

有限密度 QCD の研究

Study on QCD at finite density

大野 浩史

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

QCD 相転移の次数は、クォークの質量とフレーバー数に依存して多様に変化することが知られている。特に、クォーク化学ポテンシャルが 0 の場合、3 フレーバーのクォーク質量が 0 の極限では、相転移の次数が一次となり、クォーク質量を重くしていくと次数が二次の臨界終点を経て、クロスオーバーになると考えられている。また、有限密度の場合、すなわちクォーク化学ポテンシャルが有限の場合を考えると、臨界終点の位置はクォーク化学ポテンシャルに依存して変化し、ある曲線（臨界終線）を描くと考えられ、その形を定量的に決定することは、現実世界における QCD 臨界点の位置を予測する上で非常に重要である。このような背景から、本プロジェクトの目的は、格子 QCD に基づく第一原理計算により、有限温度・密度 3 フレーバー QCD の臨界終線の形状を決定することである。具体的には、図 1 に示すように、共同研究者らによって行われた、温度格子サイズ 6 における先行研究 [Phys. Rev. D92, 114511 (2015)] の拡張として、温度格子サイズ 8 での計算を行う。これにより、将来的に連続極限をとることを目指す。

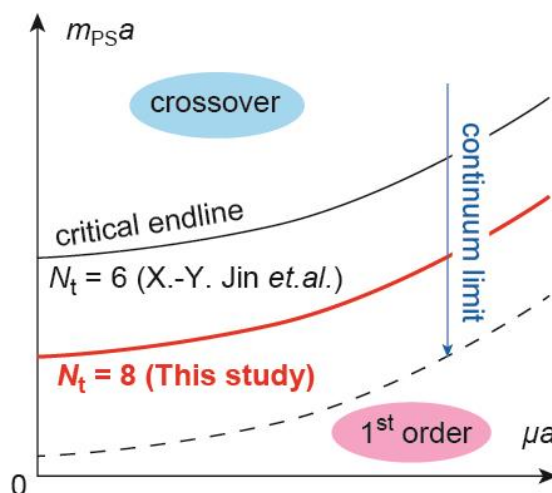


図 1：有限温度・密度 3 フレーバー QCD における臨界終線に対する連続極限の模式図。

2. 研究成果の内容

本年度は、空間体積が小さい $12^3 \times 8$ の格子サイズによるシミュレーションを行い、相転移が起こるパラメータ領域の特定を目指した。しかしながら、有限密度におけるシミュレーションの準備が不十分であったため、パラメータ領域を特定するのに必要なだけのデータを集めるには至らなかった。

一方で、ゼロ密度 4 フレーバー QCD の臨界終点を決定することも、QCD の相構造を理解する上で非常に重要であり、シミュレーションの準備も十分に整っていたこと

から、このシミュレーションも同時に進めた。そして、温度格子サイズ 4、6 及び 8 でのシミュレーションを完了し、臨界終点の連続極限を取ることができた。その結果を図 2 に示す。得られた結果を、今回シミュレーションに用いたものと同じウィルソン型のフェルミオンで、3 フレーバーの場合の結果と比較すると、臨界終点におけるパイ中間子質量は、4 フレーバーの方が 3 フレーバーの場合より大きいことが分かった。また、さらに、異なるフェルミオン型であるスタaggerド型の結果と比較すると、ウィルソン型の結果は、3、4 フレーバーどちらの場合でも、連続極限でより大きなパイ中間子質量を持つことが分かった。本来、連続極限ではフェルミオン型の依存性はなくなると考えられているので、この結果を説明するためには、さらなる研究が必要である。

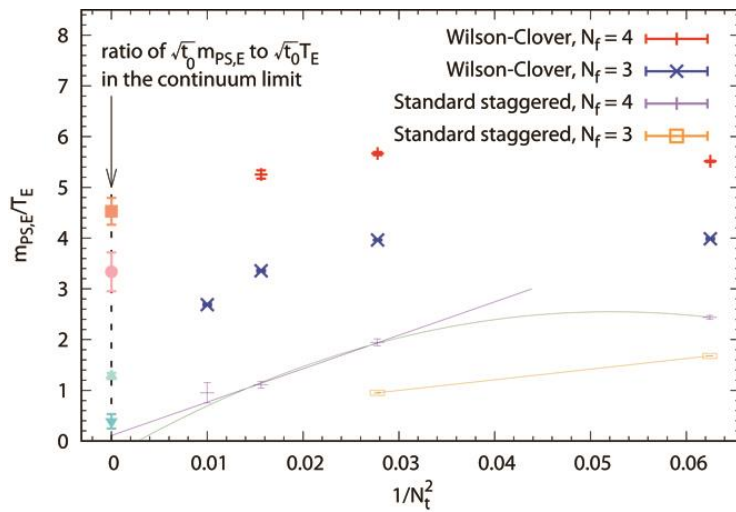


図 2: ゼロ密度 3、4 フレーバー QCD のウィルソン型フェルミオン及びスタaggerド型フェルミオンにおける臨界終点及びその連続極限。

3. 学際共同利用として実施した意義

本プロジェクトでは、ゲージ結合定数、クォーク質量、クォーク化学ポテンシャルといったパラメータの様々な組み合わせについてシミュレーションを行い、相転移が起こるパラメータ領域を地道に探索する必要がある。そのためには、膨大な計算ノードと計算時間が必要となり、学際共同利用が提供する高性能な計算資源は、プロジェクトを推進する上で非常に重要な役割を果たした。

4. 今後の展望

まず、 $12^3 \times 3$ 格子サイズでのシミュレーションをさらに進め、相転移が起こるパラメータ領域を特定する。さらに、尖度交差法を用いて臨界終点の位置を特定するため、より大きな空間体積でのシミュレーションを行っていく。最終的には、温度格子サイズ 10 でのシミュレーションを行い、臨界終線の連続極限をとることを目指す。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Hiroshi Ohno, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura and Shinji Takeda, “Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions”, PoS LATTICE 2018, accepted.

(2) 学会発表

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

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
COMA	○	94,000	0
Oakforest-PACS	○	423,000	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。			