

研究責任者名 Name	柴田章博		所属機関 Affiliation	高エネルギー加速器研究機構 計算科学センター
受理番号 Proposal No.	12/13-20	研究課題名 Program title	クォーク閉じ込めの双対超伝導描像と閉じ込め・非閉じ込め相転移	

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

(和文)

クォーク閉じ込め機構として双対超電導描像が有力視されている。我々のグループは、非線形変数変換に基づく新しい定式化を行い、SU(3) Yang-Mills 理論におけるノンアーベリアン双対超電導描像における閉じ込めの機構を提唱した。これまでに、格子ゲージ理論にもとづく数値シミュレーションを用いて、ゲージに依存することなく、閉じ込めに寄与するモード（配位）を直接抽することで、“アーベリアン”ドミナンス、及び、モノポールドミナンス、更には、クォーク・反クォーク対の作るクロモフラックスを測り、ノンアーベリアン双対マイスナー効果を検証した。

本研究では、フラックスチューブのプロファイルを測定して、双対超電導のタイプが type-I であることを確定した。また、この定式化を有限温度系に適用し、閉じ込め・非閉じ込めの相転移と双対超伝導描像との関係について解析を行った。

(英文)

The dual superconductivity is promising mechanism for quark confinement. We have presented a new lattice formulation of SU(3) Yang-Mills (YM) theory, and proposed non-Abelian dual superconductivity picture. By using numerical simulation on a lattice, we have extracted dominant mode for quark confinement and shown V-field dominance (so called “Abelian” dominance) and non-abelian monopole dominance in the string tension. We have further shown the non-abelian dual Meissner effect by measuring chromo-flux between quark and antiquark source.

In this study, we determine the type of QCD vacuum as type-I by measuring the profile of the chromo-flux tube. By applying our method to the finite temperature system, we further studied confinement - deconfinement phase transition in view of dual Meissner effect.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	5	1	2	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表 Presentations at scientific meetings concerning the program									
1. “non-Abelian dual superconductivity and Gluon propagators in the deep IR region for SU(3) Yang-Mills theory”, Quark Confinement and the Hadron Spectrum X at the Garching campus of the Technische Universität München (Germany) from 8–12 October 2012.									
2. “Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory due to non-Abelian magnetic monopoles”, KMI/GCOE Workshop on "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective (SCGT 12)" at Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe (KMI) Nagoya University, Nagoya, Japan from Dec. 4 to Dec. 7 (Friday), 2012									
3.「格子 Yang-Mills 理論の新しい定式化と非可換双対超伝導描像」於日本物理学会 第 68 回年次大会(広島大学東広島キャンパス 3 月 26 日～3 月 29 日)素粒子論・理論核物理合同シンポジウム「多様なアプローチによる量子色力学の非摂動論的現象の研究」									
4. “Non-Abelian dual Meissner effect and confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory.”, The 31st International Symposium on Lattice Field Theory was held at Johannes Gutenberg University Mainz, Germany from Monday 29th July to Saturday 3rd August 2013.									
5.”Non-Abelian dual Meissner effect in SU(3) Yang-Mills theory and confinement/deconfinement phase transition at a finite temperature” , QCD-TNT-III, From quarks and gluons to hadronic matter: A bridge too far?, at ECT*, Trent, Italy, Sept. 2-6, 2013									
査読付きの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)									
1	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory: dual Meissner effect and type of the vacuum.</td> </tr> <tr> <td>雑誌名 name of journal</td> <td>Phys. Rev. D 87, 054011 (2013)</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.87.054011</td> </tr> </table>	著者名 Author	Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,	タイトル title	Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory: dual Meissner effect and type of the vacuum.	雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D 87, 054011 (2013)	URL	http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.87.054011
著者名 Author	Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,								
タイトル title	Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory: dual Meissner effect and type of the vacuum.								
雑誌名 name of journal	Phys. Rev. D 87, 054011 (2013)								
URL	http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD.87.054011								
プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載) (*) 不足する場合には追加願います。									
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)									
1.	<table border="1"> <tr> <td>著者名 Author</td> <td>Kei-Ichi Kondo, Akihiro Shibata, Toru Shinohara, Seikou Kato</td> </tr> <tr> <td>タイトル title</td> <td>Quark confinement due to non-Abelian magnetic monopoles in SU(3) Yang-Mills theory.</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等 name of journal</td> <td>AIP Conf.Proc.1492:221-225, 2012.</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://arxiv.org/pdf/1209.0311</td> </tr> </table>	著者名 Author	Kei-Ichi Kondo, Akihiro Shibata, Toru Shinohara, Seikou Kato	タイトル title	Quark confinement due to non-Abelian magnetic monopoles in SU(3) Yang-Mills theory.	雑誌名等 name of journal	AIP Conf.Proc.1492:221-225, 2012.	URL	http://arxiv.org/pdf/1209.0311
著者名 Author	Kei-Ichi Kondo, Akihiro Shibata, Toru Shinohara, Seikou Kato								
タイトル title	Quark confinement due to non-Abelian magnetic monopoles in SU(3) Yang-Mills theory.								
雑誌名等 name of journal	AIP Conf.Proc.1492:221-225, 2012.								
URL	http://arxiv.org/pdf/1209.0311								
2.	<table border="1"> <tr> <td>著者名</td> <td>Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,</td> </tr> <tr> <td>タイトル</td> <td>Non-Abelian dual superconductivity and Gluon propagators in the deep IR region for SU(3) Yang-Mills theory.</td> </tr> <tr> <td>雑誌名等</td> <td>PoS(Confinement X)052</td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td>http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/052/Confinement%20X_052.pdf</td> </tr> </table>	著者名	Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,	タイトル	Non-Abelian dual superconductivity and Gluon propagators in the deep IR region for SU(3) Yang-Mills theory.	雑誌名等	PoS(Confinement X)052	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/052/Confinement%20X_052.pdf
著者名	Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara,								
タイトル	Non-Abelian dual superconductivity and Gluon propagators in the deep IR region for SU(3) Yang-Mills theory.								
雑誌名等	PoS(Confinement X)052								
URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/171/052/Confinement%20X_052.pdf								
3.	<table border="1"> <tr> <td>著者名</td> <td></td> </tr> <tr> <td>タイトル</td> <td></td> </tr> <tr> <td>雑誌名等</td> <td></td> </tr> <tr> <td>URL</td> <td></td> </tr> </table>	著者名		タイトル		雑誌名等		URL	
著者名									
タイトル									
雑誌名等									
URL									
その他(学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載)									
Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)									
1. Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Toru Shinohara, Seikou Kato, Non-Abelian dual Meissner effect and confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory to be published in PoS(LATTICE 2013)357									
2.									
特記(本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など) (過去に遡っても構いません。)									
Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)									
1.									

実施報告書（大型 12/13-20）

クォーク閉じ込めの双対超伝導描像と閉じ込め・非閉じ込め相転移

柴田章博
高エネルギー加速器研究機構計算科学センター

1 研究組織

- 柴田章博 [研究代表]：高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・研究機関講師
- 近藤慶一：千葉大学・理学部物理学科・教授
- 加藤清考：福井工業高等専門学校・一般教育科・准教授

2 研究の概要

双対超伝導描像はクォーク閉じ込めを説明する最も魅力的かつ有力なシナリオである [1]。双対超伝導描像では、磁気的モノポールが閉じ込め機構に中心的な役割を果たすことを示すことが必要である。これまでも、アーベリアン射影の方法 [2] によって、数多くの双対超伝導描像を支持する研究・報告、弦張力のアーベリアンドミノナンス、アーベリアン磁気的モノポール (Abelian magnetic monopole) ドミノナンスなど数値シミュレーションによる研究によって示された。

我々は、 $SU(2)$ yang-mills (YM) 理論の Cho-Duan-Ge-Faddeev-Niemi-Chabanov 分解に基づく格子上の定式化を提唱し、アーベリアン射影の方法における問題であるゲージ依存性やカラー対称性の破れの問題を克服し、明示的にゲージに依存しない形で、“アーベリアン”ドミノナンス及び、磁気的モノポールドミノナンスを示した。 $SU(N)$ YM 理論においては、の定式化を拡張し、クォーク閉じ込めに効くゲージ不変な位相的配位を特別なゲージ固定に依らずに抽出できる新しい定式化を行った。ノンアーベリアンストークスの定理に基づく考察によって、基本表現に属するクォークは、従来のアーベリアン射影のナイーブな拡張として得られる可換磁気モノポールではなく、ノンアーベリアン磁気モノポールがクォーク閉じ込めの弦張力において支配的に寄与することの発見し、数値シミュレーションによって検証した [3]。この発見は、我々の方法によって世界に先駆けて行われた。

本研究では、我々が提唱するノンアーベリアン双対超伝導描像について検証を進める。グルーオン場及び、新しい定式化によって得られた場の相関関数やフラックスを、数値シミュレーションで得られたグルーオン場の配位において計測し、双対マイスナー効果を直接的に検証する。

大型 12/13-20 においては、 $SU(3)$ YM 理論のゼロ温度シミュレーションを前期に引き続きおこない、ノンアーベリアン双対マイスナー効果の検証検証を行った。また、真空のタイプ (双対超伝導体のタイプ) は、 $SU(2)$ の時に指摘されていた type-I と type-II の境界であるという結果と対照的であり、type-I であることを発見した [5]。また、有限温度系でのシミュレーションをおこなって閉じ込め・非閉じ込め相転移を用いて、ノンアーベリアン双対超伝導の特性を数値的に解明する研究を推進した。[6]

3 閉じ込めに寄与するモードの抽出

クォーク閉じ込めに寄与するモードは、YM 場のリンク変数の分解 $U_{x,\mu} = V_{x,\mu}X_\mu$ によって抽出することができる。リンク変数の分解はゲージ群 G の stability group 部分群 $\tilde{H} (\subset G)$ とその商空間 G/\tilde{H} に対応して与えられる [?][?]。本研究では、 $G = SU(3)$ YM 理論における基本表現に属するクォークの閉じ込めを考えるため、minimal option, $\tilde{H} = U(2)$, の分解を考える。リンク変数の分解は随伴変換するカラー場 $\mathbf{h}_x = \Theta_x (\lambda_8/2) \Theta_x^\dagger$, ($\in G/H$) を導入し、拡大したゲージ理論を考えて、次の分解の定義方程式で与えられる。

$$D_\mu^\epsilon[V]\mathbf{h}_x = \frac{1}{\epsilon} (V_{x,\mu}\mathbf{h}_{x+\mu} - \mathbf{h}_x V_{x,\mu}) = 0, \quad (1a)$$

この厳密解は次で与えられる。

$$X_{x,\mu} = \hat{L}_{x,\mu}^\dagger (\det(\hat{L}_{x,\mu}))^{1/N} g_x^{-1}, \quad V_{x,\mu} = X_{x,\mu}^\dagger U_{x,\mu} = g_x \hat{L}_{x,\mu} U_{x,\mu} (\det(\hat{L}_{x,\mu}))^{-1/N}, \quad (2a)$$

$$L_{x,\mu} = \sqrt{L_{x,\mu} L_{x,\mu}^\dagger} \hat{L}_{x,\mu} q \iff \hat{L}_{x,\mu} = \left(\sqrt{L_{x,\mu} L_{x,\mu}^\dagger} \right)^{-1} L_{x,\mu}, \quad (2b)$$

$$L_{x,\mu} = \frac{N^2 - 2N + 2}{N} \mathbf{1} + (N - 2) \sqrt{\frac{2(N - 1)}{N}} (\mathbf{h}_x + U_{x,\mu} \mathbf{h}_{x+\mu} U_{x,\mu}^{-1}) + 4(N - 1) \mathbf{h}_x U_{x,\mu} \mathbf{h}_{x+\mu} U_{x,\mu}^{-1}, \quad (2c)$$

ここで、 $g_x \in U(2)$ は方程式 (1a) で決まらない定数で、 X_μ に対する条件により決定する ($g_x = 1$)。連続極限 ($\epsilon \rightarrow 0$) を取ると、連続理論における定義方程式 $D_\mu[\mathbf{V}_\mu]\mathbf{h}(x) = 0$, $\text{tr}(\mathbf{X}_\mu(x)\mathbf{h}(x)) = 0$ の方程式の解を再現する。リンク変数の分解は、YM 場とカラー場の組み $\{U_{x,\mu}, \mathbf{h}_x\}$ が与えられれば一意に決定される。分解された変数で記述された、ともとの YM 理論と等価な理論を得るためには、カラー reduction 条件を課す。本研究では、 $SU(2)$ の CFNS 分解で導入された reduction 条件を拡張したものをを用いる：ゲージ場 $U_{x,\mu}$ に対して、次の汎関数を最小にするようにカラー場 \mathbf{h}_x を定める。

$$F_{\text{reduction}}[\mathbf{h}_x; U_{x,\mu}] = \sum_{x,\mu,k} \frac{1}{2} \text{Tr} \left((D_\mu^\epsilon[U_{x,\mu}]\mathbf{h}_x)^\dagger D_\mu^\epsilon[U_{x,\mu}]\mathbf{h}_x \right). \quad (3)$$

磁氣的モノポール (磁氣的カレント) は、ノンアーベリアンストークスの定理 [?, ?] 及び場の強さ $\mathcal{F}_{\mu\nu}[\mathbf{V}]$ のホッジ分解によってゲージ不変に定義される。格子上でゲージ不変な磁氣的モノポールカレントは k は次で与えられる。

$$V_{x,\mu} V_{x+\mu,\nu} V_{x+\nu,\mu}^\dagger V_{x,\nu}^\dagger = \exp(-ig\epsilon^2 \mathcal{F}_{\mu\nu}[\mathbf{V}](x)), \quad (4a)$$

$$\epsilon^2 \Theta_{\mu\nu}(x) := -\arg \text{Tr} \left[\left(\frac{1}{3} \mathbf{1} - \frac{2}{\sqrt{3}} \mathbf{h}_x \right) V_{x,\mu} V_{x+\mu,\nu} V_{x+\nu,\mu}^\dagger V_{x,\nu}^\dagger \right], \quad (4b)$$

$$k_\mu(x) = 2\pi n_\mu(x) = \partial_\nu^* \Theta_{\mu\nu}(x) := \frac{1}{2} \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta} \partial_\nu \Theta_{\alpha\beta}(x). \quad (4c)$$

ここで、 k_μ は、分解によって得られた制限された場 V により定義されており、ノンアーベリアン磁氣的モノポールである。

4 真空のタイプの決定

ノンアーベリアン双対超伝導描像を検証するため、シミュレーションによってゲージ配位を生成し、クォーク・反クォークの生成する量子色フラックスを計測する (詳細は論文 [5] を参照)。図.1 は、量子色フラックス (グルーオン場の強さ) の計測には、クォーク・反クォークのソースとしてウイルソングループ W を導入し、ブラケット U_p (グルーオン場の強さ) のゲージ普遍的な相関関数としてフラックスの計測を行う。

$$\rho_W := \frac{\langle \text{tr}(U_P L^\dagger W L) \rangle}{\langle \text{tr}(W) \rangle} - \frac{1}{N} \frac{\langle \text{tr}(U_P) \text{tr}(W) \rangle}{\langle \text{tr}(W) \rangle}, \quad (5)$$

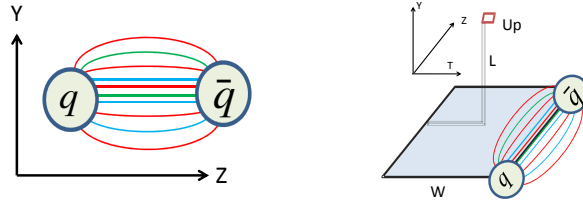


図 1: 量子色フラックスの計測:(右図)ゲージ不変なプラケット U_p とウィルソンループ W の相関関数 $(U_p L W L^\dagger)$.

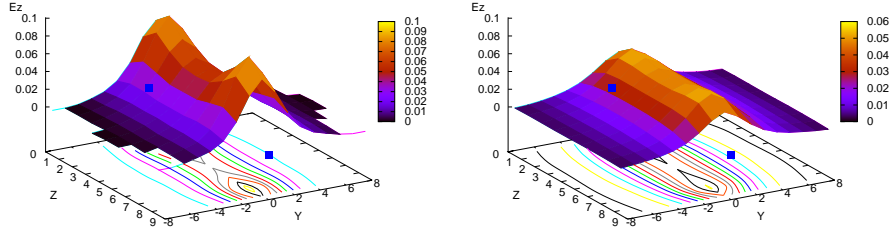


図 2: The distribution in Y - Z plane of the chromoelectric field E_z connecting a pair of quark and antiquark: (Left panel) chromoelectric field produced from the original YM field, (Right panel) chromoelectric field produced from the restricted field.

を用いる [4]。場の強さ $F_{\mu\nu}[U]$ は、格子上的ゲージ結合定数 $\beta := 2N/g^2$ を用いて次で与えられる。

$$F_{\mu\nu}[U] := \epsilon^{-2} \sqrt{\frac{\beta}{2N}} \rho_{\nu\mu}. \quad (6)$$

YM場、および、分解で得た V 場に対する計測ではともに、クォーク・反クォークの作る量子色フラックスの電気的パート $(E_x, E_y, E_z) = (F_{10}, F_{20}, F_{30})$ の E_z 成分のみゼロでない値を持ち、 E_z は T - Z 平面から離れるにしたがって指数関数的に減衰する。また、磁気的パート $(B_x, B_y, B_z) = (F_{23}, F_{31}, F_{12})$ はゼロであり、クォーク・反クォークをつなぐフラックスがあることを示唆する。図??は、 Y - X 平面で計測したフラックスの分布を示していた。クォーク・反クォークを繋ぐフラックスチューブが構成されていることを示している。

図??は、クォーク・反クォーク対の中点で測ったYM場、および、分解で得た V 場に対するフラックスの E_z を示す。実線はギンツ・ブルグランダウ方程式のクレムの仮定にもとづく解

$$E_z(y) = \frac{\Phi}{2\pi} \frac{1}{\zeta \lambda} \frac{K_0(R/\lambda)}{K_1(\zeta/\lambda)}, \quad R = \sqrt{y^2 + \zeta^2}, \quad (7)$$

によるフィットの関数曲線を示す。右図は、スカラー場の解曲線

$$\phi(y) = \frac{\Phi}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2\lambda}} \frac{y}{\sqrt{y^2 + \zeta^2}}, \quad (8)$$

とともに方程式の解曲線を示す。表 1 にはフィットしたパラメータの結果を示す。Yang-Mills 場によって決めた双対超伝導体のランダウ・ギンツブルグパラメータ κ 、相関長 ξ 、ロンドン侵入長 λ は次のようにけ呈される。

$$\kappa = 0.45 \pm 0.01, \quad \xi = 0.2707(86)\text{fm}, \quad \lambda = 0.1207(17)\text{fm} \quad (9)$$

一方、閉じ込めの役割を果たす V 場で決めた双対超伝導体のパラメータは

$$\kappa = 0.48 \pm 0.02, \quad \xi = 0.2707(86)\text{fm}, \quad \lambda = 0.1207(17)\text{fm} \quad (10)$$

これらの結果は、双対超伝導体は type I であることを示す。

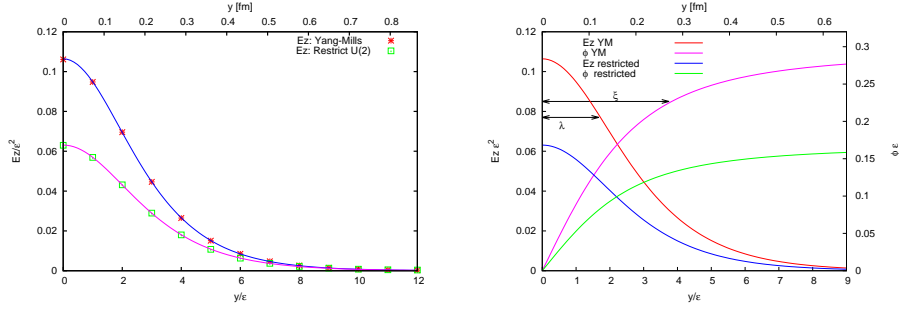


図 3: (Left panel) The plot of the chromoelectric field E_z versus the distance y in units of the lattice spacing ϵ and the fitting as a function $E_z(y)$ of y . The red cross for the original $SU(3)$ field and the green square symbol for the restricted field. (Right panel) The order parameter ϕ reproduced as a function $\phi(y)$ of y together with the chromoelectric field $E_z(y)$.

	λ/ϵ	ζ/ϵ	ξ/ϵ	Φ	κ
SU(3) YM field	1.672 ± 0.014	3.14 ± 0.09	3.75 ± 0.12	4.36 ± 0.3	0.45 ± 0.01
restricted field	1.828 ± 0.023	3.26 ± 0.13	3.84 ± 0.19	2.96 ± 0.3	0.48 ± 0.02

表 1: The properties of the Yang-Mills vacuum as the dual superconductor obtained by fitting the data of chromoelectric field with the prediction of the dual Ginzburg-Landau theory.

5 有限温度相転移

次に、双対超伝導観点から、クォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移を解析する。本研究では有限温度相転移を用いた解析を行う。ウィルソン・ループに替えて、ポリヤコフループを用いた解析を行った [6][10]。

第一ステップとして、ゼロ温度のウィルソンループに対して成立した V 場ドミナンス (“アーベリアン”・ドミナンス) が有限温度系においても成立していることを検証する。図 4 は、ポリヤコフループ空間平均の標本平均

$$\langle P_U(x) \rangle := \frac{1}{N} \sum_{\{U\}} \left\{ \frac{1}{V} \sum_x \prod_t U_{x,t,4} \right\}$$

を計測したものである。 $\langle P_U(x) \rangle$ は閉じ込め、非閉じ込め相転移のオーダーパラメータとなっており、YM 場及び V 場ともに同じ相転移点を示している。図 4 は、閉じ込め相、非閉じ込め相、臨界付近のポリヤコフループの相関関数

$$D(x-y) := \langle P(x)P^*(y) \rangle - \langle |P(y)|^2 \rangle$$

の計測結果を示す。有限温度の全領域で、V 場ドミナンスが成立していることが確かめられた。

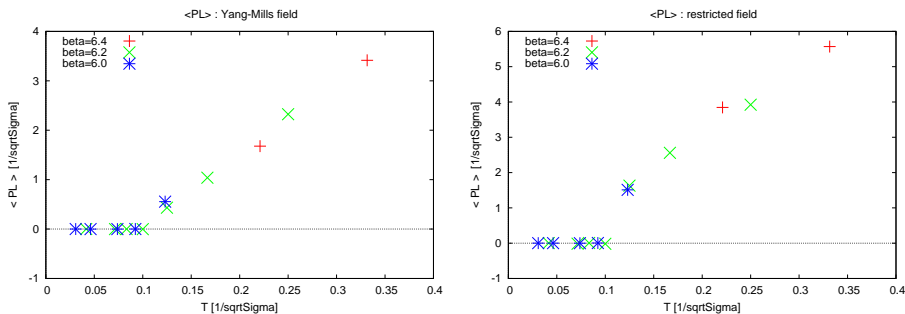


図 4: (左)YM 場に対するポリヤコフループ期待値。(右)V-場に対するポリヤコフループ期待値。

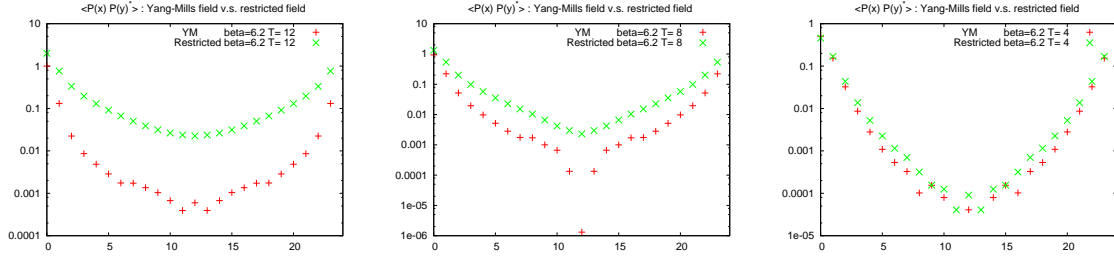


図 5: YM 場及び V 場によるポリヤコフープの相関関数 $\langle\langle P(x)P^*(y) \rangle\rangle$ の温度依存性の対比プロット。

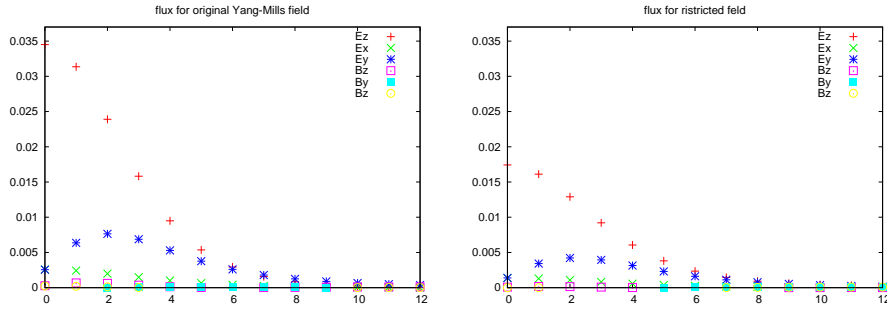


図 6: 高温相 (非閉じ込め相) におけるフラックスの計測。クォーク・反クォークの 1 対 2 に内分点で各成分の計測 (左) YM 場に対するもの (右) V 場に対するものを示す

次に、クロモフラックスを計測して、閉じ込め・非閉じ込め相転移とノンアーベリアン・双対ミスナー効果との関係調べる。フラックスの計測は式 (5)、図 1 (右) におけるウイルソンループをテンポラル方向をトラスに巻き付いたもの、即ち、クォーク、反クォークのソースをポリヤコフープ対として導入する。図 6 は、非閉じ込め相 ($T > T_c$) における計測結果を示す。クォーク・反クォークの 1 対 2 に内分点においてフラックスの各成分の計測した。YM 場 (左) に V 場 (右) の計測結果は一致している。非閉じ込め相においては、閉じ込め相と異なり、非ゼロの E_y 成分が観測され、フラックスチューブが壊れていること、即ち、双対ミスナー効果が破れてとして、閉じ込め・非閉じ込め相転移が観測される。

6 まとめ

ウイルソンループとして導入したクォーク・反クォークのソースのつくるクロモフラックスを計測することで、ノンアーベリアン双対ミスナー効果の検証を行い、QCD の真空は Type-I の双対超伝導体であることを示した。さらに有限温度相転移を用いて、閉じ込め・非閉じ込め相転移を双対超電導の観点から定性的に確認をした。現在、双対超電導相転移の定量的な検証を進めている。

参考文献

- [1] Y. Nambu, Phys. Rev. D10, 4262 (1974); G. 't Hooft, in: High Energy Physics, edited by A.; Zichichi (Editorice Compositori, Bologna, 1975); S. Mandelstam, Phys. Report 23, 245 (1976); A.M. Polyakov, Nucl. Phys. B120, 429 (1977).
- [2] G. 't Hooft, Nucl. Phys. B190, 455 (1981).
- [3] K.-I. Kondo, A. Shibata, T. Shinohara, and S. Kato, Phys. Rev. D83, 114016 (2011).
- [4] A. Di Giacomo, M. Maggiore and S. Olejnik, Nucl. Phys. B **347**, 441 (1990); A. Di Giacomo, M. Maggiore and S. Olejnik, Phys. Lett. B **236**, 199 (1990).

- [5] Non-Abelian dual superconductivity in SU(3) Yang-Mills theory: dual Meissner effect and type of the vacuum. Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Seikou Kato, Toru Shinohara, 2012, Phys. Rev. D 87, 054011 (2013), KEK-PREPRINT-2012-36;CHIBA-EP-199
- [6] Akihiro Shibata, Kei-Ichi Kondo, Toru Shinohara, Seikou Kato, Non-Abelian dual Meissner effect and confinement/deconfinement phase transition in SU(3) Yang-Mills theory, PoS(LATTICE 2013)357
- [7] A. Shibata, K.-I. Kondo, S. Kato and T. Shinohara, arXiv:1212.2835 [hep-lat], KEK-PREPRINT-2012-35, CHIBA-EP-198, talk given at 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012)
- [8] K.-I. Kondo, A. Shibata, T. Shinohara, T. Murakami, S. Kato and S. Ito, Phys. Lett. B669, 107 (2008).
- [9] A. Shibata, K.-I. Kondo and T. Shinohara, arXiv:0911.5294[hep-lat], Phys. Lett. B691, 91-98 (2010).
- [10] A. Shibata, K.-I. Kondo, S. Kato and T. Shinohara, talk presented at QCD-TNT-III, From quarks and gluons to hadronic matter: A bridge too far?, at ECT*, Trent, Italy, Sept. 2-6, 2013