

課題名 (タイトル) :

量子色力学の非摂動論くりこみ群解析
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 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 2~8 [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。そこで金沢大学の研究グループでは、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長年試みてきた。

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) 固定を用いると、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を明らかにした。しかしながら、この描像は MA ゲージ固定を除く他のゲージ固定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、ランダウゲージ固定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、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固定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。つまり、ノイズを劇的に減らすことにより、ノイズに埋もれていたシグナルを精度良く求めること

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

ゲージ固定をせずにモノポール有効作用の結合定数を決めるためには、先ず、ノイズが大きいと予想されるので、数多くのブロックスピン変換を行う必要がある。そのため、これまででない大きな格子体積 $V=96^4$ の真空を quenched SU(2) のゲージ作用を使って生成させる必要がある。この生成に必要な実行時の計算メモリは 120GB ほどあり、この真空の生成には、大容量メモリ計算機を使った生成が不可欠である。そして、モノポール有効作用に含まれる結合定数のスケーリングを見るため、大容量メモリ計算機を使って格子間隔が 0.015 [fm] から 0.025 [fm] の非常に連続極限に近い、 $\beta=2.90, 3.00, 3.30$ の 3 点で熱平衡状態達した真空を各々約 50 個生成させる。熱平衡状態を作るためには、8 スレッドで約 100 時間かかり、真空を 1 個生成させるためには、8 スレッドで約 6 時間を必要とする。

次に、この真空を使ってゲージ固定をせず、モノポール有効作用を 2 次、4 次のモノポール相互作用項に限定して定義し、結合定数を逆モンテ・カルロ法の一つである Swendsen の方法を使って決定する。シグナ

残された課題の一つに、低エネルギー有効理論の構築がある。真空中にゲージ固定に依存しないモノポールが凝縮し、クォークの閉じ込めに重要な役割を果たしているのであれば、そのモノポールの自由度を使った有効作用を決定すること、QCD の赤外領域における物理を理解する上で重要となる。そのために、ゲージ固定なしの場合でのモノポール有効作用の解析を行う。

また、近年の実験結果より、QCD は有限温度非閉じ込め相においても強く相互作用していることが示唆されており、その領域におけるモノポールの役割についても研究する。

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

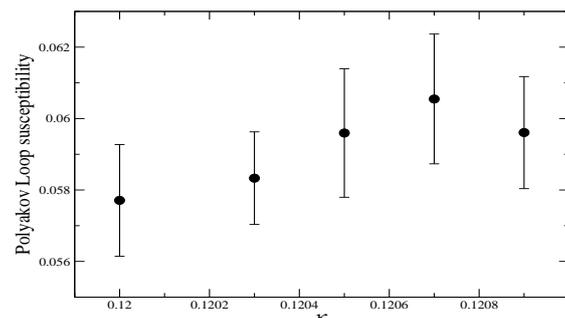
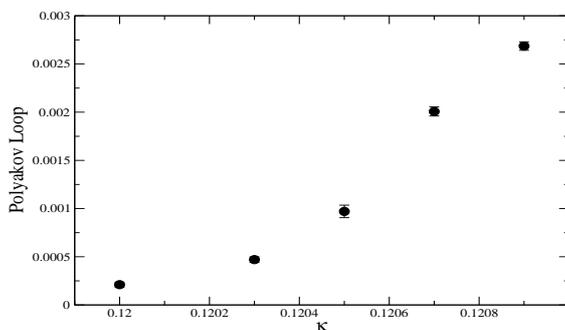
我々がこれまでに行なってきた研究では、クローバーフェルミオンと呼ばれる格子化から生じる誤差が小

有限温度非閉じ込め相におけるモノポールの役割に関する研究では、状態方程式に対する寄与をみるため、trace anomaly と呼ばれる圧力やエネルギー密度を計算する際に重要となる量とモノポールの関係を調べる。

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 κ 5 点 (0.1200, 0.1203, 0.1205, 0.1207, 0.1209) でそれぞれ $O(5000)$ の真空を発生させてポリアクフープ、ポリアクフープサセプタビリティを測定した。ポリアクフープサセプタビリティのピークの位置から $\kappa = 0.1207$ に相転移があることが分かった。



研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

モノポール有効作用の研究に関しては、十分熱平衡状態に達した真空 $\beta = 2.90$, 56 個、 $\beta = 3.00$, 96 個、 $\beta = 3.30$, 56 個を生成した。この真空に対して MA ゲージ固定を行う予定であるが、真空 1 個に対して、12 スレッドで約 10 日ほど必要になることがわかり、コード自体のチューニングを含めて現在検討中である。

非閉じ込め相におけるモノポールの役割に関する研究では、 16^4 , $16^3 \times 4$ 程度の比較的小さな格子を用いて、 $\beta 25$ 点に対して、各 5000 個の配位を発生させた。その配位を用いて trace anomaly に対するモノポールの寄与を調べたところ、誤差が大きくまだ信頼のおけるデータは得られていない。

4. まとめ

研究課題 I : 有限温度・有限密度

$\beta = 5.5$ での相転移温度がわかった。連続極限・カイラル極限を取るためにもう数点 β を変えてシミュレーションを行う必要がある。また、物理的な値に直すためには相転移点での零温度のシミュレーションを行う必要がある。

研究課題 II : 閉じ込め機構の解明

ゲージ固定を行わないで、モノポール有効作用の結合定数を決めるため、異なる 3 点の大きな格子体積を持ち、さらに連続極限に近い熱平衡状態に達した真空を生成した。また、それらの真空に対して MA ゲージ固定を行うために、計算コードの確認と書き換え、さらに時間の見積りを行った。そして Swendsen 法の計算コードの確認と書き換え、時間の見積りを行った。

また、非閉じ込め相におけるモノポールの役割については、trace anomaly に対するモノポールの寄与を調べたが、格子体積が小さく、また配位数も少ないため、さらなるシミュレーションを実行する必要がある。

5. 今後の計画・展望

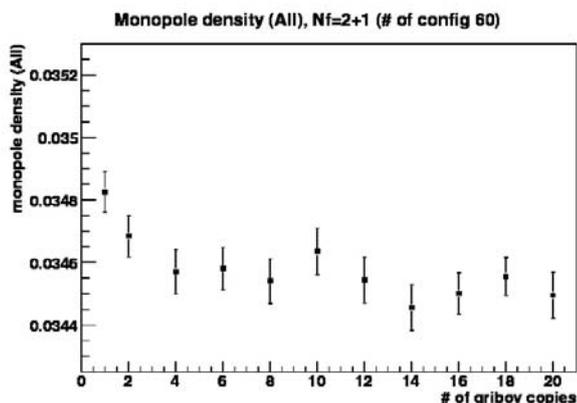
研究課題 I : 有限温度・有限密度

連続極限・カイラル極限を取るためにもう数点 β を変えてシミュレーションを行う。また、物理的な値に直すために相転移点での零温度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

長年の研究により、モノポールがクォーク閉じ込め機構に重要な役割を果たしていることを示してきた。また、これまで長い間問題であったゲージ依存性問題は、マルチレベル法やランダムゲージ変換などのノイズリダクション法を用いることによって解決された。しかし、ゲージ固定に依存しないモノポールと MA ゲージ固定から得られるモノポールの違いなどについては、さらに理論的な解明が必要である。そのための手段として、ゲージ固定を行わずモノポール有効作用の結合定数を決め、得られた結果が MA ゲージ固定から得られる結果とどのような関係があるのかを調べることが考えられる。また別の方法として、より現実に近い SU(3)の真空を使った解析を行うことによって、その解明を行う。例えば、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)の真空を用いて、これまで誰も行っていない金沢大学独自の研究課題である、ゲージ固定を行わないモノポールの研究に取り組む予定である。参考のため、中村が生成したコンフィギュ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。



また有限温度非閉じ込め相におけるモノポールの役

割を解明することは、高温相における非摂動的現象に関する理解につながることを予想される。そのため、quenched SU(2)においてより大きな格子体積を用い、配位数を増やした研究を行う。さらに、将来的にはより現実世界に近い quenched SU(3)および full QCD への拡張も視野に入れている。

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

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

常にジョブを流したがスループットが悪く使いきれなかった。

研究課題 II：閉じ込め機構の解明

大型メモリ計算機を使った計算コードの確認と書き換えに多くの時間を費やしたため。

8. 利用研究成果が無かった場合の理由

平成 22 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】

“Probing the finite temperature phase transition with $N_f=2$ nonperturbatively improved Wilson fermions”
V.G. Bornyakov, R. Horsley, S.M. Morozov, Y. Nakamura, M.I. Polikarpov, P.E.L. Rakow, G. Schierholz, T. Suzuki, Phys. Rev. D 82, 014504 (2010)

【国際会議、学会などでの口頭発表】

ポスター発表（国際会議）

“Finite Temperature QCD with SLiNC Fermions”, Y. Nakamura, M. Koma, Y. Koma
The Japanese-German Seminar 2010 “Lattice QCD confronts experiments”
4(Thu) - 6(Sat) November 2010, Mishima, Japan.

==Best Poster Award==

“Equation of state and magnetic monopoles in $SU(2)$ gluon plasma”, K. Ishiguro
The Japanese-German Seminar 2010 “Lattice QCD confronts experiments”
4(Thu) - 6(Sat) November 2010, Mishima, Japan.

学会発表（国内会議）

”ゲージに依存しないモノポールダイナミクスの研究（2）”

長谷川将康、石黒克也、駒佳明、鈴木恒雄、関戸暢、
第 65 回年次大会 日本物理学会
2010 年 3 月、岡山大学

“有限温度 QCD における状態方程式とトポロジカルな自由度”

関口昂臣、石黒克也、津江保彦

日本物理学会中国・四国支部 2010 年度学術講演会
2010 年 7 月 高知大学