

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340054

研究課題名(和文)有限密度格子QCD - 符号問題への挑戦と高密度系の第一原理計算

研究課題名(英文)Finite density lattice QCD - Challenge for the sign problem and the first principle calculation of the high density system

研究代表者

中村 純(Nakamura, Atsushi)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：30130876

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：QCDの相構造の解明のためには、第一原理計算である格子QCDシミュレーションがもっとも信頼度が高いが、有限密度格子QCDは符号問題という大きな困難がある。これまで、テーラー展開法、虚数化学ポテンシャル法、多パラメータ再規格化法により低密度高温での振舞いが少しずつ明らかになってきたが、低温高密度領域を調べることは難しい。

この状況を克服するために有限密度格子QCDのフガシティ展開から、カノニカル分配関数を求める定式化を構成した。さらにカノニカル分配関数を、粒子・反粒子対称性のみを要請して、実験の多重度分布から求める解析法を構築して、格子QCDと実験データの関連付けに成功した。

研究成果の概要(英文)：In order to study QCD phase structure, the lattice QCD simulation is most reliable since it is a first principle calculation. However, the lattice QCD at finite density suffers from so-called sign problem. So far, there have been many progresses as Taylor expansion, imaginary chemical potential method and multi-parameter re-weighting, but still it is difficult to reach low temperature and high density regions.

To go further, we have developed a canonical approach constructed from the fugacity expansion in this project. We have constructed also a method to construct the canonical partition functions from experimental data assuming only the particle anti-particle symmetry. We can now relate experimental data and lattice simulation at finite density regions.

研究分野：原子核理論

キーワード：QCD 符号問題 数値シミュレーション 高密度状態 相構造 Lee Yangゼロ 閉じこめ モンテカルロ計算

1. 研究開始当初の背景

QCD相図の構造を明らかにするためには、第一原理計算である格子QCDシミュレーションがもっとも有効である。有限温度系は大きな進歩があったが、有限密度格子QCDは符号問題のために定量的研究に至っていなかった。これまで、テラー展開法、虚数化学ポテンシャル法、多パラメータ再規格化法により低密度高温での振舞いが少しずつ明らかになってきたが、低温高密度領域を調べることは難しいことが明らかになってきた。

2. 研究の目的

この困難を克服するために、有限密度格子QCDシミュレーションを有効な道具として活用できる新しい定式化であるカノニカルアプローチを構築し、その実用上で起こる問題を明らかにして解決する。

3. 研究の方法

大きな分配関数(Grand canonical partition function) Z をカノニカル分配関数 Z_n で展開する。

$$Z = \sum_n Z_n \xi^n$$

ここで $\xi = \exp(\mu/T)$ はフガシティである。

Z_n は実験からは多重度分布から決めることができ、格子QCDではreduction formulaあるいは、純虚数化学ポテンシャルについてのフーリエ変換で求めることができる。

このフーリエ変換は不安定であると考えられていたが、われわれは多倍長計算を導入することでこの不安定性を回避した。

4. 研究成果

Z_n は化学ポテンシャルを含まないため、いったん Z_n が求めれば、上記のフガシティ展開により、任意の実 μ で物理量が Z から求められる。実際には有限の n までしか求められないことによる外挿の限界がある。

また、実化学ポテンシャルだけでなく、複素化学ポテンシャルにも拡張できるためLee-Yang ゼロを求めることができる。

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24件)

T. Makiyama, Y. Sakai, T. Saito, M. Ishii, J. Takahashi, K. Kashiwa, H. Kouno, A. Nakamura, M. Yahiro

Phase structure of two-color QCD at real and imaginary chemical potentials; lattice simulations and model analyses Phys. Rev. D 93, 014505 (2016)

Junichi Takahashi, Keitaro Nagata, Takuya Saito, Atsushi Nakamura, Takahiro Sasaki, Hiroaki Kouno, Masanobu Yahiro

Color screening potential at finite density in two-flavor lattice QCD with Wilson fermions

Phys. Rev. D 88, 114504 Dec. (2013)

Atsushi Nakamura, Keitaro Nagata

Numerical Approach to Quark-Gluon World from Statistical QCD

Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference (APPC12)

e-ISBN: 978-4-89027-101-6, 016002, 10.7566

Atsushi Nakamura, Keitaro Nagata

What are multiplicity distributions telling us about the QCD phase diagram

Nuclear Physics A931, (2014) pp. 825-830

K. Nagata, A. Nakamura and S. Motoki

Low temperature limit of lattice QCD

PoS(Lattice 2012)094

S. Motoki, K. Nagata and A. Nakamura

Study of the low temperature and high density states by using lattice QCD simulations

PoS(Lattice 2012)266

Keitaro Nagata; Shinji Motoki; Yoshiyuki

Nakagawa; Atsushi Nakamura; Takuya Saito;

(XQCD-J Collaboration)

Towards extremely dense matter on the lattice

Progress of Theoretical and Experimental Physics 2012 (1): 1A103, Sept.

Keitaro Nagata and Atsushi Nakamura

EoS of finite density QCD with Wilson fermions by Multi-Parameter Reweighting and Taylor expansion

JHEP, 1204, 092 (2012)

Net baryon number fluctuations across the chiral phase transition at finite density in the strong coupling lattice QCD

Terukazu Ichihara, Kenji Morita, Akira Ohnishi

PTEP 2015 (2015) 113D01

Topological feature and phase structure of QCD at complex chemical potential

Kouji Kashiwa, Akira Ohnishi

Phys.Lett.B750:282-286,2015

Auxiliary field Monte-Carlo simulation of strong coupling lattice QCD for QCD phase diagram

Terukazu Ichihara, Akira Ohnishi, Takashi Z. Nakano

Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 123D02

Relativistic Causal Hydrodynamics Derived from Boltzmann Equation: a novel reduction theoretical approach

Kyosuke Tsumura, Yuta Kikuchi, Teiji Kunihiro

Phys.Rev. D92 (2015) 085048

Entropy production in quantum Yang-Mills mechanics in semi-classical approximation
Hidekazu Tsukiji, Hideaki Iida, Teiji Kunihiro, Akira Ohnishi, Toru T. Takahashi
PTEP 2015 (2015) 083A01

Parametric instability of classical Yang-Mills fields in a color magnetic background
Shoichiro Tsutsui, Hideaki Iida, Teiji Kunihiro, Akira Ohnishi
Phys. Rev. D 91, 076003 (2015)

Emergence of soft quark excitations by the coupling with a soft mode of the QCD critical point
Masakiyo Kitazawa, Teiji Kunihiro, Yukio Nemoto
Phys. Rev. D 90, 116008 (2014)

Entropy production in classical Yang-Mills theory from Glnasma initial conditions
Hideaki Iida, Teiji Kunihiro, Berndt Mueller, Akira Ohnishi, Andreas Schaefer, Toru T. Takahashi
Phys. Rev. D 88, 094006 (2013)

K. Kamikado, T. Kunihiro, K. Morita, A. Ohnishi
Prog. Theor. Exp. Phys. (2013) 053D01

Single-particle spectral density of the unitary Fermi gas: Novel approach based on the operator product expansion, sum rules and the maximum entropy method
Philipp Gubler, Naoki Yamamoto, Tetsuo Hatsuda, Yusuke Nishida
Ann. Phys. 356, 467 (2015)

Thermodynamics of SU(3) Gauge Theory from Gradient Flow
Masayuki Asakawa, Tetsuo Hatsuda, Etsuko Ito, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki (FlowQCD Collaboration)
Phys. Rev. D 90, 011501 (2014)

Universal physics of three bosons with isospin
Tetsuo Hyodo, Tetsuo Hatsuda, Yusuke Nishida
Phys.Rev. C89:032201,2014

Fermionic Functional Renormalization Group Approach to Superfluid Phase Transition
Yuya Tanizaki, Gergely Fejős, Tetsuo Hatsuda

Prog. Theor. Exp. Phys. (2014) 043I01

Ferromagnetic neutron stars: axial anomaly, dense neutron matter, and pionic wall
Minoru Eto, Koji Hashimoto, Tetsuo Hatsuda
Phys. Rev. D 88, 081701 (2013)

Antiferromagnetic ground state of two-component dipolar Fermi gases -- an analog of meson condensation in nuclear matter
Kenji Maeda (Colorado School of Mines), Tetsuo Hatsuda (RIKEN), Gordon Baym (Univ. Illinois)
Phys. Rev. A 87, 021604(R) (2013)

〔学会発表〕(計 件)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1)研究代表者
中村純 (Nakamura Atsushi)
研究者番号：30130876
大阪大学核物理学研究センター協同研究員

(2)研究分担者
國廣悌二 (Kunihiro Teiji)
研究者番号：20153314
京都大学, 理学研究科, 教授
初田 哲男 (Hatsuda Tetsuo)
研究者番号：20192700
独立行政法人理化学研究所, 仁科加速器研

究センター, 主任研究員
大西 明 (Ohnishi Akira)
研究者番号: 70250412
京都大学, 基礎物理学研究所, 教授

(3) 連携研究者
()

研究者番号: