

# Neutron-Star Equation of State and Its Thermal Evolution

土肥, 明

<https://hdl.handle.net/2324/5068164>

---

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (理学) , 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



氏 名 : 土肥 明

論 文 名 : Neutron-Star Equation of State and Its Thermal Evolution  
(中性子星の状態方程式とその熱的進化)

区 分 : 甲

## 論 文 内 容 の 要 旨

中性子星は質量が 1.4 倍の太陽質量、半径が 12 km 程度のコンパクト天体であり、その中心密度は原子核密度の 3-5 倍程度である。中性子星は、数百 m 程度の厚さの薄い低密度な外殻(クラスト)と高密度な内核(コア)で構成されるが、コアは不定性の大きい核力が影響するため、内部構造を表す高密度物質の状態方程式(EOS)は未だわかっていない。従って、中性子星の観測と理論を比較することで、高密度物質の性質を表す EOS を制限し、中性子星の構造を理解するための試みが長年行われてきた (Sotani et al. 2022)。

近年、X 線観測の進展に伴い、中性子星の温度や光度に関する観測データが増えており、そうした観測と理論モデルと比較して EOS を制限する取り組みが盛んに行われている (Burgio et al. 2021)。超新星爆発によって誕生した中性子星は、主にニュートリノの散逸によって冷えていくが、ニュートリノは中性子星内部の素過程によって生じるため、その放射率は EOS によって大きく変化する。全ての中性子星で起きるニュートリノ放射過程は、修正ウルカ過程と制動放射といった遅い冷却過程であるが、EOS によっては核子直接ウルカ過程や $\pi$ 凝縮といった速い冷却過程が起きる可能性がある。速い冷却過程は、観測されている低温中性子星を再現するために必要であるため、温度観測から EOS に制限を課すことが可能である。また、低温高密度な中性子星内部の核子は超流動状態になっており、速い冷却過程の抑制や潜熱の解放に伴う冷却過程が起きるため、核子の超流動転移温度の不定性をプローブできる可能性もある。

また、中性子星はしばしば他の天体と連星系をなす。伴星が太陽以下の質量の恒星の場合、伴星から中性子星への降着が降着円盤を通じて起こるため、降着した物質が中性子星を圧縮することに伴う重力解放や、クラストの圧縮に伴う原子核の非平衡反応に伴う加熱が起きる。降着中性子星には、静穏期(表面温度は 0.1 keV 程度かそれ以下)とアウトバースト期(keV 程度)が周期的に訪れるが、静穏期の観測で X 線光度が異常に低い観測があり、そうした降着中性子星でも速い冷却過程が起きていると考えられている (Heinke et al. 2009)。

さらに、アウトバースト期では X 線バーストと呼ばれる突発的な増光現象がしばしば観測されている。この原因は、降着中性子星の表面付近で起きる水素・ヘリウム不安定核燃焼であると考えられている。X 線バースト天体では、速い陽子捕獲反応と $\beta$ 崩壊を繰り返す rp 過程が発生するため、陽子過剰な重元素(p 核)の有力なサイトである。現在、115 個の X 線バースト天体が観測されているが、その中でも GS 1826-24 は連続アウトバーストの間に観測された光度曲線の形状が一定であるという点で、X 線バーストのモデル制限に便利な天体である。複数の先行研究で、GS 1826-24 のモデルを多数構築し、最終的に質量降着率や降着物質の組成など中性子星外部に関わるパラメータの制限が行われてきた (e.g., Johnston et al., 2020)。しかし、EOS を初めとした中性子星内部

に関わるパラメータの光度曲線への影響を調べた先行研究はこれまでになかった。

本研究では、性質が異なるいくつかの EOS に着目し、中性子星の内部構造をフルに含めた 1 次元熱的進化計算を、進化コード (Fujimoto et al. 1984) を用いて行う。単独・降着中性子星の冷却においては、特に核物質の対称エネルギーが小さく核子直接ウルカ過程を禁止する Togashi EOS (Togashi et al. 2017) に着目し、速い冷却過程を導入するため Muto et al. (1993) で提案された  $\pi$  凝縮を既存の EOS に考慮した。これまでの中性子星の質量・半径の観測と比較したところ、Togashi に  $\pi$  凝縮を組み込んだモデル (Togashi+ $\pi$ ) は概ね再現する一方、他の対称エネルギーの大きい EOS に  $\pi$  凝縮を組み込んだモデルは最も重要な 2 倍の太陽質量の観測を再現しなかった。これは、対称エネルギーの違いにより、Togashi+ $\pi$  EOS は中心密度に匹敵する高密度領域であり柔らかくならない一方、他の EOS では柔らかくなり最大質量が急激に下がるためである。

構築した EOS を用いて、単独・降着中性子星の冷却計算を行った。Togashi EOS に着目すると、元の EOS では核子直接ウルカ過程が起こらないことにより、低温の観測を説明できない。一方、Togashi+ $\pi$  EOS は  $\pi$  凝縮が起こることにより、ほぼ全ての観測を説明できない事がわかった。更に、比較的強い中性子超流動効果を考慮すると、 $\pi$  凝縮が抑制されてほぼすべての観測を説明できることがわかった。従って、対称エネルギーが小さい EOS は  $\pi$  凝縮を考慮すると質量・半径・温度の観測と整合するという結果が得られた。一方、他の EOS に関しては核子直接ウルカ過程が発生するため、 $\pi$  凝縮の必要がなさそうである。

最後に、 $\pi$  凝縮を考慮しない上記と同じ EOS を用い、88 核種の近似核反応ネットワークを用いて X 線バースト計算を行った。その結果、半径の大きい EOS のほうが、再起時間やピーク光度が大きくなることがわかった。これは中性子星の表面重力効果の違いによるものである。他方、重い中性子星ほど再起時間やピーク光度が大きくなることがわかったが、これは中性子星のニュートリノ光度の違いである。従って、再起時間やピーク光度と質量の関係において、表面重力効果とニュートリノによる冷却効果は相反していることがわかる。さらに、観測されている GS 1826-24 の光度曲線との比較も行った結果、半径が大きい EOS は棄却される傾向にあることがわかった。

再起時間やピーク光度とは対照的に、降着に対する核反応の促進具合を表すバーストパラメータ  $\alpha$  はニュートリノ光度に依存せず、表面重力のみで決まることもわかった。 $\alpha$  が大きいと生成される p 核の生成量も増えると期待されるが、実際に最終生成物の EOS 依存性を調べたところ、半径が小さい (つまり表面重力が大きい) EOS ほど、rp 過程の滞留点である  $^{64}\text{Ge}$  以降の重い p 核が多く生成されていることがわかった。