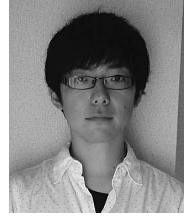


GW170817と中性子星状態方程式

関 口 雄一郎

〈東邦大学理学部物理学科 〒274-8510 千葉県船橋市三山 2-2-1〉

e-mail: y.sekiguchi@sci.toho-u.ac.jp



連星中性子星合体からの重力波は、中性子星の構造および内部物理（状態方程式）の情報を含んでおり、GW170817においても中性子星の状態方程式に関する重要な情報が得られた。中性子星合体からの重力波放射過程の概要についてまとめるとともに、重力波に含まれる中性子星の状態方程式の情報について、GW170817における成果にも言及しながら解説する。

ついに連星中性子星合体からの重力波^{*1}がGW170817において検出された¹⁾。さて、中性子星の構造は、静水圧平衡の式を介して、状態方程式と呼ばれる密度と圧力の関係によって決定される。この中性子星物質の状態方程式を決めることは、天文学・宇宙物理学だけでなく、原子核物理学における重要課題の一つともなっている。中性子星の中心領域では、密度は 10^{15} g/cm³にも達し、地上実験では達成するのが困難な超高密度環境が実現している。そこでは、核子からなる通常核物質相に加え、ハイペロン・K中間子・クォークなどの多彩な構成粒子が出現している可能性が理論的に指摘されている。中性子星は、それらの相互作用および多体問題と、そこから導かれる状態方程式を研究するための一つの実験場ともいえる存在なのである。

このような観点から、中性子星の観測によって状態方程式に制限を与え、そこから原子核物理学に関する情報を抽出しようという研究がこれまで精力的に行われてきた²⁾。連星中性子星合体からの重力波にも、他の手段では得られない状態方程式に関する情報が含まれており、GW170817ではそれを抜き出すことに成功している。これらに

鑑み、本稿では、主として重力波放射過程と重力波による中性子星状態方程式への制限に焦点を当てた簡潔な解説を試みたい。

連星中性子星合体からの重力波放射の概要を図1に示す。連星間距離が中性子星半径に比べて十分大きいインスパイラルと呼ばれる段階では、個々の中性子星を質点として近似することが可能であり、インスパイラルフェイズの重力波の解析から中性子星の質量をはじめとするさまざまな情報が得られる。GW170817においては、自転がそれほど速くないという仮定の下で、連星の全質量が $m_1+m_2=2.74^{+0.04}_{-0.01}$ 太陽質量、個々の中性子星の質量が $m_1=1.36-1.60$ 太陽質量、 $m_2=1.17-1.36$ 太陽質量という結果が得られている¹⁾（いずれも有意水準90%）。これらは、観測されている連星パルサーの質量分布と整合的である。

重力波の放射に伴って軌道半径が減少し、中性子星が有限の大きさをもつことが無視できなくなると、互いの潮汐力によって中性子星は潮汐変形し、それに伴って連星軌道および重力波は質点近似のものからずれる。この質点近似からのずれは、中性子星の状態方程式、特に潮汐変形率 Λ と呼ばれる物理量^{*2}に依存するため、重力波の解析か

^{*1} GW170817の検出論文¹⁾では他の可能性も排除しない慎重な記述をしているが、それに続く論文⁶⁾では“almost certainly”という言い回しになっているので、本稿ではGW170817は連星中性子星起源として議論する。

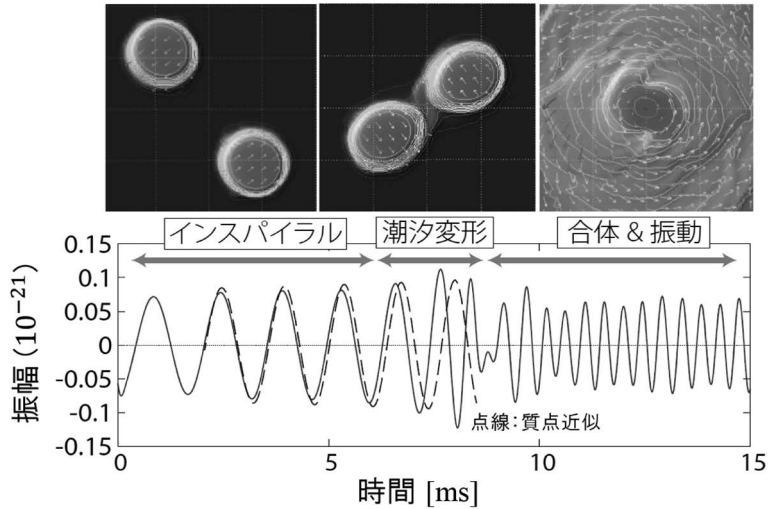


図1 連星中性子星合体からの重力波放射の概要. 重力波波形の上のコントア図は軌道面における密度プロファイルを表す.

ら中性子星の状態方程式の情報を抜き出すことが可能である. GW170817では, 典型的な質量である1.4太陽質量の中性子星に対して, $\Lambda_{1.4} \lesssim 800$ (有意水準90%) という制限が得られた^{*3}. これは1.4太陽質量の中性子星の半径でいえば, おおざっぱにいて $R_{1.4} \lesssim 13\text{--}14\text{ km}$ に相当するものである.

GW170817で得られた潮汐変形率および中性子星半径に関する制限は, 中性子星の内部物理へ大きなインパクトを与えることが予想される. 例えば, 中性子星の中心領域ではハイペロン相やクォーク相が出現している可能性が理論的に指摘されているが, これら非通常核物質相の出現に伴って中性子星の状態方程式が軟化してしまうため, これまでに精度よく質量が決定されている中性子星の最大質量である約2太陽質量^{3), 4)}を支えることが困

難になる. この問題を回避するための処方箋の一つとして, 2太陽質量の中性子星を支えられるように, 原子核実験等の制限に抵触しない範囲で, 圧力を全体的に大きくしておくというモデルが提案されている. しかし, この場合には1.4太陽質量の中性子星の半径が13 kmを超えてしまう場合が多いため, GW170817によって与えられた潮汐変形率の上限値は, これらのモデルに対して強い制約を課すことになる.

GW170817では上限値がつけられるにとどまったが, 今後のイベントにおいて, 重力波から抜き出される潮汐変形率の情報が, 原子核・素粒子物理学分野にさらにどのような影響を与えるのか, 今後の展開を注目していきたい.

さて, 最終的に連星中性子星は合体へと至るが, 合体後の進化は, 全質量および中性子星の状態方

*2 潮汐変形率 Λ は, 潮汐場 E_{ij} に対する四重極モーメントの応答

$$Q_{ij} = -\frac{C^5 R^5}{G} \Lambda E_{ij}$$

によって与えられる. ここで $C = GM / (c^2 G)$ はコンパクトネスパラメータ, M, R は質量および半径, c, G は光速および重力定数である.

*3 中性子星の自転がそれほど速くないという仮定の下での制限である.

程式に依存する。これまでの数値相対論シミュレーションによれば⁵⁾、GW170817の質量域にある連星中性子星合体では、合体後、主に微分回転（遠心力）で支えられる大質量の中性子星が過渡的に形成され、その後、重力波放射、角運動量輸送によって遠心力サポートを失ってブラックホールへと崩壊したと考えられる^{*4}。したがって、合体後の大質量中性子星の回転・振動に伴う重力波が放射された可能性がある。この重力波も大質量中性子星の状態方程式の情報を含んでいるが、GW170817においては合体後の重力波の検出には至らず、その上限値に制限が付けられるにとどまっている⁶⁾。重力波干渉計の感度向上によって、合体後の重力波を用いて、ブラックホールが形成されたかどうか、翻って中性子星の最大質量への制限など、さらなる情報が近い将来に得られることを期待したい。

以上紹介してきたように、連星中性子星合体からの重力波は、インスパイラルフェイズからは中性子星の質量、潮汐変形フェイズからは中性子星の潮汐変形率、合体後の重力波からは、大質量中

性子星の状態方程式や、中性子星の最大質量の情報など、中性子星の状態方程式に関する多角的かつ広範な情報が得られることが特徴である。

連星中性子星合体では、ガンマ線バーストやマイクロバ/キロバなど、重力波とともに電磁波も放射されることが予想されており、GW170817ではそれらが実際に観測されている（本小特集の他の記事を参照されたい）。これら電磁波放射と重力波の両者の情報を組み合わせることによって、中性子星内部の物理についての理解がさらに進むことが期待される。ついにその扉が開かれた重力波マルチメッセンジャー天文学の今後の進展がたいへん楽しみである。

参考文献

- 1) Abbott B. P., et al., 2017, Phys. Rev. Lett. 119, 161101
- 2) Lattimer J. M., Prakash M., 2007, Phys. Rep. 442, 109
- 3) Demorest P. B., et al., 2010, Nature 467, 1081
- 4) Antoniadis J., et al., 2013, Science 340, 448
- 5) Hotokezaka K., et al., 2013, Phys. Rev. D 88, 044026
- 6) Abbott B. P., et al., 2017, ApJ 851, L16

*4 熱エネルギーによるサポートも多少効いており、こちらは主にニュートリノ放射によって減少する。