

課題名(タイトル):

## 有限温度 QCD の相構造解析

利用者氏名:○中村宜文

理研における所属研究室名:計算科学研究センター フラッグシップ2020 アプリケーション開発チーム

## 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ド型のものとは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。

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の計算も行っている。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。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本年度は、ウィルソン型クォーク作用を用い、3フレーバーQCDと4フレーバーQCDの相構造を並行して調べることにした。岩崎ゲージ作用と縮退した質量をもつ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。

3フレーバーQCDの温度格子サイズは12で、空間格子サイズは $24^3$ と $28^3$ とした。4フレーバーQCDの温度格子サイズは8で、空間格子サイズは $20^3$ と $24^3$ とした。有限サイズスケール解析を行うために、複数の空間格子サイズの計算が必要である。

## 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、相転移点におけるクォーク凝縮の尖度が空間格子サイズに依存しない点を同定し、その点を臨界点とした。最後に、様々な温度格子サイズで得られた臨界温度、臨界パイ中間子質量の連続極限を実行した。

図1に3フレーバーQCD及び4フレーバーQCDの臨界温度の連続極限への外挿図を示す。3フレーバーQCDのデータは青系で示し、4フレーバーQCDのデータは赤系で示した。連続極限での臨界温度は、線形フィットで求めた。温度格子サイズ4のデータは、連続極限から遠いため、フィットには用いてない。3フレーバーQCDの臨界温度は

誤差が小さいが、4 フレーバーQCD の臨界温度は誤差が大きい。実温度にすると臨界温度は約 135 MeV である。

図 2 は臨界パイ中間子質量の連続極限への外挿図である。図 1 と同様に、3 フレーバーQCD のデータは青系で示し、4 フレーバーQCD のデータは赤系で示した。連続極限での臨界パイ中間子質量は、連続極限に近いデータ 2 点を用いた線形フィット及び、3 点を用いた曲線フィットを行い推定した。3 フレーバーQCD、4 フレーバーQCD とともに、フィットの種類によって、連続極限での値が大きく異なることがわかる。

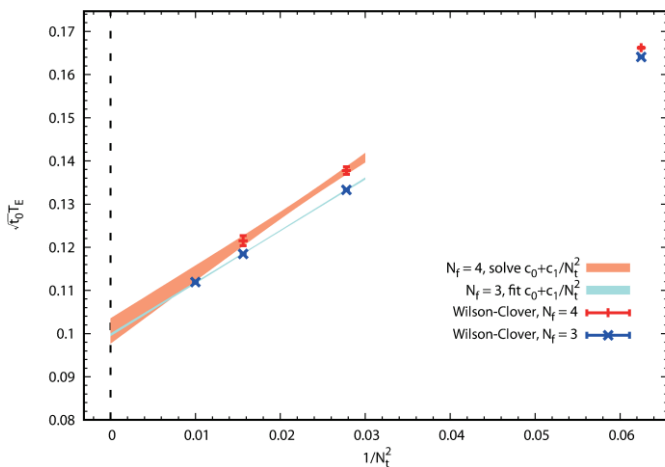


図 1：臨界温度の連続極限への外挿：縦軸は臨界温度、横軸は温度格子サイズの逆数の 2 乗（格子間隔の 2 乗に比例する量である）。

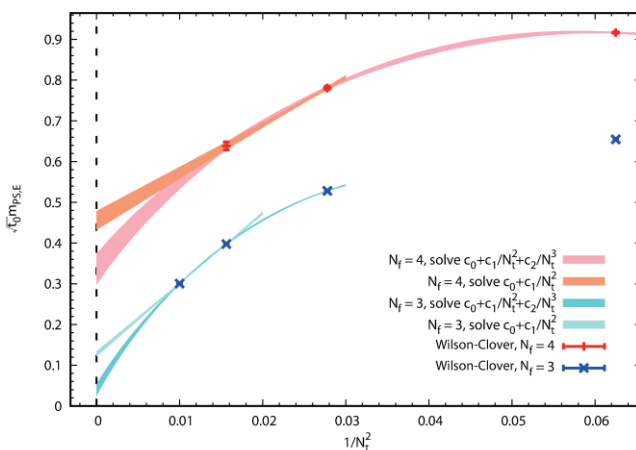


図 2：臨界パイ中間子質量の連続極限への外挿：縦軸は臨界パイ中間子質量、横軸は温度格子サイズの逆数の 2 乗（格子間隔の 2 乗に比例する量である）。

#### 4. まとめ

3 フレーバーQCD 及び 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。

臨界温度は 3 フレーバーQCD、4 フレーバーQCD とともに約 135 MeV であることが分かった。臨界パイ中間子質量の連続極限值に関しては、フィットに系統誤差が大きい。3 フレーバーQCD に関しては、一時相転移の領域が非常に小さいか存在しない可能性がある。比較的大きな臨界パイ中間子質量の値を持つ 4 フレーバーQCD に関しては、カイラル極限での相転移次数が 1 次でありそうである。

#### 5. 今後の計画・展望

依然として 3 フレーバーQCD、4 フレーバーQCD とともに臨界点の離散化誤差が大きい。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、3 フレーバーQCD の温度格子サイズ 14 以上、4 フレーバーQCD は温度格子サイズ 10 以上の計算を行いたいと考えている。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

**【会議の予稿集】**

“Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4-flavor QCD with Wilson–Clover fermions”, Hiroshi Ohno, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, arXiv:1812.01318

**【口頭発表】**

“Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4-flavor QCD with Wilson–Clover fermions”, Hiroshi Ohno, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, the 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018), 22–28 July 2018, Michigan State University, East Lansing, Michigan, USA