

相転移温度近傍における QCD のトポロジー励起

Topological excitation of QCD near the critical temperature

深谷英則

大阪大学大学院理学研究科

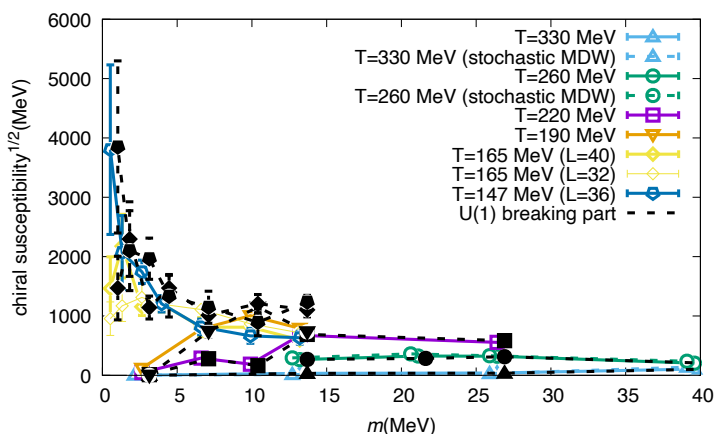
1. 研究目的

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。本プロジェクトの目的はカイラル相転移における軸性 U(1)量子異常の寄与を定量的に検証することである。2021 年度までの研究成果で、相転移温度 165MeV 以上の高温相において、カイラル感受率のシグナルのほとんどが軸性 U(1)量子異常に由来するという驚くべき結果を得た。本研究では相転移付近の統計を強化するとともに、有限体積による系統誤差を正確に見積もり、これまでの結果を精査することを目的とする。さらに相転移以下の温度でもシミュレーションを行い、軸性 U(1)量子異常の効果を定量評価する。

2. 研究成果の内容

温度 165MeV に相当する $32^3 \times 16$ 、および $40^3 \times 16$ 格子上的 QCD シミュレーションを 2021 年度に引き続き実行、さらに年度の後半では臨界温度より低い温度 147MeV に相当する $36^3 \times 18$ のサイズのシミュレーションを開始した。物理点を含む up down クォーク質量 4 点で行い、トポロジカルチャージ、Dirac 演算子の固有値/固有関数、再重みづけ因子を計算、そこからトポロジー感受率、axial U(1)感受率、カイラル感受率の各量を抽出した。クォーク質量ゼロ付近における量子異常の強い抑制、カイラル感受率のシグナルがほぼ axial U(1)量子異常に由来していることを確認した。下の図は disconnected のカイラル感受率の preliminary な結果である。色のついた全シグナルを黒の点線で示した量子異常

の寄与が占めていることが確認できる。しかし、詳細を見ると、pseudo critical 温度より低くなる重いクォーク質量では有意な差も見られており、axial U(1)量子異常の支配は相転移温度付近から高温側であることがわかった。



3. 学際共同利用プログラム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 axial U(1)量子異常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。特に 2022 年度は数値計算コストが特に大きくなる相転移温度付近に取り組んでおり、Wisteria/BDEC-01 での計算資源は非常に大きな役割を果たした。

4. 今後の展望

本プロジェクトは 2023 年度に継続課題として採択された。同じ課題で応募採択された富岳一般機動的課題 hp210231 および大阪大学 RCNP に申請した SQUID プロジェクトと相補的に研究を進め、プロジェクトの集大成として相転移温度を決定し、さまざまな物理量の結果をまとめる予定である。なお、相転移温度の決定は厳密にカイラル対称な Dirac 演算子を用いた世界初の成果となるはずである。

5. 成果発表

(1) 学術論文

Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Issaku Kanamori, Takashi Kaneko, Yoshifumi Nakamura, Christian Rohrhofer, Kei Suzuki (JLQCD Collaboration), “Axial U(1) symmetry at high temperatures in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD with chiral fermions,” PoS Lattice2021(2022) 332

JLQCD collaboration: S. Aoki, Y. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, C. Rohrhofer, K. Suzuki, “What is chiral susceptibility probing?”, PoS Lattice2021(2022) 050

(2) 学会発表

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 (JLQCD Collaboration), “オーバーラップフェルミオンで探る 2+1-フレーバ高温 QCD の U(1)量子異常,” 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6-8 日、岡山理科大学

Hidenori Fukaya, “Topological excitation of QCD near the critical temperature,” The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Epocal Tsukuba, Oct 14

Hidenori Fukaya, “What is chiral susceptibility probing?” RIKEN R-CCS workshop Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, RIKEN R-CCS, Feb. 15-17.

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 (JLQCD Collaboration), “QCD のカイラル相転移における U(1)量子異常の役割,” 日本物理学会 2023 年春季大会, 2023 年 3 月 22-25 日 online

(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			
Wisteria/BDEC-01	○	212,500	212,500
※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。			