

SU(2)QCDにおけるモノポールの有効作用

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/2297/16173

氏 名	中 村 直 紀
生 年 月 日	
本 籍	東京都
学 位 の 種 類	博士 (理学)
学 位 記 番 号	博甲第264号
学位授与の日付	平成10年9月30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)QCDにおけるモノポールの有効作用
論文審査委員	(主 査) 鈴木 恒雄 (副 査) 青木 健一, 末松大二郎, 寺尾 治彦, ミカエル・イルゲンフリッツ

学 位 論 文 要 旨

In this thesis the author discusses about infrared effective theory of QCD.

It is very important to understand low-energy hadron physics starting directly from quantum chromodynamics (QCD). For this purpose, it is very important to fix renormalized trajectory in the infrared region of QCD. Recently, considerable efforts have been made to improve a lattice action in various ways in order to get more reliable data on available lattices. But they are far from renormalized trajectory in the infrared region.

Is it possible to fix a perfect lattice action which is valid in the infrared region? Note that there are various ways of renormalization transformations. To study the infrared behaviors, it seems important to pay attention to a dynamical variable which plays a dominant role in the infrared region.

In this respect, the old conjecture which was proposed by 'tHooft is very interesting. It says that QCD is reduced to an abelian $U(1) \times U(1)$ theory with electric and magnetic charges after performing a partial gauge fixing called abelian projection. Quark confinement could be understood by the dual Meissner effect due to condensation of the magnetically charged monopoles. Actually there have been many numerical data supporting the above conjecture when we perform the abelian projection in the maximally abelian (MA) gauge. These facts suggest that monopoles are relevant operator in the infrared region.

So, performing block spin transformations on the dual lattice after abelian projection, we obtain an almost perfect lattice action in terms of monopole currents in the infrared region of pure SU(2) QCD. The action depends only on a physical scale b and is free from cut-off $a(\beta)$. It reproduces analytically the string tension which is near to the physical one for wide physical-scale region ($b \geq 1.0(\kappa^{-1/2})$).

筆者は本論文に於いて、格子 QCD を出発点として、abelian 射影後の abelian 有効理論を dual 変換して、dual 格子上での block spin 変換を考えることにより SU(2) QCD の赤外領域での有効作用を決定した。

QCD は低エネルギー領域で強結合になるため摂動論が破綻してしまい解析的な扱いが困難になる。したがって、低エネルギーハドロン現象を解析的に扱えるような有効理論を QCD

から直接的に導くことは非常に重要な問題である。低エネルギーハドロン現象における最も基本的な問題は quark の閉じ込め問題である。

最も直接的に QCD から閉じ込め問題を扱えるのが、格子 QCD の Monte-Carlo simulation による方法である。しかし、連続極限をとらなければならないという問題を抱えている。連続極限は無限大の大きさの格子をとることを意味しており、少なくとも数値的 simulation においてそれは不可能である。そこで、比較的小さな格子でも連続極限が得られるように格子作用を改善するというのがなされてきた。これは、Wilson の繰り込み群に基づく考え方で、繰り込まれた軌跡 (RT) の上では連続理論の物理を完全に再現する、すなわち格子による cutoff 効果が存在しないということに基づいている。この RT 上の作用は perfect action と呼ばれる。連続理論は RT 上の紫外固定点で定義されるが、低エネルギー現象を見るためには格子間隔がそんなに小さくなくても可能である。そこでなるべく RT に近付いておいて、比較的大きな格子でも連続理論の結果を再現するような simulation をおこなうというのが一般的な作用の改良の考え方である。さらに non-abelian link 変数に対する block spin 変換を考えることにより RT を決めようという研究もなされたが、作用の形は block spin 変換とともに複雑になっていき RT を決めるには至らなかった。

また最近、紫外固定点の近傍で perfect な (cutoff 依存性のない) fixed point action に関する研究がなされ、topological charge の定義などには威力を発揮している。fixed point action は古典的には perfect な作用である。しかし、QCD の低エネルギー領域において強結合になるため量子効果が重要なことは明らかである。本当の意味で QCD の低エネルギー領域を理解するためには、これらの量子効果を取り込んだ後に物理を支配している operator が何であるかを理解することが重要なように思える。

これに対し '81 年に 't Hooft は、QCD の $SU(N)$ 対称性を abelian projection という部分的 gauge 固定により $U^{N-1}(1)$ 対称性に reduce させることによって magnetic monopole が理論に導入されることを示し、その monopole の凝縮によって dual Meissner 効果が引き起こされ quark が閉じ込められるのではないかとことを示唆した。

そして lattice Monte-Carlo simulation は、abelian projection として maximally abelian (MA) gauge をとった場合にこの描像が正しいことを示すさまざまな証拠を与えてきた。

このことは、abelian projection 後の magnetic monopole が QCD の低エネルギー領域に対して支配的であり、QCD の低エネルギー領域に対する有効作用を決定するために monopole に対する block spin 変換が有効であることを示唆している。

この方向での最初の研究は、すでに柴と鈴木によってなされてきた。彼らは、dual 変換を数値的に実行することによって $SU(2)$ で monopole current による $U(1)$ の有効作用を決定した。またその有効作用は n extended monopole に対しても決定された。extended monopole を考えることは dual 格子上で block spin 変換を実行することに対応している。彼らは、相互作用の形を monopole current の 2 次のみに制限して作用を決定した。そして energy-entropy balance の考えに基づいて monopole 凝縮が示された。さらに決まった作用は、scale しているように見える。すなわち、格子 cutoff a には依らずに物理的な scale $b = na$ のみに依存している。

しかしながら、いくつかの不十分な点もある。彼らは、 $n = 2, 3, 4$ extended monopole を用いて $\beta = 2.5 \sim 3.0$ の領域を調べた。この領域は string tension κ を基準にして $b < 0.7(\kappa^{-1/2})$ に対応しており、低エネルギー現象を見るにはかなりの短距離領域である。したがって、より赤外の領域を詳しく調べる必要がある。さらに彼らは相互作用を monopole current の 2 点相互作用に制限した。しかし、2 点相互作用の理論は propagator を Coulomb propagator に置き換えるという近似のもとで、dual lattice 上の fixed length abelian Higgs model に変形されることが知られている。dual abelian Higgs model は、まさに dual Meissner 効果に

よる閉じ込めを示す QCD の低エネルギー有効理論 dual Ginzburg-Landau model に対応しており、その対称性が破れた相における dual photon の mass と Higgs mass の比が真空の type を決める。これに関しては格子 QCD の Monte-Carlo simulation による結果があり、それは QCD の真空が type-1 と type-2 の border であるということを示している。しかし fixed length abelian Higgs model は、Higgs の 4 点相互作用 λ を無限大にした極限で得られる model であり、London limit (extreme type-2 limit) に対応している。従って、 $\lambda < \infty$ に対応した monopole current action を決定したい。これに対して、 λ が大きいという近似のもとで saddle-point method を使うことにより解析的に求まった作用は 2 次よりも高次の項を含んでおり、このことは QCD においてこれら高次の項が重要であることを示唆している。

これらを踏まえて本論文では、次のようなさまざまな大きさの格子 (最大 48^4 格子) と extended monopole (最大 $n = 8$ monopole) を用いて、より赤外領域で (cutoff a に依らない) b のみに依存した monopole の有効作用を決定した。

$n = 1$ monopole	: 16^4	$n = 6$ monopole	: $48^4, 24^4$
$n = 2$ monopole	: 24^4	$n = 8$ monopole	: $48^4, 32^4$
$n = 3$ monopole	: 24^4	$n = 12$ monopole	: 48^4
$n = 4$ monopole	: $48^4, 32^4, 24^4, 16^4$		

また作用の形としては、2 点相互作用に加えて 4 点と 6 点相互作用を作用に導入した。

結果として、まず 2 点の支配的な項は Coulomb 項と自己相互作用項であるが示された。したがって、2 点の相互作用としては Coulomb 項と自己相互作用項のみに対して b 依存性を決定した。 b を固定して $n \rightarrow \infty$ 極限をとるために、それぞれの n と b に対する結合定数の値を求めなければならない。このために、それぞれの n ごとに χ^2 fit をおこなうことにより b 依存性を決定した。その際 b の誤差を採り入れるために、すなわち横軸 (b) の誤差を縦軸 (結合定数) に採り入れるために iterative な方法を使う。まず trial fit function を使ってその微係数から横軸の誤差を縦軸に採り入れて χ^2 fit をおこなう。次にこの χ^2 fit で得られた関数に基づいて横軸の誤差を縦軸に採り入れて χ^2 fit をおこない、得られた関数を trial function と比べ一致していなければ、新しく得られた関数を trial function と考えて同じ操作を繰り返す。これを関数が増えなくなるまで繰り返して得られた fit を b の誤差の採り入れられた χ^2 fit として採用する。この χ^2 fit を 48^8 格子の $n = 4, 6$ に対しておこない、 $n = 8, \beta = 2.0, 2.1, \dots, 2.8$ の b に対応するそれら ($n = 4, 6$) の場合の結合定数を内挿する。そして、 $48^4, n = 8, \beta = 2.0, 2.1, \dots, 2.8$ の中心値 (b の誤差は上と同様に採り入れられる) はそのまま用いてこれらの b の値に対して $n \rightarrow \infty$ 極限を考える。

Coulomb 以外の 3 つの相互作用に対する結果は、考えているすべての b の領域で $n = 8$ で scale していることを示している。したがって、これらに対しては $n = 8$ の結果を $n \rightarrow \infty$ 極限として採用する。Coulomb に対しては、 b の大きな領域 ($b > 1.5(\kappa^{-1/2})$) に対して $n = 8$ でもまだ scale していないように思える。そこでこれらの領域に対して中心値としては $48^4, n = 8$ の中心値をとり、これと $48^4, n = 12$ の結果との $1/n \rightarrow 0$ への線形外挿の結果と $48^4, n = 8$ の中心値との差を誤差としてとった。

それでこれらに対して χ^2 fit をおこなうことにより最終的な連続極限での monopole の有効作用が得られる。その結果が、図.1 である。

Coulomb 相互作用の結合定数は、なめらかに b の小さな領域まで伸びているので $48^4, n = 8$ monopole の data に加えて、より小さな b の領域 ($0.3 < b < 0.6 (\kappa^{-1/2})$) の scale していると思われる data も含めて fit をおこなった。このときの fit 関数としては、 b の大きな領域では power で振る舞い、 b の小さな領域で pure $SU(2)$ QCD の摂動的な 2-loop β 関数に対応した形になるようなものを選んだ。

Coulomb 以外の 3 つの結合定数 $p(b)$, $q(b)$, $r(b)$ に関しては、power fit をおこなった。

結果、 b の大きな領域に対して得られた monopole 有効作用は、数値的には Coulomb と自己相互作用で近似できる。そうすると、この作用は解析的に格子上の string model に変形でき、world sheet の自己結合定数から string tension を評価できる。その結果が、図.2に示される。 $b > \kappa^{-1/2}$ の領域に対して、string tension は scale している。またその値 ($\sqrt{\kappa_{th}/\kappa} \sim 1.37$ for $b \rightarrow \infty$) は、実験値をまずまず再現している。このことは、QCD の低エネルギー領域が monopole によって支配されていることを作用のレベルで示したということで意義があるだろう。

一方、 b の小さな領域において string tension は scaling 則すら満たさない。このような領域においては、さらに高次の相互作用が入っているようにより複雑な作用の形を扱わなければならないであろう。これは、今後の課題である。

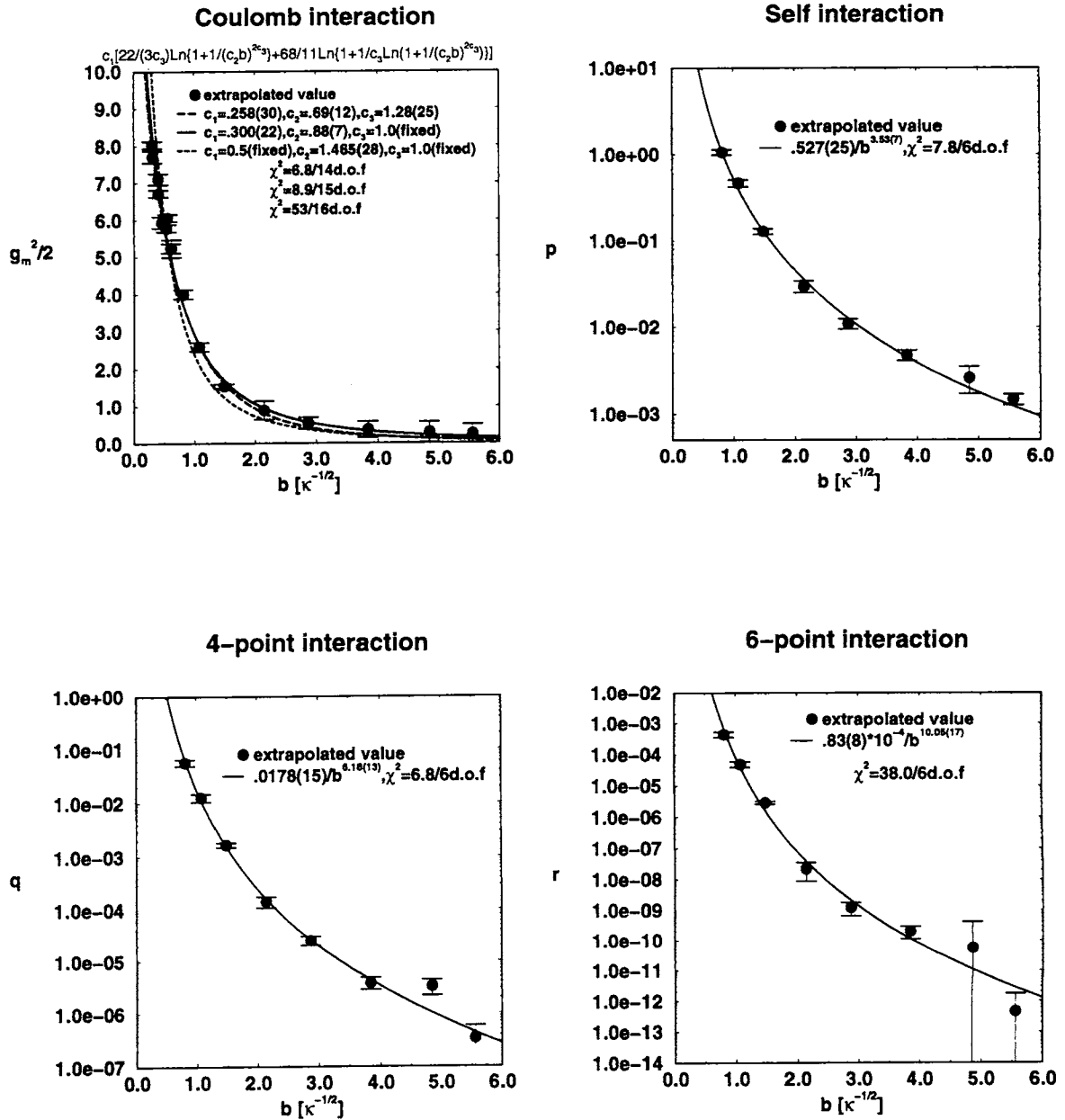


図 1: b -dependences of the perfect action.

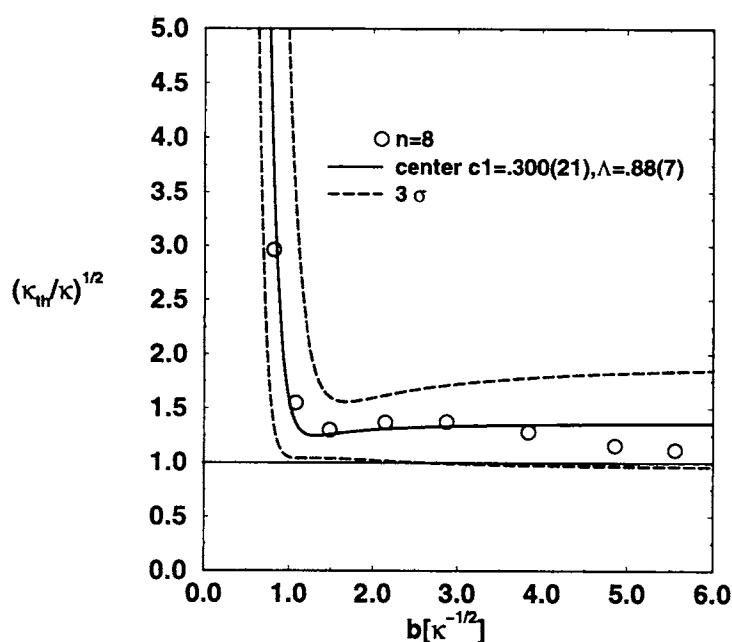


図 2: Theoretical string tension.

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。

本論文は、素粒子物理学における最大の未解決問題の一つである赤外領域での QCD の有効理論をモンテ・カルロ法を使った計算機シミュレーションで研究した結果を記述している。QCD において、可換部分群のみを残すアーベリアン射影と呼ばれるゲージ固定を行うと、QCD がモノポールを含む可換ゲージ理論とみなせる。彼のグループはこの QCD におけるクォークの閉じ込めがモノポールの凝縮によって説明されるという立場で研究してきている。これまで 1) 最大可換ゲージとよばれるゲージでアーベリアン射影後、可換ゲージ場のみでクォークの閉じ込め現象として知られている特徴が大変にきれいに再現できること。2) 更にモノポールのみで閉じ込めの特徴的な量が再現できること。3) 閉じ込めを記述する 2 次の有効モノポール作用がもとまり、ゼロ温度系で無限大体積のもとでは、QCD はモノポール凝縮相にあることなど興味ある結果を導いている。

この論文では、より現実に近い 4 次と 6 次の高次のモノポール相互作用を取り入れた QCD の赤外有効理論としてのモノポール作用を厳密に解析し、以下のような結果を得た。1) 様々な格子の体積でモノポール作用を調べ、格子体積依存性が小さいことを発見した。2) $n = 2 \sim 12$ までの繰り込み変換を行い、cutoff 依存性の小さいスケールしているモノポール作用を求めた。3) 長距離領域では、4 次や 6 次の相互作用は大変に小さくなり、2 次の相互作用でよく近似されることがわかった。4) モノポール作用から厳密にアーベリアンヒッグス理論やハドロンの弦理論を導出できることを示した。5) ハドロンの弦理論から弦定数を導出し、実験値に近い値を再現することを見つけた。6) しかし連続極限の理論の持つ回転対称性はまだ再現されず、得られた有効作用はまだ完全ではないことも解った。

以上の結果は、連続極限での完全作用をめざす研究の中で、かなり完全作用に近い形を求めており、大変興味あるものである。これらの発見は、1997 年 7 月エジンバラの国際会議で発表されている。更に、本論文は、参考論文や副論文の内容を中心に、関連する他の研究のレビューを含めてたいへん良く書かれている。

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。