

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

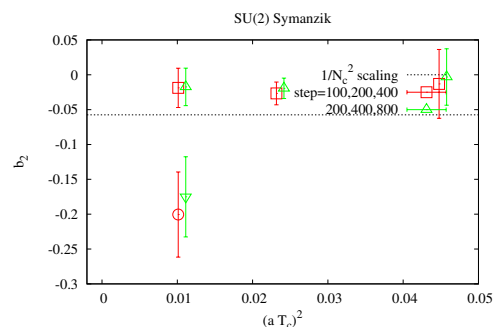
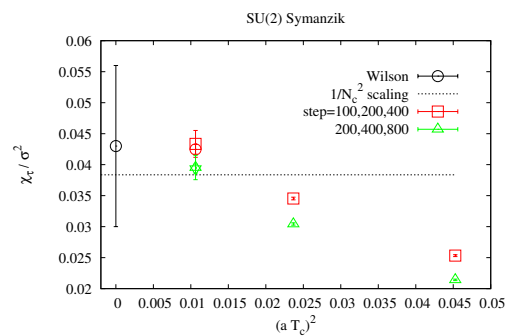
素粒子の相互作用を記述するゲージ理論は、ゲージ変換で移り変わるものを同じとするゲージ原理に従って構成され、その同一視の過程でトポロジカルな巻きつき数をもつ場の配位が可能となる。その非自明な配位の経路積分への重みをコントロールするパラメータが角度 θ である。 θ の変化に対し理論がどのような反応を示すのか、相構造はどうなっているのか等々、インスタントン解の発見以降、様々な議論がなされてきた。特に、ゼロである理由を持たないパラメータ θ が、不自然に小さい値 (10^{-10} 以下) であるという実験事実 (強い CP 問題) から、ゲージ理論のトポロジカルな性質の理解は素粒子論の根本的な問題の 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

1. 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。この図から直線で外挿したとすると、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関しては有限体積効果は大きくないことがわかる。

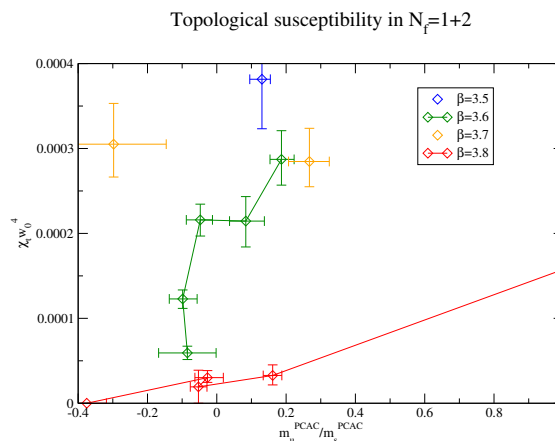
右図(下)は、真空エネルギーの θ^2 の係数 b_2 の連続極限の予備的な結果である。 $16^3 \times 32$ の格子の結果 (□ と △) は格子間隔に依らずほぼ定数の振る舞いであり、外挿値は単純な $1/N$ スケーリングからの予測値 (点線) より 0 に近い値を示すと思われる。ところが、 $24^3 \times 48$ の結果 (○ と ▽) は、大き



な負の値を示している。この振る舞いは未だ理解できていないため、更に統計をためて調べる必要がある。

2. クォークの質量問題

1 + 2 フレーバー QCD の研究については既に幾つかの β とクォーク質量で予備的な結果が得られており(右図)、それらは Lattice 国際会議で報告された。計算前の予測に反して PCAC 質量が負の領域でもシミュレーションが可能であることなどが分かってきた。図からは、トポロジー感受率 (χ_t) の PCAC クォーク質量依存性が β を変えると大きく変わることが読み取れる。従って、この不規則にも見える β 依存性を理解するとともに離散化誤差を抑制するために可能な限り大きな β でのシミュレーションを行う必要がある。



上記以外の研究として、これまでに SU(3)ゲージ理論における有限温度でのトポロジー感受率の決定、希インスタントンガス近似と格子ゲージ理論の間での相関関数の比較研究などを行い、論文や国際会議で発表を行った。

トポロジー感受率の温度依存性は、強い CP 問題の 1 つの解であるアクシオンモデルにおけるアクシオン暗黒物質の残存量の決定に必要である。本プロジェクトのグループを始め、これまで多くの計算結果が得られている。我々は、 χ_t (すなわちアクシオン質量) の温度微分を直接調べる「微分法」を提案し、クエンチ近似ではあるが、従来の方法では到達困難であった超高温領域での温度依存性を決定することができた。結果はおおむね希インスタントンガス近似による半古典的評価が高温で成り立つことを示唆するが、非閉じ込め相転移温度付近でどの程度定量的に成り立っているかは議論の余地がある。

これに関連して、半古典的に計算された相関関数のような局所的な物理量がどの程度正しい描像を与えているかについて研究を行った。インスタントン背景下では、 $\langle \mathbf{F}\mathbf{F}(\mathbf{x})\mathbf{F}\mathbf{F}(\mathbf{0}) \rangle$ といった CP を破る相関関数が値を持つ。相関関数はインスタントン計算によって評価でき、その関数型はインスタントンの典型的な大きさに支配され、また温度に依存する。デバイ遮蔽によって高温ではインスタントンは小さくなることが予想される。この描像が格子計算によって得られた配位群に存在するかどうかは、原理的にはインスタントン背景での相関関数の格子計算によって確認することができるが実際には困難である。格子計算には古典解の上に量子ゆらぎが乗るため、雑音が多い。そこで、格子計算で得られた配位から雑音を取り除き、インスタントンを抜き出してから相関関数を計算し、半古典的な予測と定量的な比較を行った。インスタントンの形を変化させない雑音の除去は、長時間の Wilson flow により実現できる。この研究により、格子計算と半古典計算が直接比較可能となった。高温のシミュレーションでは格子計算と半古典計算はよく一致しており、インスタントン描像の正しさが確認された。一方、相転移温度以下では、2 つのカーブは一致せず、インスタントン描像は定量的には成り立たないことが示された。インスタントンで解釈しようとする、予測より大きなインスタントンが経路積分に主要な寄与を与えている。この成果は Lattice 国際会議にて報告された。

3. 学際共同利用として実施した意義

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. 格子ゲージ理論における「クォーク質量とトポロジー」の関係が明らかされ、アップクォーク質量の理論的不定性の評価を与える。2. 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。3. 格子SO(3)理論の相構造とトポロジカルな性質の解明。

5. 成果発表

(1) 学術論文

[1] Julien Frison, Ryuichiro Kitano, Norikazu Yamada, "Topological susceptibility with a single light quark flavor," EPJ Web Conf. 175 (2018) 14017.

[2] Shingo Mori, Julien Frison, Ryuichiro Kitano, Hideo Matsufuru, Norikazu Yamada, "Instanton effects on CP-violating gluonic correlators," EPJ Web Conf. 175 (2018) 12009.

[3] Hitoshi Murayama, Masahito Yamazaki, Tsutomu T. Yanagida, "Do We Live in the Swampland?," JHEP 12, 032 (2018), arXiv:1809.00478 [hep-th].

[4] Jeong-Pyong Hong, Masahiro Kawasaki and Masahito Yamazaki, "Oscillons from Pure Natural Inflation", Phys.Rev. D98, 043531 (2018).

[5] Yasunori Nomura and Masahito Yamazaki, "Tensor Modes in Pure Natural Inflation", Phys. Lett. B780, 106-110 (2018).

(2) 学会発表

[1] Masahito Yamazaki, "From Swampland to Phenomenology and Back",
Rencontres de Moriond, La Thuile, Italy, EW session: March 16-23

6.

(1) 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
COMA	○	134,000	0
Oakforest-PACS			
※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。			