

## 双対超伝導描像に基づくクォーク閉じ込めの研究

### Study on the quark confinement based on the dual superconductivity

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. 研究の背景と目的

強い相互作用に従うクォークやグルーオンは現在まで単独で観測されたことはなく、ハドロンに閉じ込められていると考えられる。しかしこの事実のQCDに基づく第1原理的証明は未だに存在しない。双対超伝導描像はクォーク閉じ込めの最も有力なシナリオの一つである。't Hooft の提唱からこれまでに可換射影の方法により双対超伝導描像を検証する研究が多く存在する。しかしながら、可換射影はゲージ対称性及びカラー対称性（グローバル対称性）を破ること、特定のゲージにおいてのみ結果が得られるなどの理論的な疑義がある。我々は、これら問題を克服し閉じ込め機構の解明をするために、非可換ストークスの定理にもとづく考察とゲージ場のゲージ共役な分解の方法によって、ゲージ不変性を明白に保ちつつ閉じ込めに寄与する自由度を抽出する方法を定式化し格子ゲージ理論に基づく第一原理計算を可能とした。また、基本表現に属すクォークの閉じ込めに対して数値シミュレーションによりシエビデンスを示してきた。

本研究では、特に高次元表現における閉じ込めに関して、未解決問題として残されてきた問題を克服し、明白にゲージ不変な方法に基づく第一原理計算によってクォーク閉じ込め機構を明らかにすることである。すなわち、任意表現に拡張された非可換ストークスの定理に基づく考察とゲージ場のゲージ共役な分解の方法の拡張によって、格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションによって生成されたゲージ配位から、閉じ込めに寄与する自由度を直接抽出し解析することによって閉じ込め機構を解明する。

#### 2. 研究成果の内容

双対超伝導描像を確立するためには磁氣的モノポールが閉じ込めに中心的な役割を果たすことを様々な状況において示さなければならない。本研究ではこれまでの基本表現に属すクォークに加えて高次元表現に属すクォークを対象を拡張して閉じ込め機構を研究する。そのために、任意表現に拡張された非可換ストークスの定理のもとづく考察とゲージ場のゲージ共役な分解の方法によって、表現 $R$ のYang-Mills場から構成されるWilsonループに対して閉じ込めに寄与する自由度（制限場と呼ぶ）を抽出し、双対超伝導描像における閉じ込めに寄与する制限場で記述された表現 $R$ に属す制限場で記述されたWilsonループ演算子(制限場Wilsonループ演算子と呼ぶ)を構成する。一方、磁気モノポールの定義と表現 $R$ のWilsonループにおける磁気モノポールの寄与は、表現 $R$ に属す制限場Wilsonループ

演算子に現れる制限場の場の強さ(field strength)のホッジ分解を通して導出される。従来研究では、ゲージ群 $G=SU(2)$ の随伴表現の場合について発見的な方法によって唯一知られており、任意表現に対する制限場Wilsonループ演算子の構成は我々が世界に先がけて行った成果である。

これまでの研究で、 $G=SU(2)$ の  $J=1/2$  (基本表現),  $J=1$  の各表現に対して、 $G=SU(3)$  の  $[0,1]$  (基本表現),  $[0,2]$ ,  $[1,1]$ (随伴表現)の書く表現に対して、制限場によって計算される弦張力がもとのYang-Mills場によって計算される弦張力を再現する制限場ドミナンスを検証した。本申請期間では、モノポールの寄与を直接的検証するために、磁気モノポールの寄与から計算される弦張力がもとのヤン・ミルズ場によって計算される弦張力を再現する磁気モノポール・ドミナンスの検証を $G=SU(2)$ ,  $G=SU(3)$  のゲージ群について、様々な表現に対して磁気モノポール・ドミナンスの検証を進めている。ゲージ群 $G=SU(2)$ の $J=1/2$ と  $J=1$ 表現に属すWilsonループについての解析の中間報告をlattice2021 において行った。

### 3. 学際共同利用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

任意表現に拡張された非可換ストークスの定理にもとづく考察とゲージ場のゲージ共役な分解の方法拡張によって、任意表現のWilsonループに対して閉じ込めに寄与する自由度を抽出し直接的に解析することで閉じ込め機構の検証が可能となった。

これらの成果に基づき今後は、ゲージ群 $G=SU(2)$ ,  $SU(3)$ の高次表現のクォークの閉じ込めに対して双対超伝導描像の検証を進める。すなわち、(i)弦張力の制限場ドミナンス及び磁気モノポール・ドミナンス (ii) 双対マイスナー効果とカラーフラックスの出現 (iii) 磁気モノポール凝縮と磁気モノポール有効理論の構築, などを通じて双対超伝導描像と閉じ込めとの整合性を検証する。更には、有限温度下におけるクォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移の観点からも、双対超伝導描像との整合性を検証する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

Akihiro Shibata, Seikou Kato, and Kei-Ichi Kondo, Magnetic monopole dominance for the Wilson loops in higher representations, presented at the 38th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2021), online, Proceedings: PoS(LATTICE2021)085, arXiv:2112.01045 [hep-lat]

(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	追加配分
Cygnus	○	11,664	0
Oakforest-PACS	○	229,500	68,850
※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。			