

研究責任者名 Name	中村 宜文 Nakamura, Yoshifumi	所属機関 Affiliation	独立行政法人理化学研究所	
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-12	研究課題名 Program title	有限温度・有限密度 QCD	

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

ゲージ場の作用が繰り込み群改良型岩崎ゲージ作用で、クォーク場の作用が3フレーバーのクローバー改良ウィルソンフェルミオン作用の格子作用を用いて、時間方向(N_t)が4, 6, 8で臨界終点での温度と擬スカラー質量を求めた。連続極限への外挿を行ったところ、 $N_t=4$ の結果は $1/N_t^2$ の線形でフィットできないことが分かった。 $N_t=6, 8$ の結果のみをつかってフィットしたところ、連続極限における臨界終点での温度と擬スカラー質量として、 $131(2)(1)(3)\text{MeV}$ 、 $304(7)(14)(7)\text{MeV}$ を得た。ここで一番目の誤差は統計誤差で、二番目の誤差は系統誤差で、三番目の誤差は格子間隔からくる誤差である。2点での外挿ではあるものの、臨界終点での擬スカラー質量は、SU(3)フレーバー対称点より25%小さいと見積もることができた。

(英文)

We investigate the critical endpoint of finite temperature phase transition of $N_f=3$ QCD at zero chemical potential. We employ the renormalization-group improved Iwasaki gauge action and non-perturbatively $O(a)$ -improved Wilson-clover fermion action. The critical endpoint is determined by using the intersection point of kurtosis for the temporal size $N_t=4, 6, 8$. Spatial sizes of $N_f=6-16$ ($N_t=4$), $10-24$ ($N_t=6$), and $12-24$ ($N_t=8$) are employed. We find that $N_t=4$ appears to be out of the scaling region. Using results for $N_t=6$ and 8 , and making linear extrapolations in $1/N_t^2$, we obtain $T_E=131(2)(1)(3)\text{MeV}$, $m_{PS,E}=304(7)(14)(7)\text{MeV}$ and $m_{P,SE}/m_{PS}^{\text{phys,sym}}=0.739(17)(34)(17)$, where the third error comes from error of lattice spacing. Our current estimation of pseudo scalar mass at the critical endpoint in the continuum limit is about 25% smaller than the SU(3) symmetric point.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	1	0	0	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program	
1. Y. Nakamura, "Update on the critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD with clover type fermions", Lattice 2014, June 23 - 28, 2014, Columbia University, New York, USA	
2.	
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)	
1	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名 name of journal
	URL
2	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。 International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)	
1.	著者名 Author
	タイトル title
	雑誌名等 name of journal
	URL
2.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
3.	著者名
	タイトル
	雑誌名等
	URL
その他 (学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (著者、タイトル、論文種別、URL を記載) Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)	
1. Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi , Yoshifumi Nakamura , Shinji Takeda, Akira Ukawa, "Critical endpoint of finite temperature phase transition for three flavor QCD (http://arxiv.org/abs/1411.7461)	
2.	
特記 (本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。) Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)	
1.	
2.	

実施報告書

有限温度・有限密度 QCD

1. 研究組織 (scxqcd)

中村宜文 (なかむらよしふみ・理化学研究所 計算科学研究機構 研究員)

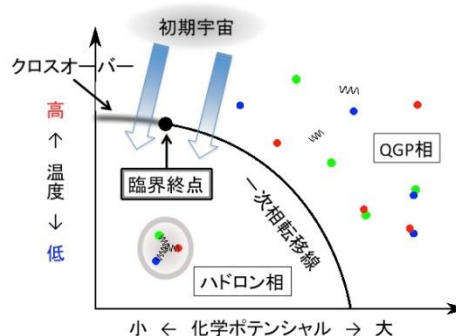
藏増嘉伸 (くらましよしのぶ・筑波大学 数理物質系 教授)

武田真滋 (たけだしんじ・金沢大学 数物科学系 助教)

Jin, Xiaoyong (ジン シャオヨン・理化学研究所 計算科学研究機構 特別研究員)

2. 研究の意義

宇宙創成から約 0.00001 秒後の世界はクォーク・グルオンプラズマ相 (QGP 相) と呼ばれる超高温状態であったが、その後、宇宙の膨張とともに温度が下がり、クォークやグルオンがハドロン (陽子や中性子など) に凝縮し、現在我々の身の回りにあるような物質が存在する状態 (ハドロン相) になったと考えられている。この冷却の過程において、状態間の急激な変化、つまり、相転移が起きていたと考えられているが、その「強さ (次数)」や「臨界温度・密度」などの情報は理論のダイナミクスにより決まっているため、「基本理論を解く」か「実験で明らかにする」しか方法はない。現状としては、実験のみで相構造の全貌を明らかにすることは困難であり、理論的には様々なモデルによる予想 (図参照) はあるが不定性への疑念は残る。そのような中で、基本相互作用に基づいた格子 QCD のシミュレーションこそが理論的アプローチの本命であり、この第一原理計算による相構造解明こそが本研究課題の意義である。



3. 研究の目的

相構造解析において、一次相転移線とクロスオーバーとの境界である臨界終点を定めることはその相構造を特徴付ける意味で重要なだけでなく、宇宙論へのインパクトも大きい。例えば、宇宙初期の QCD 相転移は低密度、つまり、

化学ポテンシャルが小さい領域で起こっていたと考えられているが、臨界終点の位置によってはその相転移がクロスオーバーか一次相転移かという違いが生じ、これによって宇宙論シナリオは大きく変わってくる。そこで、今回の利用では、最初のステップとして、化学ポテンシャルをゼロに固定し温度とクォーク質量パラメータ空間上での臨界終点を決定することを目的とした。これによって、クォーク密度ゼロ、且つ、物理的クォーク質量の場合に、有限温度相転移がクロスオーバーか一次であるかを判定することが可能となる。

4. 実施内容

ゲージ場の作用が繰り込み群改良型岩崎ゲージ作用で、クォーク場の作用が3フレーバーのクローバー改良ウィルソンフェルミオン作用の格子作用を用いて、格子サイズ $24^3 \times 8$ 、異なる格子間隔・クォーク質量の2点で約 10,000 トラジェクトリを生成した。他のスーパーコンピュータシステムで生成したものと合わせ Kurtosis (Binder キュムラント) を測定し、時間方向 (N_t) が 8 の場合の臨界終点を求めた。

Kurtosis は 2 次相転移点では体積に依存せず、一次相転移点では体積に反比例して -2 に近づき、クロスオーバーでは体積を大きくすると 0 に近づくとする性質がある。この性質を利用し、一次相転移点とクロスオーバーのそれぞれで、体積 (V) を変えて Kurtosis (K) を測定し、図のように交点 (E) を求めることで 2 次相転移点である臨界終点を求めることができる。この時、相転移点は感受率 (χ) が最大となる点である。

臨界終点での擬スカラーの質量、温度を零温度での結果をもとに内挿でもとめ、時間方向が 4 と 6 の臨界終点での擬スカラーの質量、温度もあわせて $1/N_t^2$ でプロットすると以下ようになる。(図 1)

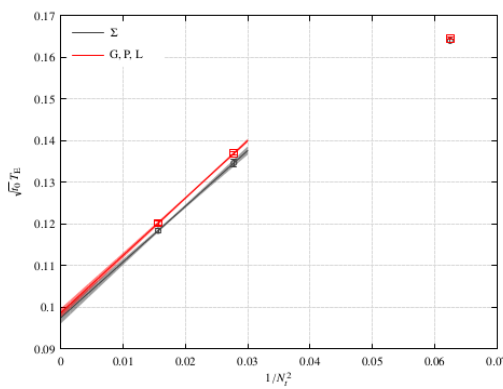
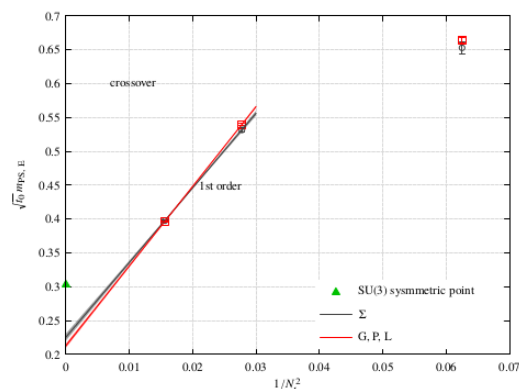
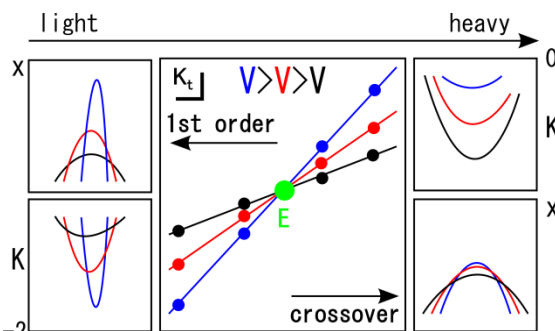


図 1 臨界終点での擬スカラー (左) と温度 (右) の連続極限への外挿

ここで t_0 の平方根はウィルソンプローから求めたスケールである。図 1 から $N_t=4$ の結果は線形スケーリングの範囲外であることがわかる。 Σ 、 G 、 P 、 L はそれぞれ、カイラル凝縮、ゲージ作用密度、プラケット、ポリアコフープであり、フェルミオンの物理量である Σ とゲージ場の物理量である G 、 P 、 L の臨界終点はほぼ一致していることがわかる。連続極限への外挿の結果、臨界終点での擬スカラーの質量は $304(7)(14)(7)\text{MeV}$ で、温度は $131(2)(1)(3)\text{MeV}$ であった。ここで一番目の誤差は統計誤差で、二番目の誤差が系統誤差で、三番目の誤差がウィルソンプローのスケールの誤差である。得られた臨界終点での擬スカラー質量は $SU(3)$ フレーバー対称点の擬スカラー質量より約 25% 小さく、物理点がクロスオーバーであることを示唆する。ただし、 $N_t=6, 8$ の二点の外挿であるため、今後、より大きな N_t でのシミュレーションが必要である。

5. 成果発表

(ア) 口頭研究発表

- ① Y. Nakamura, “Update on the critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD with clover type fermions”, Lattice 2014, June 23 - 28, 2014, Columbia University, New York, USA

(イ) 投稿中論文

- ① Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, Akira Ukawa, “Critical endpoint of finite temperature phase transition for three flavor QCD”