

超精密計測が拓く重力波天文学

麻生 洋一（国立天文台）

概要

米国の重力波検出器 LIGO による重力波の初検出は、重力波天文学の幕開けを告げるものであった。重力波が直接検出されたことの重要性に加えて、太陽質量の 25 倍を超える恒星質量ブラックホールの存在確認は、天文学的に多くの謎を投げかけている。本稿では、今後の重力波天文学に期待される成果と、 10^{-21} という極小の時空のゆがみを捉えるために必要な、超精密計測技術について概説する。

2015 年 9 月 14 日、米国の重力波検出器 LIGO によって、ブラックホール連星の合体から放出された重力波が検出された。波形の解析によって、合体したブラックホールは、太陽質量の 30 倍程度であったことが判明した。合体が起こる瞬間、この現象から単位時間あたりに重力波として放出されたエネルギーは、全宇宙の可視光によるエネルギー放出を全て合わせたものを上回った。また、合体の前後で、太陽 3 個分の質量が重力波の輻射として失われており、この現象がいかに激しいものであったかを物語っている。LIGO による約 4 ヶ月間の観測中には、他にも一件の確実なブラックホール連星合体イベントと、もう一件の有力なイベント候補が観測されている。つまり、この宇宙では巨大ブラックホールの合体が頻繁に起こっているということが分かってきた。これらの観測結果は一方で、どうやってこのような巨大ブラックホールが生まれたのかという謎を我々に投げかけてもいる。金属量の多い現在の星々では、恒星風による質量損失が大きく、このような巨大ブラックホールを作ることはできない。そこで、今回観測されたブラックホールは宇宙の初代星起源である可能性などが議論されている。今後、ブラックホール合体がより多く観測され、統計的に質量分布などが得られると、こういったブラックホールの起源に関しても情報が得られると考えられている。

一方で、今回の観測では重力波源の方向を詳しく特定することはできなかった。これは、検出器が 2 台しか動いていなかったためである。重力波の方向特定は、複数台の検出器への信号の到達時間の差を用いた三角測量の原理に基づいて行われる。そのため、検出器の台数を増やすことで、方向決定精度は飛躍的に向上する。重力波源の方向を、比較的小さい領域に絞り込むことができると、光学望遠鏡などを用いたフォローアップ観測を効率的に行うことができる。中性子星連星の合体などからの重力波の場合、ガンマ線バーストなどの電磁波放射が同時に発生すると期待されているので、その残光などを捉えることができれば、重力波の母銀河が特定できる可能性がある。母銀河が分かれば、その分光観測によって、赤方偏移を知ることができる。コンパクト連星合体の重力波波形からは、重力波源の光度距離を求めることができるため、これは宇宙の加速度膨張を測定する独立な方法となり得る。このように、他の天文観測手段と組み合わせて総合的に重力波現象を観測・解明していく、マルチメッセンジャー天文学が、今後の重力波研究の潮流となっていくと考えられている。

今回、地球に届いた重力波の振幅は 10^{-21} 乗程度であった。これは、地球と太陽の間の距離を水素原子一個分変化させる程度の微小な時空のゆがみである。約 100 年前、アインシュタインが一般相対性理論を発表した当時、このように微弱な重力波の効果を検出することは不可能であると考えられていた。しかし、技術の発展によってついに人類はこのような超精密計測を行える境地に達したのである。重力波検出を可能にするためには、超高安定かつ高出力なレーザー、大口径かつ低損失の鏡、超高性能防振装置、3km にわたる巨大な超高真空システム、大型干渉計の鏡の位置と姿勢の精密制御手法など、さまざまな技術が組み合わされている。また、こういった計測技術の進化の結果、現代の重力波検出器は、量子力学的不確定性原理がその性能を決める大きな要因となっている。量子雑音を低減するための手法も数多く提案され、有用性が実証されているものも存在する。

先に述べた通り、より多くの重力波イベントを検出し、波源方向の特定や偏光情報の分離を行うには、地理的に離れた場所に設置された複数の重力波検出器によるネットワークを構築することが必要となる。日本では岐阜県神岡町に、基線長 3km の低温重力波検出器 KAGRA が建設中である。KAGRA は、2016 年春に常温での試験運転を行い、現在は低温運転を目指して、装置のアップグレード作業を行っている。KAGRA が本格稼働し、米国の LIGO、欧州の VIRGO と共に第二世代大型干渉計型重力波検出器のネットワークを構築することで、さらなる重力波天文学の発展が期待されている。

