

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

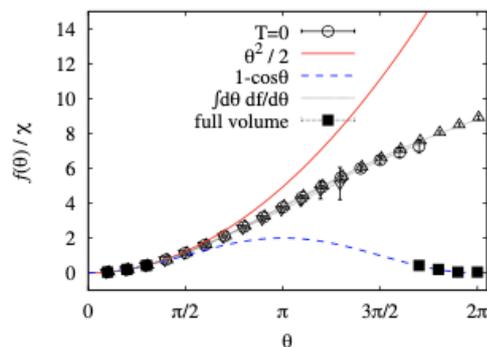
1. 研究目的

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。

2. 研究成果の内容

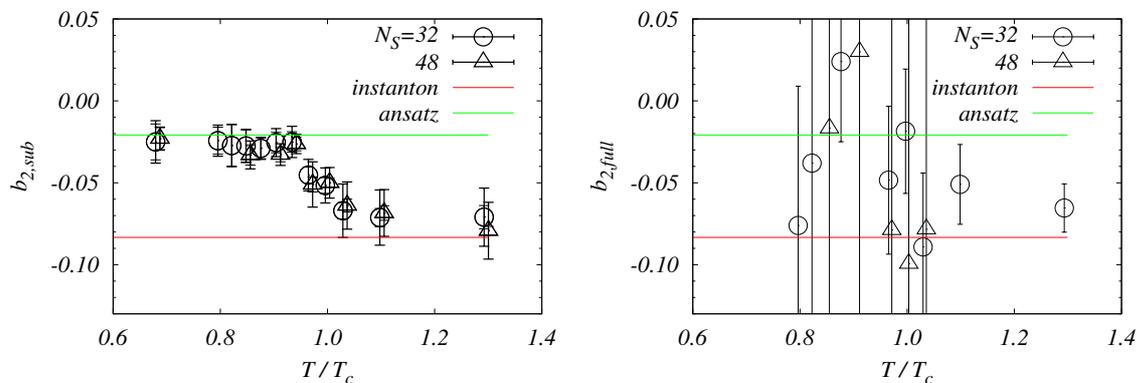
SU(2)ゲージ理論の θ 依存性は、SU(N)ゲージ理論の $1/N$ 展開から予測される定性的な性質に従うかどうか、長年の問題であった。特に $\theta = \pi$ において、 $1/N$ 展開からは CP 対称性の自発的破れが帰結されるが、 $N=2$ ではそれが起こらずに、非自明なギャップレスな理論が実現している可能性が議論されてきた。本研究では、SU(2)ヤン=ミルズ理論における θ の影響に着目する。

2022 年度までの研究で、格子上でのトポロジー荷 Q の測定方法を確立し、これを利用して、Wilson bag と呼ばれる非局所演算子の期待値から、真空エネルギーの θ への応答を探る研究を行った。この方法では、時空の一部領域のトポロジー荷 Q_{sub} を測定することにより、その部分だけに θ 項を導入した場合のエネルギーのズレを評価する (sub-volume 法)。この測定においては、異なる配位の寄与が激しく相殺するような、いわゆるサイン問題が緩和され、 θ の大きな値まで測定が可能となる。 θ 項を導



入する時空の一部分を大きな体積まで外挿することにより、上図のように $\theta = \pi$ を大きく超えた値まで自由エネルギーの計算が可能となった（白丸のデータ点）。特に重要なのが、 $\theta = \pi$ の点での微係数がゼロとならないことであり、それは自発的 CP の破れを示唆している。また、 2π 周期性がみられないことは、large N 極限の議論に特徴的な複数個のドメインの存在と整合性がある。これらの特徴は SU(2) ゲージ理論が large N クラスに属していることを示唆している。

2023 年度は格子サイズを 1 段階拡大し、且つ有限温度系にフォーカスした。臨界温度近傍に複数のゲージアンサンブルを生成し、Q の分布における 2 次(位相感受率)と 4 次のキュムラント(b_2)を標準的な方法(full-volume 法)と sub-volume 法を用いて計算した。その結果、位相感受率については両方法間でよく一致し、SU(3) の場合より比較的大きな温度依存性があることが分かった。一方、 b_2 に関しては sub-volume 法では統計誤差が劇的に改善され、これまで分かっていなかった b_2 の温度依存性が明らかになった(下図)。 b_2 は臨界温度を境に低温側では $-1/48$ 、高温側では $-1/12$ のほぼ定数として振る舞い、 T_c 近傍でそれらの間を遷移することが分かった。高温側の定数はインスタントン計算の予言と一致する。低温側についてはよく知られた予言は無いが、以前の計算からの示唆により自由エネルギーが 4π 周期であると仮定すると説明できることが分かった。この結果は論文にまとめて現在投稿中である。



3. 学際共同利用プログラム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、

より詳細な解析から自由エネルギーの定量的な評価を行う。閉じ込め-非閉じ込め相転移と CP の自発的破れとの関係を明らかにするために、相図の温度依存性についての研究を継続して行う。

5. 成果発表

(1) 学術論文

N. Yamada, M. Yamazaki and R. Kitano, "Subvolume method for SU(2) Yang-Mills theory at finite temperature: topological charge distributions," [arXiv:2403.10767 [hep-lat]].

(2) 学会発表

(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	○	40,000	
Wisteria/BDEC-01	○	100,000	
※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。			