

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287066

研究課題名(和文)理論と観測の連携による中性子星構造論の新展開

研究課題名(英文)New Frontier on Neutron Star Structure from Theoretical and Observational Points of View

研究代表者

初田 哲男(Hatsuda, Tetsuo)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・主任研究員

研究者番号：20192700

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：誕生直後の熱い中性子星、および冷却が進んだ冷たい中性子星について、その半径・質量・温度分布・密度分布・音速分布などのバルクな性質を、ハドロン-クォーク クロスオーバーの観点から詳細に検討した。特に、原子核密度以下から原子核密度の10倍に至る広い領域で有効な、現象論的状態方程式"CRover"を構築し、2倍の太陽質量以上の中性子星が説明可能であること、半径が12.5km付近に集中することを示した。有限温度のCRoverを用い、中性子星内部の強相関クォーク物質が中心温度を下げることを示した。熱い中性子星がニュートリノ放出する過程で解放される重力エネルギーや回転数増加についての定量的評価も行った。

研究成果の概要(英文)：Bulk properties of hot and cold neutron stars (such as the radius, mass, temperature/density profile, and sound velocity profile) were studied from the point of view of the hadron-quark crossover. A new equation of state "CRover", which can treat the matter from subnuclear densities to 10 times the nuclear matter density, was formulated. Using CRover, possible origin of 2 solar mass neutron stars was studied extensively. The radius of the neutron stars are found to be centered around 12.5km for CRover. We have also studied the hot neutron stars on the basis of a finite temperature CRover: Under the isentropic condition, we found that the internal temperature of the massive neutron stars decrease due to the appearance of the strongly interacting quark matter in the core region. Quantitative analysis on the release of the gravitational energy and the spin-up rate during the course of the cooling stage of the neutron stars by the neutrino emission was also carried out.

研究分野：ハドロン物理学

キーワード：中性子星 高密度物質 量子色力学

1. 研究開始当初の背景

中性子星の内部には原子核が融解した極低温の中性子液体層が存在しており、さらに内核ではハイペロン物質やクォーク物質が出現している可能性がある。近年の観測データ（以下の(A)-(D)）により、これらを定量的に研究できる可能性が出てきた：(A)パルサー周期が伴星の重力場で変調を受けるShapiro delay を利用した観測で、太陽質量の 1.97 ± 0.04 倍という大質量中性子星(J1614-2230)が発見された。(B)中性子星表面の熱核反応に由来するX線バーストの時間変化の解析から、中性子星の質量Mと半径Rを単一の中性子星について同時に決める手法が整備され、観測データのみに基づいたM-R関係が描けるようになってきた。(C)新星残骸Cassiopeia Aの中心に発見された中性子星について、2000年から2009年間の表面温度の変化がX線衛星チャンドラの観測データから引き出された。(D)パルサーの回転周期とその時間変化から、表面磁場が 10^{15} [G]に匹敵する強磁場を持つ中性子星(マグネター)の観測例が蓄積されてきた。

2. 研究の目的

中性子星の中心核は 10^{12} kg/cm³を超える超高密度状態にあり、核子超流動と量子渦、ハイペロン物質、中間子のボース・アインシュタイン凝縮、クォーク物質とカラー超伝導などさまざまな量子物質相が発現すると考えられている。近年、中性子星内部の研究は、ここ数年間の電波やX線の新しい観測結果・新しい解析により、大きく飛躍を始めている。本研究では、この機会を捉え、強相関物質に関する原子核物理・ハドロン物理の理論的知見と新しい観測データをもとに、中性子星内部構造の総合的解明を図る。

3. 研究の方法

中性子星内核では、中性子物質やハイペロン物質がクォーク物質に転移している可能性がある。しかしながら、格子QCDのモンテカルロシミュレーション技法が低温高密度で負符号問題のために破綻することから、いまだこの量子相転移の実態は謎のままである。一方、最近の太陽質量の2倍の重さを持つ中性子星の発見は、中性子星中心核の状態方程式が予想以上に硬いことを示唆している。高密度でのクォーク相への転移と硬い状態方程式は従来矛盾する概念であると考えられてきたが、ハドロンからクォークへのなめらかなクロスオーバーがおり、かつ、クォーク相の状態方程式が非摂動的に相互作用しているならば、両者が矛盾しない解がありうる。中性子星内部でのクォーク化学ポテンシャルは数百MeVで、漸近自由性がなりたつほどには大きくないことを考えるとクォーク物質が強相関である可能性は高く、また複合粒子としてのハドロンからクォークへのパーコレーションを考えればクロスオーバーの可能性が理論的にも期待できる(図1)。

本研究では、低密度では、従来のハドロン物質の状態方程式を、高密度では強相関するクォーク物質を記述する有効理論から求めた状態方程式を用い、両者を熱力学的に矛盾のない形で内挿することで、全密度領域で適用可能な新しい状態方程式を構築し、それを用いた中性子星の構造論を展開した。

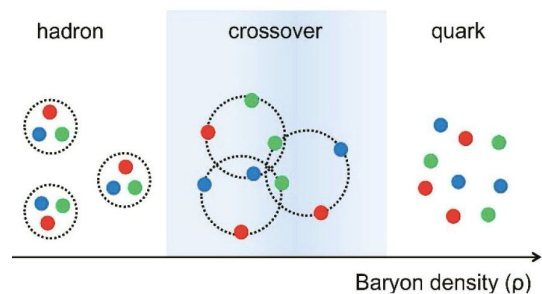


図1: ハドロン-クォーククロスオーバーの模式図。

4. 研究成果

誕生直後の熱い中性子星、および冷却が進んだ冷たい中性子星について、その半径・質量・温度分布・密度分布・音速分布などのバルクな性質を、ハドロン-クォーク クロスオーバーの観点から詳細に検討した。特に、原子核密度以下から原子核密度の10倍に至る広い領域で有効な、現象論的状态方程式"CRover"を研究代表者の初田と連携研究者の高塚龍之氏および大学院生の益田晃太が協力して構築した。その圧力とエネルギー密度の関係を示したものが図2である。CSCは、から超伝導を意味する。

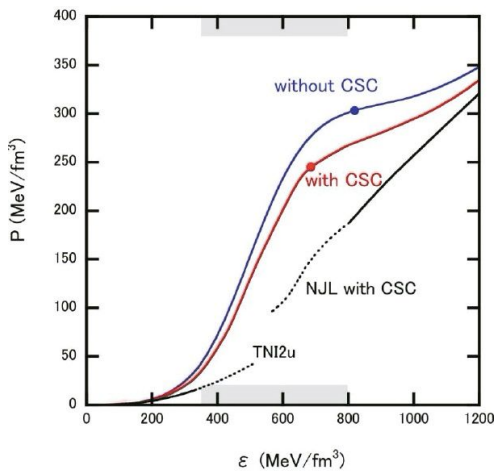


図2：ハドロン-クォーククロスオーバーを考慮した状態方程式の例。CSCは、から超伝導を意味する。

このような状態方程式に基づいて、2倍の太陽質量以上の冷たい中性子星が、通常原子核密度の数倍付近での状態方程式の急激な硬化により説明可能であることを見出した。また、この場合に、中性子星の半径が12.5km付近の極めて狭い領域に集中することを示した(図3)。さらに、有限温度でのCRoverを用いて、誕生直後の熱い中性子星の内部温度分布を求め、等エントロピー条件のもとでは、中性子星内部に現れる強相関クォーク物質のために、中心温度が減少することを示した。熱い中性子星がニュートリノ放出

する過程で解放される重力エネルギーや回転数増加についての定量的評価も行った。

図4には、CRoverを用いた場合の、典型的な熱い中性子星と冷たい中性子星の内部構造の違いが示されている。

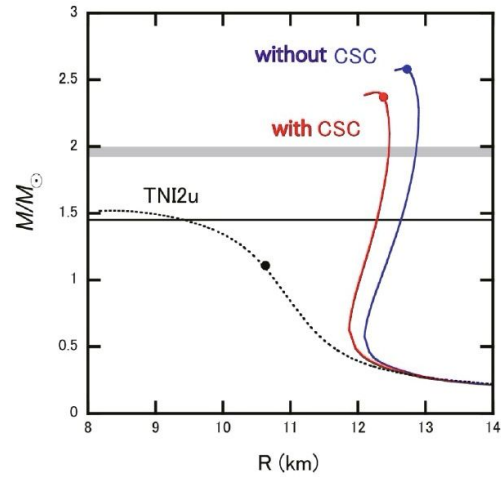


図3：ハドロン-クォーククロスオーバーを考慮した場合の、中性子星の質量(M)と半径(R)の関係。

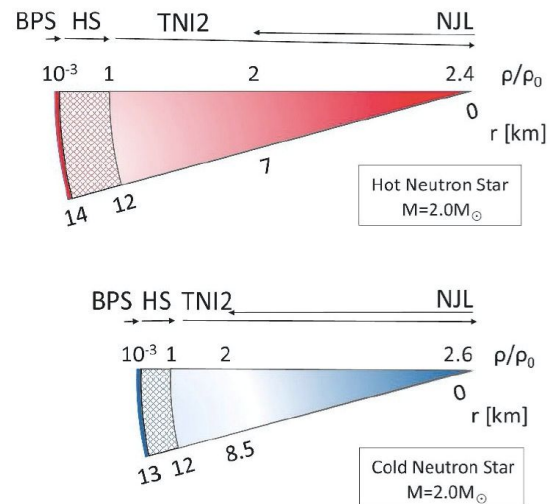


図4：ハドロン-クォーククロスオーバーを考慮した熱い中性子星と冷たい中性子星の内部構造。

有限温度でのCRoverを用いて、誕生直後の熱い中性子星の内部温度分布を求め、等エントロピー条件のもとでは、中性子星内部に現れる強相関クォーク物質のために、中心温度が減少することを示した。熱い中性子星がニュートリノ放出する過

程で解放される重力エネルギーや回転数増加についての定量的評価も行った。

さらに、強電場や強磁場中のハドロンの性質変化については、本科研費の研究支援員である服部恒一が中心となり、場の量子論に基づく一般論を展開するとともに、中間子やプラズマ中のクォークに対する影響を解析した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9件)

K.Masuda, T.Hatsuda and T.Takatsuka, "Hyperon Puzzle, Hadron-Quark Crossover and Massive Neutron Stars,"
Eur. Phys. J. A52, 65 (2016)
doi:10.1140/epja/i2016-16065-6

K.Masuda, T.Hatsuda and T.Takatsuka, "Hadron-quark crossover and hot neutron stars at birth,"
PTEP 2016, 021D01 (2016)
doi:10.1093/ptep/ptv187

Philipp Gubler, Koichi Hattori, Su Houng Lee, Makoto Oka, Sho Ozaki, Kei Suzuki, "D mesons in a magnetic field",
Phys. Rev. D93, 54026 (2016)
doi:10.1103/PhysRevD.93.054026

Koichi Hattori, Toru Kojo, Nan Su, "Mesons in strong magnetic fields: (I) General analyses",
Nucl. Phys. A951, 1 (2016)
doi: 10.1016/j.nuclphysa.2016.03.016

Kenji Fukushima, Koichi Hattori, Ho-Ung Yee, Yi Yin, "Heavy Quark Diffusion in Strong Magnetic Fields at Weak Coupling and Implications for Elliptic Flow",
Phys. Rev. D93, 74028 (2016)
doi: 10.1103/PhysRevD.93.074028

G. Baym, T. Hatsuda, "Polarization of Direct Photons from Gluon Anisotropy in Ultrarelativistic Heavy Ion Collisions",
PTEP 2015, 031D01 (2015)
doi:

<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptv024>

P. Gubler, N. Yamamoto, T. Hatsuda and Y. Nishida, "Single-particle spectral density of the unitary Fermi gas: Novel approach based on the operator product expansion, sum rules and the maximum entropy method",
Ann. Phys. 356, 467 (2015)
doi:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2015.03.007>

Koichi Hattori, Kazunori Itakura, Sho Ozaki, Shigehiro Yasui, "QCD Kondo effect: quark matter with heavy-flavor impurities",
Phys. Rev. D92, 65003 (2015)
doi: 10.1103/PhysRevD.92.065003

- 9 Sho Ozaki, Takashi Arai, Koichi Hattori, Kazunori Itakura "Euler-Heisenberg-Weiss action for QCD+QED",
Phys. Rev. D92, 16002 (2015)
doi: 10.1103/PhysRevD.92.016002

[学会発表](計 4件)

K. Masuda, "Hot Neutron Stars with Hadron-Quark Crossover",
Quark Matter 2015 (招待講演)(国際学会), 2015年09月30日~2015年10月03日, Kobe, Japan

K. Hattori, "Nonlinear QED effects on photon and dilepton spectra in supercritical magnetic fields",
New perspectives on Photons and Dileptons in Ultrarelativistic Heavy-Ion Collisions at RHIC and LHC (招待講演)(国際学会), 2015年11月30日~2015年12月11日, Trento, Italy

T.Takatsuka, K.Masuda and T.Hatsuda, "Massive Neutron Stars with Hadron-Quark Transition Core: phenomenological approach by 3-window model",
Quarks and Compact Stars, Oct.20-22, 2014, Beijing, China

T.Takatsuka, T.Hatsuda and K.Masuda, "Massive Hybrid Stars with Strangeness",
7th International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (CHIRAL 13), 27-30 Oct 2013, Beijing, China

6. 研究組織

(1) 研究代表者

初田哲男 (HATSUDA, Tetsuo)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
主任研究員
研究者番号：20192700

(2) 研究分担者 (H25 年度のみ)

中務孝 (NAKATSUKASA, Takashi)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
准主任研究員
研究者番号：40333786

(3) 連携研究者

高塚龍之 (TAKATSUKA, Tatsuyuki)
岩手大学・人文社会科学部・特任教授
研究者番号：50043427

ネドンパスカル (NAIDON, Pascal)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
専任研究員
研究者番号：70611979

玉川徹 (TAMAGAWA, Toru)
理化学研究所・仁科加速器研究センター・
准主任研究員
研究者番号：20333312