

ゲージ共変な分解にもとづくカラー閉じ込めと質量ギャップの格子 上の研究

Lattice Study on color confinement and mass gap based on the gauge-covariant decomposition

柴田章博

KEK 計算科学センター

1. 研究目的

本プロジェクトの目的は、「ゲージ場のゲージ共変な分解の方法」に基づき数値シミュレーションによる第一原理計算によって閉じ込め機構を解明することである。理論的な閉じ込め機構の説明は、単体およびカラー電荷を持つ複合粒子は全て閉じ込められて観測されず、カラー無色の状態（カラー対称性の一重項）のみが観測されるという実験事実を場の量子論の枠組みで定式化し、量子色力学に基づく第一原理計算によって検証されなければならない。純粋 Yang-Mills 理論で記述される重いクォークの系では、Wilson ループや Polyakov ループがゲージ不変な閉じ込めの判定条件であり、「双対超伝導描像」はクォークの閉じ込め機構の最も有力なシナリオである。一方、物質場が存在する場合のカラー閉じ込めについては、確立したゲージ不変な閉じ込めの判定条件すら存在しない。

本プロジェクトでは、物質場が存在する場合のカラー閉じ込め、及び閉じ込めと質量ギャップの関係を研究するために、SU(2)ゲージ・スカラー模型を理論が要請する対称性を明白に保証する定式化によって研究する。ゼロ質量のゲージボソンが質量を獲得する最もよく知られた機構として Brout-Englert-Higgs (BEH)機構がある。しかしながら、ゲージ対称性を常に保った格子ゲージ理論の定式化では、Elitzur の定理により「局所的な連続対称性は決して自発的に破れない」ことが知られている。このことは格子上の BEH 機構の記述にはゲージ固定が必要であり、ゲージ対称性及びカラー対称性を破るために、カラー閉じ込めの要件に抵触する。この困難を回避し、ゲージ固定を必要としない、ゲージ非依存な BEH 機構を有するゲージ・スカラー模型の数値シミュレーションを可能とするため、連続理論において提唱された「ゲージ対称性の自発的破れに頼らない BEH 機構の明白にゲージ不変な記述法」を格子上に移植する。更には、明白にゲージに依存しない方法論で閉じ込め機構を解明するために、我々が提唱したゲージ場のゲージ共変な分解の方法（ゲージ場の分解方法と呼ぶ）に基づき解析を行う。ゲージ場の分解の方法を用いることで、シミュレーションで生成したゲージ場の配位から閉じ込めに主要な役割を担う自由度をゲージに依存することなく抽出し直接解析することが可能となる。また、ゲージ場の分解の方法は、純粋 Yang-Mills 理論に対して、有限温度、クォークの表現の違いなど様々な条件下においてシミュレーションを行い、

双対超伝導描像検証を行うとともに、非可換ゲージ理論における閉じ込め機構の研究を行ってきた実績がある。これらの研究の成果や知見に基づき、ゲージ・スカラー模型における閉じ込め機構を解析する。

2. 研究成果の内容

昨年度の研究に引き続き、ゲージ・スカラー模型, (a)スカラー場がゲージ群の基本表現に属す場合及び(b)スカラー場が随伴表現に属す場合それぞれについて、相構造の詳細な解析を行った。

成果発表[1]では、(b)スカラー場が随伴表現に属す場合について、閉じ込め-Higgs 相（解析的連続な領域）を閉じ込め相と Higgs 相に 2 分割する境界(閉じ込めの起源を分離する境界)について、詳細解析を行った。統計を一桁上げるとともに、より広いパラメータ空間で、感受率秩序パラメータとその感受率を加味することで、閉じ込め相・Higgs 相の熱力学的な相転移の境界線、及び、閉じ込め相と Higgs 相に 2 分割する境界線を確定した。さらに、磁気モノポール密度に着目することで、Higgs 相と閉じ込め相のそれぞれは磁気モノポールを鍵として区別できることを確かめた。

成果発表[3][4]では、磁気モノポールの役割を再考した。双対超伝導描像では磁気モノポールが重要な役割を果たすが、磁気モノポールの創発と純粋 Yang-Mills 理論における非可換ビアンキ恒等式の破れとの関係を議論した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

大規模計算機を有しない大学・研究所の小規模グループの研究者にとって、学際共同利用は研究推進に必要な計算資源を確保するための貴重なプログラムである

4. 今後の展望

○我々の論文[2]が出るまでは、高次元表現に属す Wilson ループに対する処方箋は存在しなかった。方法論における欠点がそのまま双対超伝導描像に対するマイナスの評価となっていた。場の分解の方法を用いて再解析することで、非可換ゲージ理論における固有の諸性質に対して、双対超伝導描像とどのように整合するのか整合しないのか評価し、双対超伝導描像を検証する。

○ゲージ非依存な BEH 機構を有する SU(2)ゲージ・スカラー模型（2種類を）を詳細に解析し相構造を明らかにする。分離された“相”の特徴を磁気モノポールや質量ギャップなどの相を特徴づける量を見出し詳細解析することで、閉じ込め相・非閉じ込め相の物理を解明する。また、新たに発見した相境界を「トポロジカル秩序」や高次対称性 (higher-form symmetry または p-form symmetry) の新たな視点から解析することで、相分離と分離された相の新たな特徴付けを行う。

5. 成果発表

(1) 学術論文

[1] Further numerical evidences for the gauge-independent separation between Confinement and Higgs phases in lattice SU(2)SU(2) gauge theory with a scalar field in the fundamental representation,
Akihiro Shibata , Kei-Ichi Kondo,
PoS QCHSC24 (2025) 049 (Apr 6, 2025)

(2) 学会発表

[2] [invited talk] Quark Confinement in view of Cho-Duan-Ge field decomposition method,
Akihiro Shibata
presented at Frontiers in Physics 2025 Local Organizing Committee (FIP2025 LOC), Centerpoint Gwanghwamun Building, Seoul, South Korea ,
25–29 Aug 2025

[3] Emergence of magnetic monopoles for quark confinement due to violation of the non-Abelian Bianchi identity,
Akihiro SHIBATA,
Presented (Poster) at the 9th International Symposium on Symmetries in Subatomic Physics (SSP2025) , Kasugano International Forum IRAKA, Nara,
23–28 Sept 2025

[4] 純粋ヤン・ミルズ理論における磁気モノポール凝縮に伴う非可換ビアンキ恒等式の破れとクォークの閉じ込め,
柴田章博, 近藤慶一, 加藤清考
日本物理学会 2026 年春季大会 (オンライン) 2025 年 3 月 23 日～26 日

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	12960		0
Miyabi-G	○	25660	0	0
Miyabi-C	○	5760	0	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				