

Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars

益田晃太^{A,B}、初田哲男^B、高塚龍之^B
東大理^A、理研^B

概要

ハイペロンを含むハドロン相からストレンジクォークを含むクォーク相へのクロスオーバーを仮定した状態方程式を用いて中性子星の物理について議論する。(i) クロスオーバーが比較的低密度 ($(3-4)\rho_0$ (ρ_0 :原子核密度)) で生じ、(ii) クォーク相が強く相互作用している、という2つの条件下でクォーク相の影響により、 $2M_\odot$ を超え得ることを示す。これは高密度におけるエキゾチックな成分の出現による一般的な状態方程式の軟化と反する結果である [1,2]。またカラー超伝導相の持つ効果についても議論する。

1 はじめに

2010年に観測された $(1.97 \pm 0.04)M_\odot$ の中性子星 (PSR J1614-2230) の存在は EOS に強い制限を与え、特にコア部分にエキゾチックな成分が存在する可能性について疑問符を与える [3]。従来、ハイブリッド星の研究はハドロン相とクォーク相を1次相転移を仮定し接続してきたが、本研究ではハドロン相のパーコレーション描像に立ち、クロスオーバー接続を試みる。その際、中性子星内部で実現する高密度状況下ではハイペロン (s-quark) が存在すると思われるため、その効果を取り入れたハドロン相 (クォーク相) を扱う。ハドロン相においては核子間に働く三体力をハイペロンを含むバリオン間に拡張し、ブルックナーハートリーフォック方程式から得られる状態方程式を採用した [4]。

2 クォーク相状態方程式

ストレンジを含むクォーク相における状態方程式を構築する。0Kにおいてハドロン-クォーククロスオーバーが予測される原子核密度の数倍の領域ではクォーク同士はまだ強く相互作用することが予測される。また高密度では負符号問題により量子色力学 (QCD) の格子上の場の理論 (格子 QCD) による数値計算は扱えないため、本研究ではカイラル対称性の自発的破れを導く QCD の低エネルギー理論である (2+1) フレーバー南部-ヨナ・ラシーニョ (NJL) 模型を用いる (u, d, s, e^-, μ^-)。用いるラグランジアンは

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{NJL}} = & \bar{q}(i\not{\partial} - m)q + \frac{G_S}{2} \sum_{a=0}^8 [(\bar{q}\lambda^a q)^2 + (\bar{q}i\gamma_5\lambda^a q)^2] \\ & + G_D [\det\bar{q}(1 + \gamma_5)q + \text{h.c.}] - \frac{g_V}{2} (\bar{q}\gamma^\mu q)^2, \end{aligned} \quad (2.1)$$

とする (ここで i はフレーバー、 λ は Gell-Mann 行列、 m はカレント質量)。第2項はスカラー型4フェルミ相互作用、第3項は $U_A(1)$ 対称性を破る Kobayashi-Maskawa-'t Hooft (KMT)6 フェルミ相互作用を表す。第4項は現象論的ベクトル型4フェルミ相互作用を意味し、ここではフレーバーに依存しないクォーク間にユニバーサルに効く斥力を与えるモデルを採用する。 g_V の大きさは決まっていないが、先行研究に従い [5]

$$0 \leq \frac{g_V}{G_S} \leq 1.5 \quad (2.2)$$

の範囲で動かすことにする。このモデルの下、電荷的中性と β 平衡の条件を課し、状態方程式を計算する。

3 クロスオーバー

ハドロン相とクォーク相のクロスオーバー接続を試みる。クロスオーバーを特徴付ける 2 つのパラメータとして典型的クロスオーバー密度 $\bar{\rho}$ と幅 Γ を用意し、既に研究されている 0 密度有限温度状況下での両相のスムーズな現象論的接続を模倣し [6]、

$$P = P_H \times f_- + P_Q \times f_+, \quad (3.1)$$

$$f_{\pm} = \frac{1}{2} \left(1 \pm \tanh \left(\frac{\rho - \bar{\rho}}{\Gamma} \right) \right) \quad (3.2)$$

のような接続を試みる (P_H :ハドロン相圧力、 P_Q :クォーク相圧力)。エネルギー密度 ε は熱力学的関係式より求める。 $\bar{\rho}$ と Γ はパラメータであるが以下の 2 つの条件下でふる:(i) 熱力学的安定条件 $dP/d\rho > 0$ 、(ii) 原子核密度でハドロン相成立 $\bar{\rho} - 2\Gamma > \rho_0$ 。

4 結果

求めた状態方程式を用い Tolman-Oppenheimer-Volkov 方程式を解く。 $g_V = G_S, (\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$ の場合の様々なハドロン相 (左図)、今回構築した状態方程式 (右図) から計算される $M - R$ relation を図 1 に示す。図から見て取れるようにクロスオーバーを仮定した場合確かに強く相互作用するクォークを含む中性子星の方がハドロン相のみの中性子星よりも重くなり得、更に観測事実にも耐え得る。また最大質量は

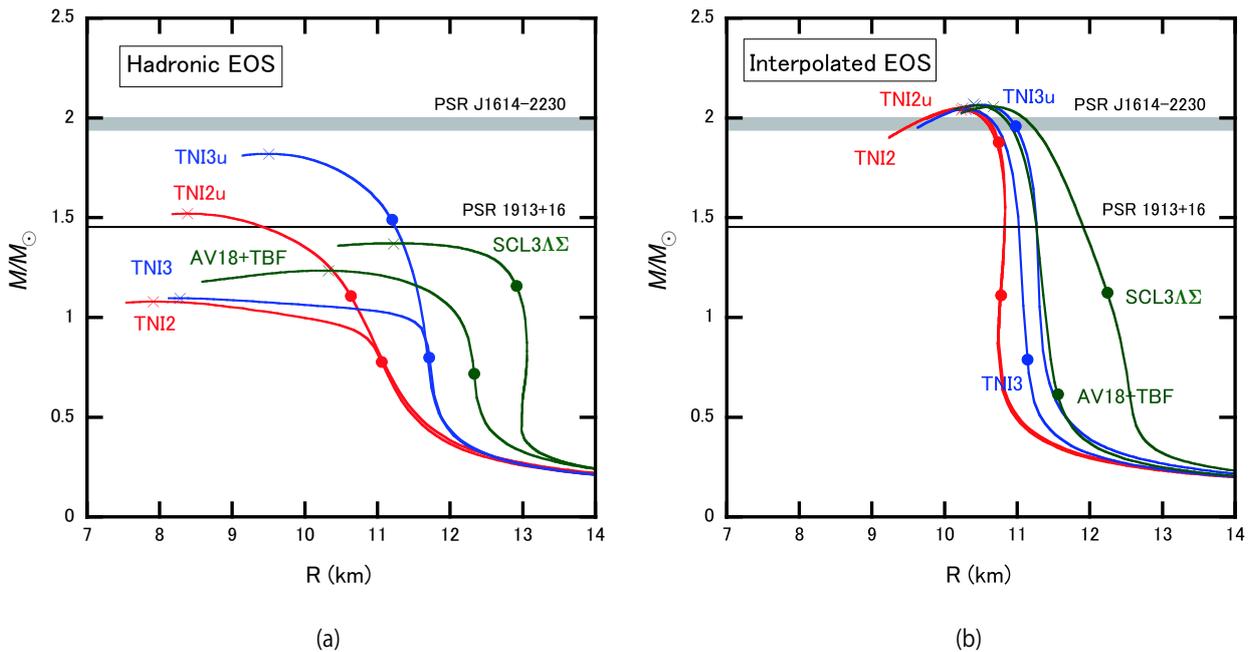


図 1 様々なハドロン相を仮定した場合の M-R relation ($g_V = G_S, (\bar{\rho}, \Gamma) = (3\rho_0, \rho_0)$) 左図はハドロン相のみ、右図は今回構築した状態方程式により支えられる中性子星を意味する。

クォーク相 (ベクトル型相互作用の強さ) が決めるが半径はハドロン相がハドロン相が決めることも見て取れる。

5 カラー超伝導

式 (2.1) に

$$\frac{H}{2} \sum_{A=2,5,7} \sum_{A'=2,5,7} (\bar{q} i \gamma_5 \tau_A \lambda_{A'} C \bar{q}^T) (q^T C i \gamma_5 \tau_A \lambda_{A'} q) \quad (5.1)$$

を加えることで $J^P = 0^+$ のダイクォーク凝縮を考えることが出来る。 H の強さにより現れる相が異なる (弱い場合高密度で CFL 相が出現、強い場合中間密度で 2SC、高密度で CFL が現れる) が、状態方程式のかたさに与える影響は微小なものであり最大質量を $0.1M_\odot$ 程減少させるのみであった。今後は中性子星内部で実現する可能性があるより多くの凝縮形態も考慮にいれ、特に超伝導状態が大きく影響を及ぼすと考えられる輸送現象 (冷却等) について考察する予定である。

6 まとめ

本研究により強く相互作用するクォーク相の影響が比較的低密度から生じる場合、エキゾチックな成分を含む中性子星でも $2M_\odot$ を超え得る可能性が示唆された。状態方程式のかたさはクォーク相によって支配され、一方半径はハドロン相によって支配される。また、ユニバーサル三体力はハイペロンの出現を遅らせる効果をもつため、中性子星の冷却を論ずる時には重要な役割を果たす。またカラー超伝導の効果も取り入れた場合、状態方程式のかたさはあまり変わらないが、冷却の速さは大きく変わることが予想される。今回のクロスオーバーを仮定した模型の有限温度への拡張も予定している。

参考文献

- [1] K. Masuda, T. Hatsuda, and T. Takatsuka. Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars with Strangeness. *Astrophys.J.*, 764:12, 2013.
- [2] K. Masuda, T. Hatsuda, and T. Takatsuka. Hadron-quark crossover and massive hybrid stars. *PTEP*, 2013(7):073D01, 2013.
- [3] P. B. Demorest, T. Pennucci, S. M. Ransom, M. S. E. Roberts, and J. W. T. Hessels. A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay. *NATURE*, 467(7319):1081–1083, OCT 28 2010.
- [4] S Nishizaki, Y Yamamoto, and T Takatsuka. Hyperon-mixed neutron star matter and neutron stars. *PTP*, 108(4):703–718, OCT 2002.
- [5] N. M. Bratovic, T. Hatsuda, and W. Weise. Role of Vector Interaction and Axial Anomaly in the PNJL Modeling of the QCD Phase Diagram. *Phys.Lett.*, B719:131–135, 2013.
- [6] M Asakawa and T Hatsuda. What thermodynamics tells us about the QCD plasma. *Phys.Rev.D*, 55(7):4488–4491, APR 1 1997.