

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旨とする。

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(図1参照)。さらに axial U(1)感受率(図2参照)、中間子2点相関関数の計算も実行、複数の異なる観測量のカイラル極限が、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を確認した。

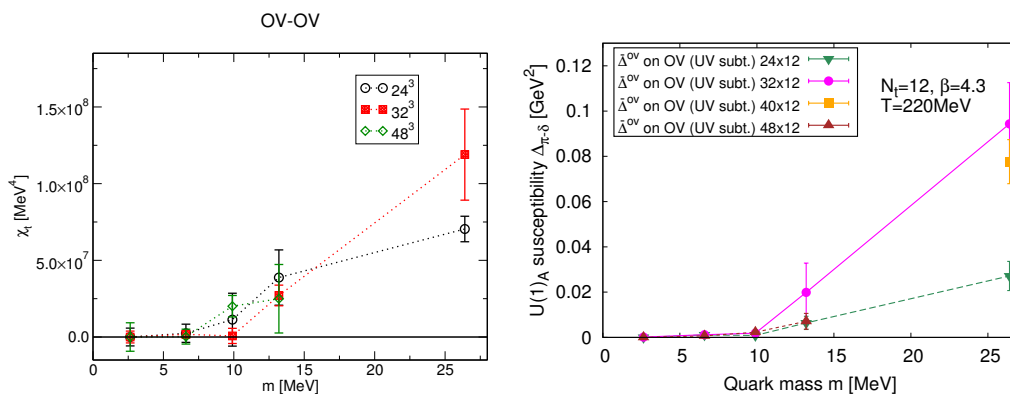


図1 トポロジー感受率をクォーク質量の関数としてプロットしたもの。異なる3点の体積でカイラル極限がゼロと無矛盾であることを確認。

図2 axial U(1) 感受率をクォーク質量の関数としてプロットしたもの。

3. 学際共同利用として実施した意義

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。しかし近年、有限温度における格子間隔誤差の影響はゼロ温度に比べて大きくなることから複数の共同研究によって明らかになりつつあり、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。本課題で実行した厳密なカイラル対称性を保つ形での研究は世界初の試みであり、この問題への決定打を与えることができるはずであるが、多大な計算コストを必要とする。本学際共同利用による大規模数値計算が不可欠である。

4. 今後の展望

2019 年度も継続課題として研究を続行する。特に重いクォーク質量のシミュレーションで見られた有意な有限体積効果の原因を理解したい。有限体積効果がクォーク質量が重い領域でのみ見られるのは一見直観と反する結果であるが、カイラル対称性の破れている相との境界が有限クォーク質量に存在するという解釈もでき、実際、二相共存状態を再現している可能性のある Dirac 演算子の固有値の履歴も確認している。2019 年度はこれらの結果をさらに相転移近傍で精査し、有限クォーク質量における相転移の有無、もし存在した場合はその次数を決定することを目標とする。さらに、バリオンの相関関数や、Dirac 演算子の固有値分布、ポリヤコフループを計算、多角的に QCD 相転移を解析する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

なし。

(2) 学会発表 (*は招待講演)

[1]*Yasumichi Aoki, "Fate of axial $U(1)$ symmetry at two flavor chiral limit of QCD in finite temperature," The 16th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2018) 2018 May 21-23 Frankfurt, Germany.

[2]Yasumichi Aoki, "Topological Susceptibility in $N_f=2$ QCD at Finite Temperature -- Volume Study," The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) 2018 July 22-28 East Lansing, Michigan, USA

[3]*青木保道, "有限温度 QCD: 相転移、トポロジー、axion 基研研究会 素粒子物理学の進展 2018 2018 Aug 6-10 京都大学 基礎物理学研究所

[4]* Yasumichi Aoki, "Topology and axial $U(1)$ symmetry in two-flavor hot QCD," Lattice and Functional Techniques for Exploration of Phase Structure and Transport Properties in Quantum Chromodynamics 2018 Sep 4-6 BLTP JINR, Russia

[5] 鈴木溪(KEK), 青木慎也(京都大学基礎物理学研究所), 青木保道(KEK), Guido

Cossu(Edinburgh 大学), 深谷英則(大阪大学), 橋本省二(KEK), “2 フレーバー格子 QCD の高温相におけるディラックスペクトルと軸性 U(1)対称性” 日本物理学会 2018 年秋期大会 2018 Sep 14-17 信州大学

[6] 青木 保道 (KEK), 青木 慎也 (京都大学基礎物理学研究所), Guido Cossu(Edinburgh 大学), 深谷英則(大阪大学), 橋本省二(KEK), 金児隆志(KEK), 鈴木溪(KEK), “有限温度 2 フレーバーQCD のトポロジカル感受率 -- 有限体積効果,” 日本物理学会 2018 年秋期大会 2018 Sep 14-17 信州大学

[7] Yasumichi Aoki, “QCD 相転移 – 現状と解明に向けて,” 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム 2019 Jan 9-10 筑波大学東京キャンパス

[8] Yasumichi Aoki, “QCD phase transition,” International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019 2019 Jan 15-17 理化学研究所 計算科学研究センター

[9]* Hidenori Fukaya, “Axial U(1) symmetry in lattice QCD at high temperature,” Recent Developments in Quark-Hadron Sciences 2018 June 11-15 YITP, Kyoto U.

[10]* Hidenori Fukaya, “Axial U(1) Anomaly at High Temperature,” Quantum Chromodynamics and Its Symmetries 2018 Sep 10-14 Oberwölz, Austria

[11]* Kei Suzuki, “Axial U(1) symmetry, topology, and Dirac spectra at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD,” The Ninth International Workshop on Chiral Dynamics (CD18) 2018 Sep 17-21 Durham, USA

[12] 鈴木溪, 青木慎也, 青木保道, Guido:Cossu, 深谷英則, 橋本省二, “2 フレーバー格子 QCD における高温相のメソン相関関数と軸性 U(1)対称性,” 日本物理学会 第 74 回年次大会 2019 Mar 14-17 九州大学

[13] Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, “Axial U(1) symmetry and Dirac spectra in high-temperature phase of $N_f=2$ lattice QCD,” The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) 2018 July 22-28 East Lansing, Michigan, USA

(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 |
| COMA | | | |
| Oakforest-PACS | ○ | 458,600 | |
| ※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。 | | | |