

受付 ID	17a15
分野	素粒子

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

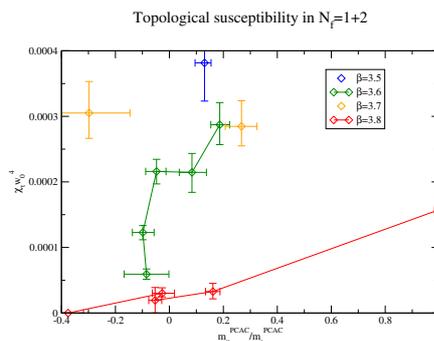
QCD の真空は、一般には CP 対称性を破る θ 真空である。しかし、中性子の電気双極子能率の実験的制限から、その破れの大きさには上限が与えられており、それは自然な予測より 9 桁も小さい。我々の宇宙が、なぜそのような奇妙な真空にあるのかという問いは素粒子物理における謎の一つであり、「強い CP 問題」と呼ばれている。

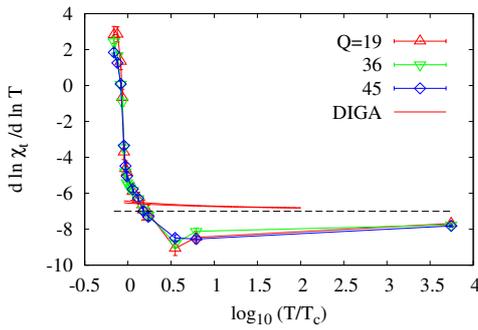
強い CP 問題の解として最も有望とされているのが、仮想粒子「アクシオン」を導入することにより CP を破らない真空が自動的に選ばれる機構(Peccei-Quinn 機構)である。興味深いことに、この仮説では初期宇宙に生成されたアクシオンが宇宙の暗黒物質の候補となる。アクシオンの現在の残存量はアクシオンポテンシャル（つまり質量）の温度依存性から決定される。これまで、半古典的手法を用いポテンシャルの評価がなされてきたが、それがどの程度信頼できるのか未知である。そこで、本研究では、第一原理計算によるアクシオンポテンシャルの温度依存性を評価し、アクシオンと宇宙論の整合性について正確な知見を得る。

強い CP 問題には、クォークに1つでもゼロ質量のものがあると、 θ 真空は CP を破らなくなるというもう一つの解がある。これまでの格子計算によりこのシナリオは棄却されたとされているが、完全に理論的決着がついているかどうかは明らかでない。それは、観測不可能なクォークに対して、「ゼロ質量」の定義に曖昧さがあることから起因する。連続理論においては、ゼロ質量はトポロジー感受率 $\chi_t=0$ により定義されるが、この定義とこれまで格子 QCD で議論されてきた質量、たとえば Wilson フェルミオンにおける PCAC 関係式を用いた質量が本当に同じものであるのか、本研究により明らかにする。

2. 研究成果の内容

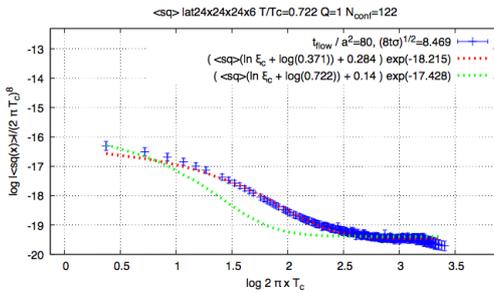
1つのクォークだけ軽くした 1+2 フレーバーのウィルソンフェルミオンのシミュレーションを行い、 χ_t と PCAC 質量の関係を明らかにする研究を行った(右図)。この不規則にも見える β 依存性を理解するとともに離散化誤差を抑制するために可能な限り大きな β でのシミュレーションを行う必要がある。



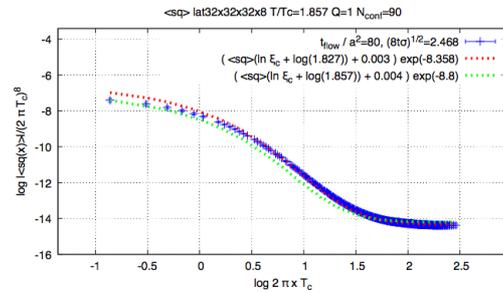


トポロジー感受率の温度依存性は、本プロジェクトのグループを始め、これまで多くの計算結果が得られている。我々は、アクシオン質量の温度微分を直接調べる「微分法」を提案し、クエンチ近似ではあるが、従来の方法では到達困難であった超高温領域での温度依存性を決定することができた（左図）。結果はおおむね希インスタントンガス近似による半古典的評価が高温で成り立つことを示唆するが、非閉じ込め相転移温度付近でどの程度定量的に成り立っているかは議論の余地がある。

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のかについて研究を行った。長時間の Wilson flow より格子配位から古典的情報を抜き出し、半古典計算と格子計算を比較した（下図）。



(a) $24^3 \times 6$ with $T/T_c \approx 0.72$



(b) $32^3 \times 8$ with $T/T_c \approx 1.9$

高温のシミュレーション（右図）では格子計算（青）と半古典計算（緑点線）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（左図）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 2017 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] R.Kitano and N.Yamada, “Topology in QCD and the axion abundance,” JHEP 1510 (2015) 136.
- [2] J.Frison, R.Kitano, H.Matsufuru, S.Mori and N.Yamada, “Topological susceptibility at high temperature on the lattice,” JHEP 1609, 021 (2016).
- [3] J.Frison, R.Kitano and N.Yamada, “ $N_f=1+2$ mass dependence of the topological susceptibility,” PoS LATTICE 2016, 323 (2016) [arXiv:1611.07150 [hep-lat]].
- [4] R.Kitano, T.Suyama and N.Yamada, “ $\theta=\pi$ in $SU(N)/Z_N$ gauge theories,” JHEP 1709, 137 (2017).
- [5] J.Frison, R.Kitano and N.Yamada, “Topological susceptibility with a single light quark flavour,” arXiv:1710.06643 [hep-lat].

(2) 学会発表

- 1. Ryuichiro Kitano, “ θ physics and axion,” at the International workshop on “Axion physics and dark matter cosmology,” December 20 - 21, 2017, Osaka University, Japan.
- 2. Ryuichiro Kitano, “ θ physics,” at the “Topological Science Symposium 2017,” November 21 - 22, 2017, Keio Hiyoshi campus, Japan.
- 3. Ryuichiro Kitano, “Strong CP problem on the lattice,” at the Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, “Beyond the Standard Model – Exploring the Frontier,” July 3 - 6, 2017, Budapest, Hungary.
- 4. Julien Frison, “Topological susceptibility with a single light quark flavour,” at the 35th International Symposium on Lattice Field Theory, June 18-24, 2017, Granada, Spain.
- 5. Shingo Mori, “Instanton effects on CP-violating gluonic correlators,” at the 35th International Symposium on Lattice Field Theory, June 18-24, 2017, Granada, Spain.
- 6. Norikazu Yamada, “Determination of axion abundance using lattice QCD” at 基研研究会「熱場の量子論とその応用 2017」2017年8月30日, 京大基研

(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
HA-PACS/TCA	○	2800	700
COMA	○	15,000	0
Oakforest-PACS	○	40,000	10,000
※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。			