

SU(2)Gluodynamicsの有限温度系におけるMonopole有効作用

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/16438

氏名	石黒克也
生年月日	
本籍	高知県
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博甲第459号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	SU(2)Gluodynamicsの有限温度系における Monopole 有効作用
論文審査委員(主査)	鈴木 恒雄(理学部・教授)
論文審査委員(副査)	久保 治輔(自然科学研究科・教授) 青木 健一(理学部・教授) 末松大二郎(理学部・助教授) 寺尾 治彦(自然科学研究科・教授)

学位論文要旨

It is important to understand nonperturbative effects of Quantum Chromodynamics (QCD) at finite temperature. Monopoles are induced by performing abelian projection (partial gauge-fixing) in QCD, and the string tension extracted from the monopole part reproduces the original one (monopole dominance). This fact suggests that monopoles play an important role for confinement. We study the effective monopole action at finite temperature in SU(2) gluodynamics on anisotropic lattices. Using an inverse Monte-Carlo method and the blockspin transformation for space directions, we determine 4-dimensional effective monopole action at finite temperature. We get an almost perfect action in the continuum limit under the assumption that the action is composed of two-point interactions alone. It depends on a physical scale b_s and the temperature T . The temperature-dependence appears with respect to the spacelike monopole couplings in the deconfinement phase, whereas the timelike monopole couplings do not show any appreciable temperature-dependence. The dimensional reduction of the 4-dimensional SU(2) gluodynamics ($(SU(2))_{4D}$) at high temperature is the 3-dimensional Georgi-Glashow model ($(GG)_{3D}$). The latter is studied at the parameter region obtained from the dimensional reduction. We compare the effective instanton action of $(GG)_{3L}$ with the timelike monopole action obtained from $(SU(2))_{4D}$. We find that both agree very well for $T \geq 2.4T_c$ at large b region. The dimensional reduction works well also for the effective action. The timelike monopole (instanton) actions here obtained are fitted beautifully by the lattice Coulomb propagator. The result means that the nonperturbative effects such as the spatial string tension in the deconfinement phase are given by the timelike monopoles in $(SU(2))_{4D}$.

強い相互作用を記述すると考えられている Quantum Chromodynamics (QCD) は、低エネルギー領域においては強結合となり、摂動論は破綻する。そのため解析的な取り扱いが困難になるが、格子 QCD 等、多くの非摂動的手法が開発され、赤外領域の物理に対する理解は進んでいる。しかしながら、QCD の代表的な非摂動的現象の1つであるクォークの閉じ込めに関しては、現在のところまだ説明されたとはいえない。

ゼロ温度系においては閉じ込められているクォークであるが、有限温度 QCD では温度を高くしていくと相転移が起こり、高温相においてそれはもはや閉じ込められず、Quark Gluon Plasma になると考えられている。このように、閉じ込めという現象を考えるだけでも有限温度系においては非常に複雑な変化が起こるのであるが、このような非摂動的現象がどのようにして起こるのかを理解す

ることは重要であり、それが本論文の目的である。

これまでに行なわれている研究から、QCDの赤外領域ではAbelian Projectionという部分的gauge固定を行なうことで出てくるmonopoleの自由度が重要であると考えられている。例えば格子QCDによる研究では、特に $SU(2)$ 、 $SU(3)$ gauge理論の場合に、string tension等の閉じ込めを特徴付ける物理量に対して、Abelian dominanceやmonopole dominanceという現象が観測されている。Abelian dominanceとは、元々のnon-Abelian変数から抜き出したAbelianの変数のみによって、元のnon-Abelian変数で測定した物理量を再現出来るというもので、このことはQCDにAbelianの有効理論が存在することを示唆している。また、monopole dominanceとはAbelian projectionをした後に抜き出したmonopoleの部分だけで元のnon-Abelianの物理を再現出来る、というもので、閉じ込めに対してmonopoleが重要な役割を果たしているということ、そしてmonopoleで書かれた有効理論の存在をも示唆している。

この考え方に基づいて、ゼロ温度系ではそれを用いた有効理論(monopole action)が得られている。有限温度系においてもmonopoleの重要性は指摘されており、ゼロ温度系の場合と同様の議論が出来ることが期待される。そこでまず、有限温度 $SU(2)$ gauge理論(以下、 $(SU(2))_{4D}$ とする)において、格子simulationを用いてeffective monopole actionを構築することを試みた。格子上で考えているので連続極限を考える必要があるが、その際に有限温度であることを考慮して、非等方格子上で考えた。これにより、空間方向はblockspin変換をし、時間方向は単純に格子間隔を小さくしていくことで、連続極限を考えられるようになる。actionの決定は、格子上で発生させたmonopole currentに対して、Inverse Monte-Carlo法を用いることで行なった。また、取り入れる相互作用は2次のものみを仮定し、Wilson loopに対する物理的意味の違いから、空間方向のmonopole(space-like monopole)と時間方向のmonopole(time-like monopole)を区別した。数値simulationの結果、

- (1) $0.6T_c \leq T \leq 2.4T_c$ の範囲内で、赤外領域において、空間方向のscale b_s 、温度 T のみに依存する連続極限と等価なmonopole actionが得られた。
- (2) space-like monopole actionの温度依存性が、非閉じ込め相において現れること、そしてtime-like monopole actionには閉じ込め・非閉じ込め両相において温度依存性が見られないことがわかった。

得られたactionの b_s 、 T 依存性は図1に示す。

次に、高温相(非閉じ込め相)における非摂動効果に注目した。この相における非摂動効果には、例えば空間2方向で張られるWilson loopから求められるspatial string tensionなどがある。 $(SU(2))_{4D}$ は、高温相においてdimensional reductionを行なうと、3次元 $SU(2)$ Georgi-Glashow model(以下、

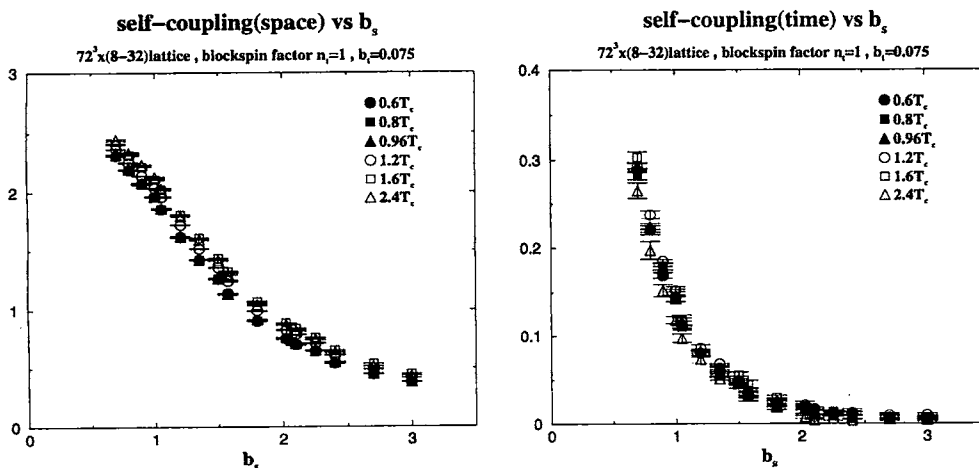


図1: space-like monopole(左)とtime-like monopole(右)のself-couplingと b_s の関係の温度依存性について

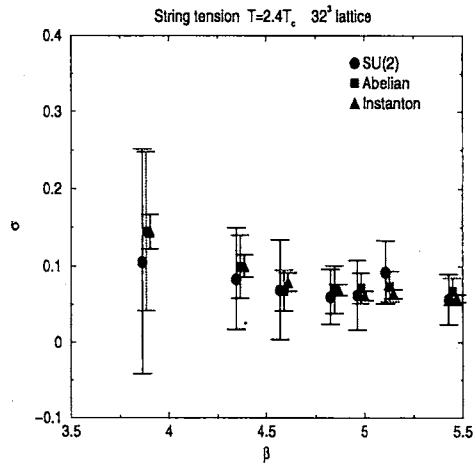


図 2: $(GG)_{3D}$ の string tension。温度は $2.4T_c$ 。

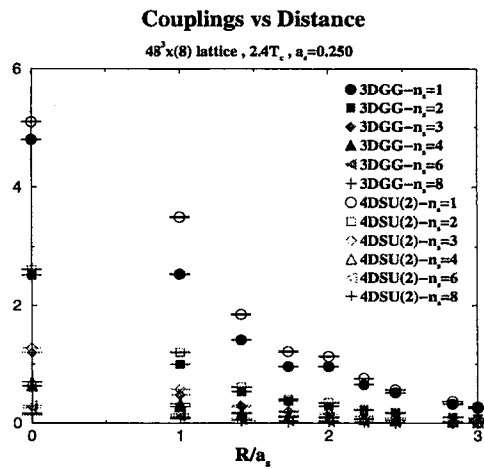


図 3: 得られた action の coupling の距離依存性と 2 つの action の比較。温度は $2.4T_c$ 。

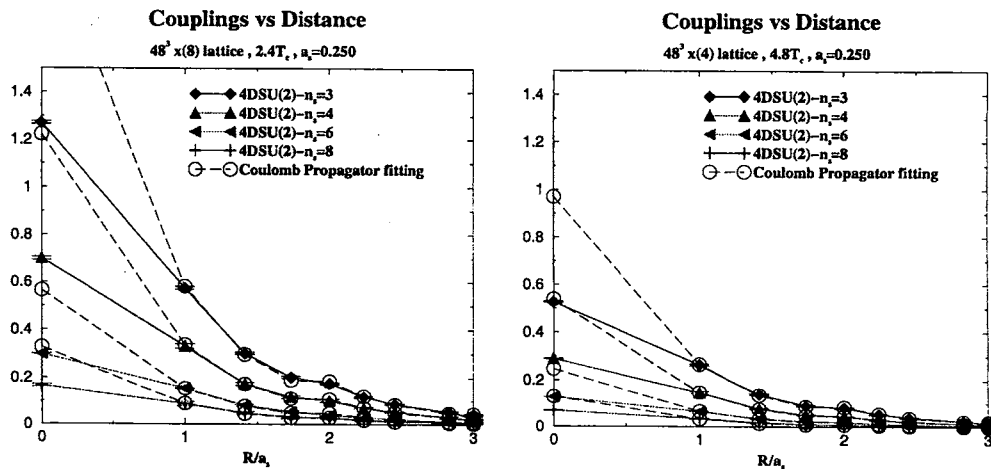


図 4: time-like monopole action の Coulomb propagator による fitting。温度は $2.4T_c$ (左) と $4.8T_c$ (右)。

(GG)_{3D} とする) になることが知られている。(GG)_{3D} には、't Hooft—Polyakov monopole (instanton) という classical solution が存在し、それが Coulomb gas として振舞うことで閉じ込めが起こることが、解析的にも数値的にも示されている。この有効理論における閉じ込めは、(SU(2))_{4D} の spatial string tension と関係していると考えられ、monopole の観点からいえば、(GG)_{3D} における instanton と 4次元空間において static な存在である time-like monopole が対応していると考えられるのである。そこで、これらの関係を探るために、(SU(2))_{4D} の time-like monopole action (ある time-slice で考えたもの) と (GG)_{3D} の instanton action を比較した。

- (1) まず、dimensional reduction した parameter 領域における (GG)_{3D} での monopole の重要性を確認するために、string tension を測定した。その結果、Abelian dominance、monopole dominance が確認された (図2)。
- (2) effective monopole action の比較は、 $1.6T_c \leq T \leq 4.8T_c$ の範囲で行なった。その結果、 $T \geq 2.4T_c$ において、 b の大きな赤外領域で2つの action が一致することがわかった (図3)。このことは、monopole 等の topological な観点からみても、 $T \geq 2.4T_c$ で dimensional reduction の手法が有効であることを示している。
- (3) 得られた action は、lattice Coulomb propagator により、非常によく fit 出来ることがわかった (図4)。これは、(SU(2))_{4D} の time-like monopole が Coulomb gas となっていること、4次元的にみれば、wrapped monopole loop (時間方向の周期境界条件によって閉じた monopole loop) が Coulomb gas をなすことで、spatial string tension がゼロでない値を持つことを意味している。また、 $T < 2.4T_c$ においても、time-like monopole action は $T \geq 2.4T_c$ のものと非常に似ており、非閉じ込め相においては time-like monopole が非摂動効果の源となっていることを示唆している。

したがって、ゼロ温度系も含めた QCD の全温度領域において、非摂動効果を考える場合には monopole の自由度が重要であると結論づけられる。

学位論文審査結果の要旨

本審査委員会は、審査の結果、上記学位論文に関して以下のように判定した。

赤外領域での QCD (量子色力学) など強い相互作用系の場の量子論では非摂動的な解析法の開発が必要である。

本論文は、非摂動的な取り扱いとして、格子上で定式化された場の量子論をモンテカルロシミュレーション法で解析し、ブロックスピン変換という格子上でのくり込み群を使って連続極限での場の量子論の赤外領域での有効理論を導くという手法を使っている。その手法で、有限温度の SU(2) QCD ($SU(2)_{4D}$) とその高温極限で限れる3次元の Georgi-Glashow 模型 (GG)_{3D} とよばれるヒッグス場を持つ SU(2) 非可換ゲージ理論を解析し、以下のような興味ある結果を得た。

1) 時空間方向の格子間隔を変えるという非等方格子上の困難な計算を行い、($SU(2)_{4D}$) で $0.6T_c \leq T \leq 2.4T_c$ で連続極限と等価なモノポール有効作用を決定した。2) 時間的及び空間的なモノポールの作用にそれぞれのモノポールの役割の違いを反映する温度依存性の違いが現れることを見つけた。3) 高温相での非摂動効果を調べるために、(GG)_{3D} のインスタントン作用と ($SU(2)_{4D}$) の時間的モノポール作用を導き $1.6T_c \leq T \leq 4.8T_c$ 比較を行った。両者は、 $T \geq 2.4T_c$ でよく一致していることを見つけた。4) この両者の作用は、Coulomb 項と自己相互作用項でうまく書けることがわかった。その結果、高温相での非摂動効果は、時間的なモノポールのクーロン気体という描像で理解できることがわかった。

以上の結果は、現実の full QCD 相転移の研究への道筋を切り開くもので大変興味ある重要な結果である。以上の点から委員会は本論文が博士論文として値すると結論した。