

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340052

研究課題名(和文) 高密度量子色力学と強結合冷却原子気体における量子相転移の統合的解明

研究課題名(英文) Unified approach to the quantum phase transitions in high-density QCD and ultracold atoms

研究代表者

初田 哲男 (Hatsuda, Tetsuo)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

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、(間接経費) 4,320,000円

研究成果の概要(和文)：中性子内部の高密度状態ではクォーク物質への転移や中間子凝縮相の可能性が考えられる。本研究では、ハドロン物理の研究者と原子分子物理の研究者が連携し、高密度QCDにおける諸相の統合的理解を目指し、(1)対称性に基づくQCD諸相の分類、(2)強結合クォーク物質と中性子星の構造、(3)多バリオン系に対する格子QCD計算、(4)冷却原子気体の量子ダイナミクス、についての理論的研究を進めた。その結果、高密度におけるハドロン相とクォーク相のクロスオーバー現象が中性子星質量にもたらす影響や、高密度物質における中間子凝縮相を双極型相互作用を持つ冷却原子/分子気体で再現できる可能性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Exotic phenomena such as the transition to quark matter and the meson condensation may occur in high density matter realized inside the neutron stars. In the present study, researchers in hadronic physics and atomic physics work together and investigate (1) the classification of the QCD phases, (2) strongly coupled quark matter and the neutron star structure, (3) lattice QCD simulations of the multi-baryon systems, and (4) quantum phenomena in cold atomic gasses. We have found that novel effect of the hadron-quark crossover to the mass of neutron stars, and also a possibility of simulating the meson condensation in dense hadronic matter by using cold atoms/molecules in the laboratory.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 ・ 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：高密度核物質 冷却原子気体 量子相転移

### 1. 研究開始当初の背景

量子色力学 (QCD) は、有限温度・有限バリオン密度において、様々な物質相を呈する。特に高温・低バリオン密度では、熱揺らぎによるエントロピー増加に伴い、ハドロン相からクォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 相への古典相転移が起こる。QGP の実験室での観測は、RHIC や LHC における相対論的重イオン衝突実験の主要テーマであり、強結合プラズマという観点から理論的・実験的研究が活発に行われている。一方、低温・高バリオン密度では、クォーク・グルオン多体系のエネルギーが最小となる配位が選ばれる事で、バリオン密度の変化に伴い様々な量子相転移が誘起される。一般に、量子相転移は古典相転移に比べ、量子ダイナミクスの詳細が重要になるので理論的解析が難しい。しかし、中性子星・超新星爆発・ブラックホール形成などの現象に関係して、高密度物質の状態方程式やその量子相転移の詳細を明らかにすることが急務の課題となっている。

### 2. 研究の目的

以上のような現状をふまえ、ハドロン物理の研究者が冷却原子物理の研究者と連携して、高密度 QCD と冷却原子気体における量子相転移の統合的理解を目指すことが目的である。特に

- (1) 対称性に基づく QCD 諸相の分類
- (2) 強結合クォーク物質と中性子星の構造
- (3) 多バリオン系に対する格子 QCD 計算
- (4) 冷却原子気体の量子ダイナミクスについての理論的研究を進める。

### 3. 研究の方法

理論的手法として、有効場の理論による解析的アプローチ、格子 QCD シミュレーションに基づく第一原理的アプローチ、高密度天体の観測データに基づく現象論的アプローチを併用して総合的に研究する。

### 4. 研究成果

(1) 対称性に基づく QCD 諸相の分類  
有限温度および有限バリオン密度における QCD は、さまざまな相変化を示すことが、格子 QCD 計算や、有効模型で調べられている。これまでに得られたさまざまな相構造を対称性と秩序変数の競合の観点から整理し、今後の研究の基礎とすべく総合報告 (文献 [18]) をまとめた。図 1 に示したように、中性子星中心部のような低温・高バリオン密度状態では、カイラル対称性の破れとカラー超伝導が競合した強結合物質が存在する可能性があることや、ハドロン相とクォーク相のクロスオーバー現象に関して、有効模型の観点から研究を行い、強結合クォーク物質中でのクォーク間有効斥力の大きさに関する評価を行った (文献 [5])。

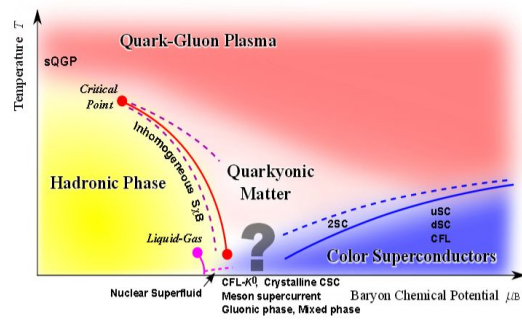


図 1 : 有限温度密度における QCD 相図の例。図は文献 [18] より転載。

(2) 強結合クォーク物質と中性子星の構造  
上記の解析で得られた定性的知見をもとに、2 - 4 倍の核密度領域でハドロン物質から強結合クォーク物質へ系がクロスオーバーする場合の状態方程式を現象論的に構築し、中性子星の質量-半径を求めた。その結果、ハドロン相の状態方程式の詳細によらず、太陽質量の 2 倍を超える中性子星が存在可能であり、2010 年のシャピロ遅延効果を用いた重い中性子星の発見と矛盾しない結果が得られた (図 2 および文献 [1][3])。特に、数倍の原子核密度で強相関するクォーク物質に転移することが重い中性子星を再現できる本質的理由であることがわかった。

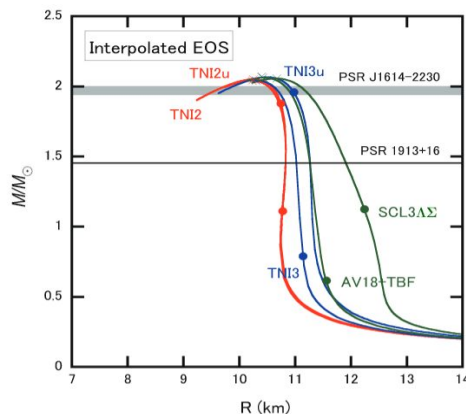


図 2 : ハドロン-クォーククロスオーバー描像での状態方程式を用いた中性子星の質量 (M) - 半径 (R) 関係。この図は文献 [1] より転載。

(3) 多バリオン系に対する格子 QCD 計算  
ハドロン相からクォーク相への高密度バリオン密度での転移を QCD から第一原理的に計算することは、いわゆる負符号問題のため極めて困難である。次善の策として我々が追及しているのは、バリオン間相互作用を格子 QCD を用いて求め、それを基礎に多体問題の手法を用いて状態方程式を構築するという道筋である。特に、高密度物質中ではハイペロンが自発的に現れるため、ハイペロンを含むバリオン間相互作用の決定が重要になる。この方向の研究の第一歩として、u, d, s クォークの質量が縮退した SU(3) 極限でのバリオン間ポテンシャルを、いわゆる HAL QCD

法を用いて格子QCDで計算した(文献[11][17])。その結果、SU(3)の規約表現に応じて、短距離でのバリオン力の振る舞いは定性的に異なることが分かった。なかでも、フレーバー1重項(Hダイバリオンのチャンネル)では、核力に存在した斥力芯の代わりに引力芯が現れ、その結果、SU(3)極限ではこのチャンネルに束縛状態が現れる事が示された(図3)。フレーバーSU(3)対称性が破れた現実の世界でも、このチャンネルに束縛状態や共鳴状態が存在するか否かは今後の課題であり、引き続き研究を進めている。

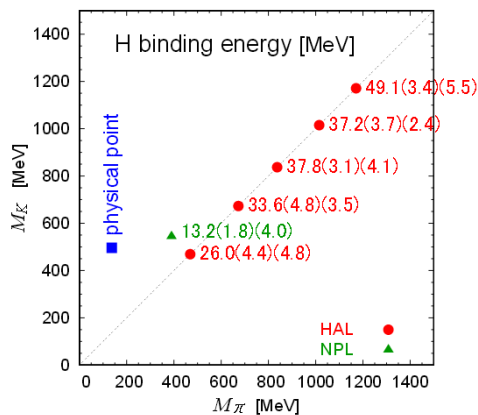


図3: 格子QCD計算に基づくHダイバリオンの束縛エネルギー。この図は文献[11]より転載。

(4) 冷却原子気体の量子ダイナミクス  
中性子星物質(化学平衡を電荷中性条件が考慮された中性子星内部に対応する高密度物質)において特徴的に現れる非一様相として中性中間子( $\pi$ )凝縮が1970年代から議論されてきたが、いまだ理論的考察に留まっている。我々は、双極子相互作用を持つ冷却原子気体や冷却分子気体を用いて、このような中間子凝縮を実験室でシミュレートする可能性について考察し、双極子相互作用が十分強ければ、層状構造を成す反強磁性スメクティック相(中間子凝縮の類似相)が実現することを平均場近似の範囲で理論的に明らかにした(図4、文献[4])。

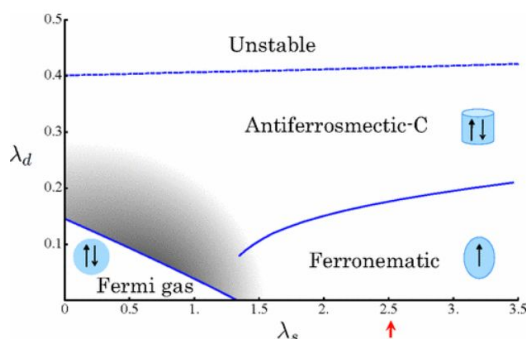


図4: 双極子相互作用強度 $\lambda_d$ と接触相互作用強度 $\lambda_s$ の平面内での、冷却原子/分子気体の相図。この図は文献[4]より転載。

## 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19件、すべて査読有)

- [1] K. Masuda, T. Hatsuda and T. Takatsuka. "Hadron-quark crossover and massive hybrid stars", PTEP 2013, no.7, 073D01 (2013) [arXiv:1212.6803 [nucl-th]]
- [2] M. Eto, K. Hashimoto and T. Hatsuda, "Ferromagnetic neutron stars: axial anomaly, dense neutron matter, and pionic wall". Phys. Rev. D 88, 081701 (2013) [arXiv:1209.4814 [hep-ph]]
- [3] K. Masuda, T. Hatsuda and T. Takatsuka. "Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars with Strangeness", Astrophys. J. 764, 12 (2013) [arXiv:1205.3621 [nucl-th]]
- [4] K. Maeda, T. Hatsuda and G. Baym. "Meson condensation analogs in ultracold atomic and molecular dipolar gases", Phys. Rev. A 87, 021604 (2013) [arXiv:1205.1086 [cond-mat.quant-gas]]
- [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. B 719, 131 (2013) [arXiv:1204.3788 [hep-ph]]
- [6] Pascal Naidon, Emiko Hiyama, and Masahito Ueda, "Universality and the three-body parameter of  $4\text{He}$  trimers", Phys. Rev. A 86, 012502 (2012) DOI: 10.1103/PhysRevA.86.012502
- [7] Shimpei Endo, Pascal Naidon, and Masahito Ueda, "Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes, Phys. Rev. A 86, 062703 (2012) DOI:10.1103/PhysRevA.86.062703
- [8] A. Yamamoto and T. Hatsuda. "Quantum Monte Carlo simulation of three-dimensional Bose-Fermi mixtures", Phys. Rev. A 86, 043627 (2012) [arXiv:1209.1954 [cond-mat.quant-gas]]
- [9] S. Aoki, T. Hatsuda et al. [HAL QCD Collaboration]. "Lattice QCD approach to Nuclear Physics", PTEP 2012, 01A105 (2012) [arXiv:1206.5088 [hep-lat]]
- [10] N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HALQCD Collaboration] "Hadron-Hadron Interactions from Imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter Wave Function on the Lattice", Phys. Lett. B 712, 437 (2012) [arXiv:1203.3642 [hep-lat]].
- [11] T. Inoue, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Collaboration] "Two-Baryon Potentials and H-Dibaryon

- from 3-flavor Lattice QCD Simulations”, Nucl. Phys. A 881, 28 (2012) [arXiv:1112.5926 [hep-lat]].
- [12] T. Doi, S. Aoki, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, T. Inoue, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Collaboration] “Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD”, Prog. Theor. Phys. 127, 723 (2012) [arXiv:1106.2276 [hep-lat]].
- [13] Y. Akamatsu, H. Hamagaki, T. Hatsuda and T. Hirano, “Can transport peak explain the low-mass enhancement of dileptons at RHIC?”, J. Phys. G38, 124184(2011)[arXiv:1106.5870 [nucl-th]].
- [14] Y. Hama, T. Hatsuda and S. Uchino. “Higgs Mechanism with Type-II Nambu-Goldstone Bosons at Finite Chemical Potential” Phys. Rev. D 83, 125009 (2011) [arXiv:1102.4145 [hep-ph]].
- [15] S. Aoki, T. Hatsuda et al. [HAL QCD Collaboration]. “Extraction of Hadron Interactions above Inelastic Threshold in Lattice QCD” Proc. Japan Acad. B 87, 509 (2011) [arXiv:1106.2281 [hep-lat]].
- [16] K. Murano, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, “Nucleon-Nucleon Potential and its Non-locality in Lattice QCD” Prog. Theor. Phys. 125, 1225 (2011) [arXiv:1103.0619 [hep-lat]].
- [17] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD Collaboration] “Bound H-dibaryon in Flavor SU(3) Limit of Lattice QCD” Phys. Rev. Lett. 106, 162002 (2011) [arXiv:1012.5928 [hep-lat]].
- [18] K. Fukushima and T. Hatsuda “The phase diagram of dense QCD” Reports on Progress in Physics 74, 014001 (2011) [arXiv:1005.4814 [hep-ph]].
- [19] T. Inoue, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki [HAL QCD collaboration], “Baryon-baryon interactions in the flavor SU(3) limit from full QCD simulations on the lattice” Prog. Theor. Phys. 124, 591 (2010) [arXiv:1007.3559 [hep-lat]].
- [20] T. Hatsuda, “Strangeness Nuclear Physics from Lattice QCD”, HYP2012: 11th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Barcelona, Spain, Oct.1-5, 2012). (招待講演)
- [21] T. Hatsuda, “Lattice QCD in Nuclear Physics”, Lectures given at Berkeley School of Collective Dynamics in High Energy Collisions (LBNL, Berkeley, USA, May 13-18 (2012)). (招待講演)
- [22] T. Hatsuda, “Recent Results in Particle and Nuclear Physics from Lattice QCD Simulations”, 2nd AICS International Symposium - Computer and Computational Sciences for Exascale Computing- (Kobe, Japan, March 1-2, 2012). (招待講演)
- [23] T. Hatsuda, “QCD Structure of Hadronic Matter” YIPQS Symposium, Perspectives in Theoretical Physics - From Quark-Hadron Sciences to Unification of Theoretical Physics - (Kyoto, Japan, Feb.6-8, 2012). (招待講演)
- [24] T. Hatsuda, “QCD Structure of Matter” The 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (Wako, Japan, Nov.14 - 17, 2011). (招待講演)
- [25] T. Hatsuda, “Introduction to the QCD Phase Transition” The International School for High-Energy Nuclear Collisions (SCHOOLNP2011) (Wuhan, China, Oct. 31 - Nov. 5, 2011). (招待講演)
- [26] T. Hatsuda, “Hadron Interactions from Lattice QCD”, International School of Nuclear Physics, 33rd Course, From Quarks and Gluons to Hadrons and Nuclei (Erice, Italy, Sep. 16-24 2011). (招待講演)
- [27] T. Hatsuda, “Nuclear force and nuclear physics from lattice quantum chromodynamics” The Rutherford Centennial Conference on Nuclear Physics (Manchester, UK, Aug. 8-12, 2011). (招待講演)
- [28] T. Hatsuda, “Recent Results in Particle and Nuclear Physics from Lattice QCD” The 19th Particles and Nuclei International Conference (PANIC11), Rutherford Centennial (Boston, USA, July 24-29, 2011). (招待講演)
- [29] T. Hatsuda, “From Yukawa and Nambu to Lattice Nuclear Force” Baryons 2010 (Osaka, Dec. 7-11, 2010). (招待講演)
- [30] T. Hatsuda, “Baryon-Baryon Forces from Lattice QCD” T(r)opical QCD 2010 (Wuhan, China, Oct.7-20, 2012). (招待講演)

[学会発表](計 14件)

- [1] T. Hatsuda, “QCD and Hadron Physics” Lectures given at International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP school 2013) (Tokai, Japan, Feb.14-20, 2013) (招待講演)
- [2] T. Hatsuda, “From Quarks to Cosmos” QCD Structure I (Wuhan, China, Oct.7-20,

(Cairns, Australia, Sep. 26 - Oct. 1, 2010). (招待講演)

[14] T. Hatsuda, "Nuclear Physics from Lattice QCD" Lattice 2010: The XXVIII International Symposium on Lattice Field Theory (Sardinia, Italy, June 14-19, 2010). (招待講演)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

無し

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

初田 哲男 (HATSUDA, Tetsuo)

東京大学・大学院理学系研究科・客員教授

研究者番号：20192700

### (2)研究分担者

平野 哲文 (HIRANO, Tetsufumi)

東京大学・大学院理学系研究科・講師(平成22年度)・上智大学・理工学部・准教授(平成23年度)

研究者番号：40318803

(平成23年度まで)

### (3)研究分担者

ネドン パスカル (NAIDON, Pascal)

独立行政法人理化学研究所・研究員

研究者番号：70611979

(平成24年度より)

### (3)連携研究者

上田 正仁 (UEDA Masahito)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：70271070