

中性子星の構造と高密度物質の状態方程式 Structure of Neutron Stars and Equation of State of high-density Matter

○岩井 佑介¹, 岩本 弘一²
Yusuke Iwai¹, Koichi Iwamoto²

Abstract: The neutron star is an extremely dense star supported by the pressure of degenerate neutrons and other forms of nuclear matter. The structure of neutron stars depends on the equation of state (EOS) for the nuclear matter. However, there are large uncertainties in the EOS for high-density nuclear matter, and various theories have been proposed for that. We use the EOS by Shen et al., which is one of the EOSs commonly used for neutron stars. We compare calculated structure of neutron stars, such as density, radius, and mass for various temperatures. Then we study how these factors relate to the thermal evolution and the stability of neutron stars.

1. はじめに

中性子星は中性子の縮退圧によって支えられる星として考案された。その構造は核物質の状態方程式 (EOS) に依存する。しかし、中性子星は極めて高密度な天体で、高密度状態の核物質の状態方程式はまだ未知な部分が多く、現象論的なアプローチによる様々な理論が提案されている。また中性子星は超新星爆発によって非常に高温な状態で誕生すると考えられている。さらに中性子星が誕生し、進化過程 (冷却過程) においてブラックホールへとなる可能性も示唆されている[1]。本研究では、中性子星の有限温度での状態方程式の一つとしてよく用いられる Shen et al.による状態方程式を用いて、半径や密度、質量などを計算し、内部温度が中性子星の構造や進化過程にどのように関与するか検討する。

2. TOV 方程式と質量保存の式

静的で球対称である時空の計量は、球座標

$$x^0 = ct, x^1 = r, x^2 = \theta, x^3 = \phi \quad (1)$$

を用いて考えると、

$$ds^2 = -e^{\nu(r)}(cdt)^2 + e^{\lambda(r)}dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \quad (2)$$

となる。ここで s は世界長さであり、 c は光速である。また計算を簡単にするため、未知関数 $\lambda(r)$ と $\nu(r)$ を導入した。中性子星を構成する物質を完全流体とし、アインシュタイン方程式を具体的に書くと次のような 3 式が得られる。

$$e^{-\lambda} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{\lambda'}{r} \right) - \frac{1}{r^2} = \frac{8\pi G}{c^4} (-\rho c^2) \quad (3)$$

$$e^{-\lambda} \left(\frac{\nu'}{r} + \frac{1}{r^2} \right) - \frac{1}{r^2} = \frac{8\pi G}{c^4} P \quad (4)$$

$$\frac{1}{2} e^{-\lambda} \left(\nu'' + \frac{\nu'}{2} + \frac{\nu' - \lambda'}{r} - \frac{\nu'\lambda'}{2} \right) = \frac{8\pi G}{c^4} P \quad (5)$$

ここで G は重力定数、 P は圧力を示す。(2)式がシュバルツシルト解に一致するような $\lambda(r)$ を定義する。

$$e^{-\lambda(r)} = 1 - \frac{2GM(r)}{c^2 r} \quad (6)$$

(3)式に(6)式を代入することで、質量保存則

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (7)$$

が得られる。これは非相対論的と同じ形である。

(3)式から(6)式を整理すると、一般相対論的な重力平衡の方程式である Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation (TOV 方程式)[2]が得られる。

$$-\frac{dP(\rho)}{dr} = \frac{G \left\{ \rho(r) + \frac{P(r)}{c^2} \right\} \left\{ M(r) + 4\pi r^3 \frac{P(r)}{c^2} \right\}}{r^2 \left\{ 1 - \frac{2GM(r)}{rc^2} \right\}} \quad (8)$$

3. Shen の状態方程式

本研究で用いる Shen の状態方程式(EOS2)[3]では、相対論的平均場(RMF)での一様な物質と非一様な物質について計算している[4][5]。非一様な物質の計算には Thomas-Fermi 近似を用いている。はじめに RMF 理論のラグランジアンについて簡単に記述する。

$$\mathcal{L}_{RMF} = \bar{\psi} [i\gamma_\mu \partial^\mu - M - g_\sigma \sigma - g_\omega \gamma_\mu \omega^\mu - g_\rho \gamma_\mu \tau_a \rho^{a\mu}] \psi + \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\omega^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} g_2 \sigma^3 - \frac{1}{4} g_4 \sigma^4$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{4}W_{\mu\nu}W^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega_\mu\omega^\mu + \frac{1}{4}c_3(\omega_\mu\omega^\mu)^2 \\
 & -\frac{1}{4}R_{\mu\nu}^a R^{a\mu\nu} + \frac{1}{2}m_\rho^2\rho_\mu^a\rho^{a\mu} \quad (9)
 \end{aligned}$$

ϕ は質量 M (陽子+中性子)の SU(2)バリオン場で、 $\sigma, \omega^\mu, \rho^{a\mu}$ は各々に質量 $m_\sigma, m_\omega, m_\rho$ を伴う σ, ω, ρ の中間子場である。 $W^{\mu\nu}$ と $R^{a\mu\nu}$ は ω^μ と $\rho^{a\mu}$ に対しての反対称場テンソルで

$$W^{\mu\nu} = \partial^\mu\omega^\nu - \partial^\nu\omega^\mu \quad (10)$$

$$R^{a\mu\nu} = \partial^\mu\rho^{a\nu} - \partial^\nu\rho^{a\mu} + g_\rho\epsilon^{abc} \quad (11)$$

と定義される。定数 $g_\sigma, g_\omega, g_\rho$ は中間子と核子間の相互作用の結合定数で、係数 g_2 と g_3 は σ 中間子場についての自己結合定数、 c_3 は ω 中間子場に対する自己結合定数である。

このラグランジアンは中間子質量、結合定数、自己結合定数というパラメータを有しており、これらパラ TM1 パラメータ[6](Table 1.)を適応することで、不安定な核子を含む重い原子核の特性を再現し、歪んだ形状の原子核の研究の実験に基づくデータとも満足に一致する。

Parameter	TM1
M [MeV]	938.0
m_σ [MeV]	511.1977
m_ω [MeV]	783.0
m_ρ [MeV]	770.0
g_σ	10.02892
g_ω	12.61394
g_ρ	4.63219
g_2 [fm ⁻¹]	-7.23247
g_3	0.61833
c_3	71.30747

Table 1. Parameter set TM1 for the RMF Lagrangian

次に、非一様な物質の計算に用いる Thomas-Fermi 近似について述べる。 $T < 14$ MeV, $\rho_B < 10^{14.2}$ g/cm³ の領域では自由エネルギーの低下により重い原子核が形成されると考えられている。これに対する EOS は Oyamatsu による研究をベースにした Thomas-Fermi 計算 [7] を用いている。非一様な物質は中性子、陽子、 α 粒子、そして重い原子核の単一種の混合物とモデルできる。またこの EOS では、バリオンの寄与のみ考えている。

重い球状の原子核は中性子、陽子、 α 粒子のガスから成り、電荷的に中性なセルの中心に位置すると仮定

し、原子核はクーロン格子エネルギーを最小化するために体心立方格子構造 (BCC) を形成する。単位セル当たりのエネルギーを簡単にするため、Wigner-Seitz cell を導入する。Wigner-Seitz cell は球状で、体積は BCC の単位セルと同じである。格子定数 a を以下のようなセルの体積の立方根と定義する。

$$V_{\text{cell}} = a^3 = N_B/n_B \quad (12)$$

ここで、 N_B と n_B は各々の単位セル当たりのバリオン数と平均バリオン数で、 $n_B = n_p + n_n$ である。

4. 今後の展望

誕生直後の中性子星の冷却や質量降着により、中性子星がブラックホールになる場合と、そのまま中性子星として残る場合の質量などの分岐点や割合を検討したい。現実的な内部温度の分布を考慮し、冷却による熱的進化の影響を調べることで、より詳細に現実的な中性子星の構造などを求めることができると期待される。

5. 参考文献

- [1] J.M. Lattimer and M Prakash, Phys. Rep. **442**, 109(2007).
- [2] 佐藤 勝彦 著, 長岡 洋介, 原 康夫 編, 「相対性理論」(岩波基礎物理シリーズ 9), 岩波書店.
- [3] <http://user.numazu-ct.ac.jp/~sumi/eos/#shen2011>, Shen EOS tables (2011), EOS2: Improved Shen EOS in 2011 (updated version of EOS1), main table, eos2.tab.gz.
- [4] H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu, and K. Sumiyoshi “User Note for Relativistic” guide EOS2.pdf (2011) <http://user.numazu-ct.ac.jp/~sumi/eos/#shen2011>
- [5] H. Shen, H. Toki, K. Oyamatsu, and K. Sumiyoshi, Nucl. Phys. A637, 493 (1998).
- [6] Y. Sugahara and H. Toki, Nucl. Phys. A579, 557 (1998).
- [7] K. Oyamatsu, Nucl. Phys. A561, 431 (1993).