

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月10日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20340055

研究課題名（和文） 極限状態QCDの国際共同研究

研究課題名（英文） International Collaborative Study of QCD at Extreme Condition

研究代表者

中村 純（NAKAMURA ATSUSHI）

広島大学・情報メディア教育研究センター・教授

研究者番号：30130876

研究成果の概要（和文）：

極限状態 QCD 研究は、宇宙初期の超高温状態、中性子星内部の超高密度状態などを明らかにするための基本的原理に基づく情報を提供することが期待されている。高エネルギー重イオン反応による実験も対象となる。本研究では、クォークの閉じ込めに大きな役割を果たすグルーオン場の位相的特異性（渦構造）の影響を数値的に明らかにし、また符号問題によるモンテカルロの困難を回避するアルゴリズムの改善とその相図解析への応用を行った。

研究成果の概要（英文）：

QCD in extreme conditions is expected to provide information at the early universe and the center of the neutron stars based on the fundamental principle. High energy heavy ion collision experiments also are the target. We studied the effects of a topological singularity of the gluon field on the confinement numerically, and improved several algorithms which circumvent the sign problem in the finite density Monte Carlo simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2009年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
2011年度	2,000,000	600,000	2,600,000
年度			
総計	13,500,000	4,050,000	17,550,000

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

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：クォーク、グルーオン、QGP、閉じ込め、QCD、化学的ポテンシャル

## 1. 研究開始当初の背景

本研究開始時においては、有限温度においては世界的に大規模計算が進み、閉じ込め／非閉じ込め相転移温度に付いての精密測定や状態方程式などの研究が進んでいたが、閉じ込め／非閉じ込め相転移でどのような機構が働いているのかについては、余り研究が進

んでいなかった。

有限密度系については、符号問題に対処するための再規格化法、虚数化学ポテンシャル法などが提案され、定性的な議論が行われていた。しかし、それらを実際にシミュレーションに適用することが可能なパラメータ領域の研究も十分とは言えない状況であった。こ

れは、符号問題の原因となる巨大な行列式の取り扱いが難しいことがその背景にある。

## 2. 研究の目的

本研究では、国際的な研究協力体制の中に若手研究者も積極的に関与してもらいながら、極限状態 QCD、すなわち有限密度、有限温度の物質の基本的な性質についてのより深い理解を、数値シミュレーションを中心として進めることを目的とした。

QCD の特徴である閉込めが、有限温度・有限密度では破れ、米国、欧州の研究所で実施されている高エネルギー重イオン反応の実験では、この閉込め・非閉込め相転移が起こっていることが確認されつつあり、閉込め機構の力学的背景を明らかにすることが重要である。

また、近年観測が大きく進んでいる中性子星や宇宙の進化の研究に使える信頼度の高い有限密度格子 QCD シミュレーションの手法を確立することも大きな目的である。

## 3. 研究の方法

有限温度 QCD の研究においては、世界的な研究者であるザハロフ教授、チェルノダブ教授と議論を行いながら、ゲージ場の持つ位相的な性質であるボルテックス（渦）と、グルーオン場の伝搬関数についての関係を調査した。閉込めは遠距離（赤外領域）の現象であるため、大きな格子を準備し、そこでの高統計のシミュレーションを実施した。

有限密度については、任意の密度で計算を可能とする新しいフェルミオン行列式の表現を構築し、それによって再規格化法、虚数化学ポテンシャル法、テーラー展開法の結果を系統的に調査し、その適用限界を探った。この定式化は世界で求められていたものであり、日本初の大きな成果として評価されている。得られた表式は、フガシティと言われる密度を表す物理量で書かれており、有限密度パラメータが格子 QCD にどのように現れるのかが明らかになった。また、そこではこれまで研究の対象になってこなかった巨大行列の固有値計算が重要であり、こんどの数値シミュレーションの大きな課題であることも明らかになって来た。

## 4. 研究成果

閉込め機構に大きな役割を果たすと考えられているボルテックスを除いた数値実験により、グルーオン伝搬関数の電気的成分はほとんど影響を受けないが、赤外領域の磁気的成分は大きな影響をうけることが示された。これは、QCD の閉込め機構の理解を大きく進めるものである。特に、磁気成分を電気成分を分離して測定を行うことによって、閉込めに寄与しているのは次期成分である

ことを示すことができた。また、グルーオン場の位相的性質、すなわち大局的な構造が閉込め機構の本質であることが明らかになった。これは摂動論では解析が不可能な領域である。

有限密度については、化学ポテンシャルが温度に比べて小さいところでは、再規格化法、テーラー展開法の間には矛盾が無いこと、しかし再規格化法の信頼できる領域は非常に小さいこと、リーマンゼロ点が QCD 相構造の理解に重要な役割を果たすことなどが明らかになった。リーマンゼロ点は、実化学ポテンシャル領域のみならず、虚数化学ポテンシャル領域の相構造も反映していることが見られた。虚数化学ポテンシャル領域は符号問題が無く、その相構造も調べられているので、このことを利用してシミュレーションの信頼性を判断することもできる。

また、虚数化学ポテンシャル領域で精密な測定を行うことにより、これまでに行われていた相転移線の解析接続ではなく、物理量を直接解析接続することを試みてそれが可能であることを示した。この際には、我々の開発したフガシティで表現された有限密度格子 QCD の定式化が非常に有用な役割を果たした。この分野の世界的権威であるドゥフオークラン教授と京都、及び広島で議論を行い、若手研究者とともに多くの有益な情報を交換することができた。

## 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 145 件)

1. Keitaro Nagata, Atsushi Nakamura, QCD Phase Diagram with Imaginary Chemical Potential, Proceedings of Hadron Nuclear Physics (HNP) 2011, EPJ web of conference, 査読有, 20, 2012, 03006
2. Yoshimasa Hidaka, Daisuke Satow, Teiji Kunihiro, Ultrasoft Fermionic Modes at High Temperature, Nuclear Physics, A, 査読有, 2012, 876:93
3. Hua-Xing Chen, V. Dmitrasinovic, Atsushi Hosaka, Baryons with  $U_L(3)*U_R(3)$  Chiral Symmetry IV: Interactions with Chiral (8,1) + (1,8) Vector and Axial-vector Mesons and Anomalous Magnetic Moments, Phys. Rev., 査読有, C85, 2012, 055205
4. Yasuhiro Yamaguchi, Shunsuke Ohkoda, Shigehiro Yasui, Atsushi Hosaka, Exotic baryons from a heavy meson and a nucleon -- Negative parity states --, Journal-ref: Phys. Rev., 査読有, D84,

- 2011, 014032
5. Atsushi Nakamura, Keitaro Nagata, Shinji Motoki, Yoshiyuki Nakagawa, Takuya Saito, Lattice QCD and High Baryon Density State, Proceedings of BARYONS'10, AIP, 査読有, 2011, 509-515
  6. Keitaro Nagata and Atsushi Nakamura, Imaginary chemical potential approach for the pseudocritical line in the QCD phase diagram with clover-improved Wilson fermions, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114507
  7. M. N. Chernodub, Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito, and V. I. Zakharov, Gluon propagators and center vortices in gluon plasma, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114501
  8. Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito and H. Toki, Scaling study of the gluon propagator in Coulomb gauge QCD on isotropic and anisotropic lattices, Phys. Rev., 査読有, D83, 2011, 114507
  9. Kenji Fukushima, Tetsuo Hatsuda, The phase diagram of dense QCD, Rept. Prog. Phys., 査読有, 74, 2011, 014001, 2011
  10. Kyosuke Tsumura, Teiji Kunihiro, First-principle Derivation of Stable First-order Generic-frame Relativistic Dissipative Hydrodynamic Equations from Kinetic Theory by Renormalization-group Method, Prog. Theor. Phys., 査読有, 126, 2011, 761-809
  11. aTakashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD collaboration), Baryon-Baryon Interactions in the Flavor SU(3) Limit from Full QCD Simulations on the Lattice, Prog. Theor. Phys., 査読有, 124, 2010, 591-603
  12. Shinji Motoki and Atsushi Nakamura, Problem Solving Environment of Lattice QCD, Proceeding of 5th International Conference on Computer Sciences and Convergence Information Technology, 査読有, 2010, pp249-252
  13. Keitaro Nagata and Atsushi Nakamura, Wilson Fermion Determinant in Lattice QCD, Phys. Rev. , 査読有, D82, 2010, 094027 (arXiv:1009.2149)
  14. Shinji Motoki, Atsushi Nakamura, Koichi Hashimoto, Kiyoshi Mizumaru, Problem Solving Environment for Lattice QCD on Cell/B.E., Journ. Convergence Information Technology, 査読有, Volume 5, Number 4, June 2010, pp. 187-194
  15. Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito and H. Toki, Spectral sum for the color-Coulomb potential in SU(3) Coulomb gauge lattice Yang-Mills theory, Phys. Rev. , 査読有, D81, 2010, 54509
  16. S. Motoki, Y. Nakagawa, K. Nagata, K. Hashimoto, K. Mizumaru and A. Nakamura, Development of lattice QCD Tool Kit on cell broadband engine processor, PoS, 査読有, LAT2009, 2009, 039
  17. A. Nakamura, Y. Nakagawa, V.I. Zakharov and S. Motoki, Entanglement entropy of SU(3) and SU(2) Yang-Mills theories at finite temperature, POS, 査読有, LAT2009, 2009, 188
  18. K. Nagata, A. Nakamura, Y. Nakagawa, S. Motoki, T. Saito and M. Hamada, Wilson fermions with imaginary chemical potential, PoS, 査読有, LAT2009, 2009, 191
  19. T. Takaishi, P. de Forcrand and A. Nakamura, Equation of state at finite density from imaginary chemical, PoS, 査読有, LAT2009, 2009, 198
  20. T. Saito, M. N. Chernodub, A. Nakamura and V. I. Zakharov , Gluon propagators and center vortex at finite temperature, PoS, 査読有, LAT2009, 2009, 179
  21. Y. Nakagawa, A. Voigt, E.-M. Ilgenfritz, M. Mueller-Preussker, A. Nakamura, T. Saito, A. Sternbeck, H. Toki, Coulomb-gauge ghost and gluon propagators in SU(3) lattice Yang-Mills theory, Phys. Rev., 査読有, D79, 2009, 114504
  22. Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito, H. Toki, IR suppression of the Coulomb gauge gluon propagator in SU(3) Yang-Mills theory, POS, 査読有, Confinement8, 2008, 189
  23. M. N. Chernodub, Atsushi Nakamura, V. I. Zakharov, Abelian monopoles and center vortices in Yang-Mills plasma, POS, 査読有, Confinement8, 2008, 037
  24. M. N. Chernodub, Atsushi Nakamura, and V. I. Zakharov, Manifestations of magnetic vortices in the equation of state of a Yang-Mills plasma, Phys. Rev., 査読有, D78, 2008, 074021

25. Atsushi Nakamura, Lattice QCD Simulations as an HPC Challenge, Lecture Notes in Computer Science, 査読有, 4759, 2008, 444-451
26. Y. Nakagawa, A. Nakamura, T. Saito, and H. Toki, Volume dependence of the long-range two-body potentials in various color channels by lattice QCD, Phys. Rev., 査読有, D77, 2008, 034015

[学会発表] (計 15 件)

1. 中村純, Mandala for Finite Density QCD, YIPQS-HPCI international molecule-type workshop on New-type of Fermions on the Lattice, 2012. 2. 09, 京都大学
2. 中村純, 格子 QCD の可能性 グルーオン場とクォーク多体系の解析の道具として, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011. 09. 18, 弘前大学
3. 中村純, 有限密度での格子 QCD, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会, 2011. 06. 23, 理化学研究所
4. Atsushi Nakamura, Finite density QCD simulations with Wilson fermions, Quarks, Gluons, and Hadronic Matter under Extreme Conditions, 2011. 03. 15, St. Goar Germany
5. 中村純, Lattice QCD and High Baryon Density State, BARYONS' S10, 2010. 12. 08, 大阪大学
6. Atsushi Nakamura, Entanglement entropy of SU(3) and SU(2) Yang-Mills theories at finite temperature, the XXVII International Symposium on Lattice Field Theory, 2009. 07. 28, Beijing China
7. Atsushi Nakamura, Finite Density QCD with Wilson Fermions, Lattice Field Theory, 2008. 07. 15, Williamsburg USA

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村 純 (NAKAMURA ATSUSHI)  
 広島大学・情報メディア教育研究センター・教授  
 研究者番号 : 30130876

### (2) 研究分担者

稲垣 知宏 (INAGAKI TOMOHIRO)  
 広島大学・情報メディア教育研究センター・准教授  
 研究者番号 : 80301307

国広 悌二 (KUNIHIRO TEIJI)  
 京都大学・理学研究科・教授

研究者番号 : 20153314

初田 哲男 (HATSUDA TETSUO)  
 東京大学・大学院理学系研究科・教授  
 研究者番号 : 20192700

保坂 淳 (HOSAKA ATSUSHI)  
 大阪大学・核物理研究センター・教授  
 研究者番号 : 10259872

関口 宗男 (SEKIGUCHI MUNE0)  
 国士舘大学・理工学部・教授  
 研究者番号 : 80246834  
 (H21→H22)

### (3) 連携研究者

関口 宗男 (SEKIGUCHI MUNE0)  
 国士舘大学・理工学部・教授  
 研究者番号 : 80246834  
 (H23)