

---

# scknzw 実施報告書 2007

平成20年5月9日

---

## 研究テーマ

QCDの閉じ込め現象の解明に向けての研究

## 研究組織 : DESY-ITEP-Kanazawa (DIK) collaboration

鈴木恒雄 (代表) : 金沢大学/理研

石黒克也 : 金沢大学 (現在、高知大学)/理研

駒 佳明 : 沼津高専

関戸 暢 : 金沢大学/理研

森 祥寛 : 金沢大学

長谷川 将康 : 金沢大学/理研

G. Schierholz, H. Stüebgen, 中村宜文 : DESY/ZIB

M. Polikarpov, A. Veselov, V. Bornyakov, M. Chernodub, F. Gubarev, S. M. Morozov : ITEP/IHEP

### 1. 有限温度

有限温度系の full QCD については、CP-PACS, KEK, Bielefeld, SCRI, RBC-Bielefeld, WHOT-QCD, Wuppertal などのグループで相転移温度や状態方程式などについての研究が行われている。最近、Wuppertal 大学グループが、連続極限での相転移温度や相転移の次数について詳しく調べ、Nature に発表した。しかし、彼らの研究は "taste-breaking" と呼ばれる問題を持つ、staggered フェルミオンを用いており、Wilson フェルミオン、ドメインウォールフェルミオンや overlap フェルミオン等のより性質の良い格子フェルミオンを用いて調べる必要がある。

また、格子 QCD において現実の世界の物理量を得るときは、連続極限とカイラル極限を取らなければならない。そのためには、格子間隔とクォーク質量で外挿を行うのが一般的であり、格子間隔やクォーク質量の小さいところでデータを精度よく求めることが重要になる。しかし、full QCD シミュレーションでは格子間隔とクォーク質量の小さいところでは非常に時間がかかるため、これまであまり行われてこなかった。

そこで我々は、これまでの研究よりもさらに小さい格子間隔とクォーク質量をもつコンフィギュレーションの生成を行い、2 フレーバー QCD の連続極限とカイラル極限における閉じ込め、非閉じ込め相転移の臨界温度を決定した。

### 具体的な計算方法

2001 年度から DESY-ITEP-Kanazawa (DIK) collaboration として共同研究が始まってから現在までに、 $16^3 \times 8$  の格子では 2 点の  $\beta$  について、また  $24^3 \times 10$  では 3 点の  $\beta$  についてコンフィギュレーションの生成を行い、温度を変えてポリヤコフープの変化から格子間隔とクォーク質量の異なる 3 点の擬臨界温度を求めた。これらの 3 点と Edward-Heller によって求められた  $N_f = 6$  の擬臨界温度を合わせて、最もシンプルな外挿式を使い臨界指数を仮定して、1 次相転移と 2 次相転移のそれぞれの場合の連続極限・カイラル極限をとった臨界温度を決定した。

しかし、得られた結果は誤差が大きく、 $24^3 \times 12$  格子のような大きな格子を使い、より小さい格子間隔

とクォーク質量での臨界温度を精度良く決めることが必要であった。

そこで 2007 年度の研究としては、2つの動的フェルミオンの入った full QCD のシミュレーションを行った。ゲージ場の作用は、通常の Wilson 作用を使い、またフェルミオン場の作用は、Wilson フェルミオン作用を格子間隔の  $O(a)$  の誤差が消えるように改良した clover 作用を用いた。コンフィグレーションを生成するアルゴリズムは、ハイブリッドモンテカルロを使った。そして、パラメータを  $\kappa = 0.1358, 0.1359, 0.1360$  と変えて  $24^3 \times 12$  格子のコンフィグレーションを各々 3000 個生成した。そのコンフィグレーションを用いて相転移温度のオーダーパラメータとしてポリヤコフープを用いて擬臨界温度の決定を行った。最後に、 $N_t = 6, 8, 10$  のデータを加えて外挿して連続極限における臨界温度の決定を行った。

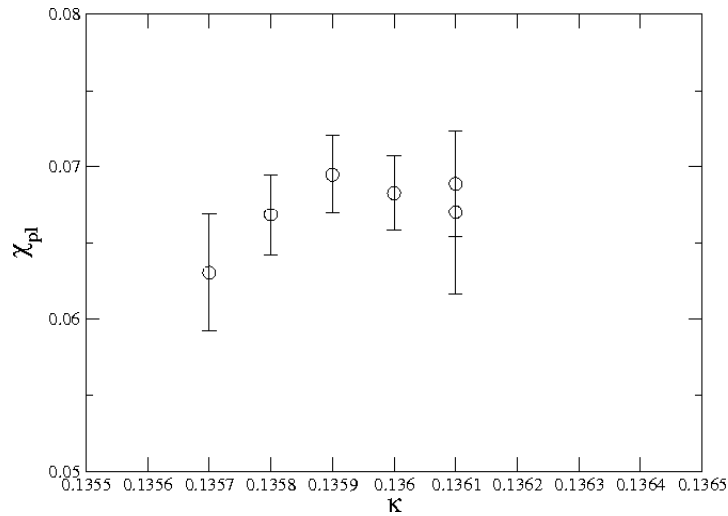


図 1:  $24^3 \times 12$  格子、 $\beta = 5.29$  でのポリヤコフープサセプティビリティ。  $\kappa = 0.1361$  に関してはチェックのためホットスタート・コールドスタート両方の点をプロットした。

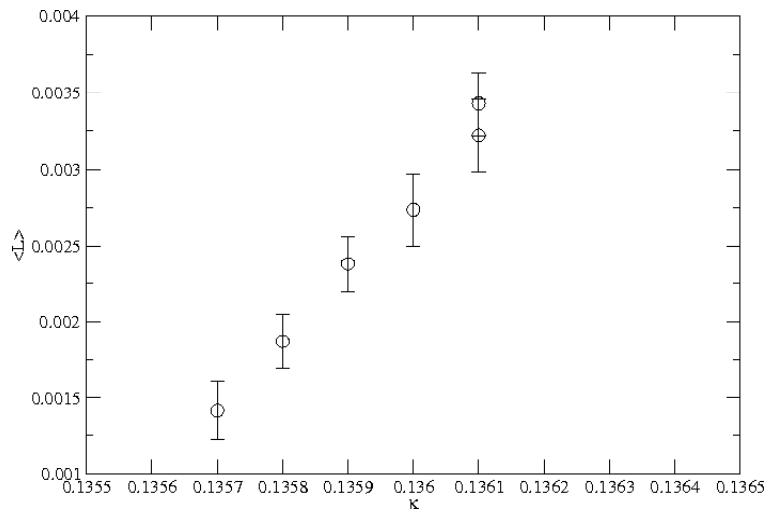


図 2:  $24^3 \times 12$  格子、 $\beta = 5.29$  での相転移付近でのポリヤコフープ。  $\kappa = 0.1361$  に関してはチェックのためホットスタート・コールドスタート両方の点をプロットした。

## 結果

$24^3 \times 12, \beta = 5.29$  の臨界温度を決定するために、異なる 5 つの  $\kappa$  でコンフィギュレーションの生成を行い、臨界温度を決定することができた。また、過去の結果とあわせて外挿を行うことで連続極限とカイラル極限での臨界温度を決めることができた。

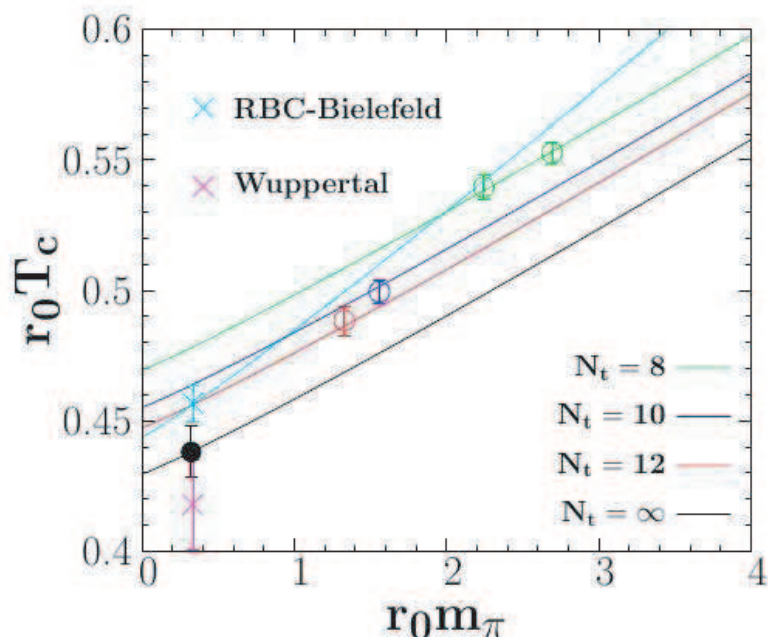


図 3:  $N_t = 8, 10, 12$  で得られた臨界温度のカイラル極限・連続極限への外挿。

## 2. 閉じ込め機構の解析

金沢大学グループはこれまで、QCD における未解決問題であるクォークの閉じ込め機構を解明するために、格子 QCD を用いて双対超伝導描像の立場から解析を行ってきた。これまでの研究から、最大可換 (MA) ゲージ固定を用いるときクォークの閉じ込め機構が双対超伝導描像で説明され、さらにはモノポールと呼ばれる位相的な場の配位が閉じ込め機構に対して重要な役割を果たしていることを示してきた。しかし、異なるゲージを選ぶとその結果が得られないという問題 (ゲージ依存性問題) を解決出来なかった。最近の金沢大学独自の研究によって、長い間解決することが出来なかったこの問題を、quenched SU(2) QCD のコンフィギュレーションを用いて、ランダムゲージ変換やマルチレベル法といったノイズを劇的に減らす方法を使うことによって解決した。しかし、それらの研究は quenched SU(2) QCD のコンフィギュレーションを用いた解析であり、より現実に近いコンフィギュレーションを用いた解析を行い、これまでと同じ結果を示す必要があった。そこで今回の研究では、quenched SU(3) QCD のコンフィギュレーションを生成して解析を行った。この研究は、quenched SU(2) QCD の論文 (Phys.Rev.D77,034502) を quenched SU(3) QCD に拡張した研究である。

### シミュレーションの概要

2007 年度は、 $O(a)$  で非摂動的に改良された clover Wilson fermionic action と gluonic action を用いてコンフィギュレーションの生成を行った。特に Blue Gene で今年度生成したコンフィギュレーションは、ゼロ温度、 $\beta = 5.40$ ,  $\kappa = 0.1366$ , Lattice volume =  $32^3 \times 64$ , 900 個である。(以下にこれまでに生成したコン

フィグレーションを示す)

また、SR11000 を用いて quenched SU(3) QCD のコンフィグレーションに対してランダムゲージ変換を使ってアーベリアン、モノポールとフォトンのポリヤコフループ相関の解析を行った。

$\beta$	$\kappa$	volume	$m_\pi [MeV]$	$m_\pi/m_\rho$	$r_0/a$	a [fm]
5.20	0.1355	$16^3 32$	$5.78(8) \times 10^2$	0.602(6)	5.04(5)	$9.92(10) \times 10^{-2}$
5.25	0.13575	$24^3 48$	$5.58(4) \times 10^2$	0.605(4)	5.53(4)	$9.04(7) \times 10^{-2}$
5.29	0.1355	$24^3 48$	$7.18(8) \times 10^2$	0.703(6)	5.57(2)	$8.98(10) \times 10^{-2}$
5.29	0.135	$16^3 32$	$8.68(13) \times 10^2$	0.767(3)	5.23(7)	$9.54(14) \times 10^{-2}$
5.29	0.134	$16^3 32$	$1.10(19) \times 10^3$	0.833(4)	4.81(8)	0.104(2)
5.29	0.1362	$24^3 48$	$3.73(2) \times 10^2$	0.429(7)	6.03(5)	$8.29(7) \times 10^{-2}$
5.29	0.13632	$32^3 64$	$3.15(3) \times 10^2$	0.420(6)	6.05(5)	$8.26(10) \times 10^{-2}$
5.40	0.1364	$24^3 48$	$4.15(5) \times 10^2$	0.505(9)	6.82(5)	$7.33(6) \times 10^{-2}$
5.40	0.1366	$32^3 64$	$2.78(5) \times 10^2$	誤差大	6.86(7)	$7.28(14) \times 10^{-2}$

ゾンマースケールを  $r_0 = 0.5[\text{fm}]$  とする。

### アーベリアンドミナンス

これまで金沢大学の研究グループは、コンフィグレーションに対して MA ゲージ固定をして、その後アーベリアン成分を抜きだし、アーベリアンやモノポールといった物理量の測定を行ってきた。しかし今回の解析では、ゲージ固定を行わずに乱数を使い、ゲージ場を何度もゲージ変換して統計数を増やすこと（ランダムゲージ変換）によって誤差を減らし、アーベリアン成分やモノポール成分のポリヤコフループ相関の測定を行った。

そこでまず、ノンアーベリアンのポリヤコフループを時間方向のリンク変数  $U_4(\vec{s}, t)$  の積として以下のように書く。

$$P_{NA}(S) = \text{Re} \frac{1}{3} \text{Tr} \left[ \prod_{t=0}^{N_4-1} U_4(\vec{s}, t) \right] \quad (1)$$

さらに、アーベリアンのポリヤコフループは以下のように定義することができる。

$$P_{Ab}^a(\vec{s}) = \exp \left( i \sum_{t=0}^{N_4-1} \theta_4^a(\vec{s}, t) \right) \quad (2)$$

このポリヤコフループ相関の測定に対してランダムゲージ変換を 7500 回行い、コンフィグレーションを 6500 個使った。その結果が図 4 である。誤差は大きいですがアーベリアンがノンアーベリアンのストリングテンションを再現し、アーベリアンドミナンスを示しているのがわかる。

### モノポールドミナンス

アーベリアンのポリヤコフループは、モノポールとフォトンのポリヤコフループの積で書くことができる。これによりモノポールのポリヤコフループとフォトンのポリヤコフループを以下のように定義することができる。

$$P_{Mo}^a(\vec{s}) = \exp \left( i \sum_{t=0}^{N_4-1} \theta_4^{mo,a}(\vec{s}, t) \right) \quad (3)$$

$$P_{Ph}^a(\vec{s}) = \exp \left( i \sum_{t=0}^{N_4-1} \theta_4^{ph,a}(\vec{s}, t) \right) \quad (4)$$

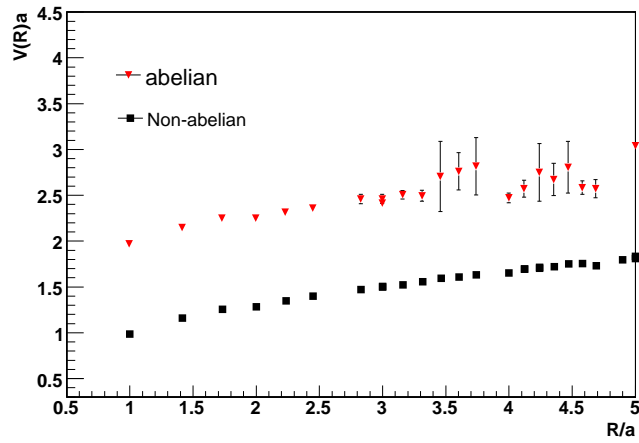


図 4: 赤いシンボルはアーベリアンのポテンシャルを示し、黒のシンボルはノンアーベリアンのポテンシャルを示す。

この時アーベリアンの場  $\theta_\mu^a$  は、 $\theta_\mu^a = \theta_\mu^{mo,a} + \theta_\mu^{ph,a}$  のようにモノポールとフォトンの部分に分けられることを使った。これらの定義からポリヤコフープ相関の測定をランダムゲージ変換を 7500 回、6500 個のコンフィグレーションを用いて行った。測定した結果が図 5 である。モノポールのポテンシャルの誤差が大きいのがわかる。

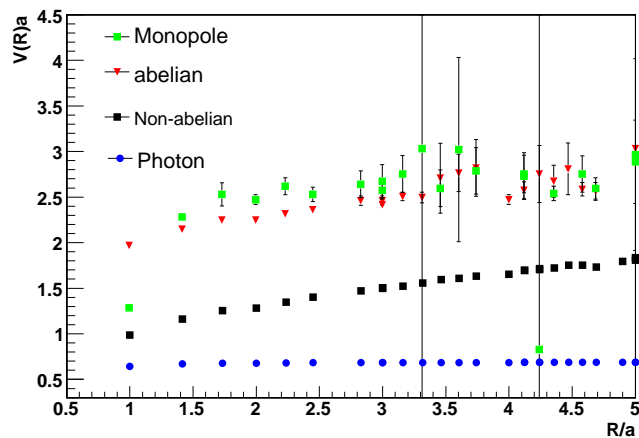


図 5: 緑色のシンボルがモノポールのポテンシャルを示し、青のシンボルがフォトンのポテンシャルを示している。

## 結果とまとめ

これらのポテンシャルの解析結果から、ゲージ固定をしない quenched SU(3) QCD のストリングテンションがアーベリアンドミナンスを示していることがわかった。しかし、モノポールドミナンスは明らかではない。また、どちらも誤差が大きく quenched SU(2) QCD で示された 100% のアーベリアンドミナンスとモノポールドミナンスを示すことが出来なかった。よって現在、コンフィグレーションの数を増やし、ランダムゲージ変換の回数を調節して解析を行っている。さらに今後は、これまで DIK が生成した full QCD のコンフィグレーションを用いて解析を行う予定である。

# 研究発表リスト

## 国際会議等のプロシーディング

- Finite temperature Lattice QCD with two flavors of improved Wilson fermions  
V. G. Bornyakov, S. M. Morozov, Y. Nakamura, M. I. Polikarpov, G. Schierholz and T. Suzuki  
hep-lat/0610071

## 口頭発表 (国際会議等)

- Title: Finite temperature LQCD with two flavors of improved Wilson fermions  
The XXV International Symposium on Lattice Field Theory, University of Regensburg, July 30-  
August 4 2007,  
V. G. Bornyakov, S. M. Morozov, Y. Nakamura, M. I. Polikarpov, G. Schierholz and T. Suzuki
- Title: The confining potential and The low-energy effective monopole action with two flavors of  
dynamical quarks (2)  
日本物理学会春季大会、首都大学東京、2007年3月25日  
M. Hasegawa, Y. Nakamura, K. Ishiguro, T. Sekido, T. Suzuki with DIK
- Title: The confining potential and The low-energy effective monopole action with two flavors of  
dynamical quarks  
Joint meeting of pacific region particle physics communites, Hawaii, Oct29 - Nov3, 2006  
M. Hasegawa, Y. Nakamura, K. Ishiguro, T. Sekido, T. Suzuki with DIK