

課題名 (タイトル) :

有限温度 QCD の相構造解析

利用者氏名 :

- 武田 真滋
- 藏増 嘉伸
- 中村 宜文

理研での所属研究室名 :

計算科学研究機構 連続系場の理論研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

量子色力学(QCD)における有限温度相転移の次数(強さ)は、クォークの質量やフレーバー数に依存することが知られている。特に3フレーバーにおけるカイラル極限、すなわちクォーク質量がゼロの場合、相転移の次数は1次となることが予想されている。このクォーク質量をゼロから徐々に大きくしていくと、一次相転移から二次相転移の臨界終点を経てクロスオーバーになると考えられている。これを確かめるため、格子QCDシミュレーションを用いて臨界終点を決定する研究が既に行われてきた。その多くはスタaggerド型のクォーク作用を用いたものであったが、作用を改良し格子離散化誤差を小さくするほど、または、連続極限により近づくほど臨界終点におけるパイ中間子質量が小さくなった。一方、ウィルソン型クォーク作用を用いた研究でも同様の振る舞いがみられたが、臨界終点におけるパイ中間子質量はスタaggerド型のものと比べると大きい値を示している。このように、未だに臨界終点の位置について最終的な結論は得られておらず、本当に一次相転移の領域が存在するのかさえもまだ確かめられていない。また、クォーク作用の違いによって結果に違いがみられることについても理解する必要がある。

そこで、本研究では、上記問題について新たな知見を得るため、3フレーバーQCDのよい比較対象として、4フレーバーQCDに着目する。その理由は以下の通りである。まず、4フレーバーでもカイラル極限の相転移次数は1次であると予想されている。また、フレーバー数がより大きい分

相転移の強さもより強く、より重いクォーク質量で臨界終点が見つかるかと予想される。これは、より少ない計算コストでシミュレーションが行えることを意味している。そして最後に、4フレーバーQCDの場合、未だに正当性の議論がある平方根化のトリックを用いることなくスタaggerド型クォーク作用を扱うことができるため、ウィルソン型との比較をより正確に議論することができる。以上の理由により、本年度は4フレーバーQCDの相構造をウィルソン型クォーク作用を用いて調べることにした。

2. 具体的な利用内容、計算方法

岩崎ゲージ作用と4フレーバーの縮退した質量をもつ0(a)改良されたウィルソンクローバー作用を用いて格子QCDシミュレーションを行った。ゲージ配位生成のためにHMCアルゴリズムを用いた。使用したプログラムはBQCDである。

相構造を決定するために必要な秩序変数としてクォーク凝縮を選び、その高次のモーメントの評価にはノイズ法を用いた。温度格子サイズは4、6、8とした。大きい温度格子サイズは、より細かい格子間隔を意味する。また、空間格子は有限サイズスケリング解析を行うために、 8^3 から 24^3 までとした。

3. 結果

クォーク凝縮の感受率を計算し、そのピーク位置を相転移点として採用した。いくつかの相転移点を結ぶと相転移線になるが、その様子を図1に示した。ただし、この一連の計算を温度格子サイズ4、6、8で行った結果を載せている。

次に、この相転移線上におけるクォーク凝縮の尖度を図 2 にプロットしている。様々な空間体積の線が交わる点を臨界点とした。

最後に、様々な温度格子サイズで得られた臨界パイ中間子質量の連続極限を実行した (図 3)。その結果、有限格子間隔依存性は 3 フレーバーの場合と同じような振る舞いを示したが、その連続値は非常に大きな値を取ることがわかった。

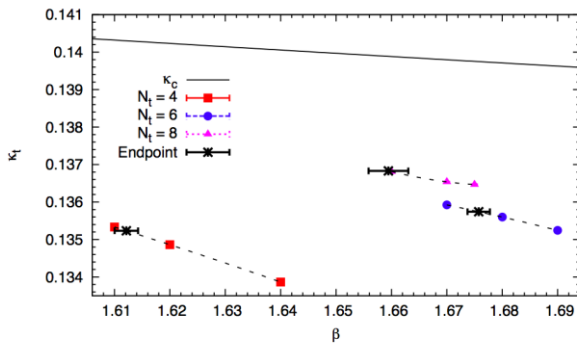


図 1 裸のパラメータ空間における相図：縦軸はクォーク質量に反比例するパラメータ κ 、横軸はゲージ結合定数に関するパラメータ β である。黒点線は各温度格子サイズ (4、6、8) における相転移線。黒い点は臨界点 (その決定は図 2 参照)。

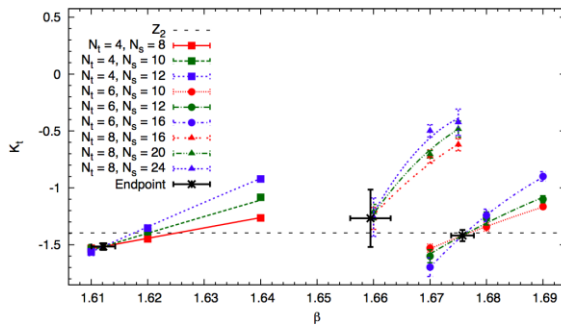


図 2 尖度交差法：縦軸はクォーク凝縮の尖度、横軸は相転移線上の β の値。黒点が臨界点。3 つの温度格子サイズ (4、6、8) の結果を載せている。水平の黒点線は 3 次元 Z_2 ユニバーサリティークラスの場合の尖度の値を示す。

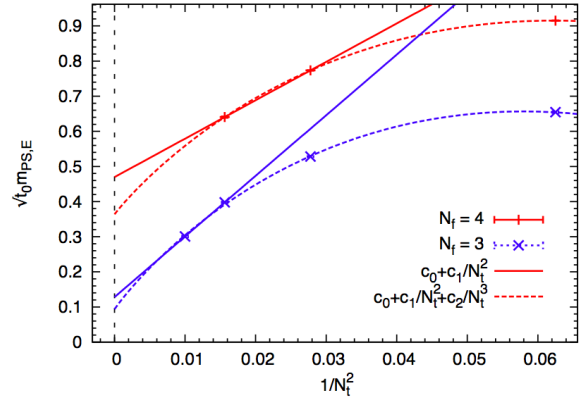


図 3 臨界パイ中間子質量の連続極限への外挿：縦軸は臨界パイ中間子質量、横軸は温度格子サイズの逆数の 2 乗 (格子間隔の 2 乗に比例する量である)。

4. まとめ

4 フレーバー QCD における有限温度相転移の臨界点の位置決定を行った。臨界パイ中間子質量の連続値は 3 フレーバー QCD の場合と異なり、比較的大きな値を持つことがわかった。これは、4 フレーバー QCD のカイラル極限での相転移次数が 1 次であることを強く示唆している。

5. 今後の計画・展望

3 フレーバーの時と同様に、4 フレーバー QCD における臨界点の離散化誤差が非常に大きいことがわかった。これは最終的に臨界点の決定に大きな不定性を残すことになる。結果の信頼性を高めるためには、より大きな温度格子サイズの計算が必要となる。よって、将来的に例えば温度格子サイズ 10 以上の計算を行いたいと考えている。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

1. 「Critical point phase transition for finite temperature 3-flavor QCD with non-perturbatively $O(a)$ improved Wilson fermions at $N_t=10$ 」 Xiao-Yong Jin, Yohshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, Akira Ukawa, Phys. rev. D96, 034523 (2017)

【国際会議などの予稿集、proceeding】

1. 「Continuum extrapolation of critical point for finite temperature QCD with $N_f=3$ 」 S. Takeda, X.Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and A. Ukawa, arXiv:1710.08057

【国際会議、学会などでの口頭発表】

1. 口頭発表：中村宜文、「Critical endpoint of the finite temperature phase transition for 2+1 flavor QCD away from the SU(3)-flavor symmetric point」、LATTICE 2017、2017年6月20日、Granada Spain
2. 口頭発表：武田真滋、「Continuum extrapolation of critical point for finite temperature QCD with $N_f=3$ 」、LATTICE 2017、2017年6月20日、Granada Spain
3. 口頭発表：大野浩史、「Critical endpoint of 4-flavor QCD with non-perturbatively $O(a)$ -improved Wilson quarks」、LATTICE 2017、2017年6月20日、Granada Spain