

課題名 (タイトル) :

有限温度有限密度量子色力学の数値シミュレーション

利用者氏名 : ○日高義将* 花田政範** 永田桂太郎*

所属 : *仁科加速器研究センター 初田量子ハドロン物理学研究室

**仁科加速器研究センター 橋本数理物理研究室

1. 有限温度有限バリオン密度の量子色力学 (QCD) の研究は宇宙初期の高温状態や重イオン衝突実験を理解するために不可欠であるが、物理的に興味のあるパラメータ領域では非摂動効果が大きいために既存の解析的な手法が適用できず、格子シミュレーションも負符号問題のために適用困難であるため、根拠の曖昧なモデル計算以外には殆ど何も結果が得られていない状態が長く続いてきた。しかし、最近になって、ある種の負符号問題の無い系と有限温度有限バリオン密度 QCD の定量的な関係が明らかになり、前者を数値シミュレーションする事で有限温度有限バリオン密度 QCD の定量的な理解が可能である事が分かった。本研究では、負符号問題の無い系を精密にシミュレーションし、有限温度有限バリオン密度 QCD のカイラル相転移の性質を世界で初めて定量的に理解する事を目標とする。

2. 具体的な利用内容、計算方法

負符号問題のない系としてアイソスピン化学ポテンシャルを持つ QCD を考える。アイソスピン化学ポテンシャルとはアップクォークとダウクォークが大きさが等しく逆符号の化学ポテンシャルを持つ系である。2つのクォークセクタから発生する負符号が常に相殺するため符号問題のない理論となっている。

この系を調べるために、QCD の非摂動的な解法である格子 QCD シミュレーションを用いる。まず、アイソスピン化学ポテンシャルを導入した QCD を格子上で定式化する。この系では4次元格子の各リンク上に8成分のSU(3)ゲージ場が配置されており、系の分配関数は全てのゲージ場に対する多次元積分として与えられる。これを解くために、モンテカルロ法を用いたシミュレーションを行い、ゲージ場の配位を生成する。

アイソスピン化学ポテンシャルの増加に伴い、系はハドロン相と呼ばれる原子核等を含む通常の相から、パイオン凝縮相への相転移を起こすことが知られている。アイソスピン化学ポテンシャルを持つ QCD とバリオン化学ポテンシャルを持つ QCD の関係はパイオン凝縮相が起きない場合に正当化される。従って、まずは相境界を特定することが重要である。このために、様々な温度や化学ポテンシャルに対してシミュレーションを行い、ゲージ配位を生成する。

得られたゲージ配位を用いてアイソスピン密度、アイソスピン感受率などの熱力学量、およびその揺らぎを計算し、相転移が発生する化学ポテンシャルの値を調べる。

本研究では4次元格子理論のモンテカルロシミュレーションにおいて RICC などのスーパーコンピュータを用いた。

3. 結果

シミュレーションは以下のセットアップで行った。まず格子 QCD 作用として、くりこみ群改良型ゲージ作用および2フレーバのクローバ改良型 Wilson 作用を用いた。格子サイズ $(N_x, N_y, N_z, N_t) = (8, 8, 8, 4)$ の系で行った。ゲージ相互作用 $\beta = 6/g^2$ を $\beta = 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.85, 1.90, 2.0, 2.1$ に対してシミュレーションを行った。これは温度として $T/T_c = 0.76 - 1.69$ に相当する。ここで、 T_c は擬臨界温度とする。そのそれぞれに対して、アイソスピン化学ポテンシャルを $\mu_1 a = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$ に変えてシミュレーションを行った。

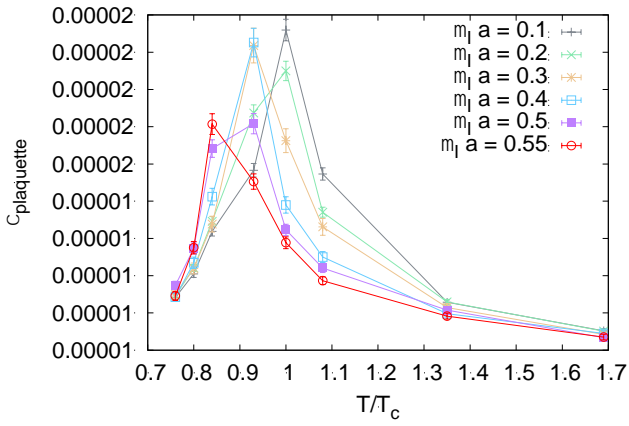


図 1. プラケット感受率の温度依存性. プラケットはゲージ場のエネルギー密度を表す.

図 1 はアイソスピン化学ポテンシャルを変えたときの、プラケット感受率の温度依存性を表す。 μ_I の増加に伴い感受率のピークが低温側にシフトする振舞が見られる。これは化学ポテンシャルの増加に伴い、閉じ込め/非閉じ込め相転移温度が下がる事を示唆している。

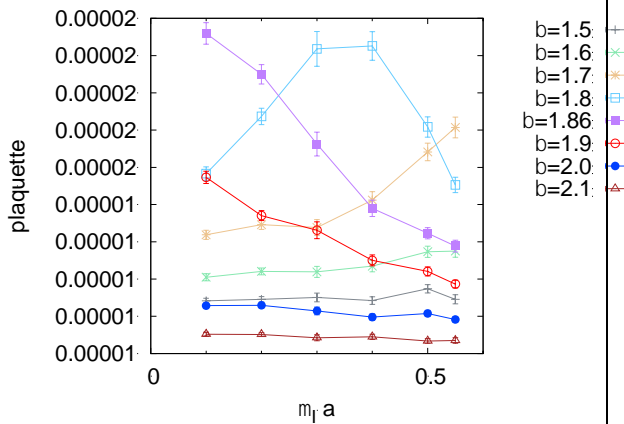


図 2. プラケット感受率のアイソスピン化学ポテンシャル依存性.

図 2 は感受率のアイソスピン化学ポテンシャル依存性を表す。 $\beta=1.86$ のとき、 $\mu_I a=0$ に感受率のピークがあり、それが温度低下 ($\beta=1.8, 1.7$) につれて、 μ_I が大きい方にシフトする振舞が見られる。これも図 1 と同様に閉じ込め相境界線の温度変化を示唆している。

先行研究のゼロ温度の計算において $T=0$ でのパイオン凝縮相転移は $\mu_I a = 0.5$ 程度でおき、高

温ではそれより大きい μ_I で起きると期待される。仮にパイオン凝縮相転移を見つけた場合、その相境界線は温度上昇に伴い、 μ_I のおおきい側にシフトすると期待されるが、今回はそのような振舞は見られなかった。

4. まとめ

アイソスピン化学ポテンシャルを持つ量子色力学のシミュレーションを行い、その相図を調べた。熱力学パラメータの値を変えながらシミュレーションを行うことで相図を調べ、閉じ込め/非閉じ込め相境界線の温度変化を特定した。一方で、パイオン凝縮相転移の兆候は見られなかった。

5. 今後の計画・展望

パイオン凝縮相転移をどのように見いだすか、また得られた配位を用いてどのような物理量を計算するかが今後の課題である。

パイオン凝縮相転移に関しては、より低温の計算や、より化学ポテンシャルの大きい計算が必要であるが、低温側は統計揺らぎが大きく、化学ポテンシャルが大きい領域はディラック演算子の低モード発生に伴う計算時間の増加があり、アルゴリズムなどの改良あるいは有効理論の援用などが必要と考えている。

すでに多くの配位が得られており、これらを用いて様々な物理量の計算が可能である。例えば、作用の位相と物理量の相関を調べる事は位相が果たす役割を理解する上で今後の重要な課題である。

平成 26 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

“Lee-Yang zero distribution of high temperature QCD and Roberge-Weiss phase transition” , K. Nagata, K. Kashiwa, A. Nakamura, S. M. Nishigaki, arXiv:1410.0783, (投稿中).

【国際会議などの予稿集、proceeding】

“A filtering technique for the temporally reduced matrix of the Wilson fermion determinant” , Futamura, Hashimoto, Imakura, Nagata, Sakurai, arXiv:1411.4262v1 to be appeared in PoS Lattice2015.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

Futamura, Hashimoto, Imakura, Nagata, Sakurai,

“A filtering technique for the temporally reduced matrix of the Wilson Fermion determinant” , The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory, 23-28 June 2014, Columbia University New York.

【その他】

“Properties of the baryon number distribution in QGP” , Keitaro Nagata, Kouji Kashiwa, Atsushi Nakamura, Shinsuke M. Nishigaki, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS Hawaii island, Hilton Waikoloa Village, October 7-11, 2014.

“Baryon number distribution in lattice QCD” , Computational Nuclear Physics II Hawaii island, Hilton Waikoloa Village, October 7-11, 2014.