

ゲージ共役な分解と非可換ストークスに定理に基づくクォーク閉じ込め機構の研究

Lattice Study on the quark confinement based on the gauge-covariant decomposition and non-Abelian Stokes theorem

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. 研究目的

本研究の目的は、量子Yang-Mills理論および量子色力学(QCD)において、強い相互作用による非摂動的現象であるクォーク閉じ込め機構を第一原理計算によって明らかにすることである。その目的を達成するために、ゲージ場のゲージ共役な分解の方法の格子上の定式化を用いて、明白にゲージ不変な手続きによって閉じ込めに主要な役割を担う自由度を抽出し、その配位を直接解析することで閉じ込め機構を解明する。

双対超伝導描像はクォーク閉じ込め最も有力なシナリオのひとつである。’t Hooft による可換射影の方法の提唱(1977)以来、それを支持する研究報告が多数存在する。しかしながら、これらの研究では、最大可換ゲージ (MAゲージ) などの特定のゲージにおいてのみ期待される結果がえられること、またゲージ対称性やカラー(グローバル)対称性を破り破るなど理論の要請を満たさないことから、作為的な結果ではないのかという疑義がある。更には、これまでの検証は基本表現に属するクォークの閉じ込めについてであり、高次元表現に属すクォークの閉じ込めについてはむしろ否定的な結果が報告されている。その理由は、可換射影の方法において、高次元表現に属すWilsonループに対してクォークの閉じ込めを記述する演算子の構成法を見いだすことができなかつたことによる。正しい結果を導いた研究は、SU(2)の随伴表現においてPolis達による発見法によるものが唯一あるのみで、長年にわたり未解決問題とされてきた。これらは、従来手法の問題にもかかわらず、双対超伝導描像自体を否定する結果となっていた。

我々は、従来手法の問題点を克服し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検証を行うために、はじめに基本表現に属するWilsonループ演算子に対して、ゲージ場のゲージ共役な分解の方法の基づく格子上の定式化を提唱した。ゲージ場のゲージ共役な分解の方法は、ゲージ場の非線形変数変換に基づく再定式化とWilsonループ演算子に対する非可換ストークスの定理の拡張の一連の仕事から導出される。ゲージ場のゲージ共役な分解の方法によって、可換射影の方法における問題点を払拭し、双対超伝導描像の検証が可能となった。高次元表現に属すWilsonループに対して、任意表現に属するWilsonループに対して拡張された非可換ストークスの定理に基づく考察によって、ゲージ場のゲージ共役な分解の方法を拡張した。Yang-Mills場で記述された任意表現に属すWilsonループをゲージ共役な分解によって抽出した制限場によって再構成する方法を見出した。実際に、数値シミュレーションによって、高次元表現に属すWilsonループに対して、ゲージ場のゲージ共役な分解の方法を用いて抽出した制限場を用いて計算される静的ポテンシャル(弦張力)が、元のYang-Mills場から計算される静的ポテンシャル(弦張力)を再現する「制限場ドミナンス」を確かめた。更には、任意表現に属すWilsonループに対するゲージ不変な磁気モノポールの定義とその静的ポテンシャルへの寄与を導出し、任意表現に属すクォーク

に対して閉じ込め機構の検証が可能とした。

2. 研究成果の内容

双対超伝導描像の検証には、可換ゲージ理論である超伝導体における電場と磁場の役割を入れ替えた双対の描像を、非可換ゲージ理論である Yang-Mills 理論において示されなければならない。つまり閉じ込めに寄与するモードを抽出して以下の証拠を示す必要がある。

- (1) クォーク・反クォーク間に働く線形ポテンシャル
- (2) カラーフラックス束の出現と双対マイスナー効果
- (3) 磁気モノポールの真空凝縮

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。これまでの研究ではゼロ温度における諸性質、弦張力に対する制限場（“アーリアン”）ドミナンスや磁気モノポールドミナンスなどを、基本表現及び高次元表現に属すWilsonループに対してゲージ共役な分解の方法を用いて検証してきた。

一方、双対超伝導描像がクォークの閉じ込めを機構であるとするれば、閉じ込め・非閉じ込め相転移における諸性質は双対マイスナー効果の出現・消失として説明される。更には、クォーク閉じ込めの表現依存性の性質も説明されなければならない。本研究では、有限温度下で数値シミュレーションを行いゲージ場のゲージ共役な分解の方法を用いて閉じ込めに寄与する自由度をゲージに依存することなく（ゲージ不変に）抽出し、その抽出した配位を用いて閉じ込め・非閉じ込め相転移を直接解析することで、閉じ込め機構を調べた。基本表現に属するクォークの閉じ込め・非閉じ込め相転移は双対超伝導描像における相転移と無矛盾であることを確かめた。更に、一部の解析に高次元の表現に拡張して解析を進めている。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

閉じ込め機構の研究は強結合ゲージ理論の赤外領域のダイナミクスを解析するため非摂動計算が不可欠である。閉じ込めの機構の解析には遠赤外領域の情報が必要となり大きな物理体積の計算が必要とされる。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、任意表現に属すWilsonループやPolyakov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、明白にゲージ非依存な方法によって、クォークの閉じ込めの機構の検証が可能となった。

有限温度下における閉じ込め・非閉じ込めの相転移を詳細に解析することで、双対超伝導描像と整合性を検証する。また、高次元表現に対する諸性質を解析することで、非可換ゲージ理論の諸性質、ストリングブレーキング、カシミラスケーリング、N-ality 等との整合性や他の閉じ込めの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

- 柴田章博、加藤清考、近藤慶一、クォーク閉じ込め非閉じ込め相転移と双対超伝導描像、基研研究会「熱場の量子論とその応用」2022 年 9 月 20 日～9 月 22 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	追加配分
Cygnus	○	14,000	0
Wisteria/BDEC-01	○	127,500	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。			