

# 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

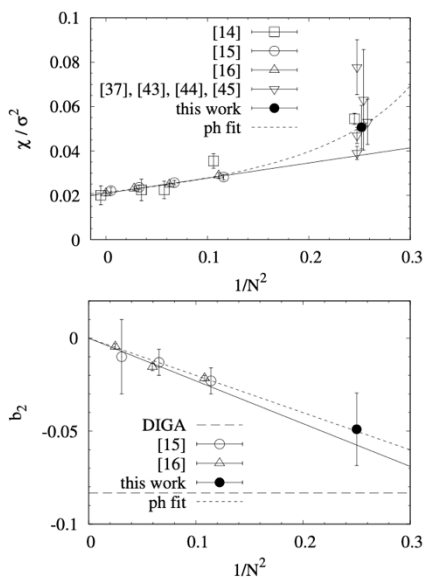
### 1. 研究目的

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  $\theta$  である。 $\theta$  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  $\theta$  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一つとなっている。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。

### 2. 研究成果の内容

SU(2)ゲージ理論の  $\theta$  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

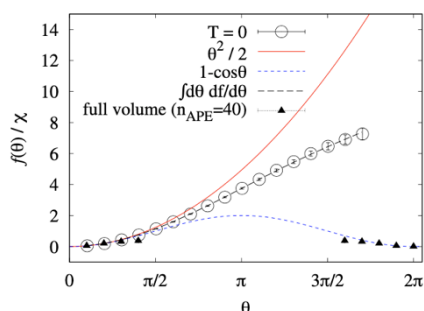
自発的破れが帰結されるが、 $N=2$  ではそれが起こらずに、非自明なギャップレスな理論が実現される可能性が議論されてきた。本研究では、SU(2)ヤン=ミルズ理論の  $\theta$  依存性を格子ゲージ理論のシミュレーションを用いて調べ、 $1/N$  展開の予測が成り立つことを示した。



論文[1]では、 $\theta = 0$  における自由エネルギーの  $\theta$  微分を高階微分まで調べ、 $N$  の関数としての振る舞いをみることにより、その徴候を掴むことができた。

(左図)

この研究において、各配位のトポロジー荷の測定の方法を確立した。特に、格子配位の smearing とトポロジー荷の関係を明らかにし、信頼



できる測定が可能となった。この理解を踏まえ、論文[2]では 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  $\theta$  への応答を直接探る研究を行った。この方法では  $\theta = \pi$  の情報を直接抜き出すことに成功し、 $\theta = \pi$  での自発的 CP の破れを結論付けることができた。(左図)

図で、白丸のデータ点が、 $\theta$  の関数として得られた自由エネルギーである。 $\theta = \pi$  の点での微係数がゼロとならないことが明らかであり、それは自発的 CP の破れを表す。

### 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、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。また、SU(3)ゲージ理論との比較も行う。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

[1] Ryuichiro Kitano, Norikazu Yamada, Masahito Yamazaki, “Is N=2 large?” JHEP 02 (2021) 073.

[2] Ryuichiro Kitano, Ryutaro Matsudo, Norikazu Yamada, Masahito Yamazaki, “N=2 is large,” 2102.08784 [hep-lat].

#### (2) 学会発表

1. Masahito Yamazaki, “Is N=2 Large?” Quantum Matter in Mathematics and Physics, Jan. 22, 2021, Harvard CMSA/online.
2. Masahito Yamazaki, “Large N and Small N in Yang-Mills,” Potential Toolkit to Attack Nonperturbative Aspects of QFT – Resurgence and related topics –, 9/7-9/25, 2020, YITP, Kyoto University (online).

#### (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	○	31,500	
Oakforest-PACS	○	216,000	
※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。			