

研究責任者名 Name	金谷 和至 KANAYA, Kazuyuki	所属機関 Affiliation	筑波大学 数理物質系 Faculty of Pure and Applied Sciences, Univ. of Tsukuba
受理番号 Proposal No.	12/13-14	研究課題名 Program title	有限温度・有限密度 QCD の非摂動論的研究 Non-perturbative study of hot and dense QCD

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

重イオン衝突実験からクォーク・グルオン・プラズマ生成のシグナルを抽出するためには、低密度領域での QCD 相転移に関する理論からのインプットが必要である。我々は、非摂動論的に改良されたWilson・クォーク作用を用いた格子 QCD の数値シミュレーションにより、高温低密度領域での QCD の相構造や相転移温度、熱力学量の温度・密度依存性などに関する定量的研究を進めている。本課題では、ストレンジクォークの真空偏極まで取り入れた、物理点直上での $N_f=2+1$ QCD の状態方程式計算を固定格子間隔に基づいて進めている。同時に状態方程式計算に必要なベータ関数の計算方法の研究も進めている。有限密度に関しては、ヒストグラム法により、まずクォークが重い領域で有限温度・密度の相構造を計算し、さらに、クォーク行列式の位相をクエンチしたシミュレーションからの再重み付け法と組み合わせることにより、クォークが軽い領域での相構造を研究した。

(英文)

In order to extract an evidence for formation of the quark-gluon-plasma by heavy ion collision experiments, theoretical understanding of the nature of QCD transition at low but finite densities is indispensable. We are pushing forward a series of projects to study the phase structure and thermodynamic properties of QCD on the lattice using improved Wilson quarks. In this project, we are investigating the equation of state (EOS) in finite-temperature $N_f=2+1$ QCD at the physical point adopting the fixed scale approach. Even in the approach calculation of the EOS needs the beta-function which is also studied in the project. We also have studied the QCD phase structure at finite temperatures and densities by the histogram method. To extend our previous study in the heavy quark region to light quarks, we have adopted the reweighting technique to phase-quenched simulations of finite-density QCD.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	11	0	1	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program									
<p>1. K. Kanaya, <i>Finite density QCD with Wilson quarks using the histogram method</i> International workshop "QCD Structure I", 2012/10/10, Wuhan, China (招待講演)</p> <p>2. S. Ejiri, <i>Finite density lattice gauge theory</i> International workshop "QCD Structure I", 2012/10/10, Wuhan, China (招待講演)</p> <p>3. S. Ejiri, <i>Numerical study of QCD phase structure at finite temperature and density</i> (招待講演) Conference on "Computational Physics 2012" (CCP 2012), 2012/10/16, Kobe Port Island, Kobe, Japan</p> <p>4. Y. Nakagawa, <i>Lattice study of the phase structure in finite density QCD with a histogram method</i> Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), 2012/12/13, 奈良県新公会堂, 奈良</p> <p>5. S. Ejiri, <i>Study of finite density lattice QCD by the histogram method</i> Symposium on Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012), 2012/12/14, 奈良県新公会堂, 奈良</p> <p>6. K. Kanaya, <i>Finite density QCD on the lattice with a histogram method</i> International workshop on "Quarks, Gluons, and Hadronic Matter under Extreme Conditions", 2013/3/18, St. Goar, Germany (招待講演)</p> <p>7. K. Kanaya, <i>Finite density QCD with a histogram method</i> School and workshop "New Horizons in Lattice Field Theory" 2013/3/25 Natal, Brazil (招待講演)</p> <p>8. 齋藤 華, 格子 QCD シミュレーションにおける β 関数の計算に関する研究 日本物理学会, 2013/3/27 広島大学, 東広島</p> <p>9. 中川 義之, <i>multi-parameter reweighting</i> 法を用いた有限密度 QCD の相構造の解明 日本物理学会, 2013/3/27 広島大学, 東広島</p> <p>10. T. Umeda, et al. (WHOT-QCD Collaboration), <i>Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions</i> The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013), 2013/7/29-8/3, Mainz, Germany</p> <p>11. 江尻信司, 有限密度格子 QCD の数値的研究における技術的な困難とその解決にむけた試み 日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013/9/20-23, 高知大学, 高知 (企画講演)</p>									
査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)									
1	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td></td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td></td> </tr> <tr> <td>雑誌名</td> <td></td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td></td> </tr> </table>	著者名 Author		タイトル title		雑誌名		URL	
著者名 Author									
タイトル title									
雑誌名									
URL									
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)									
1.	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等 1</td> <td>PoS (Lattice 2012) 074 (7pages)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/074/Lattice%202012_074.pdf</td> </tr> </table>	著者名 Author	T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno	タイトル title	Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach	雑誌名等 1	PoS (Lattice 2012) 074 (7pages)	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/074/Lattice%202012_074.pdf
著者名 Author	T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno								
タイトル title	Thermodynamics in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach								
雑誌名等 1	PoS (Lattice 2012) 074 (7pages)								
URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/074/Lattice%202012_074.pdf								
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載)									
Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)									
投稿中論文									
<p>1. H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno, T. Umeda, "Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density", submitted to Phys. Rev. D. URL: http://arxiv.org/abs/arXiv:1309.2445</p>									
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。)									
Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)									
なし									

実施報告書

研究課題名 「有限温度・有限密度 QCD の非摂動論的研究」

(Non-perturbative study of hot and dense QCD)

筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授

金谷 和至

2013 年 12 月 16 日

1 研究組織 (研究実施開始時)

	氏名	所属 職名 / 研究分担
研究責任者	金谷和至 (かなやかずゆき)	筑波大学数理物質系 教授 研究の統括と解析
共同研究者	青木慎也 (あおきしんや)	筑波大学数理物質系 教授 ¹ 相構造と臨界指数の研究
共同研究者	初田哲男 (はつだてつお)	理化学研究所仁科加速器研究センター 主任研究員 最大エントロピー法による相関関数の研究
共同研究者	江尻信司 (えじりしんじ)	新潟大学大学院自然科学研究科 准教授 有限密度 QCD の研究
共同研究者	梅田貴士 (うめだたかし)	広島大学大学院教育学研究科 准教授 シミュレーションの実行とプログラム開発
共同研究者	中川義之 (なかがわよしゆき)	新潟大学大学院自然科学研究科 研究員 シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	吉田信介 (よしだしんすけ)	筑波大学大学院数理物質科学研究科 研究員 ² シミュレーションの実行とデータの解析
共同研究者	斎藤華 (さいとうはな)	筑波大学大学院数理物質科学研究科 博士課程院生 ³ シミュレーションの実行とデータの解析

¹ 現在の所属：京都大学基礎物理学研究所 教授

² 現在の所属：理化学研究所仁科加速器研究センター 研究員

³ 現在の所属：日本学術振興会研究員 DESY/Zeuthen

2 研究課題の内容

クォークは通常、陽子、中性子などのハドロンに閉じこめられているが、約 1 兆度以上の超高温では溶け出して、クォーク・グルオン・プラズマ (QGP) 状態と呼ばれる、これまで人類が経験したことのない物質に相転移すると考えられている。この相転移の解明は宇宙の初期進化や物質創成を理解する上で重要である。これまでブルックヘブン国立研究所の RHIC において実験的検証に向けた高エネルギーハドロン衝突実験が行われ、また CERN の LHC では、約 $10T_c$ までの QGP の性質を定量的に調べることを目的とした、より高エネルギー領域での大規模実験もスタートした。終状態に数千個 数万個以上の粒子を含む複雑な重イオン衝突実験データから QGP 生成の明確な証拠とその熱力学特性を引き出すためには、QGP の物性に関する QCD 第一原理からの理論的予言が不可欠であ

る。そのための現在唯一の研究方法が、格子 QCD に基づく数値シミュレーションである。実験データと格子 QCD の理論的解析により QGP の性質が精密に理解されると、初期宇宙におけるクォーク物質の進化を定量的に追うことが可能になり、物質創成のメカニズムも解明できると期待される。本研究では、有限温度・有限密度における QCD の性質を、クォークの対生成・対消滅効果を取り入れた格子 QCD の数値シミュレーションにより、非摂動的に研究する。さらに、RHIC や LHC ではクォーク数密度がゼロでないことの効果を見積もる必要がある。このプロジェクトでは、ウィルソン型クォークで有限温度・有限密度のクォーク物質の性質を研究する。改良ウィルソン型クォーク（クローバークォーク）と岩崎改良ゲージ作用を組み合わせた作用を、厳密なアルゴリズムを用いてシミュレーションする。s クォークまで正しく取り入れた物理クォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCD で相転移温度と相転移次数の決定、状態方程式や音速などの熱力学量の計算を行うことや、有限密度における符号問題の解決を目指している。

3 平成 24-25 年度の研究の概要

3.1 固定格子間隔法に適した、ベータ関数計算方法の開発

QCD の状態方程式計算において、非常に大きな計算量を要求するものの、フレーバー数などに関して基盤の確立したウィルソンクォークを用いた計算を行うために、我々のグループでは固定格子間隔アプローチを開発した。しかし状態方程式の計算ではやはり従来通りベータ関数の情報が必要になる。このベータ関数を reweighting の手法で求める為の研究を行った。今年度はまずクエンチ近似において静的クォーク間ポテンシャルを reweighting 法で計算する事によってベータ関数を求めた。予想していたよりも多くの統計が必要だったものの、期待していた結果を得ることが出来た。これらの結果は国内の学会などで報告を行った。

3.2 質量前処理を用いた物理点での有限温度配位生成

今年度から本格的に物理点での状態方程式計算の準備を行っている。ウィルソン型クォークを用いたシミュレーションは、クォーク質量を物理点近傍まで下げると、格子間隔をかなり小さくしない限り、数値的不安定性を示す可能性がある。計算時間を抑えるために、通常は、格子間隔を小さくする代わりに、格子作用の改良を行っているが、smaering と呼ばれる高次の改良や質量前処理による改良が有効であるとの報告がなされている。今年度は特に質量前処理を用いた物理点での有限温度配位生成のテストを行った。高温相における配位生成では 1 段の前処理程度で十分なアクセプタンスと安定性が得られたものの、低温相では 3, 4 段の前処理と注意深いパラメータの設定が必要なことが分かった。これまでに各温度における配位生成の Thermalization が終わったと考えている。次年度の配位生成へ向けて、これらのパラメータのチューニングは引き続き行っていく予定である。

3.3 ヒストグラム法による有限密度 QCD の相転移の研究

クォークの質量や化学ポテンシャルの関数として、有限温度・密度 QCD の相転移が一次相転移か二次相転移かクロスオーバーかといった相転移の性質について議論した。本研究では、適当な物理量で状態をラベルして、その状態がどれだけの確率で発生するかを表す関数である「確率分布関数」に着目する。一次相転移があれば、同時に 2 つの状態が等確率で現れるため、一次相転移が起こったかどうか判定できる。また、有限密度 QCD で問題となる「符号問題」や「オーバーラップ問題」の回避方法を同時に議論した。我々の方法では、シミュレーションパラメータを変化させたときにそ

の確率分布関数がどう変化するかを式で書き下し、いろいろなパラメータでのシミュレーションのデータを組み合わせることにより、広い変数域で確率分布関数を計算する。それがオーバーラップ問題の回避法になり、さらに、有限密度での符号問題は、その問題を級数展開の収束性の問題にすり替えるような方法で回避する。質量のパラメータ空間内の現実の質量点付近に一次相転移領域の境界となる臨界面があることが予想されていて、有限密度でその臨界面を探ることが最終的な目標である。各密度で現実の質量点に対して一次相転移側にあるかどうかを特定することによって、現実世界のQCD相転移の性質が分かる。本研究ではその臨界面を見つけるための研究を行った。有限密度ではシミュレーションの重みが複素数になるので、その複素位相を除いて配位生成を行い (phase-quenched simulation)、あとで複素位相部分の補正を行った。その補正のとき、符号問題が現れるが、位相平均をキュムラント展開し、その収束性を確認しながら、最初の項で近似することによってその問題を回避した。まだ格子点の数が少ない計算であるが、確率分布関数の形を調べることにより、低密度でクロスオーバーであった相転移が、高密度で一次相転移に変わる兆候を見つけることができた。今後、その相転移の変化を系統的に調べることにより、高密度QCDの相構造の詳細な研究に進んでいきたいと考えている。

3.4 カイラル相転移の臨界点近傍でのスケールリング則

さらに、クォークの質量と化学ポテンシャルの関数として有限温度・密度QCDの相転移を議論する別の方法である、クロスオーバー領域でのスケールリング則の研究を行った。臨界点付近での秩序パラメータの振る舞いを調べて臨界点の位置の特定と相転移の性質の分類をする方法はよく用いられている。動的クォークの効果を検討し、数値シミュレーションでカイラル相転移の秩序パラメータとその化学ポテンシャル微分を計算して、有限密度の効果を一時的に無視したスケールリング則について議論した。アップ・ダウン・クォークの動的効果のみを考慮した密度ゼロの場合、クォーク質量ゼロ極限でのスケールリング則は $O(4)$ スピン模型と同じスケールリング則にしたがうことが予想されているが、本研究ではその予想を確認した。密度ゼロ近傍のスケールリング則の中には、化学ポテンシャルの関数とした、高温相と低温相を分ける臨界温度の曲率の質量ゼロ極限での値が、パラメータとして含まれるが、そのスケールリング則を仮定することによって、その相転移温度の曲率を計算することができた。まだストレンジ・クォークが考慮されていないが、研究が難しいと言われている密度効果がある場合でも、低密度領域ならスケールリング則が議論できることを示した。研究成果は国際会議で発表を行った。