

## 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

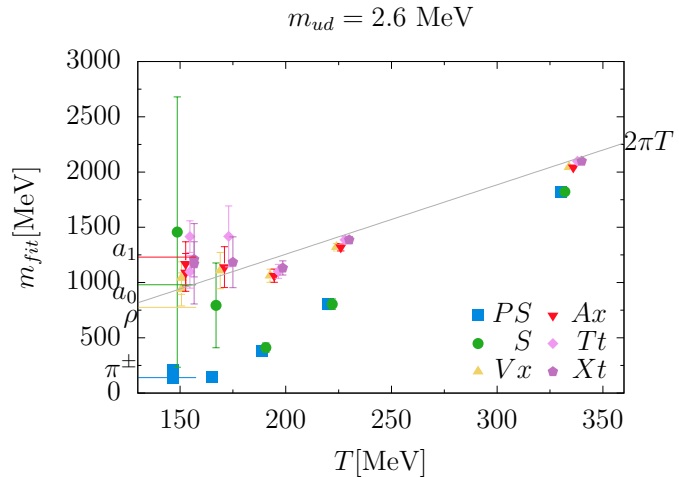
## 1. 研究目的

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。2023 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 年度まで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、中間子 2 点相関関数の遮蔽質量における軸性 U(1)量子異常を含めた対称性の温度依存性を詳細に調べる。

## 2. 研究成果の内容

温度 147MeV(相転移温度の 90%)から 330MeV(相転移温度の 2 倍)の範囲で様々なチャンネルの 2 点相関関数を計算、それぞれの遮蔽質量を抽出した。格子間隔 0.075fm という比較的細かい格子でメビウスドメインウォールフェルミオンを用いたシミュレーションを実行、格子誤差によるカイラル対称性の破れを 0.14MeV に抑えることに成功した。本研究課題のメインの物理量であるトポロジー励起に直接関係する軸性 U(1)対称性に関わるチャンネルは、感受率で調査したスカラー、擬スカラー粒子だけでなく、テンソル場、擬テンソル場のチャンネルについても比較を行った。さらに、相転移に直接関わっている  $SU(2)_L \times SU(2)_R$  対称性をベクトル、軸性ベクトルから、温度無限大で現れると考えられているスピンも混ぜるカイラルスピン対称性を、軸性ベクトルと擬テンソルからそれぞれ検証した。

抽出された遮蔽質量(右図参照)は以下の興味深い特徴を持っていた。1)  $0.9T_c$  の温度ですでに温度ゼロの中間子質量とよい一致を見せていること、2) スカラー、軸性ベクトル、擬テンソルの質量が相転移温度前後でそれぞれの対称



性パートナーの質量付近までいったん下がり、その後単調に  $2\pi T$  ( $T$  は温度) の直線に漸近していくことである。これは対称性を破り本来許されない遷移を許している staggered フェルミオンのシミュレーションでは確認されていなかった性質である。

対称性については、 $SU(2)_L \times SU(2)_R$  対称性が 165 MeV 付近で回復すること、テンソル場、擬テンソル場のチャンネルの差である軸性  $U(1)$  対称性も同様の傾向を見せていること、カイラルスピン対称性は 10% 以上の大きな破れを見せていることを確認した。本研究については Physical Review D 誌に投稿、現在査読中である。

### 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 年度以降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 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、中間子の遮蔽質量について論文をまとめることができた。今後も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について順次論文を発表する予定である。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

[1] Yasumichi Aoki, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Issaku Kanamori, Yoshifumi Nakamura, Christian Rohrhofer, Kei Suzuki, David Ward, “Symmetry of screening masses of mesons in two-flavor lattice QCD at high temperatures,” Physical Review D に投稿、査読中。arXiv: 2501.12675

#### (2) 学会発表

[2] Study of symmetries in finite temperature  $N_f=2$  QCD with Möbius Domain Wall Fermion, David Ward, Sinya Aoki, Yasumichi Aoki, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Issaku Kanamori, Takashi Kaneko, Jishnu Goswami, Yu Zhang, 41st International Symposium on Lattice Field Theory, July 28-Aug 3 2024, U.

Liverpool, UK.

[3] Symmetry of QCD near the (pseudo-) critical temperature, 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, 鈴木溪, David Ward, 日本物理学会 第 79 回年次大会 (2024 年) 於 北海道大学、2024 年 9 月 16 日 -- 9 月 19 日

(3) その他

| 使用計算機            | 使用計算機に<br>○                                                        | 配分リソース※ |     |       |
|------------------|--------------------------------------------------------------------|---------|-----|-------|
|                  |                                                                    | 当初配分    | 移行* | 追加配分  |
| Cygnus           |                                                                    |         |     |       |
| Pegasus          |                                                                    |         |     |       |
| Wisteria/BDEC-01 | ○                                                                  | 144000  |     | 36000 |
|                  | ※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。<br>*バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入 |         |     |       |