

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

強い相互作用を記述する理論である量子色力学 (QCD) には、有限温度・密度において、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。また、相転移の次数は、クォークのフレーバー数及び質量に依存して変化すると考えられている。例えば 3 フレーバーの場合、クォーク質量が 0 の極限では 1 次相転移になると予想され、質量を大きくしていくと 2 次相転移となる点を経てクロスオーバーになると予想されている。この 1 次相転移が終わり 2 次相転移となる点を臨界終点と呼び、その位置を特定することは、QCD の相構造を理解する上で非常に重要である。しかしながら、格子 QCD 計算に基づく先行研究により、臨界終点の位置はフェルミオン作用の種類や連続極限の取り方に強く依存するという結果が得られており、最終的な結論は未だ得られてない。このことは、臨界終点の位置が格子化誤差の影響を強く受けることを示唆しており、フェルミオン作用依存性のより詳細な理解と、より正確な連続極限への計算が求められている。

この様な背景から、本研究の目的は、4 フレーバー QCD における臨界終点の位置を格子 QCD の第一原理計算により決定し、QCD の相構造を明らかにすることである。

2. 研究成果の内容

本年度はまず、昨年度に引き続き、 $O(a)$ 改良されたウィルソンフェルミオン作用を用いた時間方向格子サイズ $N_t = 10$ の計算を進めた。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。その結果、物理量の統計誤差を昨年度よりも大きく改善することに成功し、尖度交差法を用いて臨界終点の位置を特定することが可能となった (図 1)。得られた成果は、国際会議「Lattice 2021」等にて発表した。

これに加えて、フェルミオン作用依存性を調べるため、スタッガードフェルミオン作用を用いた計算も開始し、 $N_t = 4$ 及び 6 における臨界終点の位置を特定した (図 2)。さらに連続極限を目指し、 $N_t = 8$ の計算も行ったが、本年度は臨界終点を特定するのに十分な計算精度を達成するには至らなかった。これらの計算は、Cygnus 及び OFP の両方を用いた。筑波大学大学院博士前期課程の学生であった羅梟氏は、この結果を修士論文にまとめ、学位を取得した。

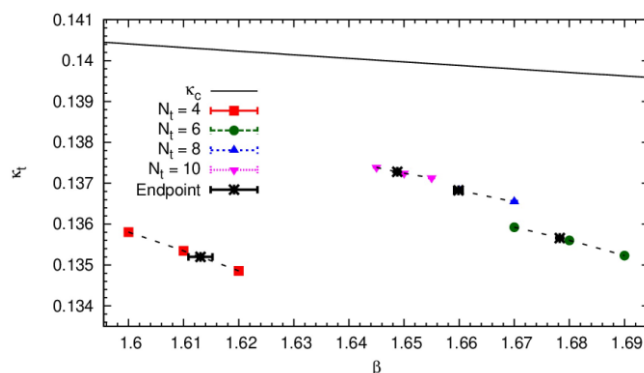


図 1：ウィルソン型フェルミオン作用を用いた計算における臨界終点。

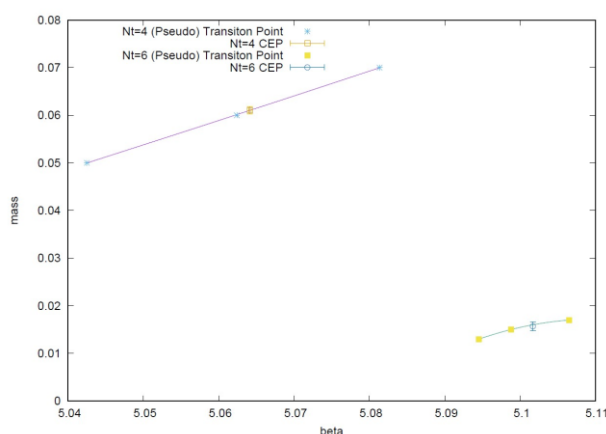


図 2：スタaggerド型フェルミオン作用を用いた計算における臨界終点。

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

ウィルソン型フェルミオン作用を用いた計算では、本年度までに $N_t = 4 \sim 10$ の計算が揃っており、連続極限への外挿を行う用意がほぼ揃った。 $N_t = 10$ では物理スケールを決定する計算が若干残っており、これが終了次第連続極限への外挿に取り組む。また、スタaggerド型フェルミオンを用いた計算では、現在行っている $N_t = 8$ の計算に加え、 $N_t = 10$ の計算を行い、連続極限へ外挿する。そして最終的には、ウィルソン型及びスタaggerド型フェルミオン作用それぞれを用いた計算結果を比較することで系統誤差を見積り、4フレーバーQCDの臨界終点の位置についての完全な理解を目指す。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし

(2) 学会発表

1. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda, “Critical endpoints in (2+1)- and 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions”, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021), Online, July 26-30, 2021.
2. Hiroshi Ohno, Yoshifumi Nakamura, Yoshinobu Kuramashi, Shinji Takeda, “Critical endpoint of finite temperature phase transition for four flavor QCD”, CCS international symposium 2021, 13th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Science, Online, October 8, 2021.
3. S. Takeda, Y. Kuramashi, H. Ohno, Y. Nakamura, “Study of QCD critical end-point using Wilson-type fermions”, QCD phase diagram and lattice QCD, Online, October 25-29, 2021 (Invited).

(3) その他

修士論文：

羅 梶、「Naive staggered fermion 及び plaquette gauge action を用いた 4 flavor QCD の有限温度相転移に関する研究」、筑波大学大学院博士前期課程理工情報生命学術院数理物質科学研究群物理学学位プログラム、2022 年 2 月

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	○	16,000	4,800
Oakforest-PACS	○	255,000	76,500
※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。			