

Nf=2SU(3)Full QCDの有限温度系における、バリオンおよびメソンのfluxのひも描像に関する研究

著者	森 祥寛
雑誌名	博士学位論文要旨 論文内容の要旨および論文審査結果の要旨 / 金沢大学大学院自然科学研究科
巻	平成18年1月
ページ	1-5
発行年	2006-01-01
URL	http://hdl.handle.net/2297/16694

氏名	森 祥寛
学位の種類	博士 (理学)
学位記番号	博甲第 672 号
学位授与の日付	平成 16 年 3 月 31 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	$N_f=2SU(3)$ Full QCD の有限温度系における, バリオンおよびメソンの flux のひも描像に関する研究
論文審査委員 (主査)	鈴木 恒雄 (総合メディア基盤センター・教授)
論文審査委員 (副査)	末松 大二郎 (理学部・教授), 青木 健一 (理学部・教授) 寺尾 治彦 (自然科学研究科・助教授), 田村 博志 (理学部・助教授)

学 位 論 文 要 旨

Abstract

We study the Abelian flux tube profile in the mesonic and the baryonic configurations of static quarks below and above the finite-temperature transition in $N_f = 2$ full QCD. To reduce effects of ultra-violet fluctuations we measure Abelian distributions of the action density, the color electric field and the monopole current after fixing the maximally Abelian gauge. Changing a distance R between quarks for fixed $T/T_c < 1$, one can see a clear signal of the string breaking for large R . The electric field becomes Coulomb-like and the circulating monopole current disappears. We study also temperature dependence of the flux profile for a fixed $R \approx 0.7$ fm. The disappearance of the squeezed flux is observed clearly above T_c . Similar behaviors are observed both in the mesonic and the baryonic systems.

1 INTRODUCTION

クォークは QCD (量子色力学) に従うことが示されている。これはクォークのもつ color の自由度 ($SU(3)$ 対称な Gauge 場) をもとに構築された理論で、紫外領域においては十分にその正しさは示されている理論である。しかし赤外領域において、多くの未解決問題を抱えている理論でもある。

クォークの閉じこめ問題もその一つで、これはハドロン内部からクォークを単体では取り出すことができないという、赤外領域における代表的な問題の一つである。その解決として考えられたのがハドロンのひも描像である。これはクォーク間では、Gauge 場を担うグルオンによって color の自由度の受け渡しが行われ、それによって力 (強い相互作用) が伝播するとき、力の場 (color electric field) の flux がひも状 (一次元の tube) に絞られることでクォーク間に働く力は距離に比例するようになり、結果としてクォークが単体で取り出せないとする描像である。現在、この描像を導く理論として、超伝導体におけるギンツバーグ-ランダウ理論のアナロジーから構築された、双対 (Dual) なギンツバーグ-ランダウ理論 (DGL 理論) が示されている。この理論は、QCD を基礎とした赤外領域における有効理論であり、その古典解を解くと、dual な世界におけるマイスナー効果により、QCD 真空中では color electric field の flux が tube 状に絞られるという描像を導くことができる。

しかし、実際のハドロン内部における物理には量子効果が入っているため、古典解による解析だけではその描像の妥当性は完全には示せない。そこで量子効果を含めた形で flux のひも描像を確かめるために、時空を格子状に区切り正則化した格子 Gauge 理論をもとに、数値シミュレーションによって、ハドロンのひも構造について調査した。

特に、三体のクォークからなるバリオンにおいては、その内部構造、すなわち color electric field の flux の形状が Y 字型を取るか、 Δ 型を取るかで論争になっている。DGL 理論では Y 字型を支持しており、既に 0 温度系の結果から Y 字型の flux tube の構造を見ることができている [1, 1]。また Static potential の振る舞いからも Y 字型を取ることも同様に示唆されている [3, 4]。この研究では、 $N_t = 8$ の有限温度系におけるバリオンの内部構造

について調べた。

また、最近の Full QCD における有限温度系の研究において、赤外領域において Static potential が flat になることが示された [5]。flat になるのは、動的なクォークの対生成による効果 (string breaking) であると考えられる。このときの flux の profile の振る舞いについても調べた。同時に、有限温度相転移の前後における flux の変化についても追った。

2 SIMULATION DETAILS

数値シミュレーションでは、configuration を QCD の Action を実現するように、量子効果を含む形で生成する。この研究では、

$$S_F = S_F^0 - \frac{i}{2} g c_{sw} \kappa a^5 \sum_x \bar{\psi}(x) \sigma_{\mu\nu} F_{\mu\nu} \psi(x), \quad (2.1)$$

で表される Fermion の Action (clover action) と standard Wilson gauge action S_F^0 を使い、ここで c_{sw} は clover 係数で Ref. [6] に従い非摂動的に決めた。 $16^3 \times 8$ の格子サイズの有限温度系において $\beta = 5.2$, $\kappa = 0.1330, 0.1340, 0.1344, 0.1360$ の configuration をハイブリッドモンテカルロ法によって生成した。これによってフレーバー数 2 の動的なクォークの効果の含まれた系を扱った。有限温度系を扱うことで、有限温度相転移による効果についても調べた。このときの相転移点は $T_c = 213(10)\text{MeV}$ [5] であった。

DGL 理論を背景としたハドロンのひも描像においてはその導出に際して、Abelian projection による Gauge 固定が必要なので、リンク変数の対角成分を最大化する Maximal Abelian gauge (MA Gauge) による Gauge 固定を simulated annealing algorithm [7] によって課した。これによって 3 行 3 列の行列によって表される Non-Abelian リンク変数 ($SU(3)$) から、その対角成分である Abelian リンク変数 ($U(1) \otimes U(1)$) を抜き出すことができる。さらに、この Abelian リンク変数によって計算される plaquette を regular な部分と singular な部分に分解し、そこからの寄与を考えることで regular より photon のリンク変数 operator が singular より monopole リンク変数 operator がそれぞれ定義できる。これらのリンク変数を用いて、Action density や color electric field、Monopole

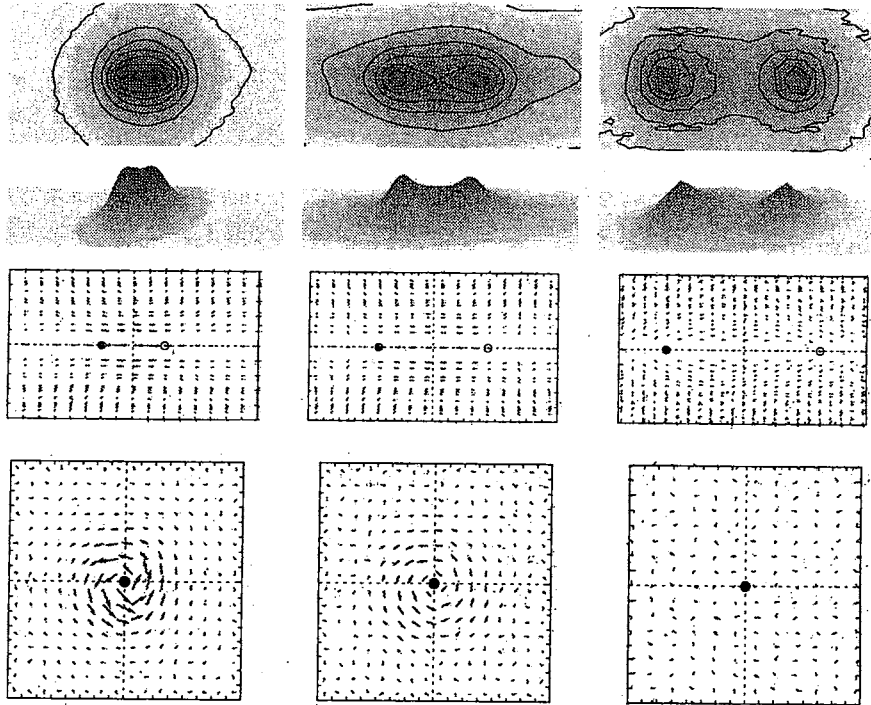


図 1: $T/T_c = 0.94$ ($\beta = 5.2$, $\kappa = 0.1340$) のメソンにおける Action density (TOP)、color electric field (MIDDLE)、Monopole current (BOTTOM) の profile。Source として monopole の PLO を用いた。 $Q\bar{Q}$ の距離は、 $R/r_0 = 0.91$ (left), 1.59 (center), 2.25 (right) である。current の局所的な観測量を定義した。これら観測量と静的なクォーク対 (メソンならばクォーク、反クォーク、バリオンならば 3 体のクォーク) である source $S(R)$ との相関の期待値から、source を外挿したときの局所的な観測量の profile を

$$\langle O(\vec{s}, R) \rangle_{S \neq 0} = \frac{\langle O(s) \cdot S(R) \rangle_{S=0}}{\langle S(R) \rangle_{S=0}} \quad (2.2)$$

と定義できる。ここで $\langle \dots \rangle_{S \neq 0}$ は source が外挿されたものとしめし、 $\langle \dots \rangle_{S=0}$ は外装されていないものを示す。ここで静的なクォークとは、空間上の一点で時間発展する粒子と考えて、時間方向を向いたリンク変数の積によって定義される Polyakov loop operator (PLO) によって表すことにする。そして静的なクォーク対 $S(R)$ を、メソンならば PLO とそのダガーを取ったものの相関、バリオンならば3本の PLO の相関によってそれぞれ定義した。また、メソン、バリオンの source に Abelian, monopole, photon のリンク変数 operator から計算された PLO をそれぞれ考える。

3 NUMERICAL RESULTS

結果が図1である。これは閉じこめ相 ($T/T_c = 0.94$) におけるメソンの monopole part の内部構造を示す profile である。DGL 理論の dual Meissner 効果において、この monopole part が flux のひもを絞る部分を担い、photon part が source の coulomb 部分を担うことが知られている [10, 11, 12]。逆に言えば、この monopole part の振る舞いを調べることで、ひも構造の振る舞いを追うことができる。実際、クォーク間距離の短い領域 ($R/r_0 = 0.91$) においては、flux が絞られ tube 状になっているのがわかる。dual Meissner 効果に従い、color electric field の周りを Monopole current が回っていることもわかる。しかし R/r_0 を大きくしていくと、flux のひも構造が弱まってくることが見て取れる。このひも構造が見えなくなるのが、ちょうど Static potential が flat になる領域と一致することが確かめられている。

バリオンにおいても、flux のひも描像を見ることができた (図2)。特にバリオンにおいては、その内部構造が Y 字型を示唆することが flux の profile から見て取れた ($R_Y/r_0 = 2.61$)。なお、この図の Action density は flux を

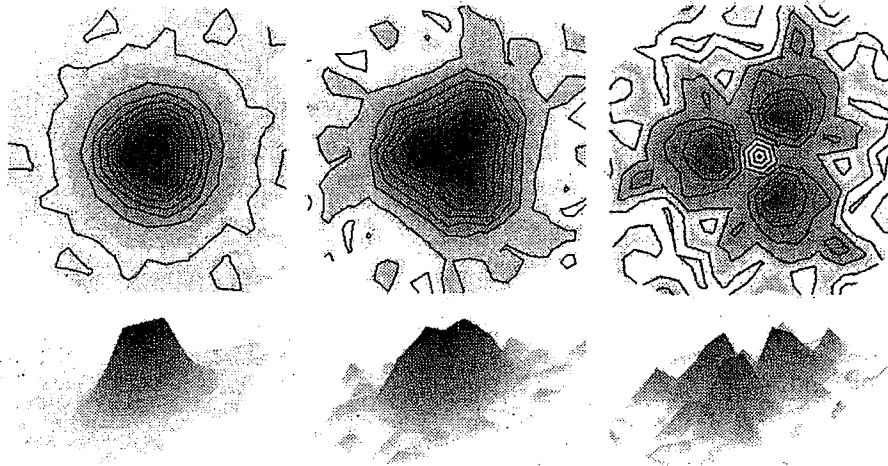


図2: $T/T_c = 0.80$ ($\beta = 5.2$, $\kappa = 0.1330$) のバリオンにおける Action density の profile。Source として monopole の PLO を用いた。QQQ の距離は、 $R_Y/r_0 = 1.96$ (left), 2.61 (center), 3.26 (right) である。

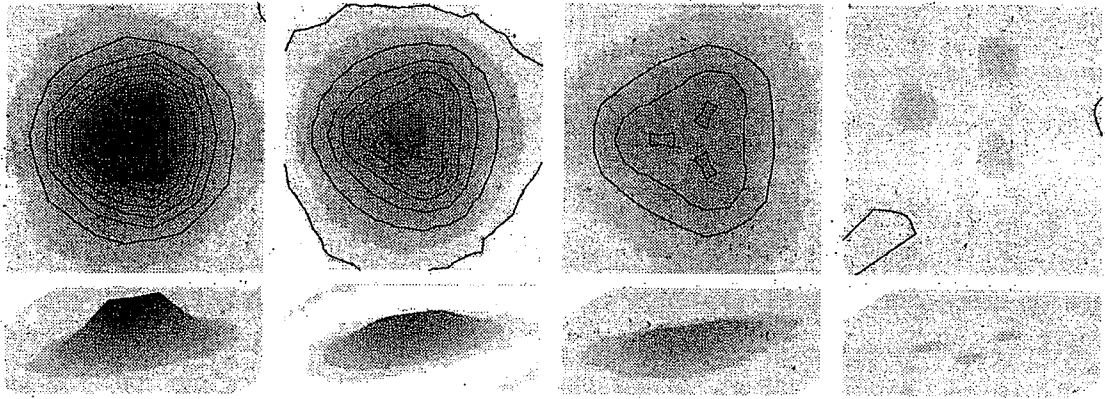


図 3: $\beta = 5.2$, $\kappa = 0.1330$ のバリオンにおける Action density の profile。Source として monopole の PLO を用いた。QQQ の距離を $R_Y/r_0 \sim 2.0$ に固定し、温度 T/T_c を左から 0.80, 0.94, 1.00, 1.28 と取った。 $T/T_c = 1.00$ が相転移点である。

構成する color electric field と Monopole current の強度の分布のようなもので、この値が大きいところに flux が分布する。また R_Y/r_0 はクォーク間距離を表す量で 3 対のクォークからの距離も最も小さくする関数値である。

相転移前後における profile の変化が図 3 である。これは QCD 真空のもつ性質の変化を追うことになる。温度の変化によって系の格子間隔が変化するので、できる限り $Q\bar{Q}$ 間の物理的距離を同じにするように PLO を配置した。その結果、閉じこめ相において見えていた flux のひも構造が非閉じこめ相に遷移するに従って、消えていくさまを追える。クォーク間に働く力が非閉じこめ相において消失するという描像は、非閉じこめ相において、クォークが一体でも存在できるように真空の性質が変化するということと整合する。

参考文献

- [1] H. Ichie, V. Bornyakov, T. Streuer and G. Schierholz, arXiv:hep-lat/0212024.
- [2] H. Ichie, V. Bornyakov, T. Streuer and G. Schierholz, Nucl. Phys. A **721** (2003) 899, [arXiv:hep-lat/0212036].
- [3] C. Alexandrou, P. De Forcrand, A. Tsapalis, Phys. Rev. D **65** (2002) 054503
- [4] T. T. Takahashi, H. Suganuma, Y. Nemoto, H. Matsufuru, Phys. Rev. D **65** (2002) 114509
- [5] Y. Mori et al., Nucl. Phys. A **712** (2003) 930.
- [6] K. Jansen and R. Sommer Nucl. Phys. B **530** (1998) 185
- [7] G. S. Bali, V. Bornyakov, M. Muller-Preussker and K. Schilling, Phys. Rev. D **54** (1996) 2863
- [8] G. 't Hooft, Nucl. Phys. B **190** [FS3] (1981) 455 ; G. 't Hooft, Phys. Scr. **25** (1982) 133.
- [9] M. I. Polikarpov, Kenton K. Yee, Phys. Lett. B **316** (1993) 333
- [10] Y. Koma, M. Koma, D. Ebert, H. Toki JHEP **08** (2002) 047, [arXiv:hep-th/0108138]
- [11] Y. Koma, M. Koma, D. Ebert, H. Toki Nucl. Phys. B **648** (2003) 189, [arXiv:hep-th/0206074]
- [12] Y. Koma et al., Phys. Rev. D **68** 094018, (2003), [arXiv:hep-lat/0302006].

学位論文審査結果の要旨

本論文は、クォークの力学である量子色力学を格子上で定式化し、モンテカルロシミュレーション法を用いて、赤外領域での最大の未解決問題である「クォークの閉じこめ」問題に関する双対マイスナー効果について考察している。極めて計算時間のかかる軽いクォーク 2 個を含んだ改良されたフェルミオン作用を用いた fullQCD のモンテカルロシミュレーションを行い、中間子や重粒子などにおけるカラー電束の分布とそれを絞っている磁氣的なモノポールによる磁流の分布、エネルギー分布などを調べ、以下のような興味ある結果を得た。1) 有限温度系での QCD での計算を行い、低温での閉じ込め相では短距離では線形ポテンシャルに対応する電束が観測されるが、クォーク間距離が離れると電束が切れるという軽いクォークの効果を確認した。重粒子における電束分布は、いわゆる Y 字型であることを観測した。2) 比較的短距離で、低温で線形ポテンシャルに対応する電束分布がみられる領域でも、温度を変化して高温相へいくと、電束が切れることを確認した。3) 絞られた電束の周りにはモノポールによる円形状の磁流が流れていることを確認した。4) これらの結果は、アーベリアン射影後、モノポール自由度に着目したときは信号対誤差比を改善できて、きれいに観測できることを示している。以下の結果は、モノポール凝縮によるクォークの閉じこめというシナリオの正しさを確証づける研究につながる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。