

高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究成果報告書（2006年度）

(Brief report of the program)

2007年 5月 22日

研究責任者名 Name	金谷 和至 Kanaya, Kazuyuki	所属機関 Affiliation	筑波大学 数理物質科学研究科 University of Tsukuba
受理番号 Proposal No.	大型-06-19 LS-06-19	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。

<p>成果の概要 Abstract (和文)</p> <p>重イオン衝突実験からの観測結果を理解するためには、比較的低密度での QCD 相転移に関する理論からのインプットが必要である。本課題では、改良されたウィルソン・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、高温相での静止したクォーク間のポテンシャルなどに関する定量的な研究を行う。平成 18 年度には、$N_f = 2$ QCD で有限密度の計算方法の検証や様々なチャンネルでのクォーク間ポテンシャル、クォーク数密度のゆらぎの温度・密度依存性を研究した。密度ゼロにおける研究はほぼ完了し、格子場の理論国際会議 LATTICE 2006、RIKEN-BNL ワークショップ "QCD in Extreme Conditions"、国際会議 Quark Matter 2006、基研 Yukawa International Seminar 2006 等で発表を行った。クォーク間ポテンシャルの結果は Physical Review D に出版した。</p> <p>(英文)</p> <p>In order to study the nature of the quark matter by heavy ion collision experiments, theoretical understanding of the nature of QCD transition at low but finite densities. In this project, we perform lattice QCD simulations adopting improved Wilson quarks to perform a qualitative study of the phase structure and thermodynamic quantities of QCD. In FY 2006, we have carried out a series of simulations of dynamical two-flavor QCD and calculated the transition temperature, inter-quark potentials in various color channels, quark number susceptibilities, etc. A part of the results at zero density have been presented at international conferences and workshops such as the LATTICE 2006, RIKEN-BNL workshop "QCD in Extreme Conditions" and Quark Matter 2006, and the results of inter-quark potentials in various color channels have been published in Physical Review D.</p>				
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	査読付きの学術論文 数	プロシーディング 論文数	その他（投稿中を 含む）
	15	1	5	0

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

2007年5月21日

1. 研究組織

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)	筑波大学大学院数理物質科学研究科 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)	筑波大学大学院数理物質科学研究科 教授 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)	東京大学大学院理学系研究科 教授 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)	東京大学大学院理学系研究科 助手 (現職：米国ブルックヘブン国立研究所研究員) 有限密度QCDの研究
共同研究者 浮田尚哉 (うきたなおや)	東京大学大学院理学系研究科 研究員 (現職：筑波大学計算科学研究センター研究員) シミュレーションの実行とプログラム開発
共同研究者 石井理修 (いしいのりよし)	東京大学大学院理学系研究科 研究員 (現職：筑波大学計算科学研究センター研究員) プログラム開発とハドロン構造の研究
共同研究者 前沢祐 (まえざわゆう)	東京大学大学院理学系研究科 博士課程院生 クォーク間ポテンシャルの解析

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。

現在、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進められている。また、約 $10 T_c$ までのQGPの性質を定量的に調べることを目的として、CERNのLHCを用いた、より高エネルギー領域での大規模実験も準備が進められている。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。世界的には、計算の楽なスタガード型格子クォークを使った研究が主流で、クォーク間ポテンシャルのチャンネル依存性や、有限密度QCDに関してはほとんどスタガード型クォークでのみ調べられているのが現状だが、これだけでは、格子化誤差のコントロールが十分ではない。格子化誤差を取り除いて、実験と比較できる結果を導くためには、ウィルソン型クォークによる追試と比較が必要である。そこで、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。最終的には、sクォークまで正しく取り入れた $N_f=2+1$ QCDで相転移温度と相転移次数の決定、RHICで実験を行っている相転移点 T_c 周辺から、LHCで到達可能な $10 T_c$ 程度までをカバーする広い温度範囲で、物理量（状態方程式や音速などの熱力学量、及びチャーモニウムをはじめとするハドロンの質量や幅、時空相関などの諸性質）の温度依存性の解明を目指している。

3. 平成18年度の研究の概要

平成18年度は、最初のステップとして、フレーバー数2の場合（u,dクォークまでの動的効果を取り入れた近似）の有限温度物理の研究から開始して、ウィルソン型格子クォークによる最初の有限密度シミュレーションの遂行と、最終的には、2+1フレーバーQCD（動的なu,d,sクォークを取り入れた近似無し）の格子QCD）における予言を目標としている。平成18年度は、平成17年度に開始したフレーバー数2のQCDのシミュレーションを進め、相転移温度、クォーク間ポテンシャル、クォーク数サセプティビリティについて研究した。これらは格子場の理論国際会議 Lattice 2006 (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006) で中間結果を発表し、クォーク間ポテンシャルに関してはPhysical Review D に論文を発表した。その他の論文も準備中である。

相転移温度に関しては、CP-PACSグループによるWilsonクォークを用いた先行研究を拡大して、現状の中間結果として $N_t=4$ で170-186MeV, $N_t=6$ で164-179MeVを得た。 N_t を6程度まで大きくすればスタガード型クォークとだいたい一致している。クォーク間ポテンシャルに関しては、2個のクォークのカラー状態（「チャンネル」）の違いによりクォーク間の力がどのように変わるかを研究した。クォーク・反クォーク間のカラー1重項ポテンシャル、カラー8重項ポテンシャル、及び、クォーク・クォーク間のカラー6重項、3*重項ポテンシャルを調べた結果、(i)相転移温度の2倍程度以上の高温では、クォーク間ポテンシャルにおけるチャンネルの違いは摂動最低次から予想される全体のカシミア係数に吸収可能で、チャンネルによらず同じパラメータを持つスクリーンされたクーロン型

ポテンシャルでよく記述できることを示した (図1)。結果として得られた有効クーロン係数や有効デバイ質量は3次元有効理論の摂動から予想される振る舞いをしていいる。有効クーロン係数はスタガード型クォークの結果と矛盾はしていないが、有効デバイ質量は20%程度大きいことがわかった。また、高温相における空間的閉じこめを研究し、有効結合定数を適切に選べば、3次元有効模型からの予想とよく一致することがわかった (図2)。さらに、ウィルソン型クォークとして初めて、有限密度におけるクォーク数サセプティビリティの計算を実行した。スタガード型クォークによる先行研究と定性的によく似た結果が得られた。

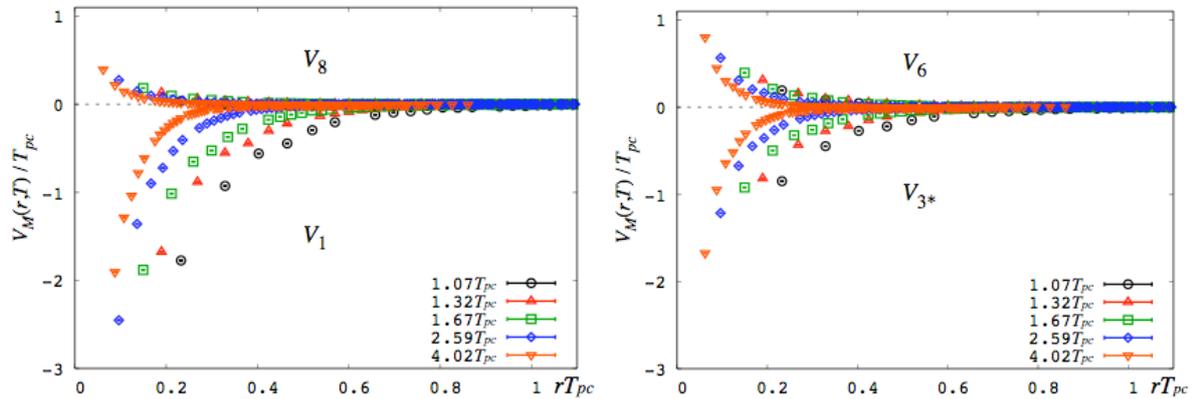


図1: クォーク・反クォーク間ポテンシャル (左図) と、クォーク・クォーク間ポテンシャル (右図)。カラー1重項、3*重項チャンネルは引力、8重項、6重項チャンネルは斥力になっている。

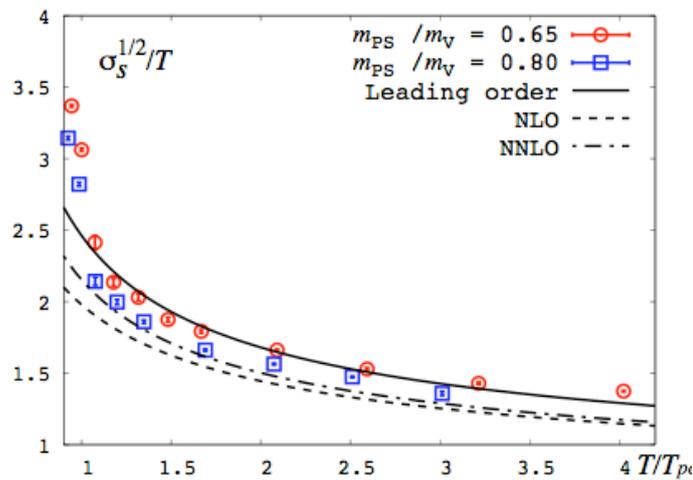


図2: 高温相における空間的弦張力のシミュレーション結果と3次元有効理論との比較。

4. 研究成果の公表

4.1 査読付き論文

- Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya, *Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action*, Phys. Rev. D 75 (2007) ref.074501, pp.1-23

4.2 国際会議プロシーディングス

- S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, *Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential*, PoS(LAT2006) (2006) ref. 132, pp.1-7 [Proc. LATTICE 2006]
- Y. Maezawa, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, N. Ukita, S. Aoki, K. Kanaya, *Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks*, PoS(LAT2006) (2006) ref. 141, pp.1-7 [Proc. LATTICE 2006]
- N. Ukita, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, S. Aoki, K. Kanaya, *Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action*, PoS(LAT2006) (2006) ref. 150, pp.1-7 [Proc. LATTICE 2006]
- Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita, *Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density*, [hep-lat/0702005], to be published in the Proceedings of Quark Matter 2006.
- Shinji Ejiri, *Lattice QCD thermodynamics with Wilson quarks*, [arXiv:0704.3747], to be published in the Proceedings of Yukawa International Seminar (YKIS 2006)

4.3 口頭発表

- Y. Maezawa 「Heavy quark potentials in full QCD lattice simulations at finite temperature」, Frontiers in the Physics of Quark-Gluon Plasma (RIKEN, Wako, Japan, July 7-8, 2006)
- Y. Maezawa*, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Taniguchi and N. Ukita 「Static quark free energies at finite temperature with two flavors of improved Wilson quarks」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- S. Ejiri*, S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Taniguchi, N. Ukita 「Equation of state for two-flavor QCD with an improved Wilson quark action at non-zero chemical potential」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- N. Ukita*, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, Y. Maezawa and Y. Taniguchi 「Finite temperature phase transition of two-flavor QCD with an improved Wilson quark action」, The XXIV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2006) (Tucson, Arizona, USA, July 23-28, 2006)
- Y. Maezawa 「Heavy Quark Potentials in Full QCD Lattice Simulations at Finite Temperature」, RIKEN-BNL Workshop "QCD in Extreme Conditions" (Brookhaven National Laboratory, NY, USA, July 31-Aug. 2, 2006)
- Shinji Ejiri 「QCD thermodynamics with Two Flavors of Wilson Quarks」, RIKEN-BNL Workshop "QCD in Extreme Conditions" (Brookhaven National Laboratory, NY, USA, July 31-Aug. 2, 2006)

- 前沢 祐*, 青木 慎也, 江尻 信司, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 谷口 裕介, 浮田 尚哉 「格子QCDによる高温でのクォーク間ポテンシャルの研究」, 基礎物理学研研究会「熱場の量子論とその応用」 (京都大学, 京都, Aug. 23-25, 2006)
- 江尻 信司*, 青木 慎也, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 前沢 祐, 浮田 尚哉 「ウィルソン型クォーク作用を用いた2フレーバーQCDの有限密度での状態方程式の研究」, 基礎物理学研研究会「熱場の量子論とその応用」 (京都大学, 京都, Aug. 23-25, 2006)
- Y. Maezawa*, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita 「Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density」, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006) (Shanghai, China, Nov. 14-20, 2006)
- Y. Maezawa*, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita 「Static quark free energies at finite temperature in full QCD lattice simulations」 poster, The 19th International Conference on Ultra-Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2006) (Shanghai, China, Nov. 14-20, 2006)
- 前沢 祐*, 青木 慎也, 江尻 信司, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 谷口 裕介, 浮田 尚哉 「格子QCDによる高温でのクォーク間ポテンシャルの研究」, 日本物理学会 (奈良女子大学, 奈良, Nov. 20-23, 2006)
- Shinji Ejiri 「Lattice QCD Thermodynamics with Wilson quarks」, Yukawa International Seminar "New Frontiers in QCD" (YKIS 2006) (Yukawa Institute, Kyoto, Japan, Nov. 20-Dec.8, 2006)
- Y. Maezawa 「Static quark potentials at finite temperature in full QCD lattice simulations」, Yukawa International Seminar "New Frontiers in QCD" (YKIS 2006) (Yukawa Institute, Kyoto, Japan, Nov. 20-Dec.8, 2006)
- 浮田 尚哉*, 青木 慎也, 江尻 信司, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 前沢 祐 「ウィルソン型クォーク作用を用いた格子QCDシミュレーションによる相転移温度と熱力学の研究 1」, 日本物理学会 (首都大学東京, 八王子, Mar. 25-28, 2007)
- 前沢 祐*, 青木 慎也, 江尻 信司, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 浮田 尚哉 「ウィルソン型クォーク作用を用いた格子QCDシミュレーションによる相転移温度と熱力学の研究 2」, 日本物理学会 (首都大学東京, 八王子, Mar. 25-28, 2007)