

重力波を用いた核理論の検証及び中性子星における普遍的関係性の応用



八木 絢 外

〈バージニア大学物理学科 382 McCormick Road, Charlottesville, VA, 22904 USA〉

e-mail: ky5t@virginia.edu

2017年、中性子星連星合体からの重力波及び対応する電磁波が初めて同時に検出された。中性子星は内部の密度の高さ及びそのコンパクトさゆえ、様々な基礎物理学及び天体物理学の検証に役立つ。本稿では主に核理論の検証に注目する。核物理学における大きな未解決問題の一つに、核物質の状態方程式の決定が挙げられる。ここではまずLIGO及びVirgoによる重力波観測から、中性子星の潮汐効果を測定することで核理論に対して現在までにどのような知見が得られたか解説する。さらに、中性子星における独立な2つの観測量の間に存在する、未知である状態方程式にはほとんど依存しないような普遍的関係性をいくつか紹介し、それらがどのように核理論を含む様々な物理学の検証に役立つかを解説する。

1. はじめに

2017年8月17日、歴史的瞬間が訪れた。人類史上初めて中性子星連星合体からの重力波が捕えられたのだ¹⁾。それだけではない。この重力波イベントに付随して、ガンマ線、X線、紫外線、可視光線、電波、といった様々な電磁波望遠鏡で対応する電磁波信号が検出された²⁾。多粒子天文学に重力子という強力な役者が加わった瞬間である。検出された日にちなみ、このイベントはGW170817と名付けられた (GWはgravitational waveの略)。

この歴史的発見から、天文学のみならず、核物理学、重力物理学、宇宙論等、様々な分野において新たな知見が得られた。例えば、重元素合成過程の一つであるr-プロセスに付随したkilonova (またはmacronova) が検出され、地上における重元素の含量は中性子星連星合体起源として説明できることが示された³⁾。また、電磁波と重力波

との到達時刻を比較することで、重力波の伝播速度、ひいては重力子の質量へ強い制限が与えられた⁴⁾*1。さらに、重力波観測から中性子星連星の距離が測定され、また電磁波観測から宿主銀河が同定され赤方偏移が推定されたことで、ハッブル定数が超新星爆発及び宇宙マイクロ波背景放射とは全く独立に測定された⁵⁾。

本稿では、主に重力波を用いた核物理学の検証に注目する。核物理学における大きな未解決問題の一つに、核物質の状態方程式 (圧力と密度の関係) の決定が挙げられる。理論的側面では、核物質の状態方程式決定のためには多体系のシュレディンガー方程式を解く必要があり、様々な近似や格子シミュレーション等を用いて数々の状態方程式が提唱されている (図1)。しかし、実験で状態方程式を決定しようにも、地上実験で実現できる密度には限界が存在する。そこで登場するのが中性子星である。中性子星の中心密度は核密度

*1 一般相対論によると、重力波は光速で伝播し、重力子の質量は0である。

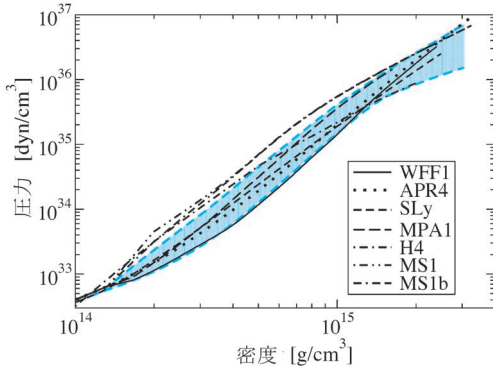


図1 様々な核物質の状態方程式（黒線）及び重力波イベントGW170817の観測と無矛盾な領域⁸⁾（青色）. 重力波観測はAPR4やSLyといった柔らかい状態方程式とよく一致しており、MS1やMS1bといった硬い状態方程式とは矛盾する.

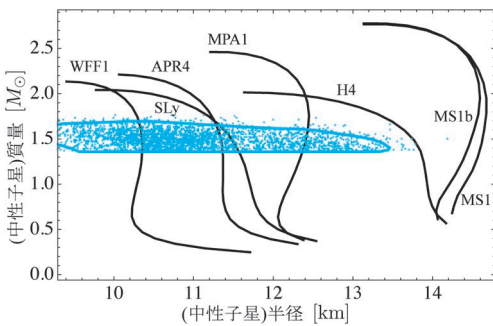


図2 様々な核物質の状態方程式における中性子星の質量と半径の関係性（黒線）. 青色の点の密度は中性子星連星合体GW170817中の（より重い方の）中性子星の質量と半径の確率密度分布を表し、青色の実線は90%信頼区間を示す¹⁰⁾.

を優に超えるため、中性子星は核物理学を検証するにはまさにうってつけの実験場である^{6),7)}.

では、どのように中性子星観測から核理論の情報を引き出せるのだろうか？中性子星の内部構造は核物質の状態方程式に強く依存するため、中性子星の観測量から内部構造の情報が引き出せれば、それを核物理の情報に反映することができ

る. 中性子星の観測量として最もよく調べられているものに質量と半径がある. これら二つの観測量の関係性は核物質の状態方程式に強く依存するため、これらを独立に測定できれば状態方程式の決定に役立つ（図2）. 一般に、柔らかい状態方程式はよりコンパクトで最大質量の小さな中性子星を実現し、硬い状態方程式は半径の大きく最大質量も大きい中性子星を実現する. 中性子星が連星をなしていれば、中性子星の質量は連星軌道から比較的容易に決定可能であるが、問題は半径の決定である. 例えば、現在国際宇宙ステーションに搭載され稼働中であるX線観測機器NICERを用いれば、近い将来中性子星の半径が5%程度の誤差で決定可能であると期待されている⁹⁾.

2. 中性子星連星からの重力波を用いた核理論の検証

中性子星連星からの重力波を用いることで中性子星の内部構造を推定することも可能である. 重力波を用いると、電磁波の場合と比べて系統誤差の小さいよりクリーンな測定が可能である. 連星が重力波を放出すると軌道半径が徐々に小さくなり、中性子星同士がお互いに近づいていく. すると、一方の中性子星による潮汐場が他方の中性子星に作用し、後者の星が潮汐変形する. 潮汐変形しないようなブラックホール連星からの重力波形と比べて潮汐変形する中性子星連星からの重力波形は大きく異なるため（図3）、重力波観測から星の潮汐変形率 λ が測定できる^{11)-14),*2)}. さらに、潮汐変形率は核物質の状態方程式に強く依存するため、重力波観測から核物理学の検証が行える. 中性子星連星からの重力波形に現れる潮汐効果は連星中のそれぞれの中性子星に付随した潮汐変形率 (λ_1, λ_2) のある組み合わせ $\vec{\Lambda}$ で記述できる^{15),16)}:

*2 外場である潮汐場を ϵ_{ij} 、誘発された四重極モーメントを Q_{ij} とすると、 λ は $Q_{ij} = -\lambda \epsilon_{ij}$ で定義される. つまり λ は線形応答係数に対応する.

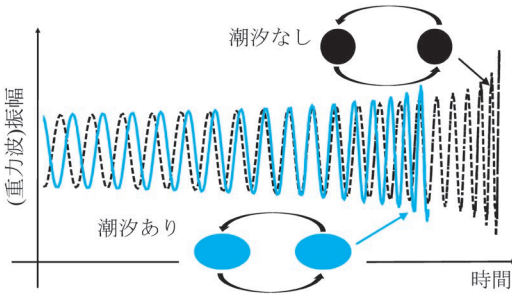


図3 コンパクト星連星からの重力波形. 中性子星連星合体からの重力波形 (青色) は潮汐効果の情報を含むため, そのような効果の現れないブラックホール連星合体からの重力波形 (黒色) とは異なる.

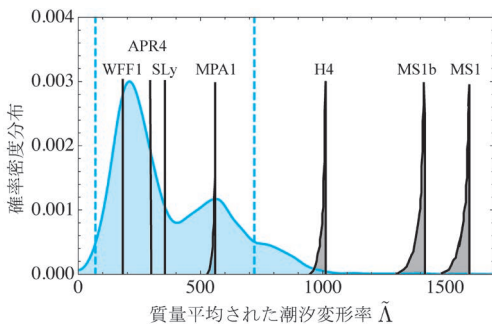


図4 重力波イベントGW170817から得られた潮汐パラメータ $\tilde{\Lambda}$ (1式を参照) の確率分布 (青色実線) 及び90%信頼区間 (青色破線)¹⁰⁾. 参考のため, 様々な状態方程式を仮定した際の $\tilde{\Lambda}$ の確率分布 (黒色実線) も示す.

$$\tilde{\Lambda} = \frac{16}{13} \frac{(1+12q)\Lambda_1 + (12+q)q^4\Lambda_2}{(1+q)^5}. \quad (1)$$

ここで, $q = m_2/m_1 (< 1)$ は質量比を表し, $\Lambda_A = \lambda_A/m_A^5$ は ($c = G = 1$ の単位系で) 無次元化された潮汐変形率を表す.

実際, GW170817においても $\tilde{\Lambda}$ が測定された. 初期の解析では上限しか与えられなかったが¹⁾, その後のより詳細な解析により下限も与えられたことで^{10, 17)}, ブラックホール連星に対応する $\tilde{\Lambda} = 0$ は90%以上の信頼度で棄却された. 最終的な $\tilde{\Lambda}$

の確率分布を図4に示す. この図から, LIGO-Virgoの観測はWFF1等の柔らかい状態方程式とより整合性があることがわかる.

さて, 測定された $\tilde{\Lambda}$ はどのように核物質の状態方程式の情報に焼きなおすことが可能であろうか? 一つの方法は, 状態方程式をパラメータ化し, 様々なパラメータにおいて $\tilde{\Lambda}$ を計算する. すると, $\tilde{\Lambda}$ から状態方程式のパラメータを推定することができる. LIGO-Virgoチームは, スペクトラル状態方程式というパラメータ手法を用いて状態方程式への制限を計算した⁸⁾ (図1).

3. 中性子星の普遍的関係性

上述した中性子星の質量と半径の関係のように, 一般に中性子星における2つの物理量間の関係は核物質の状態方程式に強く依存する. しかし, 中には状態方程式にほとんど依存しないような関係性も存在する (詳細については, 著者のレビュー論文を参照¹⁸⁾).

そのような普遍的関係性の代表例にI-Love-Q関係性がある^{19), 20)}. I は慣性モーメント, Loveは潮汐変形率^{*3}, Q は (自転による) 四重極モーメントを表す. 図5に I と潮汐変形率の関係性 (I-Love関係性), 及び Q と潮汐変形率の関係性 (Q-Love関係性) を示す. どのような状態方程式を用いても, これら2つの物理量の関係性は一つの曲線で綺麗に表せることがわかる. これらI-Love-Q関係性における状態方程式依存性は大体1%以下である.

I-Love-Q関係性以外にも普遍的関係性は存在する. 重力波を用いた核理論の検証において有用となるものに, 連星Love関係性がある^{21), 22)}. 上述のように, 重力波形に現れる潮汐効果は連星中のそれぞれの中性子星に付随した潮汐変形率 (λ_1, λ_2) で特徴づけられる. ここで, 以下の量を定義する:

*3 潮汐変形率 λ は潮汐ラプ数と呼ばれる量 k (及び半径 R) と $k = 3\lambda/2R^5$ のような関係がある. 潮汐ラプ数は潮汐変形率と同様に, 外場となる潮汐場に対する四重極モーメントの応答の強さを表す係数に対応する.

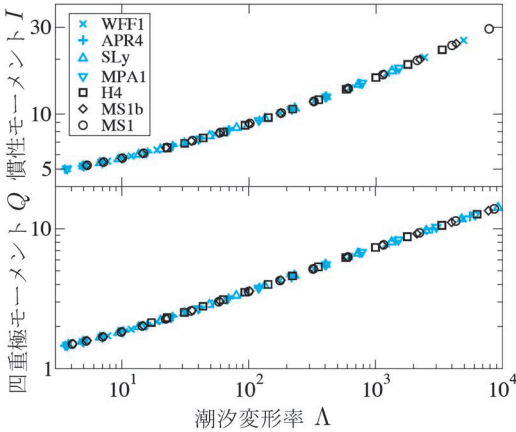


図5 中性子星のI-Love-Q関係性^{19), 20)}. 上の図は慣性モーメント I 及び潮汐変形率（または潮汐ラズ数） Λ を, 下の図は四重極モーメント Q 及び Λ との関係を表す. I, Q, Λ は中性子星の質量を用いて無次元化されている. 異なる点の種類は異なる状態方程式を表す. 図2の質量及び半径の関係とは大きく異なり, I-Love-Q関係性は核物質の状態方程式にほとんど依存しない普遍的関係性であることがわかる.

$$\Lambda_s \equiv \frac{\Lambda_1 + \Lambda_2}{2}, \quad \Lambda_a \equiv \frac{|\Lambda_1 - \Lambda_2|}{2}. \quad (2)$$

つまり, Λ_s は Λ_1 と Λ_2 の平均, Λ_a は Λ_1 と Λ_2 の差分に対応する. すると, 図6に示すように, Λ_s, Λ_a と連星の質量比 $q = m_2/m_1$ の間に普遍的関係性が存在する. 連星Love関係性の状態方程式依存性は大体10%程度であり, I-Love-Q関係性よりも普遍性は弱い.

4. 普遍的関係性を用いた核理論の検証

さて, 上述の普遍的関係性は重力波を用いた核理論の検証を行ううえでどのように役立つのだろうか? 答えは, これらの関係性はパラメータ推定を行う際物理量間の縮退を解くのに役立ち, その結果中性子星の内部構造と直結した物理量である潮汐変形率をより精度よく決定することができる.

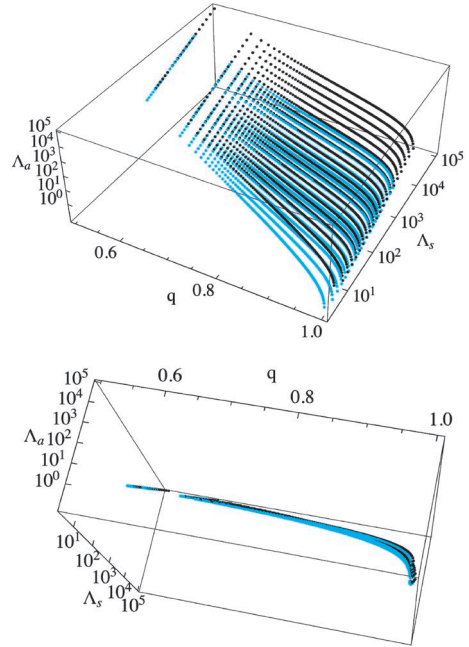


図6 中性子星連星の連星Love関係性^{21), 22)}. (2)式で定義された, 連星中の中性子星に付随した(無次元の)潮汐変形率の平均 Λ_s と差分 Λ_a 及び質量比 q の間には, 状態方程式にはあまり強く依存しない普遍的関係性が存在する. ここでは便宜上柔らかい状態方程式(WFF1: 青色)と硬い状態方程式(MS1: 黒)の2種類の結果を示す. 下図は上図を違う角度で見たものに対応する.

4.1 普遍的関係性の有用性

まずはQ-Love関係性の重力波観測への応用例について解説する. 中性子星が潮汐効果により球対称からずれ, この潮汐効果が潮汐変形率を通じて重力波形に現れるのは前述した通りである. さらに中性子星が自転している場合, この自転の効果によっても中性子星は球対称からずれる. 自転に起因する四重極モーメント Q も中性子星の内部構造, ひいては核物質の状態方程式に強く依存する. Q が無視できない場合, Q と潮汐変形率両方をテンプレート波形のパラメータに含み重力波データから推定する必要がある. しかし, 普遍的なQ-Love関係性を用いれば, 正しい状態方程式を知らなくても潮汐変形率から一意に Q を決め

られる^{19), 20)}. このように、中性子星の普遍的関係性は重力波のデータ解析においてパラメータの数を減らす役割を果たす。

次に、連星 Love 関係性の重力波観測への応用例について解説する。前述したように、重力波観測で主に測定できる潮汐パラメータは、中性子星それぞれに付随した潮汐変形率 λ_A のあるコンビネーションとして記述できる $\tilde{\Lambda}$ である。しかし、より物理的に意味のある Λ_A (無次元化された λ_A) またはこれらの平均及び差分に対応する Λ_s, Λ_a を測定しようと思うと、例えば Λ_s, Λ_a を共に未知のパラメータとしてデータ解析を行う必要がある。しかし、 Λ_s と Λ_a は強く縮退するため、これらの量をそのまま測定することは困難である (ゆえに、通常は $\tilde{\Lambda}$ の測定を考える)。そこで連星 Love 関係性が有用となる。この関係性を用いると、例えば Λ_a を Λ_s と質量比 q で状態方程式に依らずに記述できてしまう。つまり、 Λ_s と q がパラメータに含まれていれば Λ_a を改めて含む必要がなく、2つの潮汐パラメータ間の縮退が解けることで Λ_s が測定できるようになる^{8), 21), 22)}。

4.2 核理論に対する知見

LIGO-Virgo チームは、これらの普遍的関係性を用いて GW170817 による核理論への検証がどのように向上するかを調べた。まず、 Λ_1 - Λ_2 平面上の制限を図7に示す。普遍的関係性を用いると、それを用いない場合と比べてこの平面上の制限が強まる⁸⁾ ことが見てとれる。

また、中性子星の潮汐変形率とコンパクト度合いを表す物理量 $C=Gm/c^2R$ (G は重力定数、 c は光速、 m は質量、 R は半径を表す)の間にも普遍的関係性が存在する²³⁾。この関係性を用いると、 Λ_1 - Λ_2 平面上の制限を質量と半径の平面上に反映することができる¹⁰⁾ (図2)。GW170817より、中性子星の半径は9-13.5 km程度であることが導かれる。誤差はまだ大きいだが、この観測は硬

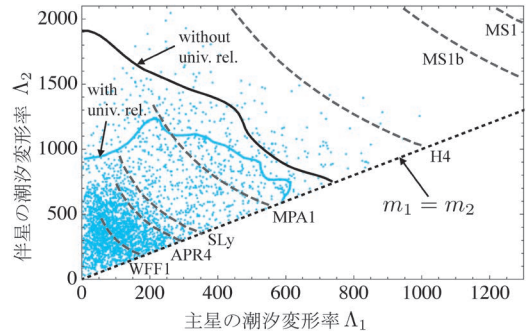


図7 普遍的関係性が重力波を用いた中性子星の潮汐パラメータ測定に与えるインパクト。 $m_1 > m_2$ を仮定すると、この平面上では等質量に相当する黒点線より上の部分のみ意味がある。GW170817の場合、それぞれの状態方程式を仮定すると Λ_1 と Λ_2 の間の関係は灰色の破線のようになる。I-Love-Q関係性及び連星 Love 関係性といった普遍的関係性を用いない場合、GW170817観測から得られる90%信頼度に相当する上限は黒い実線で与えられる¹⁰⁾。対して、普遍的関係性を用いると Λ_1 と Λ_2 の確率密度分布は(図2同様)青色の点の密度で表され、90%信頼度の上限は青色の実線に対応する⁸⁾。普遍的関係性を用いるとこの平面上で許される領域が狭まることがわかる。

い状態方程式とは矛盾するため、すでに述べた通り GW170817 は核物理学に対して重要な知見をもたらした^{8), 10)} と言える。

また、別の普遍的関係性を用いて、GW170817 の観測から核理論のパラメータ (状態方程式のパラメータ) を直接検証することも可能である。状態方程式をパラメータ化する方法は、前述したスペクトラル法以外にも、状態方程式を核密度の周りで展開し展開係数をパラメータとして扱う方法がある。このようなパラメータの一つに「対称エネルギーの曲率」と呼ばれる $K_{\text{sym},0}$ がある^{*4)}。このパラメータと潮汐パラメータ $\tilde{\Lambda}$ の間には強い相関が存在する (図8上)^{23), 24)}。そこで、重力波観測から得られた $\tilde{\Lambda}$ の測定 (図4) から核理論パラメータの情報を引き出すことが可能となる。結果

*4 対称エネルギーは、核物質の結合エネルギーが中性子と陽子の個数の比にどのように依存するかを表す物理量であり、 $K_{\text{sym},0}$ は対称エネルギーを核密度の周りで展開した場合の2次の係数に対応する。

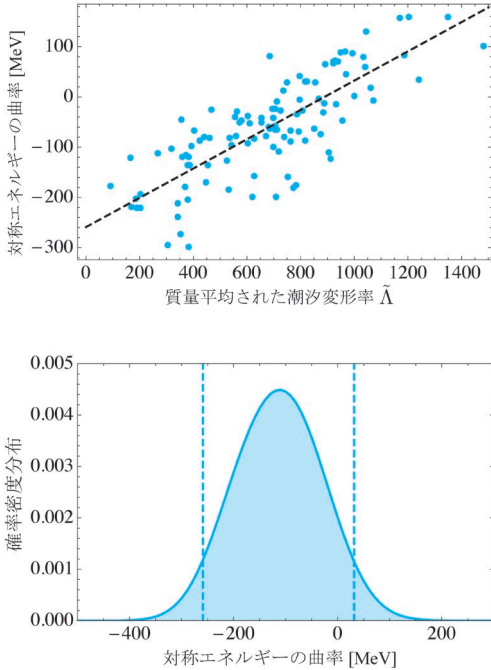


図8 (上図) 核理論パラメータ $K_{\text{sym},0}$ と中性子星連星中の潮汐パラメータ $\tilde{\Lambda}$ の相関関係²⁵⁾。中性子星の質量はGW170817に対応するものを採用。青丸一つ一つは異なる状態方程式を表す。黒い破線は最適な線形の回帰線を示す。(下図) LIGOより得られた $\tilde{\Lambda}$ の確率分布(図4)と上図を合わせることで得られる $K_{\text{sym},0}$ の確率分布(青色実線)及び90%信頼区間(青色破線)²⁴⁾。

を図8下に示す。このパラメータは展開係数の比較的高次であるため地上の実験では測定することが容易ではなく、中性子星観測が核理論の検証を行ううえで如何に強力であるかを物語っている。

5. 普遍的関係性の様々な応用

普遍的関係性の応用は重力波を用いた核理論の検証のみに留まらない。ここでは様々な応用例を紹介する。

5.1 核物理学

I-Love-Q関係性は、重力波のみでなく電磁波を用いた核理論の検証にも役立つ。すでに述べたように、NICERは中性子星の質量と半径を精度よく測定できると期待されている。中性子星が比

較的速く自転している場合、中性子星表面のある高温領域(ホットスポット)からのX線プロファイルは、測定したい質量や半径のみならず慣性モーメントや四重極モーメントといった物理量にも依存する。そのため、これらの量も含めてパラメータ推定を行う必要があるが、パラメータの数が多いとパラメータ間の縮退が大きくなり、質量と半径の測定誤差が大きくなる。

そこで普遍的関係性の登場である。まずI-Q関係性を用いると四重極モーメントを慣性モーメントの関数として表すことが可能であるため、前者を推定すべきパラメータから外すことができる。さらに、潮汐変形率とコンパクトネス C との間に普遍的関係性が存在するように、I-Love関係性から慣性モーメントとコンパクトネスの間にも似たような関係性が存在する。これを用いると慣性モーメントを質量及び半径の関数として表せるため、慣性モーメントも推定すべきパラメータから取り除くことができる。このように普遍的関係性を用いてパラメータの数を減らすことで、最も興味のある質量と半径の測定誤差を小さくすることが可能となる²⁶⁾。

5.2 天体物理学

普遍的関係性は中性子星の形成シナリオを決定するうえでも役立つ²⁷⁾。例えば、2つのパルサーが連星をなしているJ0737-3039は軌道離心率が小さく、初めに誕生したパルサーJ0737-3039Aの自転軸と軌道角運動量の方向がほぼ揃っている。また、連星系の固有速度も小さいことから、後に誕生したパルサーJ0737-3039Bは(反動の少ない)球対称な超新星爆発が比較的短時間で起こったことにより生成されたと推定される。

そのような超新星爆発の一つに電子捕獲型の超新星爆発がある^{28), 29)}。シミュレーションの結果、このような爆発が起こる際、爆発前の星のコア質量は $1.366M_{\odot}$ から $1.377M_{\odot}$ の間であることがわかっている³⁰⁾⁻³³⁾。電子捕獲型の爆発による質量損失は無視できるほど小さいと考えられ、その結

果、誕生した中性子星のバリオン質量は爆発前の星のそれとほぼ変わらない。一方、連星パルサーの軌道の観測から J0737-3039B の重力質量は $1.25M_{\odot}$ と推定されている（重力による結合エネルギーの分だけ重力質量はバリオン質量よりも小さい）。つまり、J0737-3039B の結合エネルギー（バリオン質量と重力質量の差）は $E_B = [0.116, 0.127]M_{\odot}c^2$ と推定される。

そこで、J0737-3039B の結合エネルギーを測定し上記の範囲内に入っているかどうかを調べることで、理論上はこのパルサーの形成シナリオを検証できる。しかし、重力質量はわかっているがバリオン質量を測定することは困難であるため、残念ながら結合エネルギーを直接測定することは難しい。そこで再び普遍的関係性の出番である。実は、結合エネルギーと（無次元化された）潮汐変形率 Λ の間にも状態方程式には強く依存しない関係性が存在する²⁷⁾。そこで、将来重力波観測から $1.25M_{\odot}$ の質量をもつ中性子星の潮汐変形率が測定できれば、この普遍的関係性を用いて J0737-3039B と同じ質量を持つ中性子星の結合エネルギーを推定でき、このパルサーの形成シナリオの検証が行える。

5.3 重力物理学

普遍的関係性は重力理論の検証にも役立つ。弱い重力場ではニュートン重力が良い近似となるが、中性子星やブラックホール近傍といった強重力場では相対論的効果を取り入れた一般相対論を用いる必要がある。しかし、一般相対論の枠組みでは重力は量子化できず、超弦理論等一般相対論を超えた理論を考える必要がある。また、一般相対論の範囲内では宇宙の加速膨張を説明するうえで圧力が負である未知の暗黒エネルギーを導入する必要があるが、一般相対論を超えた修正重力理論を考慮すれば暗黒エネルギーを導入することなく加速膨張を説明できる。現在までのところ、一般相対論からずれた効果は発見されていない。太陽系実験は非常に精度良く重力理論の検証を行う

ことができるが、弱重力場での検証にとどまる。修正重力理論の中には、重力場が強ければ強いほど一般相対論からのずれが大きくなるような理論も存在するため、強重力場での検証が重要になる。

強重力場の検証を行ううえで中性子星の観測は非常に有用であるが、ここでひとつ問題が生じる。重力理論の不定性と核理論の不定性との縮退である。例えば、中性子星の質量と半径の測定から重力理論の検証を行うことを考える。この場合、あらかじめ核物質の正しい状態方程式が分かっていたら、一般相対論が正しい場合の質量と半径の関係が分かっているため、観測から重力理論の検証を行うことが可能となる。しかし、現段階では核物質の状態方程式は分かっていないため、このように状態方程式に強く依存してしまうような関係性を用いて重力理論の検証を行うのは単純ではない。

対して I-Love-Q 等の普遍的関係性は状態方程式の不定性に左右されにくいのが、ひとたび重力理論を変更すると関係性が一般相対論のそれとはずれる。そのため、重力理論の検証を行うにはまさにうってつけの道具となる。例えば、重力波観測から得られる潮汐変形率の測定及び将来の連星パルサーを用いた中性子星の慣性モーメントの観測を様々な重力理論から予言される I-Love 関係性と比較することで、重力理論の検証を行うことが可能となる。理論によっては現在得られている弱重力場の制限よりも6桁以上強い制限をかけられると期待されている^{19), 20), 34)}。

6. 今後の展望

本稿では中性子星における普遍的関係性の重力波観測への応用について主に解説した。逆に、重力波観測を用いて普遍的関係性をより確固たるものにするというアプローチも存在する。具体的には、図1に示すように、重力波の観測から核物質の状態方程式への知見が得られたので、LIGO の

観測から許される領域に存在する状態方程式のみを用いると、状態方程式依存性を半分以下に下げることが可能である³⁵⁾。このように、向上した普遍的関係性を将来観測に用いることができ、また将来観測からその都度状態方程式依存性を少なくすることも可能である。

本稿では紹介しきれなかったものも含めて様々な普遍的関係性を駆使し、重力波及び電磁波を用いた将来の中性子星観測を合わせることで、多粒子天文学から究極的に基礎物理学及び天体物理学をどこまで検証できるか明らかにすることが今後の課題の一つである。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2013年から2018年に筆者らが発表した投稿論文^{18)-22), 25), 27), 34)}に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。編集を担当して下さった富田賢吾氏から原稿について有益なコメントを数多く頂いた。

参考文献

- 1) Abbott, B.P., et al., 2017, Phys. Rev. Lett., 119, 161101
- 2) Abbott, B.P., et al., 2017, ApJ, 848, L12
- 3) Abbott, B.P., et al., 2017, ApJ, 850, L39
- 4) Abbott, B.P., et al., 2017, ApJ, 848, L13
- 5) Abbott, B.P., et al., 2017, Nature, 551, 85
- 6) Lattimer, J.M., & Prakash, M., 2007, Phys. Rept., 442, 109
- 7) Lattimer, J.M., 2012, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 62, 485
- 8) Abbott, B.P., et al., 2018, Phys. Rev. Lett., 121, 161101
- 9) Ozel, F., et al., 2016, ApJ, 832, 92
- 10) Abbott, B.P., et al., 2019, Phys. Rev. X, 9, 011001
- 11) Flanagan, E.E., & Hinderer, T., 2008, Phys. Rev. D, 77, 021502
- 12) Hinderer, T., et al., 2010, Phys. Rev. D, 81, 123016
- 13) Damour, T., et al., 2012, Phys. Rev. D, 85, 123007
- 14) Read, J.S., et al., 2013, Phys. Rev. D, 88, 044042

- 15) Favata, M., 2014, Phys. Rev. Lett., 112, 101101
- 16) Wade, L., et al., 2014, Phys. Rev. D, 89, 103012
- 17) De, S., et al., 2018, Phys. Rev. Lett., 121, 091102
- 18) Yagi, K., & Yunes, N., 2017, Phys. Rept., 681, 1
- 19) Yagi, K., & Yunes, N., 2013, Science, 341, 365
- 20) Yagi, K., & Yunes, N., 2013, Phys. Rev. D, 88, 023009
- 21) Yagi, K., & Yunes, N., 2016, CQG, 33, 13LT01
- 22) Yagi, K., & Yunes, N., 2017, CQG, 34, 015006
- 23) Maselli, A., et al., 2013, Phys. Rev. D, 88, 023007
- 24) Malik, T., et al., 2018, Phys. Rev. C, 98, 035804
- 25) Carson, Z., et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 043010
- 26) Psaltis, D., et al., 2014, ApJ, 787, 136
- 27) Newton, W.G., et al., 2018, ApJ, 856, 19
- 28) Podsiadlowski, P., et al., 2005, MNRAS, 361, 1243
- 29) Ferdman, R.D., et al., 2013, ApJ, 767, 85
- 30) Miyaji, S., et al., 1980, PASJ, 32, 303
- 31) Nomoto, K., 1984, ApJ, 277, 791
- 32) Nomoto, K., 1987, ApJ, 322, 206
- 33) Takahashi, K., et al., 2013, ApJ, 771, 28
- 34) Gupta, T., et al., 2018, CQG, 35, 025009
- 35) Carson, Z., et al., 2019, Phys. Rev. D, 99, 083019

Probing Nuclear Physics with Gravitational Waves and Applications of Universal Relations for Neutron Stars

Kent YAGI

Department of Physics, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22904, USA

Abstract: The historical detection of gravitational waves from a binary neutron star merger (GW170817) offers us a unique testbed to probe nuclear physics, namely determining the equation of state for nuclear matter. In this article, the author first reviews its current status. The author then explains how universal relations among certain neutron star quantities that are insensitive to the equation of state can be used to improve the extraction of nuclear physics (and other fundamental physics) information from gravitational wave observations.