

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

2008 年 5 月 9 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 | 梅田貴士 (うめだたかし) | 筑波大学大学院数理物質科学研究科 研究員 $N_f = 2 + 1$ QCD の熱力学の研究 |
| 共同研究者 | 江尻信司 (えじりしんじ) | 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) | 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) | 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 Tc 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影響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 19 年度の研究の概要

3.1 デバイ遮蔽質量の研究

前年度までに $N_f = 2$ QCD における static quark free energy の計算やそこから引き出される遮蔽質量に関する研究を行った。今年度はさらに $N_f = 2$ QCD の配位上での magnetic と electric 遮蔽質量の詳細に関する計算を行った。Euclid 時間反転 と 荷電共役 の対称性を考えることによってあるゲージ固定条件のもと、Polyakov loop 相関をそれぞれの対称性に応じて分類し、それぞれの遮蔽質量を導出する事ができる。それらの結果、有限温度摂動論からの予想の通り、magnetic 遮蔽質量 (m_M) は electric 遮蔽質量 (m_E) よりも大きくなる事などを示した。

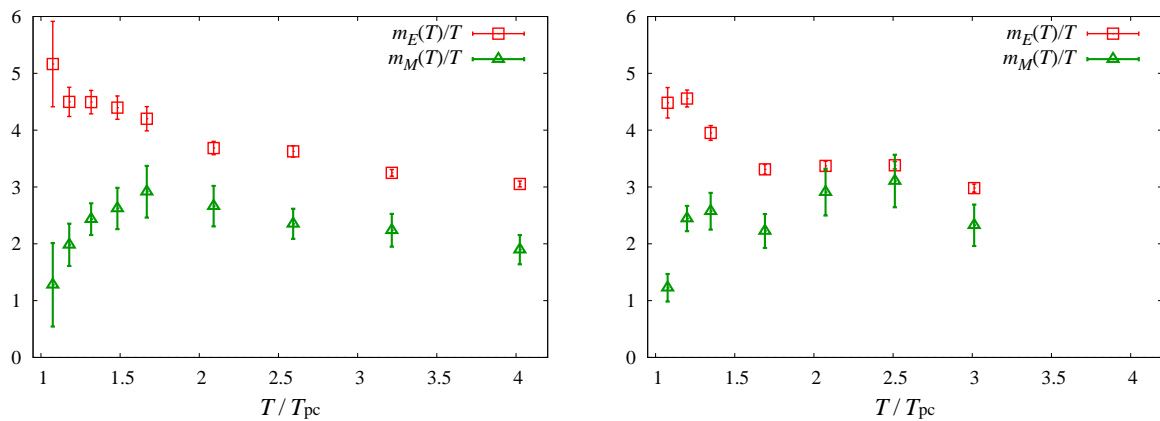


図 1: Magnetic 遮蔽質量 (m_E) と Electric 遮蔽質量 (m_M) の温度依存性。左図は $m_{PS}/m_V = 0.65$ 、右図は $m_{PS}/m_V = 0.65$ に相当するクォーク質量での計算を行った。

さらに両者の質量比 (m_E/m_M) が AdS/CFT 対応より求められる値に良く一致する事などを議論した。

そして $T/T_{pc} = 1.2$ 程度かそれ以上の高温では、この研究の計算で求めた electric 遮蔽質量は従来の方法である heavy quark free energy から求めた遮蔽質量と良い一致を示す事も分かった。これは、今回計算を行った範囲では electric な寄与が支配的であることを示している。摂動論によると

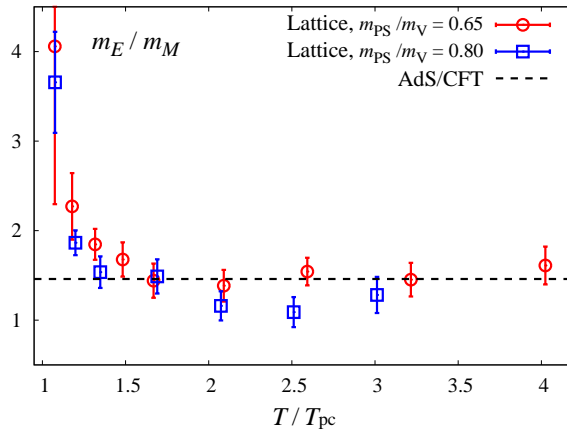


図 2: $m_{PS}/m_V = 0.65$ (circle) と 0.80 (square) に相当するクォーク質量での遮蔽質量比 m_E/m_M の計算。AdS/CFT 対応からの予想は $m_E/m_{\text{gap}} = 1.46$ として図中に示されている。

$m_E < 2m_M$ の場合、heavy quark free energy の magnetic な寄与は十分遠方で抑制される事が示唆される。今回の計算ではこの不等号関係式が成立している事を確認した事になる。

これらの計算に関しては国際会議などで発表を行った [3-1][3-2][3-3][3-6][4-1]。また現在投稿論文を準備中である。

3.2 有限密度の研究

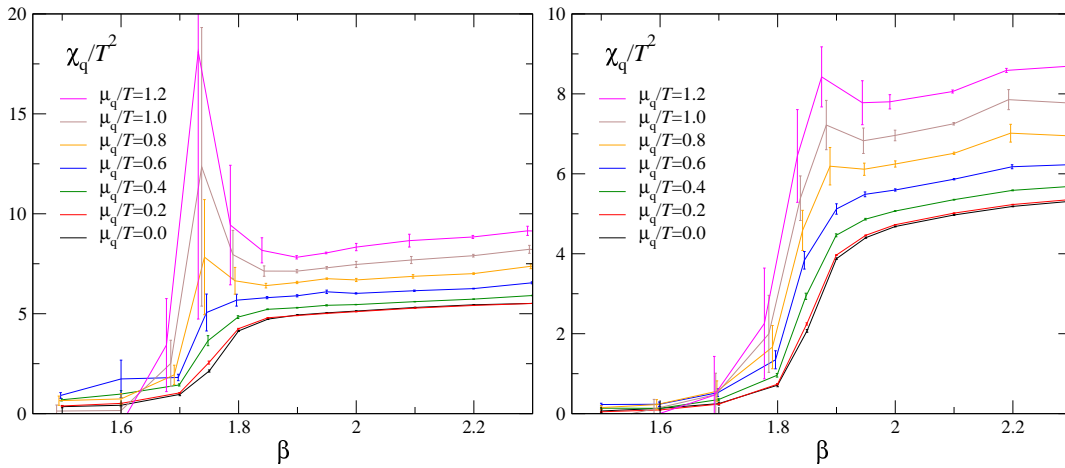


図 3: 複素位相をガウス関数で近似する手法による有限密度での Quark number susceptibility の計算。左図は $m_{PS}/m_V = 0.65$ 、右図は $m_{PS}/m_V = 0.80$ に相当するクォーク質量での計算を行った。

昨年度までに計算した $N_f = 2$ QCD のゲージ配位において heavy quark free energy や、quark number susceptibility の有限密度効果に関する計算を行った。有限密度での QCD の計算は符号問題と呼ばれる問題があり、直接モンテカルロ法による計算ができない。その為、有限密度効果の見積りは、共同研究者の一人である江尻氏によって開発された、化学ポテンシャルに関する Taylor 展開の手法を用いる。この研究ではそれぞれの物理量について、Taylor 展開の展開係数のうち非自明な 2 次と 4 次の係数を数値的に計算した。

従来の方法に加えて有限密度の複素位相部分をガウス関数で近似して reweighting 法を用いる手法による Quark number susceptibility の計算なども行った。平成 20 年度の研究計画で検討しているクォーク数密度相関距離が長くなる場合は susceptibility が大きくなるという関係がある為に新しいプロジェクトの予備計算としても重要性がある。

これらの計算に関しては国際会議などで発表を行った [3-1][3-2][3-3][3-4][3-6][3-7]。また現在投稿論文を準備中である。

3.3 チャーモニウム消失温度の研究

この研究ではチャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウム (特に J/ψ , $\psi(2S)$, $\psi(3S)$ 状態など) がクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相中で、それぞれが散乱状態としてバラバラになってしまう「チャーモニウム状態の消失温度」を有限温度格子 QCD による数値シミュレーションによって求める事を目的とする。これらチャーモニウムの消失温度は重イオン衝突実験での QGP 生成を示す重要なシグナルの一つである「 J/ψ 抑制」のシナリオを議論する上で必要となるパラメータであり、格子 QCD による第一原理計算、特に動的クォークの効果を検討した full QCD 計算での見積りが必要とされている量である。まずはチャーモニウムの相関関数から、状態の質量スペクトルを計算する。それらの空間方向の境界条件を変える事によって (a) ハドロン粒子として束縛状態を持つ場合は質量スペクトルが境界条件に依存しない。(b) 束縛状態が解けてクォーク、反クォークの散乱状態として存在する場合は、境界条件によって制限される運動量に応じて質量スペクトルが変化する。という性質を利用して QGP 相におけるチャーモニウム状態の消失温度を計算する。虚時間定式化による有限温度の計算の場合、時間方向の格子サイズが温度の逆数に制限されるために、可能な限り短い (虚) 時間で状態を引き出す必要がある。さらに、「間接的 J/ψ 抑制」のシナリオに重要な励起状態 ($2S$) の計算を行う為にも対角化のテクニックが必要になる。これらの計算で同時に波動関数を計算することも可能で、波動関数の温度依存性の側面からも消失温度の見積りも行う。最初は時間方向の自由度を十分に確保することができる非等方格子でのクエンチ近似計算を行った。

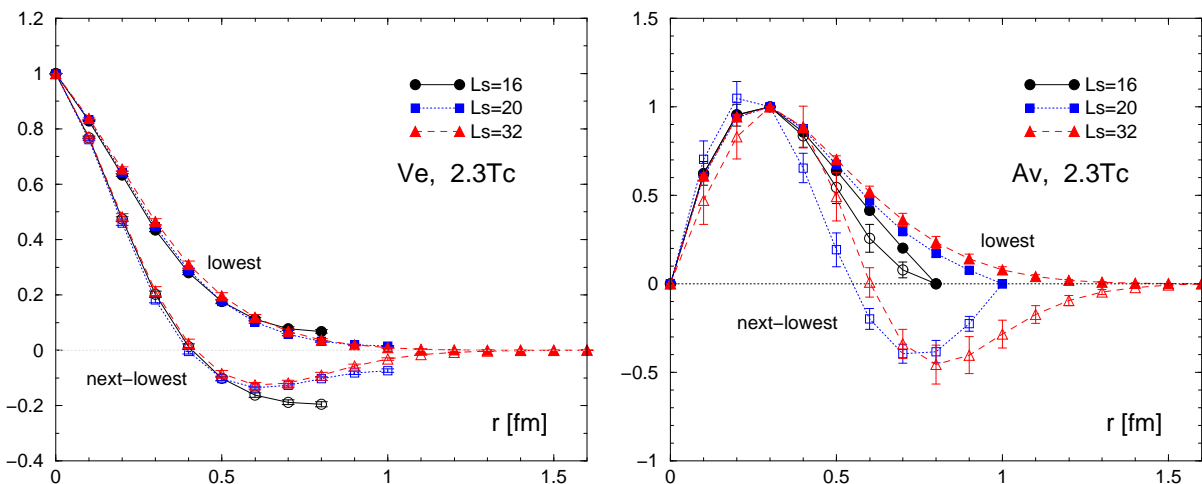


図 4: Bethe-Salpeter 波動関数の体積依存性。左図が S 波状態、右図が P 波状態に関する基底状態、第一励起状態を表す。

チャーモニウムの束縛状態と散乱状態とを見分けるために Bethe-Salpeter 波動関数の形状を調べた。その際、対角化の方法を用いて基底状態と各励起状態を分離した。また、メソン相関関数の定数モードの効果を取り除いた計算を行った。シミュレーションの結果、少なくとも $2.3T_c$ まで、チャー

モニウムの S 状態、P 状態、さらにそれらの励起状態まで含めてハドロンの状態が消失することは確認できなかった。

これらの計算に関しては国際会議などで発表を行った [3-5][3-8][3-9][4-2][4-4][4-5]。また現在投稿論文を準備中である。

3.4 $N_f = 2 + 1$ QCD の研究

$N_f = 2 + 1$ QCD の熱力学の研究として、相転移次数、相転移温度、状態方程式などを計算する計画を進めている。この方法では従来の熱力学量の計算と異なり、ゲージ結合定数ではなく、時間方向の格子サイズによって温度を変えるという手法での有限温度の研究を行う。この新しいアプローチでの計算は温度の分解能が低いという欠点があるが、多くの利点も存在する。有限温度の計算でもスケールの決定や、クォーク質量のチューニングなどゼロ温度での計算が不可欠であるが、この場合 CP-PACS などが研究を行ったゼロ温度の計算をそのまま流用する事が可能な点、さらにシミュレーションを行うパラメータを決める為のパラメータサーチの必要が無い点である。通常これらのゼロ温度での基礎データの計算は有限温度格子 QCD の研究において大部分を占める計算である。今回のアプローチでは、ゼロ温度での配位生成を一切行うことなく、非摂動改良されたウィルソン型クォーク作用による $2 + 1$ フレーバーでの格子 QCD シミュレーションによって計算を行うことが可能になる。この有限温度の研究に対する新しい方針は、近年の full QCD のゲージ配位の共有化の流れにも非常に相性の良いやり方で、この方針がどの程度有効に機能するかを示すこと自体が格子 QCD の分野全体に対する貢献につながるとも考えている。このアプローチの下で、既に CP-PACS のゼロ温度計算のパラメータに基づいた有限温度ゲージ配位の生成を進めている。このアプローチでの相転移温度計算のテスト計算の報告は日本物理学会で報告を行った [4-3]。

4 研究成果の公表

4.1 査読付き論文

1-1 Heavy-Quark Free Energy, Debye Mass, and Spatial String Tension at Finite Temperature in Two Flavor Lattice QCD with Wilson Quark Action

Phys. Rev. D75 074501 (2007)

WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, N. Ukita, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii and K. Kanaya

TKYNT-07-02, UTHEP-535, BNL-NT-07/3 hep-lat 0702004

1-2 Existence of the critical point in finite density lattice QCD

Phys. Rev. D77 014508 (2008)

Shinji Ejiri

arXiv:hep-lat 0706.3549

4.2 国際会議プロシーディングス

2-1 Lattice QCD thermodynamics with Wilson quarks

Proceedings of Yukawa International Seminar "YKIS 2006"

Prog. Theor. Phys. Suppl. 2007 245 252

Shinji Ejiri

arXiv:hep-lat 0704.3747

2-2 Thermodynamics of two-flavor lattice QCD with an improved Wilson quark action at non-zero temperature and density

J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.34 2007 651 654

WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya and N. Ukita

TKYNT-07-01, UTHEP-536, BNL-NT-07/4, arXiv:hep-lat 0702005

2-3 Study of constant mode in charmonium correlators at finite temperature

PoS(LATTICE 2007) 2007 1 7

Takashi Umeda

arXiv:hep-lat 0710.0204

2-4 Study of the critical point in lattice QCD at high temperature and density

PoS(LATTICE 2007) 2007 1 7

Shinji Ejiri

arXiv:hep-lat 0710.0645

2-5 Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks

PoS(LATTICE 2007) 2007 1 7

WHOT-QCD Collaboration: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita, T. Umeda

arXiv:hep-lat 0710.0945

4.3 国際会議発表

3-1 Heavy-quark free energy and Debye screening effect at finite temperature and density in lattice QCD simulations (poster)

INTERNATIONAL NUCLEAR PHYSICS CONFERENCE Tokyo, Japan

Y. Maezawa (2007) June 3-8

3-2 Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density in lattice QCD simulations

Nagoya Mini-Workshop "Chiral Symmetry in hot and/or dense matter" Nagoya, Japan 2007

Y. Maezawa

(2007) June 25-27

3-3 Thermodynamics and heavy-quark free energies at finite temperature and density with two flavors of improved Wilson quarks

The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007)

Regensburg, Germany 2007

Y. Maezawa

(2007) July 30-August 4

- 3-4** Study of the critical point in lattice QCD at high temperature and density
The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007)
Regensburg, Germany 2007
S. Ejiri
(2007) July 30-August 4
- 3-5** Study of constant mode in charmonium correlators at finite temperature
The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2007)
Regensburg, Germany 2007
T. Umeda
(2007) July 30-August 4
- 3-6** Thermodynamics of QCD in lattice simulation with improved Wilson quark action at finite temperature and density
QCD in extreme conditions
INFN Frascati, Rome, Italy 2007
Y. Maezawa
(2007) August 6-8
- 3-7** On the critical endpoint in QCD at non-zero temperature and density
QCD in extreme conditions
INFN Frascati, Rome, Italy 2007
S. Ejiri
(2007) August 6-8
- 3-8** Study of constant mode in charmonium correlators in hot QCD
QCD in extreme conditions
INFN Frascati, Rome, Italy 2007
T. Umeda
(2007) August 6-8
- 3-9** Charmonium dissociation temperatures in lattice QCD with a finite volume technique
INTERNATIONAL NUCLEAR PHYSICS CONFERENCE (Quark Matter 2008)
Jaipur, India 2008
T. Umeda
(2008) Feb. 4-10

4.4 国内会議発表

- 4-1** 格子 QCD による QGP 物質の性質の解明
基研研究会「熱場の量子論とその応用」
京都大学基礎物理学研究所, 京都 2007
前沢 祐
(2007) Sept.5-7
- 4-2** Constant mode in charmonium correlation functions
基研研究会「熱場の量子論とその応用」

京都大学基礎物理学研究所, 京都 2007

梅田 貴士

(2007) Sept.5-7

4-3 Finite temperature lattice QCD with $N_f=2+1$ Wilson quark action

日本物理学会第 62 回年次大会

北海道大学、北海道 2007

梅田 貴士, 青木 慎也, 江尻 信司, 初田 哲男, 石井 理修, 金谷 和至, 前沢 祐, 浮田 尚哉

(2007) Sept. 20

4-4 Lattice QCD study of charmonium dissociation temperatures

日本物理学会第 63 回年次大会

近畿大学、大阪 2008

梅田 貴士

(2008) Mar. 22-26

4-5 有限温度格子 QCD によるチャーモニウム消失温度の探索

日本物理学会第 63 回年次大会

近畿大学、大阪 2008

大野 浩史, 梅田 貴士, 金谷 和至 for WHOT-QCD Collaboration

(2008) Mar. 22-26