴィングストン（右図）で観測された GW231123 の重力波信号のデータ。上図は時間に沿った観測データの振幅をグレーで、波形モデルによって得られる重力波信号の予想値を水色で表す。下図は重力波信号の振幅の時間（横軸）と周波数（縦軸）変化を表す。明るい色はより強い重力波信号を表す。

重力波信号の波源

重力波信号が **2 つのブラックホールの合体**によって生じた可能性が高いことが観測データからわかります。合体前の 2 つのブラックホールの質量や自転を理解するために、私たちは**アインシュタインの一般相対性理論**に基づく複数のモデルを使い、さまざまなブラックホールの対のシミュレーションを行いました。

観測データとシミュレーション結果を比較することで、合体前のブラックホールがそれぞれ**太陽質量**の約 137 倍と約 103 倍であることが判明しました。あらゆる不確定性を考慮した結果、連星の総質量が太陽質量の約 190～265 倍であり、これまで観測された連星ブラックホールの合体で最大の総質量であった **GW190521** よりも大きな質量であることがわかりました。さらに興味深いことに、2 つのブラックホールそれぞれが理論上の最大自転速度に近い値で自転していたのです。したがって、**GW231123 はこれまでに高い信頼度で観測されてきた重力波信号の中でも、最大総質量のみならず、最大自転速度である連星ブラックホールを波源とするもののなのです。**

ブラックホールは合体して、太陽質量の約 182～251 倍の残骸ブラックホールを生成しました。合体によってできたブラックホールの質量は**中間質量ブラックホール**と呼ばれる珍しい分類に属します。中間質量ブラックホールは恒星の崩

壊から生成されるブラックホールよりも重く、銀河中心にある超巨大ブラックホールよりもずっと軽い質量帯なのです。GW231123 と GW190521 は重力波によって高い信頼度で観測され、その残骸ブラックホールは共にこの興味深い分類に属しています。

なぜこれらの性質が興味深いのか

既存の恒星進化論では、太陽質量の約 60～130 倍のブラックホールは非常に稀、または、存在しないとされています。この「禁じられた」質量領域はブラックホールの質量ギャップと呼ばれ、このギャップは大質量星を引き剥がす特殊な超新星爆発である対不安定型超新星によって、または、崩壊前に自身の質量のうちかなりの部分を放出する脈動性対不安定型超新星によって、より大きな質量のブラックホールが形成されないことで生じると考えられています。

しかし、GW231123 はこの想定に疑問を投げかけます。合体した 2 つのブラックホールのうち軽い方のブラックホールは 83% の確率で、重い方は 26% の確率でこの質量ギャップに属するのです。すなわち、既存の恒星進化論ではこれらのブラックホールの起源を十分に説明することができない可能性があるのです。

興味深い仮定のひとつとして、合体したブラックホールのうちの 1 つまたは両方が過去の連星ブラックホール合体によって生成された、とする多重合体シナリオがあげられます。この仮定は合体前のブラックホールの質量と自転速度が大きいことを説明することができ、さらに、核星団や活動銀河核のような星が密集した環境に存在していたためブラックホール同士の合体が起こりやすかったことが考えられます。このような密度が高い環境ではブラックホールが互いの周りを歪んだ軌道で、すなわち離心率が 0 でない軌道を辿ることがあります。その複雑性ゆえに私たちが現在用いるモデルでは連星ブラックホールはほぼ円起動を辿り、重力波を放出しながら軌道が徐々に縮小していくと仮定しています。しかし、軌道の離心率が（特に合体直前で）大きい場合、放出される重力波に影響を及ぼす可能性があるものの、現在のモデルで捉えることができません。GW231123 はこの可能性が残っており、より高度なモデルで調べる必要があります。

GW231123 のような重力波信号を生じる現象としては他にも重力レンズ効果、原始ブラックホール、重力崩壊型超新星、ボゾン星の合体や宇宙ひもなどが挙げられますが、これらは上記で説明されたシナリオより天体物理学の観点から可能性が低いと考えられます。

合体の最終段階

LVK が観測してきた（この要約が書かれた時点では 300 近い）連星ブラックホール合体のほとんどにおいて、検出器は重力波信号の最初のインスパイラル部分（ブラックホールが合体前に互いの周りを周回する段階）での感度が最も高くなっていました。しかし、GW231123 はその大質量ゆえに、合体とリングダウン段階の観測が可能です。このリングダウン段階は生成された残骸ブラックホールが重力波を放出しながら振動し、最終的に安定した状態に落ち着く現象のことで、鳴らされた鐘が徐々に静まる様子に例えられ、「リングダウン」と呼ばれます。

重力波信号の最終段階と一般相対性理論によって予想されるブラックホールのリングダウンを比較することで、理論と観測データが良く一致することが結論づけられました。なお、GW231123 の極端な性質は我々のモデルの限界を試したことで、説明しきれない領域を残し、我々の波形モデルに改善の余地があることを示しました。

結論

数年前、私たちが発表した GW190521 の要約 で「記録は破られるためにある」と締めくくり、GW231123 はまさにそれを成し遂げました。質量ギャップに属する可能性と理論上の限界に近い自転速度をもつこの重力波源は特殊だけでなく謎も残しました。今回の発見は既存の恒星進化論を超えたブラックホール生成シナリオを探求する必要性と波形モデルの限界を私たちに示しました。私たちが重力波を通して宇宙に耳を澄まし続ける中で、GW231123 は宇宙がまだ多くの驚きと謎を用意してくれていることを示しています。私たちはそれらを明らかにし始めたばかりなのです。

さらに情報を得るには

LIGO のウェブサイト：<http://ligo.org/>

VIRGO のウェブサイト：<http://www.virgo-gw.eu/>

KAGRA のウェブサイト：<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp>



GW231123 の発見についての論文：<https://dcc.ligo.org/LIGO-P2500026/public>

重力波オープンデータサイエンスセンター(GWOSC) で公開されている GW231123 のデータ：
https://www.gw-openscience.org/eventGWapi/html/O4_Discovery_Papers/