

重力波観測で見てきた連星ブラックホールの多様性と形成過程

衣川 智 弥 (東京大学宇宙線研究所 kinugawa@icrr.u-tokyo.ac.jp)

2015年9月14日、世界で初めて**重力波**が直接観測された。重力波の存在が直接証明されたことにより、今後の重力波研究は重力波を用いてどのように天体の物理を解明していくかという段階に切り替わりつつある。まさに重力波天文学の幕開けである。

現在稼働している重力波観測器であるLIGO-Virgoによる連星ブラックホールの観測の報告は46件に及んでいる。そのうち、30太陽質量以上の“重い”質量帯のブラックホールの合体が35件も見つかると、最も重いものは合体後の質量が150太陽質量になるものすら見つかっている。

なぜ30太陽質量以上のブラックホールを重いと表現したかという点、X線連星内のブラックホール候補天体の質量の見積もりは典型的に10太陽質量程度であり、重力波で観測される連星ブラックホールの質量も同程度だと予想されていたからである。

LIGO-Virgoの解析結果によるとブラックホールの質量分布は10太陽質量にピークをもつ右肩下りの冪関数に $33.1^{+4.0}_{-3.6}$ 太陽質量のガウス関数型ピークを加えた冪関数+ピーク分布が最も合っていると報告されている。重力波観測以前の予想とは異なり、幅広い質量のブラックホールが我々の宇宙には存在することが示されている。

重力波で観測された幅広い質量のブラックホール形成を説明するため、大きく分けて次の三つの説がある。連星として生まれた恒星のペアが両方ともブラックホールとなり合体する孤立連星起源説、星団という恒星の密集した領域で生まれたブラックホールが重力相互作用でダイナミカルに連星を組み、合体を繰り返していく階層的合体起源説、ビッグバン由来の密度揺らぎの大きな領域が重力崩壊を起こしてできるブラックホールを起源とする原始ブラックホール起源説である。

いまだこれらの説に決着はついていない

が、孤立連星起源が主に寄与しているのではないかと注目されている。これは宇宙に生まれる大質量の星のほとんどが連星として生まれるため、後天的に連星を組む階層的合体起源などよりも合体率が高くなりやすいからである。

孤立連星起源モデルでは、宇宙初期の天体ほど重いブラックホールになりやすい傾向があると示唆されている。また、重力波による連星合体までの時間は数億年から宇宙年齢以上と長いため、宇宙初期から現在までにできた多様な連星が現在になって合体し、重力波で観測される可能性がある。

我々は**初代星**という宇宙最初期(**赤方偏移** 10-50)にできた孤立連星起源の連星ブラックホールの合体が約30太陽質量のピークを形作り、初代星以降に生まれる**種族I, II星**の孤立連星によってできた連星ブラックホールが10太陽質量のピークを説明できることを連星進化計算により示している。これは宇宙初期から現在までの異なる時代に形成された多様なブラックホールが累積している可能性を示唆している。ただし、LIGO-Virgoによる重力波観測からわかる物理量は主にブラックホールの質量と自転角運動量(スピン)であるが、これらだけではまだ約30太陽質量のブラックホールが本当に初代星起源かは決着がつかない。2030年代の重力波観測の将来計画では赤方偏移10までの初代星起源連星ブラックホール合体が観測できると期待されている。連星ブラックホールの赤方偏移依存性を確かめられれば、初代星起源かどうか白黒つけられる。

初代星は宇宙初期の天体のため、直接観測が難しい。しかし、重力波により、ブラックホールという星が死んだ後に残る「化石」を調べられるようになった。初代星の「化石」として、連星ブラックホールから初代星の特徴を明らかにできるかもしれない。

用語解説

重力波:

質量をもった物体の運動による時空のさざ波。ブラックホールや中性子星といった強重力天体同士からなる連星の軌道運動などにより強い重力波が生じる。

初代星:

宇宙の最初期に生まれる恒星のこと。炭素以上に重い元素を全く含まない星であり、質量は太陽質量よりも10倍以上大きかったと予想されている。

赤方偏移:

光源の後退により光の波長が伸びて赤色側に偏移して観測されること。観測されるスペクトルの波長を λ 、光源の静止系での波長を λ_0 とすると赤方偏移 z は $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ となる。光を発した天体までの距離を測る物差しであると同時に、そのときの宇宙年齢を測る物差しでもある。赤方偏移0が現在で、赤方偏移10は約133億年前、赤方偏移50は約137億年前となる。

種族I, II星:

太陽程度の金属量(天文業界ではヘリウムより重い元素の量を金属量という)の場合、種族Iと呼び、太陽に比べ比較的low金属量な環境でできた星のこと種族IIと呼ぶ。これは、まず太陽や太陽近傍で発見された星を種族Iと名付け、その次に発見された低金属量な星を種族IIと名付けていた歴史的経緯による。