

課題名 (タイトル) :

ゼロ密度・有限温度 QCD の臨界点の研究

利用者氏名 :

○ 武田 真滋

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

本プロジェクトの目的は、モンテカルロシミュレーションによる第一原理計算によって、量子色力学(QCD)の有限温度相転移の次数を決定することである。ただし、以下ではクォーク数密度は考えない。一般的に相転移次数はクォーク質量の値やクォークのフレーバー数によって変化することが知られている。例えば、3フレーバーQCDの場合、非常に軽い、あるいは、非常に重いクォーク質量領域では1次相転移を示し、一方でその中間領域ではクロスオーバーになることが知られている。その1次相転移領域とクロスオーバー領域との境界上では2次相転移を示すと考えられており、その臨界点を定量的に定めることが当該研究分野の重要な課題の一つである。特に軽い質量領域の臨界点については、これまでの我々の研究成果や近年の他グループの報告によると、それが連続極限のQCDにおいて存在するのかどうか疑わしくなっている状況である。

臨界線や臨界点を決定する先行研究としては、スタaggerドフェルミオンを用いたものが主流であった。しかし、スタaggerドフェルミオンの結果は、平滑化という改良の度合いによって臨界点が出現したり消滅したりするなど、不明瞭な点が指摘されている。また、これら一連の計算では計算コストを優先するために、理論的な問題が指摘されている平方根化というトリックを使っており、根本的な疑念も残されている。このような状況を踏まえ、我々は理論的な不安要素がない「改良ウィルソン型フェルミオン作用」を採用するに至り、これが他のグ

ープとの大きな違いである。

これまでの実績としては、温度格子サイズ4、6、8の計算を行い、臨界パイ中間子質量の連続極限への外挿を試みた[Phys. rev. D91, 14508(2015)]。しかし、有限格子間隔による系統誤差が大きいことが明らかになった。そこで、H27年度に本制度の一般利用の計算資源等を使って温度格子サイズ10の計算を行い、連続外挿の改善を行った[Phys. Rev. D96, 034523(2017)]。その結果、臨界パイ中間子質量の上限値がおよそ170MeVとなることがわかった。これは上記の系統誤差のために、スタaggerドフェルミオンの上限値50MeVに比べて緩い上限値となっているが、平滑化や平方根化を使わないクリーンな結果として重要な意味を持っている。

このような一連の研究の流れの中で、さらに臨界点の上限値を下げる、あるいは、連続極限を実行するため、本課題では温度格子サイズ12の計算に着手した。しかし、短い期間ですべての計算を実行することは難しいため、本課題ではまずパラメータサーチを小さい体積(空間格子サイズ16、20、24)で計算を行い、臨界点の適当な位置を特定した。つまり、本課題は将来行う大規模シミュレーションに向けた準備計算という位置づけである。

2. 具体的な利用内容、計算方法

これまでの計算と同様に、岩崎ゲージ作用と0(a)改良されたウィルソンローバー作用を用いて格子QCDシミュレーションを行う。ゲージ配位生成のためにHMCアルゴリズムを用い、プログラムはBQCDを使った。10トラジェクトリ毎に

ゲージ配位をストアし、そのストアされた配位に対して下記の物理量の測定を行った。

秩序変数としてクォーク凝縮を採用し、その高次モーメントの評価にはノイズ法を用いた。また、マルチアンサンブル法を用いて、異なるパラメータ（今回はクォーク質量に関連するパラメータ κ の値が異なるデータをこの方法でまとめた）で生成されたデータを統合して解析をおこなった。温度格子サイズは 12 で固定した。また、空間格子は有限サイズスケール解析を行うために、 16^3 , 20^3 , 24^3 を選んだ。アスペクト比は小さいが、これまでの経験から相転移線を決定するには十分であると判断した。

3. 結果

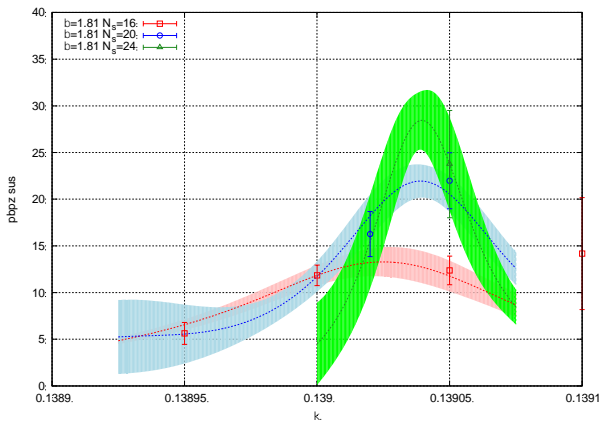


図 1 クォーク凝縮の感受率：縦軸はクォーク凝縮の感受率、横軸はクォーク質量に反比例するパラメータ κ 。この図ではゲージ結合定数に関するパラメータ $\beta=1.81$ は固定している。

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（図 1 参照）。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 2 に示した。ただし、比較のために以前得られた温度格子サイズが小さい場合（6、8、10）のデータも同時にプロットしている。

次に、感受率ピークの空間サイズ(L)依存性 $\chi_{\max} \propto L^b$ を支配する指数 b を抽出し、それを相転移線上のパラメータ β の関数としてプロットしたのが図 3 である。我々が求めたい臨界点のユニバーサリティークラスは 3 次元 Z_2 であると予

想されており、その場合指数 b はおよそ 2 であることがわかっている（図 3 の水平な濃緑線）。よって、その値を取るときの β が臨界点上のパラメータ β_c であると予想できる。図 3 の $N_t=12$ のデータから $\beta_c \sim 1.81$ と読み取れ、おおよその臨界点の場所を特定することができた。

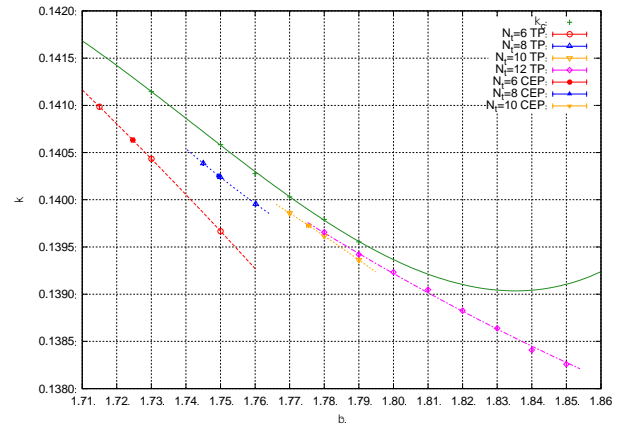


図 2 裸のパラメータ空間における相図：縦軸はクォーク質量に関連するパラメータ κ 、横軸はゲージ結合定数に関するパラメータ β である。各温度格子サイズの相転移線については $N_t=6, 8, 10$ のものは以前に得られた結果で、一方 $N_t=12$ は本年度得られた結果である。

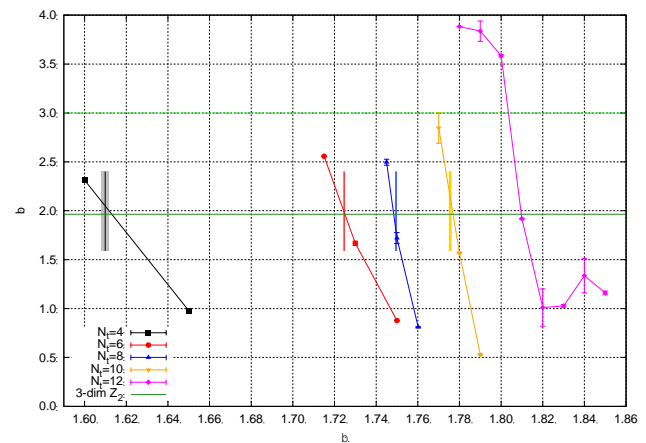


図 3 感受率ピークのスケール指数 b：縦軸が指数 b、横軸は相転移線上の β の値。以前の温度格子サイズ（4、6、8、10）の結果も比較のためプロットしている。水平の濃緑線は 3 次元 Z_2 ユニバーサリティークラスの場合の b の値を示す。

4. まとめ

温度格子サイズを 12 に固定し、3 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。その解析には、クォーク凝縮の感受率ピークの体積依存性を利用した。ただし、比較的小さい空間格子を使っているため、これは最終的な決定ではなく、今後行う大規模計算に向けての準備段階という位置づけである。

5. 今後の計画・展望

来年度は、同じ温度格子サイズ 12 のままで、大きい空間格子サイズ 28^3 や 32^3 などの計算を行い、また、クォーク凝縮の尖度などを用いた尖度交差法によって臨界点を決定したいと考えている。これにより、臨界点の連続外挿の不定性が抑えられ、より高精度で臨界点を決定できると期待される。