

格子ゲージ理論を用いた量子色力学における強い CP 問題の研究

Strong CP problem in QCD on the lattice

北野龍一郎

高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所理論センター

1. 研究目的

素粒子の相互作用を記述するゲージ理論は、ゲージ変換で移り変わるものを同じとするゲージ原理に従って構成され、その同一視の過程でトポロジカルな巻きつき数をもつ場の配位が可能となる。その非自明な配位の経路積分への重みをコントロールするパラメータが角度 θ である。 θ の変化に対し理論がどのような反応を示すのか、相構造はどうなっているのか等々、インスタントン解の発見以降、様々な議論がなされてきた。特に、ゼロである理由を持たないパラメータ θ が、不自然に小さい値 (10^{-10} 以下) であるという実験事実 (強い CP 問題) から、ゲージ理論のトポロジカルな性質の理解は素粒子論の根本的な問題の 1 つとなっている。本プロジェクトでは、トポロジカルに非自明な配位は真空の形成や構造にどのような影響を及ぼすのか? という問いに答えることを目指し、格子ゲージ理論に基づく数値シミュレーションを通じてそのような配位が果たす役割についての理解を深めることである。具体的には、ゲージ理論のトポロジーに関連する以下のテーマについての研究を行い、強い CP 問題や、ゲージ理論の基本的性質に関する未知の事実を明らかにする。

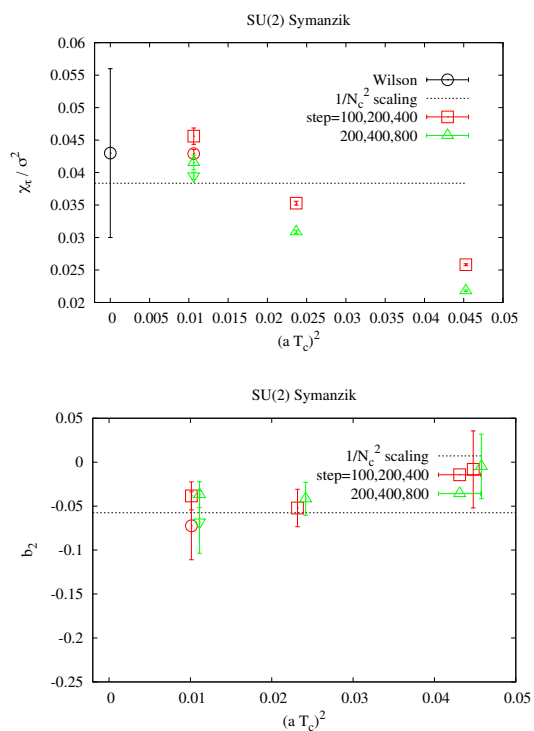
2. 研究成果の内容

SU(2)ゲージ理論における真空エネルギーの θ 依存性

SU(2)ゲージ理論における真空エネルギーの

θ 依存性を調べるために、位相感受率 (χ_t) の計算を 3 つの格子間隔で行った。右図(上)は、string tension (σ) で規格化した χ_t の連続極限のデータである。この図から直線を外挿したとすると、連続極限の 2 つの方法 (□と△) に依らず、先行研究の結果(左端の○)を概ね再現することがわかる。また、最も細かい格子では 2 つの異なる体積で計算を行なっているが、互いに概ね一致しておりこの物理量においては有限体積効果はさほど大きくないことがわかる。

右図(下)は、真空エネルギーの θ^2 の係数 b_2 の連続極限の予備的な結果である。これまでに $16^3 \times 32$ の格子の結果 (□と△) の計算を終えている。有限体積効果を調べるため、 $24^3 \times 48$ の計算を行ってきたが、今年度統計が倍近くまで増えた。以前大きな負の値を取っていた



結果(○と▽)が、 -0.05 付近になり、ラーゼ N_c スケーリングから予測される値(図中の点線)に概ね一致しそうである。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

学際共同利用-重点課題推進プログラムでは、大規模計算によって探究すべき計算科学の重点課題を推進するものであるが、大規模計算機を有しない大学・研究所の研究者にとって上述のような計算は、当プログラムを利用する以外に実現することはできなかった。従って大変貴重なプログラムであると思う。

4. 今後の展望

今後はゲージ理論のトポロジーに関する新たな知見を得るため更なる研究を遂行し、次のような成果が期待できる。1. $SU(2)$ 理論の θ 依存性が large N 展開で期待されるものと定性的に一致するか否かを明らかにする。2. 相転移の次数とトポロジカルな性質の間の相関。3. 動的クォークを導入した際の、トポロジカルチャージセクター間の障壁の変化。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] Naoto Kan, Ryuichiro Kitano, Shimon Yankielowicz, Ryo Yokokura, “From 3d dualities to hadron physics,” arXiv:1909.04082.
 [2] Masahito Yamazaki, Kazuya Yonekura, “Confinement as Analytic Continuation Beyond Infinity,” Phys. Rev. Research 2, 13383 (2020).

(2) 学会発表

- [1] “From 3d dualities to hadron physics,” at the International Joint Workshop on the Standard Model and beyond, October 14 - 17, 2019, Fragrant Hill Hotel, Beijing, China.
 [2] “Electroweak Quintessence Axion and Swampland Conjectures,” at PASCOS 2019, 1-5 July 2019, The University of Manchester, UK.
 [3] “Electroweak Quintessence Axion as Dark Energy,” at the 15th Rencontres du Vietnam: Cosmology, August 11 – 17, 2019, Quy Nhon, Vietnam.

(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	○	30000	
Oakforest-PACS	○	225000	
※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。			