

QCD の非可換ビアンキ恒等式の破れ（モノポール）に基づく 新しい閉じ込め機構のモンテ・カルロ法による研究

鈴木 恒雄¹、平口 敦基²、石黒 克也²

大阪大学 核物理研究センター¹、高知大学²

1. はじめに

半世紀間もの間の未解決問題である素粒子の強い相互作用の理論である量子色力学 QCD でのカラーの閉じ込め問題を、磁氣的モノポールの真空凝縮による双対マイスナー効果の考えで解明する。QCD では、ゲージ場が特異的でビアンキ恒等式の破れが起こり、その破れが、可換な保存則をみたす磁氣的なモノポール流とみなせることを、最近著者の一人鈴木が発見した[1]。人為的なゲージ固定や QCD を拡張しなくても、QCD での磁氣的なモノポールが定義でき、連続極限を持っていること、連続極限でのモノポール有効作用をモデルである格子 SU2QCD でのモンテ・カルロ計算機実験で、ブロックスピン変換という方法を用いて示した[2,3]。本研究計画では、（1）SU2QCD での結果が、現実の SU3QCD でも成立しているかどうか？（2）グルオンのみの PureSU3QCD で、グルーボールの質量や弦定数などの非摂動効果が、モノポールのみで理解できるかどうか？を確かめる。

2. 計算手法

計算手法は、QCD を有限体積 V 、有限格子間隔 a の 4 次元空間上に定式化し、モンテ・カルロ法を用いて QCD での真空配位を発生させ、それを用いて様々な物理量を計算する。最後に体積無限大、格子間隔ゼロとする極限を調べて、連続理論での結論を得る。

格子空間と連続極限での世界は、位相構造がまったく異なり、位相量であるモノポールを格子上で定義するためには、SU3 非可換理論から可換なゲージ場を定義し、モノポールを抜き出さなければならない。抜き出し方は、ユニークでなく、SU3 の場合は SU2 と違い非常に多様な方法があり、どの方法が連続極限を調べるのが良いかの事前準備に相当時間を

要した。抜き出した一つのカラーの可換ゲージ場やそのモノポールで計算される量は、全体として、ゲージ不変量ではない。しかし、非常に多量の真空配位を用いて平均操作を行うと、ゲージ不変部分が抜き出せる。もしも連続極限で重要な役割を果たすなら、ゲージ不変な部分が連続極限で、有限に存在しているはずである。非常に多量の真空配位を利用して平均操作をしないと、連続極限が得られないので、統計精度を上げるため、一つの真空配位に対して各々 3000 回ほどのランダムゲージ変換をした配位も平均操作に含める、さらに可換ゲージ場は、8 個あるがそれらが対等であることから、すべて平均操作に加えることで、S/N 比を改善した。

3. 完全な Abelian dominance と monopole dominance

Abelian Polyakov loop の相関、monopole Polyakov loop の相関から、弦定数を測定した。

まず Abelian 弦定数のみで、一切のそれ以上の近似をせずに、non-Abelian 弦定数を出せるという結果は、参考論文[4]の Multilevel method を活用して、示すことができた。

monopole dominance は、SU2 の場合は、比較的容易に示せたが、SU3 は比較にならないほど多くの真空配位が必要で、大変困難を極めた。ようやく 2020 年度夏に $24^3 \times 4$ という格子サイズで 6 万個の熱平衡真空配位に、それぞれ 3000 回のゲージ変換をした配位に、カラーの自由度の違うものもとりこんで、合計 16 億個の配位による平均操作をして、ようやく興味ある結果が得られた。結果を表 1 に示す。

SU3 $24^3 \times 4$ beta=5.6	16 億個の配位
Non-Abelian 弦定数	0.193(4)
Abelian 弦定数	0.184(15)
Monopole 弦定数	0.188(16)
Photon 弦定数	-0.0014(2)

表 1 からわかるように、誤差の範囲で閉じ込めを示す物理量である non Abelian の弦定数が、カラー1個での Abelian 弦定数で再現され、さらにそれが対応するカラーだけのモノポールの寄与で、きれいに再現されるということが示された。つまり 8 個の成分を持つグルオンに関するカラー平均電場が、8 個のカラー成分どれか 1 個の可換電場と同じ弦定数で再現され、それが対応するカラーのモノポールだけで再現されるということがわかった。この結果は、2018 年[2]に得られた簡単モデルとして SU2 の結果が、現実の SU3QCD でも、実現していることを示している。非可換ゲージ場の静的な Quark-AntiQuark の閉じ込めを示す線形のポテンシャルが、可換な双対マイスナー効果でソレノイド型のモノポール磁流で絞られて、生じていることを示している。しかもこの結果は、これまで真空配位を滑らかにするために導入された最大可換ゲージなどの人為的な仮定なしに、厳密に得られた結果であり、大変興味深い。参考までに、SU2 に比べていかに大変な計算であったかを示すために、SU2 の結果も載せる。熱平衡配位 5000 個、ゲージ変換 1000 回合計 500 万個の配位で、大きな格子のデータもきれいに決まった。

SU2 $36^3 \times 6\beta=2.53$	500 万個の配位
Non-Abelian 弦定数	0.072(3)
Abelian 弦定数	0.073(2)
Monopole 弦定数	0.073(3)
Photon 弦定数	$-1.0 \times 10^{-4}(2)$

SU2 では、同じ温度系に対応する、いろいろな相互作用ベータでも同じ結果が得られたので、SU3 でも試みた。しかし、時間方向 6 の格子でベータ 5.75、および時間方向サイズ 8 でベータ 5.9 の計算は、困難を極めた。SX-ACE の運用終了後、別のセンターで利用した SX-Aurora での計算で、ようやく $40^3 \times 6\beta=5.75$ で非常にたくさんの配位数を採用して、意味のある結果はでたが、時間方向 8 の格子では、まだ出ていない。しかし、multilevel method による計算で、完全な Abelian dominance は、示せており、さらに photon-photon 相関から、photon による弦定数は、ゼロであること、Abelian の弦定数が、monopole と

monopole の積に分解されることから、Abelian の弦定数は、monopole から出ていることが、予想できる。

4. 双対マイスナー効果の測定

直接にカラー1個の Abelian 電場の振る舞い、その周りの対応するカラー磁流の分布を測定した。予想通り、可換電場も全体の電場と同じ浸透長をもって絞られていること。さらにソレノイド型の磁流分布が観測された。

5. おわりに

計算は、大阪大学サイバーメディアセンターの SX-ACE で大半得られた。成果の一部は、文献[5][6]に載せてある。センターの方や NEC の方に program 相談などにのっていただいた。大変感謝しております。また高エネルギー研究所の SX-Aurora, 東北大学のサイバーサイエンスセンターの SX-Aurora も利用させてもらった。ここにその協力を感謝します。

参考文献

- [1] T.Suzuki, arXiv:1402.1294 (2014)
- [2] T.Suzuki, K.Ishiguro, V.Bornyakov, P.R. D97, 034501, 099905(erratum) (2018)
- [3] T.Suzuki, P.R. D97, 034509 (2018)
- [4] M.Luscher and P.Weisz, JHEP, 010(2001)
- [5] A.Hiraguchi, K.Ishiguro and T.Suzuki, P. R. D102, 114504 (2020)
- [6] Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) August, 2020 (Online conference)
鈴木恒雄 「Color confinement due to violation of non-Abelian Bianchi identity」
石黒克也 「Abelian and monopole dominance without gauge fixing in pure SU(3) gauge theory」
平口敦基 「The dual Meissner effect due to the violation of non-Abelian Bianchi identity」