

GW241011 と GW241110 :

高速で自転する非等質量の連星ブラックホール合体を重力波で 2 件検出

2024 年の最後の数か月に、LIGO-Virgo-KAGRA (ライゴ-ヴィルゴ-かぐら; LVK) 共同研究チームは、GW241011 と GW241110 という 2 つの重力波イベントを検出しました。これらは、名前だけでなく、非常によく似た重力波でした。最初のイベントである GW241011 は、2024 年 10 月 11 日 23 時 38 分 34 秒 (UTC) に検出されました。GW241110 は、ほぼ 1 か月後の 11 月 10 日 12 時 41 分 23 秒 (UTC) に検出されました。どちらも高速で自転する連星ブラックホールの合体を波源とする重力波であり、どちらもそれぞれのブラックホールの質量はだいぶ異なっていました。これらの特性は、連星ブラックホールの形成や進化、そして基礎物理学のさまざまな分野への理解に重要な意味を持ちます。

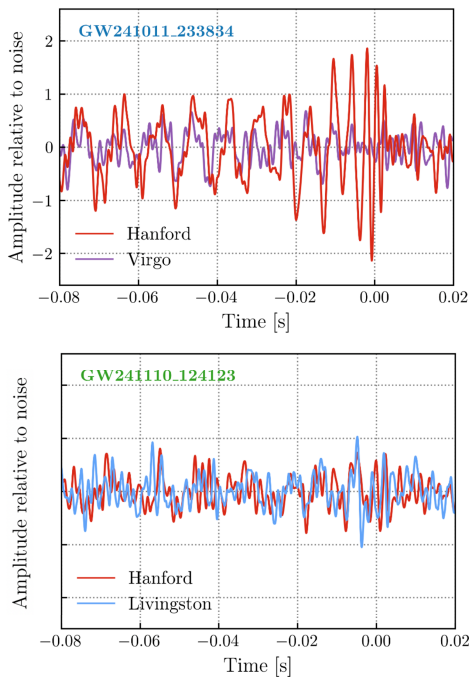


図 1: LIGO ハンフォード, LIGO リビングストン, Virgo の各検出器のデータを合わせた GW241011 (上) と GW241110 (下) の重力波信号の振幅を時間経過とともに示す。連星の合体時刻を Time = 0 としている。

捉えた信号

2 つのイベントは、LIGO-Virgo-KAGRA による第 4 回観測運転期間の第 2 期 (O4b) に、LIGO と Virgo の検出器によって観測されました。図 1 は、この重力波の振幅を時間経過とともに示したものです。

GW241011 はすぐに目立ち、両方の検出器とも典型的なノイズをはるかに上回る信号でした。LIGO ハンフォードの検出器では、信号は背景ノイズの約 35 倍の強さでしたが、Virgo ではノイズレベルの約 9 倍で検出されました。LIGO リビングストンの検出器は休止中でした。高度な探索アルゴリズムと統計手法を用いると、ランダムなノイズがこの信号を引き起こしてしまう確率は 10^{26} 年に 1 回未満であり、これは宇宙の年齢よりもはるかに長い時間であることがわかりました。

GW241110 は 1 か月後に検出されました。このときは 3 つの検出器すべてが稼働中でした。この信号は GW241011 よりも弱いものでしたが、LIGO の 2 つの検出器で明瞭に観測され、Virgo での信号は比較的弱いものでした。リビングストン検出器では地面振動が大きく、低周波のノイズが発生していましたが、検出には大きな影響はありませんでした。詳細な分析の結果、この信号がランダムノイズによって引き起こされる確率は 1500 年に 1 回未満であると推定されます。

これらの信号の波源は？

それぞれの重力波は、2 つのブラックホールの激しい合体によって発生しました。GW241011 は、太陽質量の約 20 倍と約 6 倍の質量を持つ 2 つのブラックホールの衝突によって発生した重力波信号でした。一方、GW241110 のブラックホールは、太陽の約 17 倍と約 8 倍の質量を持っていました。驚くほ

ど似ています！（図2の下図参照）。どちらも高速で自転しており，GW241011の自転は精密に推定されました（図2の上図参照）。

進化の物語を紡ぐ

これら2つの重力波イベントには，興味深い共通点がいくつかあります。それぞれのペアにおいて，質量の大きい方のブラックホール（以下，星の場合の連星では明るい方を主星ということになり，主ブラックホールとします）の自転の大きさは，精度よく推定されました。また，主ブラックホールの自転軸の方向は，それぞれの軌道面の軸と完全に一致していないこと，また，それぞれのペアで，主ブラックホールが副ブラックホールよりも約2倍の質量をもつことも共通点です。これらの手がかりは，それぞれのペアにおける主ブラックホールが，過去のブラックホール合体によって形成された可能性を示唆しています。いわゆる「第二世代」ブラックホールです（図3参照）。このシナリオは階層的合体と呼ばれ，このような系が，[星団](#)のような高密度環境で形成された可能性を示唆しています。ブラックホールが互いに衝突し，合体することが繰り返しおきる可能性が高い領域です。しかし，別のシナリオとして，これらの系の両方が，2つの恒星が単独で進化して形成された結果である，という説を排除することはできません。

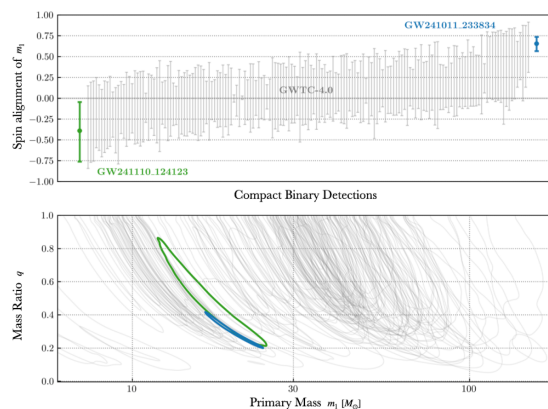


図2:（論文のFig.1を改変）上図は，重力波カタログGWTC-4に掲載されたすべての重力波イベントと，今回報告する2つの新たな重力波イベントGW241011およびGW241110について，主ブラックホール（質量の大きい方のブラックホール）の軌道面の軸方向自転の大きさを順に表示したもの。言い換えれば，主ブラックホールの自転軸方向が連星系の軌道公転面の軸とどの程度一致しているかを示している。値が0より大きい場合，ブラックホールの自転の向きが連星系の公転の向きと一致していることを意味し，0より小さい場合は，逆向きであることを意味する。下図は，今回の2つを含むGWTC-4のすべてのイベントについて，主ブラックホールの質量（太陽の質量を単位にした値）の分布とブラックホールペアの質量比を示す。

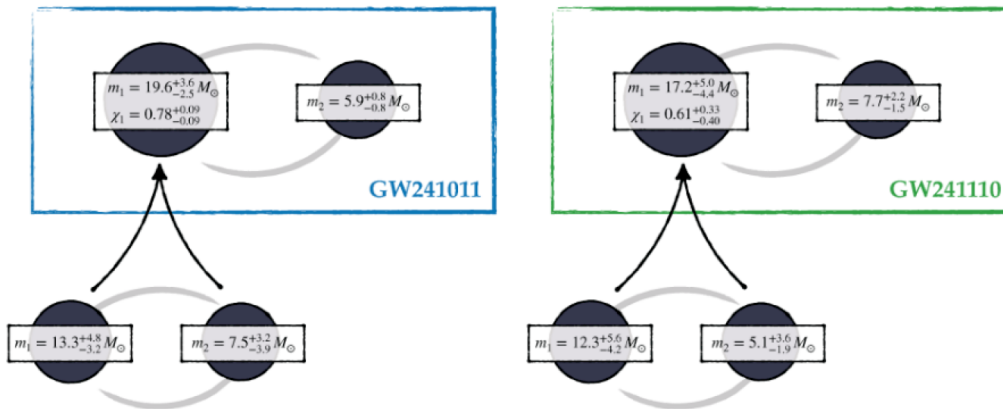


図3:（論文のFig.7を改変）GW241011およびGW241110の各重力波イベントにおける連星ブラックホールと，それぞれの主ブラックホール（質量が大きい方のブラックホール）の祖先と考えられるブラックホールを示す。各ブラックホールの推定質量（太陽質量を単位とする）を推定誤差を含めて記している。また，各ペアの主ブラックホールの自転の大きさの推定値 χ も示している。

基礎物理学への示唆

GW241011の主ブラックホールの自転の大きさの推定は，驚くほど正確かつ信頼性の高いもので，アインシュタインの[一般相対性理論](#)の重要な予測を検証することがで

きました。ブラックホールの自転によって誘起される四重極モーメントの存在についてです。この効果は，急速な回転がブラックホールの形状をわずかに歪ませ，放出する重力波を変化させることを予言します。GW241011

の信号を注意深く解析することで（図4参照）、この効果に関するアインシュタインの予測を前例のない精度で検証することができました（そうです、彼はまたもや正しかったのです!）。これにより、回転するブラックホールに対する、これまでで最も強い制約を提示することができました。

GW241011 や GW241110 の主ブラックホールのように、回転するブラックホールは、未発見の新粒子が存在するかどうかの検証も可能にします。いくつかの理論では、超軽量ボゾン（素粒子物理学の標準モデルにおける粒子よりもはるかに軽い「暗黒物質」候補粒子）が、時間の経過とともにブラックホールから徐々に角運動量を「抽出」する可能性があるとして予測されています。もし、このような粒子が特定の質量範囲内に存在し、GW241011 と GW241110 の主ブラックホールの周囲に雲のように存在していれば、合体するずっと以前からブラックホールの自転を減速させていたはずで、2つの主ブラックホールが依然として高速で回転していることが観測されたため、予想されていたボゾン粒子の質量が広い範囲で却下されることになりました。これらの結果は、新しい物理学を構築する強力なヒントとなることでしょう。

まとめ

GW241011 と GW241110 の検出は、またしても重力波天文学の目覚ましい進歩を浮き彫りにしています。合体するブラックホールの隠れた誕生の謎を解き明かしたのです。どちらの系も、合体が繰り返し起こり得る高密度環境で形成された「第二世代」ブラックホールの可能性を示唆しています。さらに、GW241011 での自転の大きさや多重極モードの精密な推定は、極限的な条件下で一般相対性理論を検証することを可能にしました。結果として、アインシュタインの予言からのずれがないことが示されました。重力波検出のたびに得られる洞察は、宇宙の壮大なパズルを解き明かす助けとなっています。それぞれの重力波イベントは、天体物理学的な発見であるだけでなく、物理の基本法則を探るための実験室に

なっていることを改めて認識させてくれます。

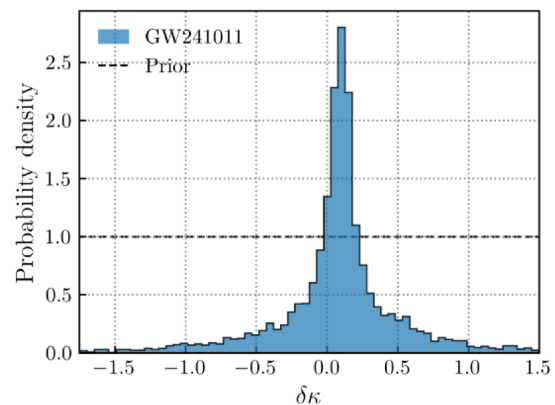


図4: (論文の Fig.9 を改変) GW241011 の主ブラックホールの自転によって誘起される四重極モーメントに対する一般相対性理論の予言からのずれ。このずれはゼロと矛盾せず、この重力波イベントがアインシュタインの理論と整合していることを示す。

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/P2500402/public>
- GW241011 のデータは[ここで](#)公開しています。
GW241110 のデータは[ここで](#)公開しています。

(日本語訳：真貝寿明，成川達也)