

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) は、クォークとグルーオン及びその間に働く強い相互作用を記述する理論である。QCD にはカイラル対称性と呼ばれる対称性がある。この対称性は通常、自発的に破れているが、初期宇宙や中性子星内部等のような超高温・高密度では回復すると考えられている。この相転移の次数は、クォークのフレーバー数や質量に依って様々に変化することが知られており、その依存性を調べることは、QCD の相構造を理解する上で非常に重要である。特に、有限温度 3 フレーバー QCD では、クォーク質量 0 の極限で一次相転移があり、質量を大きくしていくと、二次相転移となる臨界終点を経て、クロスオーバーになると予想されている。しかしながら、このことを実際に確かめるため、格子 QCD シミュレーションによる多くの研究が行われてきたが、臨界終点の位置はクォーク場の離散化の方法に大きく依存し、未だに正確な連続極限での結果が得られていない。従って、多角的な見地から臨界終点の位置に対するクォーク場の離散化法依存性を考察する必要がある。

この様な背景から、本研究では有限温度 4 フレーバー QCD における臨界終点の位置を、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調べる。ここで、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ている。また、より計算コストが少ない比較的重いクォーク質量に臨界終点があると考えられ、3 フレーバー QCD をより詳しく知るための良い比較対象である。また、4 フレーバーはスタaggered型クォークが自然に定義されるフレーバー数で、3 フレーバーで必要で非自明な **rooting** と呼ばれる操作が必要ないことから、ウィルソン型クォークの場合と結果を比較する際に、不確定要素がより少ない利点がある。

2. 研究成果の内容

本年度は、昨年度までに行った、時間方向格子サイズ 4、6 及び 8 の計算を拡張し、より正確な連続極限を目指すため、時間方向格子サイズ 10 の計算を進めた。また特に、Cygnus 上では空間体積 20^3 及び 24^3 、OFP 上では 32^3 の計算を行った。その結果、現在までに最大で 1 パラメータ当たり約 4 万トラジェクトリ分のゲージ配位の生成が完了しており、これを用いて、カイラル凝縮の期待値及びその感受率を図 1

に示す精度で計算することができた。また、このことから、臨界終点の位置を推定するためには、まだ統計精度が十分でないことが分かった。

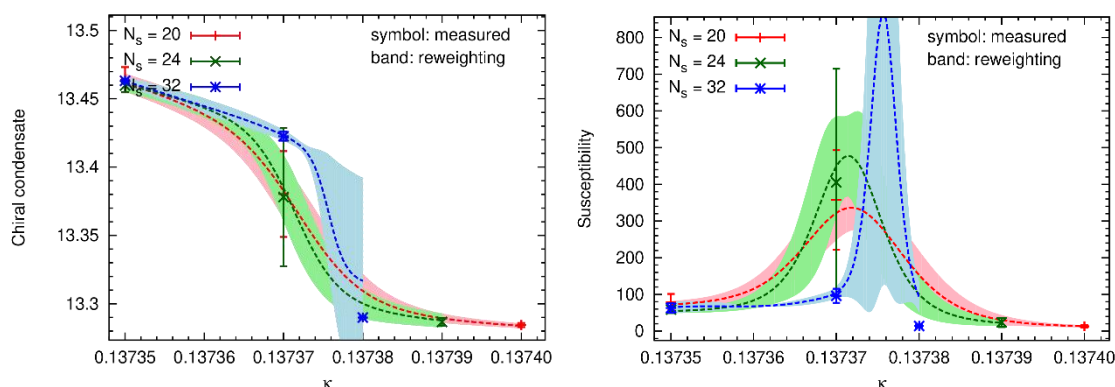


図 1 : カイラル凝縮の期待値 (左図) 及びその感受率 (右図)。

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

今後は、より多くのゲージ配位を生成し、臨界終点を推定するために十分な統計精度を目指す。そして、これまでの時間方向格子サイズ 4、6 及び 8 の結果と、本研究で得られる時間方向格子サイズ 10 の結果を組み合わせ、より正確な連続極限での臨界終点の位置を決定し、その結果を 3 フレーバー QCD の結果やスタッガード型クォークの結果と比較する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし。

(2) 学会発表

H. Ohno, “Phase structure of lattice QCD at finite temperature”, ISTC-CERN-JINR Summer School on High Energy Physics and Accelerator Physics 2019, al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, August 25-31, 2019 (invited talk).

- (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	○	30,000	15,000
Oakforest-PACS	○	225,000	75,000
※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。			