

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。

このような背景から、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 、Wisteria/BDEC-01 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、臨界終点の位置をより正確に計算することができた。そして、この $N_t = 10$ の結果と、これまで得られた $N_t = 4, 6$ および 8 の結果を用いて、臨界温度および臨界擬スカラー中間子質量に対する連続極限への外挿を行った。これらの結果を図 1 および図 2 に示す。その結果、連続極限における 4 フレーバー QCD の臨界温度は、3 フレーバーのものと非常に近いことが分かった。一方、連続極限における 4 フレーバー QCD の臨界擬スカラー中間子質量は、3 フレーバーのものよりも大きいことが分かった。ただし、臨界温度の連続極限への収束性は非常によい一方で、臨界擬スカラー中間子質量については格子間隔依存性が大

きく、より信頼できる連続極限の結果を得るためには、より小さい格子間隔でのシミュレーションが必要であることが示唆された。

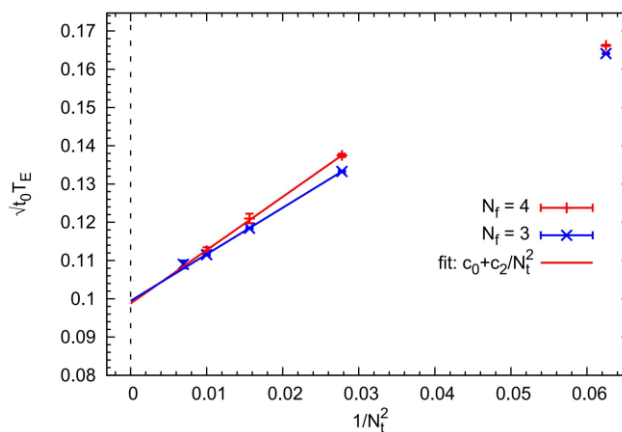


図 1: 3 フレーバーおよび 4 フレーバー QCD の臨界温度とその連続極限

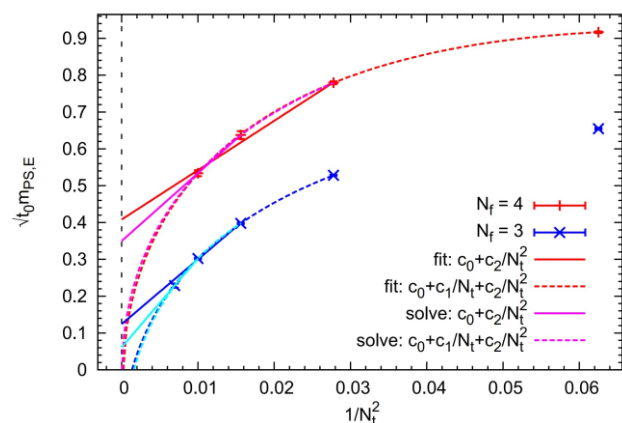


図 2: 3 フレーバーおよび 4 フレーバー QCD の臨界擬スカラー中間子質量とその連続極限

3. 学際共同利用プログラム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

臨界擬スカラー中間子質量のより正確な連続極限への外挿を行うため、より小さな格子間隔である $N_t = 12$ でのシミュレーションを行う。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし

(2) 学会発表

Hiroshi Ohno, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda and Luo Xiao, "Critical endpoint in 4-flavor QCD at finite temperature in the continuum limit," The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 13 – 14, 2022

(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	○	14,000	0
Wisteria/BDEC-01	○	212,500	0

※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。