

O-16

中性子星の最大質量と小質量 X 線連星の進化

The maximum mass of neutron stars and the evolution of low-mass X-ray binaries

○栗山一彦¹, 岩本弘一²

*Kazuhiko Kuriyama¹, Koichi Iwamoto²

Abstract: We can calculate the maximum mass of neutron star(NS) by using the mass conservation equation, TOV equation, and the equation of state(EOS). However, there remains a large uncertainty in the EOS because of the unknown properties of nuclear forces. Thus, the mass of NS predicted so far varies from 1.5 to 2.5 solar masses. The mass of pulsar J1614-2230, determined to be 1.97 ± 0.04 solar masses by radio observations, provided new constraints on the EOS.

In this study, we investigate structure of NS with EOS allowed by such recent observations.

1. はじめに

中性子星の限界質量は、質量保存の式、TOV 方程式、状態方程式の 3 つによって求めることができる。しかし、状態方程式は核力の制限を受けるために、まだ多くの不明な点がある。そのため、中性子星の限界質量はそれぞれの理論によって異なり $1.5M_{\odot} \sim 2.5M_{\odot}$ の開きがある。また、2010 年の観測により、pulsar J1614-2230 が質量 $1.97 \pm 0.04M_{\odot}$ と計測され、状態方程式は新たに制限を加えられた。

本研究では、中性子星の温度を $T=0$ と仮定し、強い相互作用の制限を考慮した状態方程式に対する中性子星の構造を考える。そしてそれぞれの状態方程式が中性子星の限界質量と半径にどのように影響するか考察する。

2. 中性子星の内部

中性子星は自己重力を中性子の縮退圧によって支えている天体である。その内部は、いくつかの特徴的な層からできている (Figure.1)。密度が $10^9 \sim 4.3 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3}$ の層は電子捕獲による原子核の中性子化が進む。密度が $4.3 \times 10^{11} \text{ g cm}^{-3} \sim 2 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$ の層では、中性子の化学ポテンシャルが正になり、自由中性子が存在するようになる。これ以上の密度の層は陽子の化学ポテンシャルも正になり、自由陽子も存在するようになる。すなわち、原子核は溶けてしまう。中性子星の中心近くのインナーコアは密度が極めて高いので、凝縮した π 中間子や K 中間子、ハイペロンが存在すると考えられている。

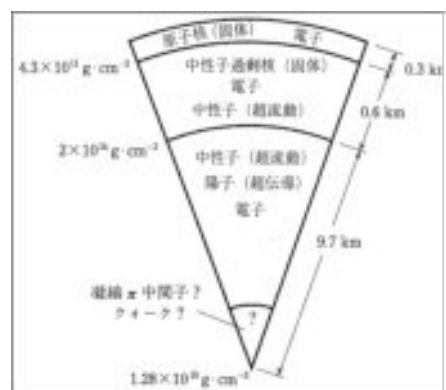


Figure.1 Pattern diagram of a cross-section of the neutron star

3. TOV 方程式と質量保存の式

中性子星は半径が重力半径に近い極めて高密度な天体であるため、一般相対論の効果を検討した重力平衡の式を用いなければならない。これは静的な球対象の時空の計量と、密度と圧力が半径の関数になる完全流体のエネルギー-運動量テンソル T^i_j を仮定し、これらを重力場の方程式

$$R^i_j - \frac{1}{2}R\delta^i_j = \frac{8\pi G}{c^4}T^i_j \quad (1)$$

に代入する。ただし R^i_j はリッチテンソルであり、 R はスカラー曲率である。中性子星の外側はシュバルツシルト計量になる条件を考えることによって得られた各成分の式から dp/dr の項を求めると、

$$-\frac{dp}{dr} = \frac{G\{\rho + (p/c^2)\}\{M(r) + 4\pi r^3(p/c^2)\}}{r^2\{1 - \frac{2GM(r)}{rc^2}\}} \quad (2)$$

1 : 日大理工・院 (前)・物理、 2 : 日大理工・教員・物理

となる.これは非相対論的重力平衡の式の一般相対論的な拡張になっていて,TOV 方程式(Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation)と呼ばれている.一方,同じく重力場の方程式から得られる質量保存の式は非相対論的な式と全く同じになる.

4. 中性子星の限界質量

中性子物質は理想気体として扱えず,密度が核密度以上になると強い相互作用の効果を考慮しなければならない.さまざまな理論による状態方程式によって計算された中性子星の半径と質量の関係を図2に示す.ローマ字はそれぞれ異なった状態方程式の場合に対応する.各曲線のピークより右側の部分は安定した中性子星に対応している.ピークの左側は,重力半径に近づきなり不安定となる.図3は観測によって求められた各パルサーの質量であり,1.4 M_{\odot} 程度に集中していることから,中性子星の半径はだいたい10km~15kmだということがわかる.また,質量が2.0 M_{\odot} の pulsar J1614-2230を支えられるのはこの表ではMFのみであることもこの図からわかる.

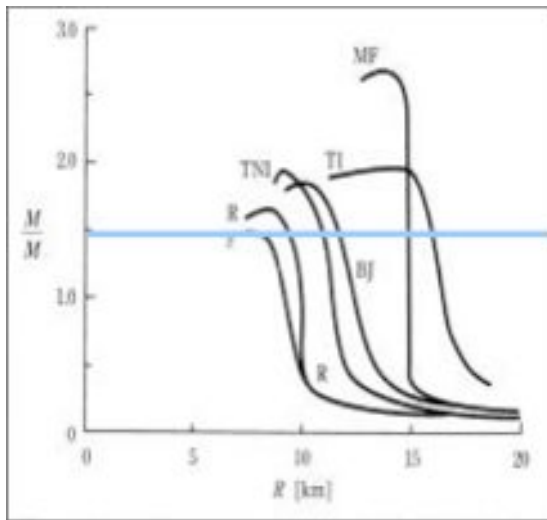


Figure.2 Gravitational mass and radius for various model from equation of state.

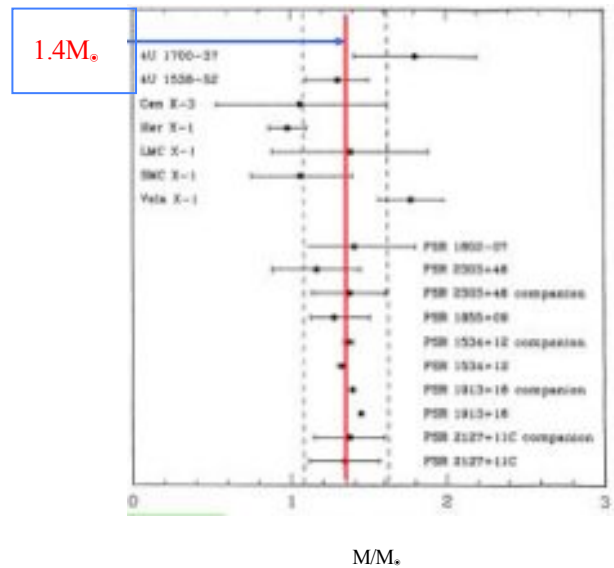


Figure.3 Mass of neutron star

5. 今後の課題

近接連星系中に存在する中性子星は小質量 X 線連星として観測されている.このような中性子星は伴星からの質量降着により質量が増大する可能性がある.また,降着する水素とヘリウムの燃焼により中性子星が加熱され,熱伝導により表面から内部へ熱が伝わる.そのため中性子星の内部の温度も上昇する.そのため,有限温度の状態方程式を用いて中性子星の構造を計算し,最大質量や半径への影響を調べる必要がある.そして,小質量 X 線連星の進化を考察していきたい.

6. 参考文献

- [1] Bethe and Johnson: "Dense Baryon Matter Calculations with Realistic Potentials" *Nucl. Phys. A*, Vol. 230, pp.1, 1974.
- [2] P. B. Demorest et al: "A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay" *nature*, Vol.467, pp.1081~1083, 2010.
- [3] Baym and Pethick: "Physics of Neutron stars" *Ann. Rev. Astron. Astrophysics*. Vol.17, pp.415, 1979.
- [4] Pandharipande and Smith: "Nuclear Matter Calculations with Mean Scalar Fields," *Phys. Lett. B* Vol,59, pp.15, 1975