

課題名 (タイトル) :

I. 有限温度・有限密度
II. 閉じ込め機構の解明

利用者氏名 :

○青木健一
鈴木恒雄
駒佳明
石黒克也
森祥寛
中村宜文
長谷川将康

所属 : 和光研究所 仁科加速器研究センター
素粒子物性研究部門 延與放射線研究室

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

研究課題 I : 有限温度・有限密度

量子色力学(QCD)の相構造は、初期宇宙、中性子星の構造や重イオン衝突過程などに関係しており、現在盛んに研究が行なわれている。[温度, 化学ポテンシャル] ($[T, \mu]$) 平面での豊かで複雑な相構造は、モデル計算によって大体はわかっているが詳細な構造までは明らかにされていない。そのため、我々は格子 QCD を用いた第一原理計算からこの研究を行なっている。

これまで、我々は有限温度系で 2 つの動的クォークが入ったシミュレーションを行なってきたが、現実世界にはアップ、ダウン、ストレンジクォークの 3 つの軽いクォークが存在しているので (アップクォーク、ダウンクォークは $2\sim 8$ [MeV]、ストレンジクォークは 110 [MeV])、これら 3 つのクォークを動的に扱ったシミュレーションを行なう必要がある。

本研究の大目標は有限温度・有限密度 QCD の相構造を明らかにし状態方程式を計算することである。さらに相転移や状態方程式に対して位相不変量がどのような役割を果たすのかを調べる。

今年度は、化学ポテンシャル $\mu=0$ かつ小さな格子サイズで相転移温度の決定を行う予定である。

また、最終目標は相転移のオーダーパラメーターを見つけ QCD の相構造を明らかにすることである。今年度生成されたコンフィギュレーションは、International Lattice Data Grid を通じて世界の研究グループが利用できるようにする予定である。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

格子 QCD は、ミクロの自然界を理解する上で重要な役割を果たす原子核・ハドロンの物理を、場の量子論に基づく第一原理から非摂動的に研究出来る唯一の方法である。金沢グループでは、QCD における最重要の未解決問題であるクォークの閉じ込め機構に対して、格子 QCD を用いて双対超伝導体描像の立場から理解することを試みてきた。

これまでの研究から、ある特定のゲージ (最大可換 (MA) ゲージ) を用いると、クォークの閉じ込め機構が双対超伝導体描像で記述されること、そしてその際にモノポールと呼ばれる位相的場の配位が重要な役割を担うことが明らかになっている。しかしながら、この描像は MA ゲージを除く他のゲージ条件の下では成立が確認されず、ゲージ依存性の問題として長い間残されていた。

平成 16 年度に金沢グループは SX-7 を用いて、ランダウゲージの場合に変位磁流がソレノイダルカレントとなって、クォーク・反クォーク間の電場を絞ることを明らかにし、双対超伝導体描像のゲージ不変性に対する一つの証拠を示すことが出来た。その後、金沢グループではゲージ依存性問題の解決のために、これまで性質が悪いゲージとして知られていたローカルユニタリゲージに焦点を当てた。ローカルユニタリゲージとはゲージ固定条件を完全にローカルに決定できるゲージ固定の総称である。ローカルユニタリゲージとして F12 ゲージ、F123 ゲージ、空間ポリヤコフラインゲージ (SPL ゲージ)、ポリヤコフゲージ (PL ゲージ) を採用し、ノイズリダクション法として、マルチレベル法

およびランダムゲージ変換の方法を用いた。その結果、ローカルユニタリゲージにおいても、静的ポテンシャルのアーベリアンドミナンスおよびモノポールドミナンスを観測することができた。また、クォーク反クォーク間のフラックスチューブプロファイルを測定し、双対超伝導体描像が成り立っていることが確かめられた。上記の手法はローカルユニタリゲージだけでなく、より一般的なゲージ固定なしの場合の解析にも適用可能である。

そこで我々は一昨年度より、ゲージ固定なしの場合にもローカルユニタリゲージの場合と同様の解析を始めた。一昨年度までにゲージ固定なしの場合にもアーベリアンドミナンスやモノポールドミナンスなどが観測されていたが、有限体積効果や連続極限の存在など、まだ調査しなければならない点が多く残されており、昨年度は様々な格子サイズ、格子間隔を用いて詳細な計算を行なった。

そして今年度、ゲージ固定を行わなくても、アーベリアンドミナンス・モノポールドミナンスが連続極限で、誤差内で 100% 成り立つことを示した。同様に、異なる体積を持つコンフィグレーションを使った解析でも、アーベリアンドミナンス・モノポールドミナンスが、誤差内で 100% 成り立つことを示した。さらにクォーク反クォーク間のフラックスチューブプロファイルを測定し、双対超伝導体描像が成り立っていることを示した。また、真空の特徴を示すパラメータである、真空のタイプを決めた。そして真空のタイプが格子間隔に依存せず決まり、スケールしていることも示した。

2. 具体的な利用内容、計算方法

研究課題 I : 有限温度・有限密度

我々がこれまでに行なってきた研究では、クローバーフェルミオンと呼ばれる格子化から生じる誤差が小さくなるように改良した格子フェルミオン作用と、一般的によく使われている Wilson ゲージ作用を用いて、2 フレーバーの有限温度シミュレーションを行なってきた。しかし、3 フレーバーの場合、この作用には小さい β の領域に非物理的な一次相転移があり、適用することができない。これを機に、これまで使用してきた作用を使うのを止め、改良した作用を用いる。その

ためにまず、Wilson 作用から Symanzik 作用に変更することによって非物理的な一次相転移を回避する。これには、格子化から生じる誤差をより小さくする利点もある。そして、フェルミオン場の作用はこれまでと同様にクローバー作用を使うが、リンク変数はスメアリングされたものに置き換えたものを使用する。これらの改良には、格子化から生じる誤差が小さくなるという利点に加えてカイラル対称性の破れを改善するという利点もある（クローバー作用や Wilson フェルミオン作用は有限格子間隔においてカイラル対称性が破れている）。さらにこの作用には、計算コストがこれまで使用してきた作用に比べて少ないといった大規模計算には欠かせない非常に大きな利点もある。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

これまで我々のグループは、SX-7 を使ってモノポールによるクォーク閉じ込めについて研究を行ってきた。昨年新しいシステムに変更することになったため、これまで使ってきた計算用プログラムを使って、同じ計算結果を得ることが出来るか、確認する必要があった。

そこで、我々の研究で最も根本的なプログラムである、quenched SU(2) のコンフィグレーションを生成するためのプログラムを実行して、計算プログラムの実行結果を確認した。そして生成時間の見積りを行っている。

3. 結果

研究課題 I : 有限温度・有限密度

これまで、 $\beta = 5.5$, $32^3 \times 12$ 格子で $\kappa = 5$ 点 (0.1200, 0.1203, 0.1205, 0.1207, 0.1209) でそれぞれ $0(5000)$, $0(5000)$, $0(4000)$, $0(2000)$, $0(1000)$ の真空を発生させてポリアコフープ、ポリアコフープサセプタビリティ、トポロジカルチャージサセプタビリティを測定した。その結果、 $\kappa = 0.1207$ 付近に相転移があることがわかった。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

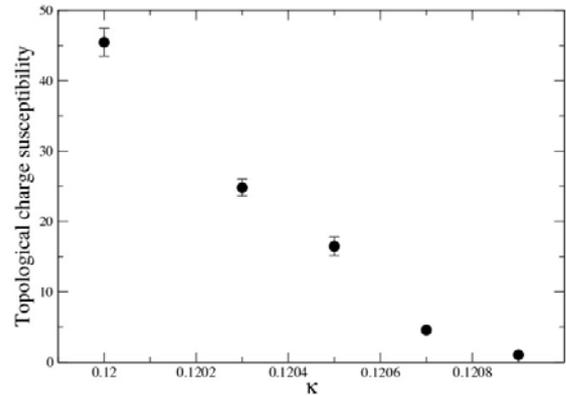
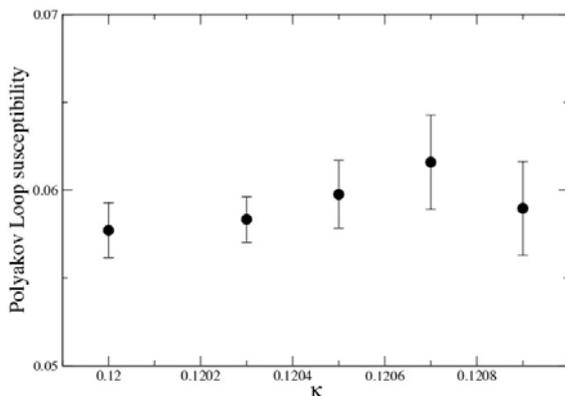
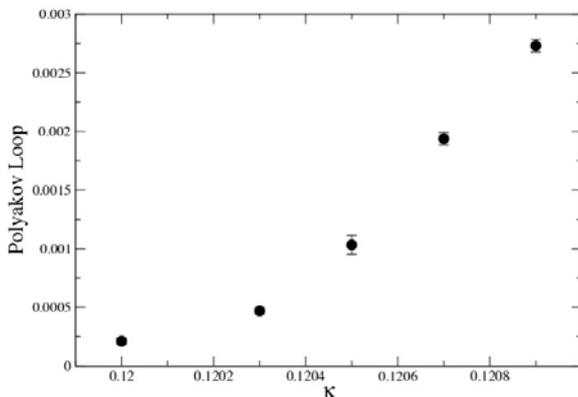
これまで利用してきた SX-7 と異なる計算結果を得たため、コンフィグレーションを生成するプログラムを詳細に確認して原因を突き止めた。

その原因は、D0 ループの計算で何度も変数をアップデートすることによって丸め誤差が積み重なり、計算途中にある if 文によってはじかれて計算結果が異なることがわかった。しかし、コンフィグレーションを多く使って統計を上げれば、誤差の範囲内で同じ結果を得ることは確かなことであり、物理量の測定に影響を及ぼさないことがわかった。

4. まとめ

研究課題 I : 有限温度・有限密度

この半年のシミュレーションで、3フレーバーQCDの大体の相転移温度がわかった。相転移温度を厳密に決定するためには、 $\kappa=0.1207, 0.1209$ の統計を上げることと、 $\kappa=0.1206, 0.1208$ のシミュレーションが必要である。



研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

これまで使ってきたコンフィグレーションを生成する計算プログラムを SX-7 で実行した場合と新しいシステムの大型メモリ計算機を使った場合と計算結果を比較した。その結果、丸め誤差が積み重なることによって計算結果が変わるがそれは誤差の範囲内であり、物理量の測定には影響がないことがわかった。

現在確認を終えたコンフィグレーションを生成する計算プログラムを使って、コンフィグレーションの生成と時間の見積りを行っている。

5. 今後の計画・展望

研究課題 I : 有限温度・有限密度

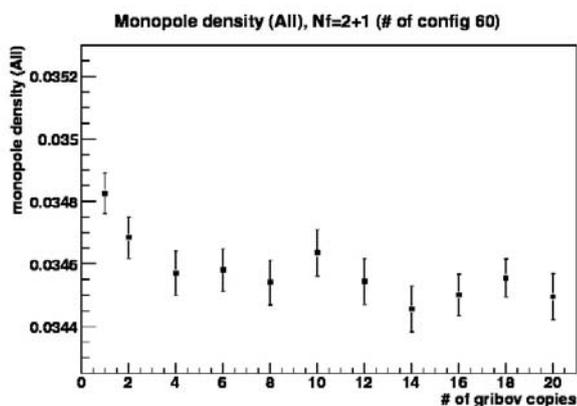
$\kappa=0.1207, 0.1209$ の誤差を減らすため、統計をあげる。また、ポリアコフープサセプタビリティのピークの位置をより正確にきめるため、 $\kappa=0.1206, 0.1208$ のシミュレーションを行う。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

コンフィグレーションを発生させる計算プログラムの確認はほぼ完了したので、これまで我々が示した、ゲージ固定に依存しないモノポールが何であるかを調べる手段として、モノポールアクションを定義して、カップリングを決め、その振る舞いを調べる。そのためには、これまでになく大きな体積を持つコンフィグレーション、例えば、体積 96^4 などのコンフィグレーションが必要であるため、そのようなコンフィグレーションを生成する。そして、ケージ固定を行わないモノポールアクションの解析を行い、ゲージに依存しないモノポールの正体を明らかにする。

また、同グループの中村が生成している 3 フレーバーを持つ SU(3)のコンフィグレーションを用いて、これまで誰も行ってない金沢大学の独自の研究課題であるモノポールの研究、例えば、モノポールの静的ポテンシャルの解析や、フラックスチューブプロファイルなどの研究、さらに今年度 quenched SU(2)のコンフィグレーションを用いて解析を行った、ゲージ固定を行わないランダムゲージ変換を使った解析に、このコンフィグレーションを使って取り組む予定である。

中村が生成したコンフィグレーションを使った解析として、モノポール密度のグリボフコピー依存性を示した図を以下に添付する。



6. RICC の継続利用を希望の場合は、これまで利用した状況 (どの程度研究が進んだか、研究においてどこまで計算出来て、何が出来ていないか) や、継続して利用する際に行う具体的な内容

研究課題 I : 有限温度・有限密度

これまでの研究で大体の相転移温度を決定することが出来た。今後はこれまでのシミュレーションを継続して統計を上げていく。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

これまで我々が使ってきた SX-7 の計算プログラムが、RICC においても利用できることを確認した。次の段階として、平成 22 年 4 月頃から、この計算プログラムを使って体積 96^4 を持つコンフィグレーションを 100 個生成するつもりである。このコンフィグレーションは実行時のメモリが約 128GB あり、生成には理研の大型メモリ計算機が有効である。また、リストベクトルを使うため、SX-7 の計算プログラムを並列化するのに時間

がかかるが、自動並列化が使えるため、大型メモリ計算機が大変有用だと考えている。

そして、生成したコンフィグレーションを用いて、ゲージ固定を行わないモノポールアクションの研究に取り組む予定である。その他、中村の生成しているコンフィグレーションの生成進度を見ながら、3 フレーバーSU(3)のコンフィグレーションを使った解析にも取り組む予定である。

7. 一般利用で演算時間を使い切れなかった理由

研究課題 I : 有限温度・有限密度

一年間の CPU 時間として秋に申請した。しかし、スループットが悪く、来秋までに使い切れない可能性がある。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

昨年秋に一年間の利用申請を行った。これまで主に計算プログラムの確認に時間を使ってきたため、予定よりも利用時間が少なくなっている。

平成 21 年度 RICC 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

Tsuneo Suzuki, Masayasu Hasegawa, Katsuya Ishiguro, Yoshiaki Koma, Toru Sekido, *Gauge invariance of color confinement due to the dual Meissner effect caused by Abelian monopoles*, Physical Review D, **80**, (2009), 054504

【国際会議などの予稿集、proceeding】

K. Ishiguro, M. Hasegawa, Y. Koma, T. Suzuki, T. Sekido, “*Gauge invariance of the color confinement mechanism due to the Abelian dual Meissner effect*,” Pos(Lat2009)238

【国際会議、学会などでの口頭発表】

ポスター発表（国際会議）

K. Ishiguro, M. Hasegawa, Y. Koma, T. Suzuki, T. Sekido, “*Gauge invariance of the color confinement mechanism due to the Abelian dual Meissner effect*,” 27th International Symposium on Lattice Field Theory, Peking University, July 26-31, 2009

学会発表（国内会議）

長谷川、石黒、駒、鈴木、関戸、“ゲージに依存しないモノポールダイナミクスの研究、”日本物理学会第 64 回年次大会、立教大学、2009 年 3 月 27 日-30 日

