

量子色力学の高温相におけるトポロジー励起

Topological excitation in high temperature phase of Quantum-Chromodynamics

深谷英則

大阪大学大学院理学研究科

1. 研究目的

非可換ゲージ理論として定式化される量子色力学(QCD)では、ゲージ場のトポロジー励起という特徴的な背景場が存在し、自発的対称性の破れを引き起こしていると考えられている。カイラル対称性が回復する高温相では、トポロジー励起は消失しているか、少なくとも強く抑制されているはずで、その詳細はアクシオン暗黒物質の残存量に関係して宇宙の歴史をも左右する。本研究では、QCD の高温相でのトポロジー励起の頻度を、カイラル対称性を保つ格子 QCD シミュレーションを用いて明らかにすることを目指す。特に 2019 年度は有限体積効果の理解、中間子、バリオンにおける対称性の調査に力を入れた。

2. 研究成果の内容

2017 年度の研究の結果、トポロジー励起がカイラル対称性を損なう手法の従来の研究に比べて、有意に抑制されていることが確認できた。2018 年度の研究では、温度を 220 MeV に集中し、異なる 3 点の体積でシミュレーションを実行、2.4fm 以上のサイズの格子で無矛盾な結果を得た。さらに 2019 年度はこれまでの axial U(1)感受率に加え、中間子、バリオン 2 点相関関数の計算も実行した(下図参照)。複数の物理量が、axial U(1) アノマリーの消失と統計誤差の範囲で無矛盾であること、ゼロでなかったとしてもその大きさは数 MeV 程度であるということが確認できた。

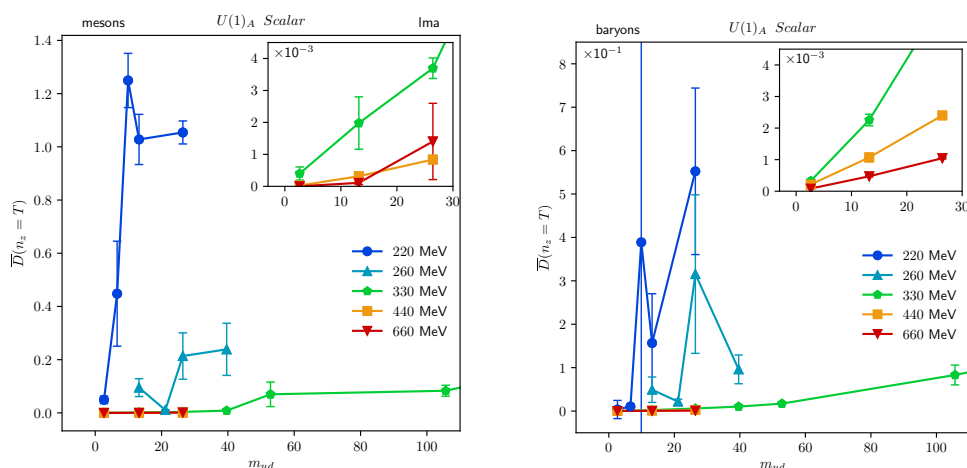


図: 中間子(左図)、バリオン(右図) 2 点相関関数における U(1) 量子異常。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究の主題であるトポロジー励起は、軸性 $U(1)$ アノマリーの帰結として現れるが、格子 QCD の先行研究では、トポロジー励起は高温で抑制されないとされる研究がほとんどであった。しかし、私たちの研究で先行研究の結果は、トポロジー励起を過大評価している可能性が高いことが明らかになった。本プロジェクトは世界で初めてカイラル対称性を厳密に保つフェルミオン作用を用いて行われた QCD 数値計算である。その計算コストは従来の手法に比べて10倍ほど高いため、学際共同利用による大規模数値計算が不可欠であり、本研究の成功の鍵となった。

4. 今後の展望

2020 年度からはより現実の QCD に近い **strange quark** を入れた **2+1-flavor** の数値計算を行う予定である。初期宇宙で実際に起きた QCD 相転移におけるトポロジー励起はどんなものだったのか、それを世界初のカイラル対称性を保つフェルミオン作用を用いたシミュレーションにより、定量的に明らかにする。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] “Axial $U(1)$ symmetry and Dirac spectra in high-temperature phase of $N_f=2$ lattice QCD,” Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto (JLQCD Collaboration), PoS LATTICE2018 (2018) 152
- [2] “Observation of approximate $SU(2)_C$ and $SU(2)_F$ symmetries in high temperature lattice QCD,” Christian Rohrhofer, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Leonid Glozman, Shoji Hashimoto, Christian B. Lang, Sasa Prelovsek, Nucl.Phys.A 982 (2019) 207-210
- [3] “Symmetries of spatial meson correlators in high temperature QCD,” C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L.Ya. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, S. Prelovsek, Phys.Rev.D 100 (2019) 1, 014502
- [4] “Axial $U(1)$ symmetry, topology, and Dirac spectra at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD,” Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto (JLQCD Collaboration), PoS CD2018 (2019) 085

(2) 学会発表

- [5] “Symmetries of the light hadron spectrum in high temperature QCD,” 口頭 Lattice2019, 2019 6 月 17 日, Wuhan, China, C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, K. Suzuki.
- [6] “Axial $U(1)$ symmetry and mesonic correlators at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD,” Lattice2019 2019 6 月 17 日, Wuhan, China, K. Suzuki, S. Aoki, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, C. Rohrhofer

[7] “Nf=2 格子 QCD における高温領域の対称性,” 口頭 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 9 月 17 日 山形大学, 青木慎也, 青木保道, 深谷英則, 橋本省二, Christian Rohrhofer, 鈴木溪

[8] “Axial U(1) symmetry in high temperature phase of two-flavor QCD,” FLQCD2019 2019 4 月 16 日, YITP, Kyoto Kei Suzuki,

[9] “量子色力学の高温相におけるトポロジー励起,” HPCI 第 6 回成果報告会 2019 11 月 1 日 筑波大学, Kei Suzuki

(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			
Oakforest-PACS	○	225,000	225,000
※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。			