

微視的狀態方程式を用いた 高速回転する中性子星の内部構造の理論的研究

東京科学大学大学院理学院物理学系物理学コース 博士後期課程 1 年 (助成時)

同上 博士後期課程 2 年 (現 在)

KWON Hyukjin

1. 研究の背景と目的

中性子星は、地球上では実現不可能な極限状態を有する天体であり、その観測技術の発展は、原子核相互作用をさまざまな密度領域へ拡張し、その精密性を研究する重要な手がかりとなる。中性子星の内部構造の計算は、原子核相互作用理論に基づいて圧力と密度の関係、すなわち状態方程式を求め、その後天体の平衡状態を計算することで行われる。こうして得られた理論値を観測データと比較することで、異なる密度領域における原子核相互作用モデルの有効性および精密を評価することが可能となる。

核力を記述するさまざまなモデルは、このような過程を通じて検証および改良が進められてきたが、その多くは回転しない単体の平衡状態を記述する Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) 方程式に基づいている [1]。しかしながら、実際の中性子星の観測データは、それらが回転していることを示しており、より正確な理論計算のためには回転効果を取り入れる必要がある。

回転する中性子星の計算には、軸対称なアインシュタイン方程式を直接数値的に解く必要があり、その代表的な手法として Komatsu-Eriguchi-Hachisu (KEH) 法が知られている [2]。本研究の目的は、KEH 法を数値的に実装し、観測データに基づく原子核相互作用モデルへの制約を与えると同時に、核物質の性質と中性子星の構造との関連性を明らかにすることである。

2. 研究成果

・ 回転を考慮に入れた状態方程式制約

本研究では、原子核物理学分野で非相対論的平均的モデルとして広く用いられている Skyrme および Gogny 相互作用に基づき実際に観測された中性子星の回転速度を導入して計算を行い、より精密な状態方程式の制約を与えた [3,5]。同一の原子核相互作用モデルにおいては、回転速度の増加に伴い、遠心力の影響によって赤道半径および最大質量が増加することが確認された。この傾向は高速回転ほど顕著であり、特に 400Hz 以上の回転速度を持つ場合には、回転の有無を考慮するか否かが無視できない差異をもたらすことが明らかとなった。一方で、低速回転の場合には中性子星の半径および質量は増加するものの、その変化は極めて小さく、状態方程式の制約に対して本質的な影響を与えないことが確認された。

・核物質の特徴と中性子星の回転効果の関連性

地上実験によって得られる核物質特性のうち、対称エネルギーの傾き (L 値) は、非対称核物質 (陽子数と中性子数が異なる系) において状態方程式に直接的な影響を与える重要な物理量である。本研究では、この対称エネルギーの傾きが、中性子星の回転に伴う半径増加と一定の比例関係を持つことを確認した [3]。この関係が純粋に L 値の効果によるものかを検証するため、他の核物質特性 (状態方程式に影響を与え得る要因) を固定し、 L 値のみを変化させた OMEG 状態方程式を用いて計算を行った [4]。その結果、 L 値が大きいほど、1.4 太陽質量の中性子星において回転による半径増加が大きくなることが明らかとなった。図 1 に示すように、OMEG1 が最も大きな L 値を持ち、次いで OMEG2、OMEG3 の順となっている。

・摂動的な回転中性子星計算方法の限界

回転する中性子星の計算手法の一つとして、低速回転を仮定した摂動的な手法である Hartle–Thorne (HT) 法が知られている。しかしながら、この摂動法の適用限界および有効範囲については、これまで十分に明確化されてこなかった。本研究では、KEH 法と HT 法の双方を用いて計算を行い、両者の結果を比較することで摂動的な手法の適用限界を評価した [4]。その結果、回転周波数が 200Hz を超える領域において、両手法の間に顕著な差異が現れ始めることを明らかにした。

3. まとめ

本研究では、回転を考慮した中性子星の構造計算により、状態方程式への影響とその制約を評価した。特に高速回転では半径や最大質量に顕著な変化が生じ、回転効果が重要であることを示した。さらに、対称エネルギーの傾きと回転による半径増加の相関を明らかにした。加えて、Hartle-Thorne 法の適用限界が約 200Hz 付近にあることを示した。

[1] J. R. Oppenheimer, and G. M. Volkoff, Phys. Rev., **55**, 374 (1939).

[2] H. Komatsu, Y. Eriguchi, and I. Hachisu, MNRAS, **237**, 355 (1989).

[3] **H. Kwon**, and K. Sekizawa, Minor revision in Phys. Rev. C.

[4] **H. Kwon**, *et al.*, Accepted in Astrophysical Journal.

[5] **H. Kwon**, and K. Sekizawa, Accepted in INPC Proceedings at Eur. Phys. J.

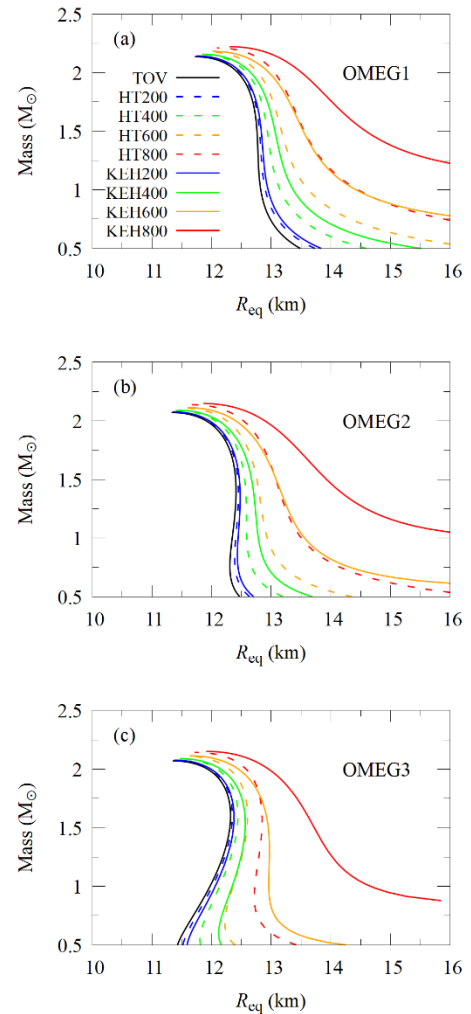


図 1. 回転効果を考慮に入れた中性子星の質量—半径関係