

高温量子色力学の物理点近傍におけるトポロジー励起

Topological excitation of high temperature QCD near the physical point

深谷英則

大阪大学大学院理学研究科

1. 研究目的

2. ビッグバン直後に起きたと考えられている QCD の相転移の詳細を明らかにすることは、素粒子論、宇宙論、原子核理論にまたがる重要な研究課題である。QCD 相転移を理解する鍵となるのが、グルーオンのトポロジカルな励起である。グルーオンのトポロジー励起はクォーク場のカイラル凝縮を引き起こし、さらにその温度依存性は暗黒物質の候補であるアクシオンの残存量に影響し、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定量的に明らかにすることを目指す。2019 年度まで行ってきたアップダウンクォークのみを用いた 2 フレーバー計算の結果をふまえ、より現実に近いセットアップでストレンジクォークも含め(2+1 フレーバー)、かつ物理点近傍まで質量を下げて計算を行う。

3. 研究成果の内容

2020 年度は 2 フレーバーのときに重点的に調べた相転移温度(T_c)の 1.3 倍あたりの温度、具体的には 204MeV からシミュレーションを開始した。物理点近傍(4MeV)を含む質量 4 点のシミュレーションはどれも順調に実行され、予定していた 20000 トラジェクトリの統計量をためることができた。その後、 $1.1T_c$ あたり(175MeV)のシミュレーションを開始、こちらも順調に進んでいる。この 2 点の温度の中間結果を深谷および金森がそれぞれ日本物理学会で発表した(成果[9][10])。また 2019 年度までのシミュレーションの結果は PRD 誌に掲載された(成果[3])。その結果は 2 フレーバーと同様、カイラル極限付近でトポロジー励起が強い抑制を受けるというものであった。下図にトポロジー感受率の結果[JLQCD collaboration, preliminary]を添付する。

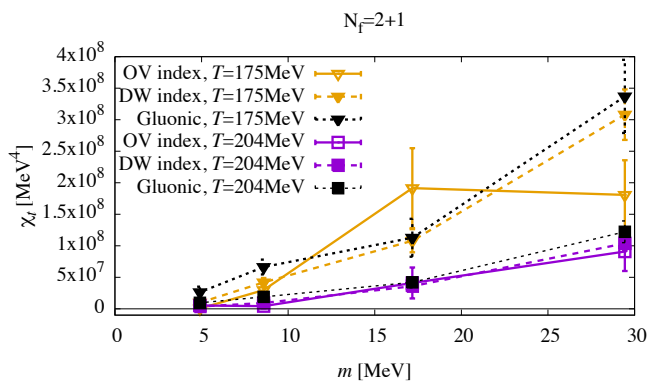


図: トポロジー感受率の結果

4. 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。

5. 今後の展望

2021 年度は 2+1 フレーバー QCD のトポロジー励起の研究は HPCI プロジェクトで進め、本プロジェクトの継続課題は 2 フレーバー QCD に戻り相転移近傍の軸性 $U(1)$ 量子異常のふるまいを明らかにする。これは、過去の 2 フレーバー QCD の数値計算の解析で、従来 $SU(2) \times SU(2)$ 対称性の自発的破れのプローブとみなされていたカイラル感受率のほとんどを $U(1)$ 量子異常の寄与が占めているという驚くべき結果が明らかになったからである。これが相転移温度まで続くと QCD 相転移のトリガーとして $U(1)$ 量子異常が役割をはたしていることになる。

6. 成果発表

(1) 学術論文

[1] Axial $U(1)$ symmetry and mesonic correlators at high temperature in $N_f=2$ lattice QCD, Kei Suzuki, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Guido Cossu, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Christian Rohrhofer, Proceedings of science Volume 363, 178 (2020).

[2] Symmetries of the light hadron spectrum in high temperature QCD, C. Rohrhofer, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, C. Gattringer, L.Ya. Glozman, S. Hashimoto, C.B. Lang, K. Suzuki, Proceedings of science, Volume 363, 227 (2020).

[3] Study of the axial $U(1)$ anomaly at high temperature with lattice chiral fermions, S. Aoki, Y. Aoki, G. Cossu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, C. Rohrhofer, K. Suzuki, Phys. Rev. D103 74506 (2021).

(2) 学会発表

[4] What is chiral susceptibility probing? Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020) 2020 4-7 August, online, H. Fukaya

[5] カイラル感受率と $U(1)$ 量子異常, 基研研究会 素粒子物理学の進展 2020 2020 8月31日 - 9月4日 online 深谷英則

[6] Topological excitation in high temperature phase of Quantum Chromodynamics 筑波大学 CCS International Symposium 2020 2020 Oct 6,

online H. Fukaya

[7] 量子色力学の高温相におけるトポロジー励起(hp190090) 第7回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 2020 30-Oct, online

深谷英則

[8] A new perspective to hadronic excitations above T_c , Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020), 2020, 4-7 August on-line
Christian Rohrhofer

[9] Axial U(1) anomaly in 2+1 flavor QCD at high temperature, 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 9/14-17 on-line 青木慎也, 青木保道, 深谷英則, 橋本省二, 金森逸作, 金児隆志, 中村宜文, Christian Rohrhofer, 鈴木溪

[10] Axial U(1) anomaly in 2+1-flavor lattice QCD at high temperature near the physical point, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021, 3 月 12 日-15 日, on-line 青木慎也, 青木保道, 深谷英則, 橋本省二, 金森逸作, 金児隆志, 中村宜文, Christian Rohrhofer, 鈴木溪

[11] What is chiral susceptibility probing? FunQCD: from first principles to effective theories 2021, 31-Mar, on-line, Hidenori Fukaya

(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	○	240,000	0
※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。			