

中性子星の潮汐効果と重力波を用いた状態方程式の探究

成川 達也 (東京大学宇宙線研究所 narikawa@icrr.u-tokyo.ac.jp)

中性子星は、太陽の約10倍の質量を持つ恒星が重力崩壊と超新星爆発を起こした際に、中心核の残骸として形成される。その典型的な質量は太陽程度であるのに対し、半径は10 km程度と、超高密度天体である。その内部では原子核は融けて、主な組成は中性子である。その中心部では密度が原子核の数倍に達するため、超高密度物質の状態方程式を研究するための絶好の実験室となっている。

状態方程式は、圧力と密度の関係を表す。中性子星内部の状態方程式は、一般相対論的な星の静水圧平衡を解くことによって、質量と半径に対応させられる。中性子星の中心部のような超高密度状態でのような相が実現しているのか、理論的にも実験的にも解明されておらず、天文観測からの制限も含めた連携がその探究に重要である。

2つの中性子星が連星を形成した場合、共通重心の周りを互いに公転しながら、**重力波**を放出し、エネルギーが持ち去られるため、軌道半径(2体間距離)が小さくなり、最終的には合体に至る(連星中性子星合体)。中性子星は有限の大きさがあるので、潮汐効果として連星の軌道進化や重力波に影響を及ぼす。潮汐効果は状態方程式に依存するため、重力波から状態方程式の情報が得られる。状態方程式を重力波による観測量に対応させることができ、**潮汐変形率**と質量の関係によって主要な効果は表される。

2015年、連星ブラックホール合体から放出された重力波GW150914が、アメリカにある重力波検出器LIGOによって検出されたことによって重力波天文学が始まった。さらに、2017年、連星中性子星合体からの重力波GW170817と電磁波対応現象の同時観測というマルチメッセンジャー天文学により、天文学から原子核、そして宇宙論にわたる多くの研究課題で進展があった。重力波が絡んだ天体現象のおもしろさを実感させられた。

GW170817の解析によって、中性子星の潮汐効果が初めて測定された。この重力波を用いた測定は、中性子星のX線観測など他の天文観測による相補的な制限と合わせることで、より精密に状態方程式モデルを絞り込むことを可能にする。

検出器の感度の向上に合わせて、理論モデルの改良も重要である。筆者達は、中性子星の潮汐効果が重力波波形に与える影響について理論的なモデル化を行ってきた。最近の論文では、**ポストニュートン近似**の枠組みにおいて、主要な潮汐効果に副次的な効果も加えた、多重極潮汐波形モデルについて、データ解析に使いやすい表式を定式化した。これまでに導出されている潮汐波形モデルと比較すると、多重極潮汐波形モデルは、主要な潮汐効果のみの波形モデルよりも位相変化が大きく、最も精度が良いモデルである数値相対論較正波形モデルにより近い位相の周波数進化を示すことがわかった。また、GW170817の解析に応用した結果、潮汐変形率の事後分布における波形モデルの違いによる系統誤差は統計誤差よりも小さかった。一方で、波形モデルによる推定値の違いは、位相の周波数進化から予想される値と無矛盾であった。将来、信号雑音比がより大きな重力波イベントに対して、要求される波形の改良において、多重極潮汐効果は重要となるであろう。

2023年から2024年に実施されたO4a(第4次観測前半)でも、LIGOが高感度で安定運転し、重力波イベント候補が検出されている。**KAGRA**も一か月間参加し、初めてLIGOとの共同観測を実施し、安定稼働に成功した。2024年4月からO4b(第4次観測後半)が、LIGOとイタリアにある検出器Virgoによって実施されている。2030年代後半には、次世代重力波検出器による観測が計画されている。今後も続く重力波観測によって、中性子星の状態方程式の理解がますます進展していくことが期待される。

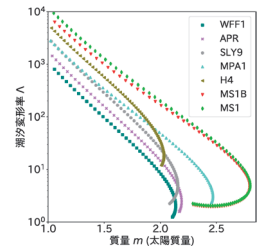
用語解説

重力波：

天体などの非常に重い物体が加速度運動したとき、4重極モーメントが時間変化することによる時空のゆがみが波として伝播する現象。地上検出器の主なターゲットは、連星合体によって放出される重力波。

潮汐変形率：

連星において、軌道半径(2体間距離)が小さくなったとき、伴星の作る潮汐場によって4重極モーメントが励起される際の線形応答係数。潮汐変形率は最も主要な潮汐効果であり、その測定によって、中性子星の状態方程式の情報が得られる。



代表的な中性子星の状態方程式モデルにおける潮汐変形率-質量関係、 $\Lambda-m$ 。一般相対論的平衡解の系列に対応する。

ポストニュートン近似：

連星系の一般相対論的運動方程式を $(v/c)^2$ を展開パラメータとして解く近似。連星の公転速度 v が光速 c より小さく、かつ弱場(連星軌道を支配する重力場が弱い)ときに有効な近似。ポストニュートン近似を用いて導出された重力波波形は最も基本的な波形モデル。

KAGRA：

岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下に建設された重力波検出器。片腕3 kmのL字型レーザー干渉計で、極低温冷却鏡を備える。