

重力波観測が明らかにする 中性子星連星の姿



神田 展行

〈大阪市立大学大学院理学研究科 数物系専攻 宇宙・高エネルギー物理学講座
〒558-8533 大阪市住吉区杉本 3-3-138〉
e-mail: kanda@sci.osaka-cu.ac.jp

ついに、重力波マルチメッセンジャー天文学の大本命の一つである中性子星連星合体からの重力波が捉えられた。重力波の解析が明らかにしたことを解説する。

米国 advanced LIGO 実験の第2回観測 (O2) の最後の1カ月弱は、感度が上昇してきた欧州の advanced Virgo 実験も観測運転に加わった。O2 観測終了まであと数日の2017年8月17日に、初めて中性子星連星合体重力波イベントとなる GW170817 が観測された¹⁾。LIGO の観測周波数帯域に重力波が現れ、約100秒後のUTC時刻 12:41:04.4 に合体に至った。検出器の信号と理論予想波形の相関を用いるマッチドフィルター法が、LIGO-Hanford, LIGO-Livingston, Virgo の3台の検出器の合成で32.4という今までで最大の信号雑音比で波形を捉えた。

図1は、LIGO, Virgo で捉えた重力波イベント GW170817 の時間-周波数のグラフである。横軸に時間、縦軸に周波数、信号の強さを周波数ごとに規格化して明るさで示している。連星合体の重力波の特徴的な周波数変化が長時間 (図では合体の30秒前から) にわたって確認できる。特に LIGO-Livingston の信号は明確である。

重力波のみの解析で、GW170817 の到来方向は天球上28平方度の範囲 (信頼度90%) に絞り込まれる。初観測のブラックホール連星合体 GW150914 では約600平方度であったから、格段に良くなっている。この理由は、検出器が3台であったことが大きい。図1のように、Virgo 検出

器には GW170817 の信号はほとんど見えていない。しかしこのことが、重力波源の方向を決定するのに一役買っている。これに先立つ8月14日のブラックホール連星合体 GW170814 では LIGO とともに信号を検出しており、Virgo 検出器の動作は確認されている。ということは GW170817 は Virgo の死角の方向にあるかあるいは重力波の偏光が検出しづらい向きであるということになる。このことから、到来方向、距離と連星軌道面傾き角に制限が与えられる。Virgo を含む3台の重力波検出器の推定する到来方向の範囲は、重力波の1.7秒後に観測されたショートガンマ線バースト GRB 170817A の推定範囲と重なり、またその範囲内に光学観測で遷移天体が発見されて、見事にシナリオどおりの重力波天体の同定がなされた。光学観測によって判明した母銀河 NGC 4993 は地球から 40 Mpc (1.3億光年) の距離であり、GRB 170817A はいままでのところ最も地球に近い距離で観測されたショートガンマ線バーストということになる。ガンマ線バースト放射の広がり角にも依存するが、重力波と同時観測できるのは20-30回に1回と予想されていた。LIGO や Virgo の感度はさらに遠い天体まで検出可能であるので、もっと遠方で生じたイベントが中性子星連星合体の最初の検出例になる可能性もあった。今回

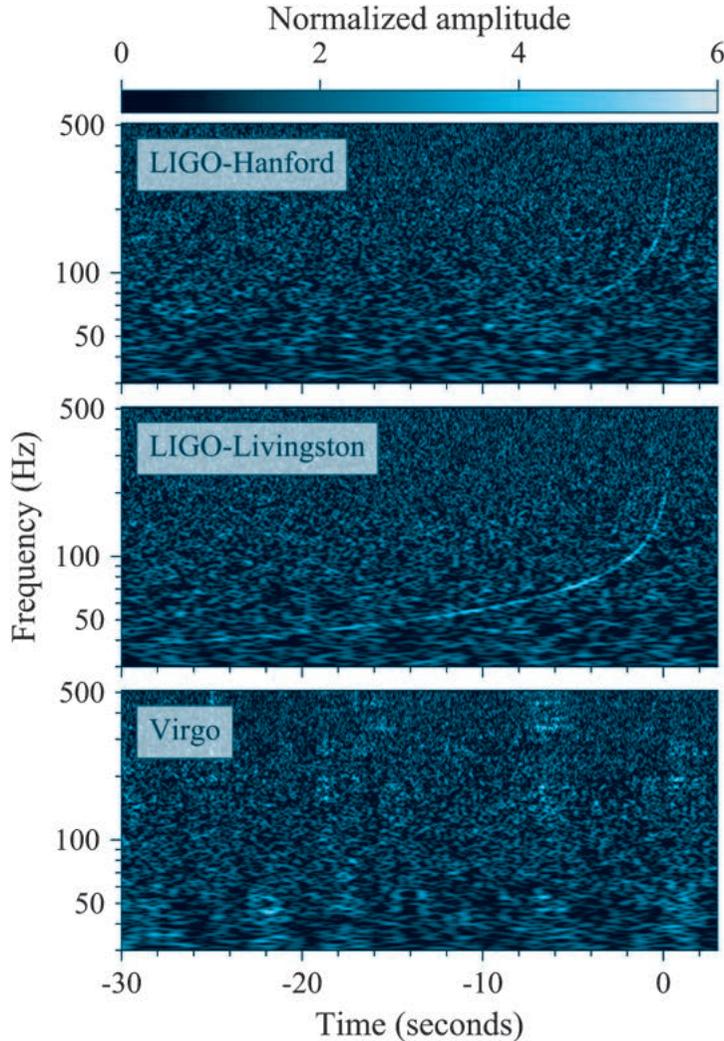


図1 LIGO, Virgoで捉えた重力波イベントGW170817の時間-周波数スペクトログラム¹⁾. それぞれの検出器での信号を、横軸に時間、縦軸に周波数、信号の強さを周波数ごとに規格化して明るさ（原典ではカラー）で表している。

のGW170817は、非常に幸運なイベントといえる。

大きな信号雑音比は、重力波による中性子星連星の各種パラメーターや物理の推定の精度に反映される。二つの星の質量 m_1 、 m_2 として、重力波の時間変化を決定づけるチャープ質量 $\mathcal{M}=(m_1 m_2)^{3/5}(m_1+m_2)^{-1/5}$ が、 $\mathcal{M}=0.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$ と高い精度で決定された (M_\odot : 太陽質量)。さらに二つの星の全質量 m_1+m_2 は2.73-3.29 M_\odot 、

それぞれの星の質量は、一方が1.36-2.26 M_\odot 、もう一方が0.86-1.36 M_\odot と推定された。連星軌道面の検出器からの視線方向に対する傾き角の推定は、連星までの距離の推定と縮退する。さらに、重力波振幅と偏極成分比は傾き角に依存する。また重力波もやはり赤方偏移するので、周波数や光度距離も解析では赤方偏移を含めて行う。今回は光学観測があるので、重力波のみで距離を推定する場合に比べ有利である。逆に、重力波の

みから推定する母銀河までの距離を用いて解析することで、光度距離と赤方偏移の関係、つまりハッブル定数 H_0 が推定でき²⁾、 $H_0 = 70^{+12}_{-8}$ km/s/Mpc と求められた。重力波と光学による独立な観測の直接比較による宇宙論の検証であり、大いに意義がある。天文学でいういわゆる“距離の梯子”や、複雑な宇宙進化のシミュレーションを用いているのではないことは評価されるべきだ。今後、より遠方の中性子星連星合体や多数のイベントが集まれば、精度も高くなるだろう。

これらのパラメーターだが、もしも、4台目の検出器が稼働していれば、偏極、軌道面傾斜角と距離の縮退を重力波検出だけで解け、さらに良い精度で求められただろう。KAGRAがまだ建設中なのが惜しい。また、今回の重力波データ解析にあたっては、検出器の振幅と位相の誤差をそれぞれ、LIGOで7%と3度、Virgoで10%と10度として行っている。現在、KAGRAを含む国際的な協力で、外部レーザー光による励起を用いた較正方法で誤差1%以下を目指している。KAGRAのサファイア鏡はLIGOの溶融石英のものより堅く、そのため高周波数において精度の良い較正が期待できる。連星の合体やそれ以降のkHz帯域の波形に、将来KAGRAが活躍できる可能性がある。

天体物理や原子核物理からは、中性子星の状態方程式についての知見が待望されている。重力波波形における中性子星の潮汐変形の効果を解析することで、状態方程式に制限をつけることが可能である。GW170817の解析では、よりコンパクトな星を形成するほうが示唆されており、いくつかの状態方程式モデルでは90%信頼度区間を外れてしまうことが指摘されている。すなわち、柔らかい状態方程式のほうが好まれる結果となっている。中性子星連星の存在率・合体率は、星形

成、連星の進化はいうまでもなく、重元素の供給源として考えるうえでも重要なものである。今回の観測からは合体率は 1540^{+3200}_{-1220} Gpc³/yr と推定されている。

以上の解析は、かねてから可能性が指摘され、解析手法も検討されてきたものだ。すばらしく幸運な観測、素晴らしい解析結果だが、全くシナリオどおり進んでいる。初観測GW150914が大質量ブラックホール連星で驚きをもって迎えられたのに比べると、今回は逆にあまりにも順当な推移に感心してしまう。そして、これも以前からわかっていたことだが、ハッブル定数、合体率、状態方程式などについては、1, 2例の観測で決めるのは難しい。今後多数のイベントを観測することで決定できる。重力波天文学はたった今始まったところなのである。また冒頭にも書いたように、中性子星連星合体は重力波マルチメッセンジャー天文学の大本命の一つである。それは、本特集のそれぞれの記事が、異なる観測方法やさまざまな物理過程を取り上げていることから明らかであろう。多様な観測手段を組み合わせることで正体に迫るのはまさにマルチメッセンジャーの醍醐味である。

ところで、マルチメッセンジャーとして待ち望まれる重力波源がまだ存在する。超新星爆発である。超新星爆発からの重力波は連星の場合と異なり、二つの偏光成分の波形をそれぞれ観測によって求める必要がある。爆発メカニズムや中性子星の形成など超新星の内奥に迫るためには4台目の検出器は不可欠である。いつか来たるそのイベントには、ぜひKAGRAも検出し、ニュートリノや電磁波との同時観測を成功させたい。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2017, PRL 119, 16101
- 2) Abbott B. P., et al., 2017, Nature 551, 85