

## QCD 相構造の研究

### Study on QCD phase structure

大野 浩史

筑波大学 計算科学研究センター

#### 1. 研究目的

量子色力学 (QCD) では、クォーク・グルーオンの閉じ込め・非閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れと回復に関する相転移が存在する。この相転移の次数はクォークの質量や種類 (フレーバー数) により多様に変化することが予想されており、このことを QCD の第一原理計算により確かめることが重要な課題の一つとなっている。特に 3 フレーバーの場合、クォーク質量が 0 の極限で一次相転移があり、クォーク質量を大きくしていくと二次相転移点である臨界終点を経てクロスオーバーになると考えられており、この臨界終点の位置を決定するため、これまで多くの格子 QCD に基づく数値計算が行われてきた。しかしながら、臨界終点の位置は格子化誤差の影響を強く受け、フェルミオン作用の格子化手法の違い等により連続極限での値が大きく異なることが分かった。本来、正しい連続極限では格子化手法等の違いに依存しない普遍的な結果が得られるはずであり、この違いがなぜ起こっているのかを理解することは、信頼できる計算を行う上で非常に重要である。

この様な背景から、本研究の目的はウィルソン型クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより有限温度 4 フレーバー QCD における臨界終点の位置を調べ、その結果をスタッガード型クォークの場合と比較することで、それらの間に大きな違いが現れる原因を理解することである。ここで、4 フレーバー QCD に注目する理由は以下の通りである。まず、4 フレーバー QCD は 3 フレーバーの場合と同様にクォーク質量 0 の極限で一次相転移があると予想され、3 フレーバーを理解する上でも役立つと考えられる。また、スタッガード型クォークは一般に **rooting** と呼ばれる非自明な操作を必要とするが、4 フレーバーではこれが不要なため、ウィルソン型クォークと比較する上で **rooting** に由来する不確定な要素を排除することができる。

#### 2. 研究成果の内容

本年度は昨年度に引き続き、時間方向格子サイズ  $N_t = 10$  におけるシミュレーションを行った。特に空間体積に関しては、Cygnus 上では  $20^3$  及び  $24^3$ 、OFP 上では  $32^3$  を用いた。これによりさらに多くのゲージ配位を生成することができ、図 1 に示すように、カイラル感受率のピークの位置を明確に特定できる程度まで統計精度が向上した。またその結果、カイラル感受率のピークの体積依存性から得られる臨界指数を見

積ることが可能となり、図2に示すように、以前の計算で得られた  $N_t = 4, 6$  及び  $8$  の結果と同様にこの系が3次元イジング ( $Z_2$ ) の普遍類に属すると仮定すると、 $Z_2$  の臨界指数と一致する点から、ゲージ結合定数がおよそ  $\beta = 1.65$  の付近に臨界終点があると推定できた。しかしながら、臨界終点の位置はカイラル凝縮に対する尖度の最小値の体積依存性がない点を特定することで最終的に決定するが、これを行うには尖度の統計精度がまだ十分ではなく、更なる統計精度の改善が必要である。

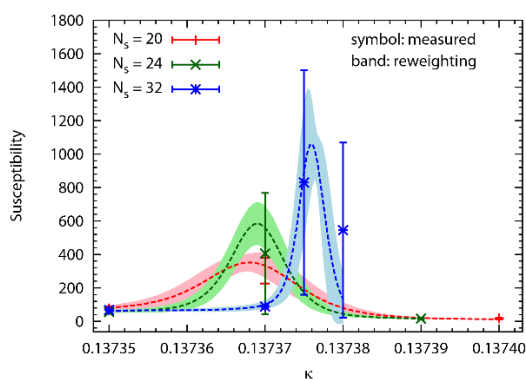


図1:  $\beta = 1.645$ におけるカイラル感受率

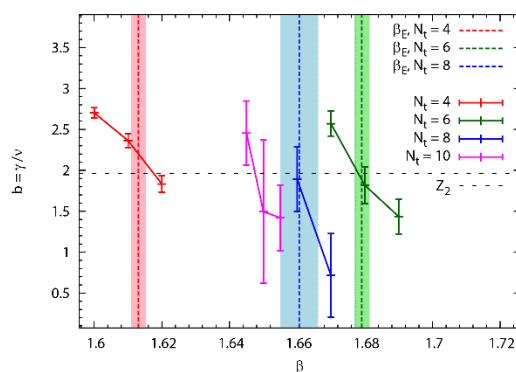


図2: カイラル感受率に対する臨界指数

### 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本プロジェクトでは、ゲージ結合定数、クォーク質量、空間体積といったパラメータの様々な組み合わせについてモンテカルロシミュレーションを行うため、多数の計算ノードと多くの計算時間を必要とする。従って、学際共同利用が提供する高性能で大規模な計算資源は、本プロジェクトを推進する上で必要不可欠な役割を果たした。

### 4. 今後の展望

今後はさらに多くのゲージ配位を生成することでさらに統計精度を向上させ、臨界終点のより正確な位置を決定することを目指す。また、これまで行った  $N_t = 4, 6$  及び  $8$  の結果と合わせることで、臨界終点の連続極限における位置を推定し、3フレーバーQCDの結果やスタガード型クォークでの結果との比較を行う。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

Y. Nakamura, Y. Kuramashi, H. Ohno and S. Takeda, “Critical endpoint in the continuum limit and critical endline at  $N_T = 6$  of the finite temperature phase transition of QCD with clover fermions,” *Proceeding of Science (Lattice 2019)* 053 (2020).

(2) 学会発表  
なし。

(3) その他  
なし。

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	45,000	0
Oakforest-PACS	○	240,000	60,000

※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。