

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

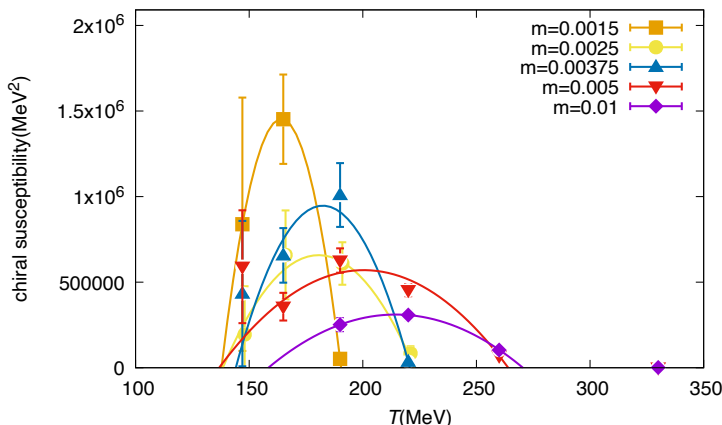
大阪大学大学院理学研究科

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 2022 年度に行われた相転移温度以下のシミュレーション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。特に軸性 U(1)量子異常の効果を定量評価する。

2. 研究成果の内容

2022 年度に引き続き、臨界温度より 10%ほど低い温度と見積もられる 147MeV に相当する $36^3 \times 18$ および $48^3 \times 18$ のサイズのシミュレーションを実行した。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支配率を確認したが、詳細を見ると臨界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た。また、今回初めてカイラル感受率のピークの位置から相転移温度の見積もりを試みた[図参照]。まだ preliminary な結果であるが、物理点での相転移温度は 165MeV となった。カイラル対称性を保つ Dirac 演算子を用いた世界初の成果である。



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、2023 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 年に終了予定であったが $48^3 \times 18$ のサイズの格子の統計量が予想より不足したため、2024 年度に継続課題として申請、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 hp230323 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。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

[1] Axial U(1) symmetry near the pseudocritical temperature in

$N_f=2+1$ lattice QCD with chiral fermions, S. Aoki, Y. Aoki, HF, S.

Hashimoto, I. Kanamori,

T. Kaneko, Y. Nakamura, K. Suzuki and D. Ward, 40th International

[2] Symposium on Lattice Field Theory, July 31-Aug 4, Fermi lab and online.

Symmetries of Two-Point Spatial Correlators in $N_f=2+1$ QCD above

Critical Temperature, S. Aoki, Y. Aoki, HF, S. Hashimoto, I. Kanamori,

T. Kaneko, Y. Nakamura, K. Suzuki and D. Ward, 40th International

Symposium on Lattice Field Theory, July 31-Aug 4, Fermi lab and online.

[3] Symmetry of two point spatial correlators in 2+1-flavor QCD at high

temperature, David Ward for JLQCD collaboration, 34th IUPAP Conference on

Computational Physics, Aug 4-8, Kobe International Conference center.

[4] Axial U(1) symmetry at low and high temperatures in $N_f=2+1$ lattice QCD

with chiral fermions, Kei Suzuki for JLQCD collaboration, 34th IUPAP

Conference on Computational Physics, Aug 4-8, Kobe International Conference

center.

(3) その他

筑波大学計算科学研究センター 2023 年度学際共同プログラム利用報告書

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	532,000		532,000
※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				