

重いクォークを持つ有限温度 QCD の臨界点

Critical point of finite-temperature QCD with heavy quarks

金谷 和至

筑波大学 宇宙史研究センター

1. 研究目的

ビッグバン直後の高温高密度な宇宙は、クォークとグルーオンが核子から溶け出したクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)状態にあったと予想されている。我々は、宇宙初期に実現したと考えられる量子色力学(QCD)の有限温度・密度相転移の性質を、ウィルソン型クォーク作用を用いた大規模格子 QCD シミュレーションにより研究している。当課題では、グラジエントフローに基づく SFtX 法を応用した物理点 2+1 フレーバー QCD の配位生成を進めるとともに、クォークが重い QCD の相構造解明にむけ、我々が開発した重クォーク QCD を効率的にシミュレーションする手法により空間格子サイズを先行研究より大きく拡大した臨界点探索を実行する。

2. 研究成果の内容

物理点 2+1 フレーバー QCD のゼロ温度配位生成と、クォークが重い QCD の臨界点探索の研究を推進し、後者で開発した Lee-Yang ゼロ比法の有効性を検証した。

前者は、2024 年度で配位生成を完了し、それを取り込んだ最終解析を進めている。後者は、我々で開発したホッピングパラメータ展開に基づく方法を採用して、大格子で高統計のシミュレーションを遂行した。2021 年度までに $N_f=4$ 格子を、2022 年度から 2024 年度にはより連続極限に近い $N_f=6$ 格子を研究し、アスペクト比 $LT=N_s/N_t$ が 10 以上の大きな格子を用いた Binder キュムラントを使って臨界点を高精度に特定した (図 1)。 $N_t=6$

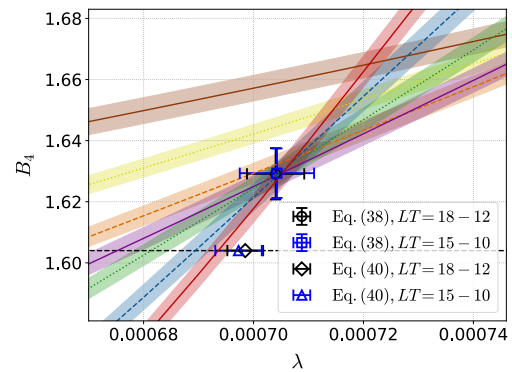


図 1. $N_f=6$ 格子での Binder キュムラントの最終結果[1]。

格子の結果を論文[1]にまとめ、研究発表では $N_f=8$ 格子での中間結果も報告した[6]。論文[6]では、 $N_f=4\sim 8$ の臨界点における擬スカラー中間子質量を仮評価し、 $m_{PS}^{(CP)}/T_c$ が N_t にほとんどよらず 17 程度になることがわかった。連続極限もこの程度であることが示唆される。

後者の研究で、Binder キュムラントとは独立な臨界点探索の方法として、Lee-Yang ゼロの臨界スケーリングも研究した。系の結合パラメータを複素数に解析接続すると、臨界点近傍のクロスオーバー側でも、分配関数のゼロ点が複素結合パラメータで現れ、Lee-Yang ゼロと呼ばれている。クロスオーバー側では Lee-Yang ゼロは実軸を挟んだ2つのカットとして現れ、臨界点でカット間のギャップが閉じて、一次相転移側では実軸上にゼロ点が現れる。先行研究では、カットの端 (Lee-Yang edge 特異点) の振る舞いから臨界点の位置を評価した。

しかし、有限格子ではカットは離散的なゼロ点の集合に分解し、その端点の位置にも有限体積効果が含まれると考えられる。我々は Lee-Yang ゼロの有限体積効果を含んだ臨界スケーリングを調べ、有限格子における Lee-Yang ゼロの比が Binder キュムラントとよく似た性質を持っていることを発見した。つまり、さまざまな有限格子での Lee-Yang ゼロ比が交差する点として、熱力学極限における臨界点の位置を評価できる。これは、Binder キュムラント法とは独立だが同様に強力な臨界点探索の一般的評価方法が発見できたことを意味する。3次元の3状態 Potts 模型でその有効性を確認した論文[4]は、Physical Review Letters の Editor's Suggestion に選定された。

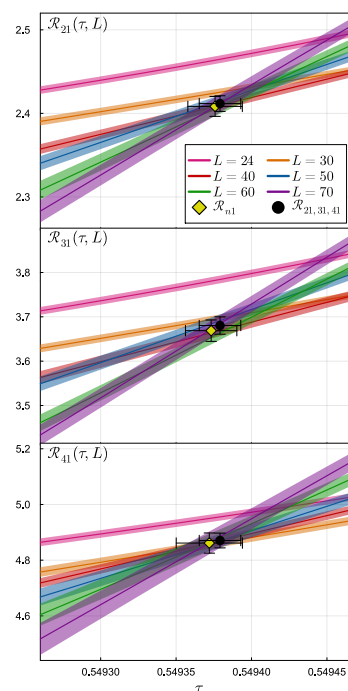


図 2. Potts 模型における Lee-Yang ゼロ比[4]。 R_{nm} は n 番目と m 番目の Lee-Yang ゼロの比。臨界点の評価結果は、Binder キュムラント法の結果と一致する。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムでは、A64FX アーキテクチャを持つ Wisteria-O における QCD コードの高速化にむけた改良と動作検証を行い、配位生成の一部を実行した。

4. 今後の展望

新たに開発した Lee-Yang ゼロ比法は、臨界スケーリング研究においてこれまで最も強力な手法であった Binder キュムラント法と同等の有効性があり、素粒子研究だけでなく一般の物性系における臨界現象の研究に大きなインパクトを持つと期待できる。Lee-Yang ゼロ比法を使って様々な物性系の臨界スケーリングを再検討することは急務である。そのため、我々は、この手法やその変形版がイジング系などのスピン系でどの程度有効かの検証を優先的に進めている。それを完成させ、さらには、当初の目的であった QCD の臨界点探索を、まずは重クォーク QCD の場合に実行する計画である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Ryo Ashikawa, Masakiyo Kitazawa, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, "High-precision analysis of the critical point in heavy-quark QCD at $N_t=6$," Phys. Rev. D 110, No.7, ref.074508, pp.1-13 (2024), DOI:10.1103/PhysRevD.110.074508, arXiv:hep-lat:2407.09156
2. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "Chemical potential dependence of the endpoint of first-order phase transition in heavy-quark region of finite-temperature lattice QCD," PoS (LATTICE 2023), ref.174, pp.1-7 (2024), DOI:10.22323/1.453.0174, arXiv:hep-lat:2311.11508
3. Masakiyo Kitazawa, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Hiroto Sugawara, "Critical point in heavy-quark region of QCD on fine lattices," PoS (LATTICE 2023), ref.190, pp.1-7 (2024), DOI:10.22323/1.453.0190, arXiv:hep-lat:2401.0040
4. Tatsuya Wada, Masakiyo Kitazawa, Kazuyuki Kanaya, "Lee-Yang-zero ratios for locating a critical point," Phys. Rev. Lett. 134, ref.162302, pp.1-6 (2025), DOI:10.1103/PhysRevLett.134.162302, arXiv:hep-lat:2410.19345 (Editor's Suggestion)
5. Tatsuya Wada, Masakiyo Kitazawa, Kazuyuki Kanaya, "Finite-size scaling of Lee-Yang zeros and its application to the 3-state Potts model and heavy-quark QCD," PoS (LATTICE 2024), ref.167, pp.1-10 (2025), DOI:10.22323/1.466.0167, arXiv:hep-lat:2501.18904
6. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroto Sugawara, "Finite-temperature critical point of heavy-quark QCD on large lattices," PoS (LATTICE 2024), ref.439, pp.1-9 (2025), DOI:10.22323/1.466.0439, arXiv:hep-lat:2412.0059
7. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroto Sugawara, "Finite-temperature critical point of heavy-quark QCD on large lattices," PoS (LATTICE 2024), ref.439, pp.1-9 (2025), DOI:10.22323/1.466.0439, arXiv:hep-lat:2412.00598

(2) 学会発表

1. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa and Hiroto Sugawara for the WHOT-QCD collaboration, "Finite-temperature critical point of heavy-quark QCD on large lattices", The 41st International

- Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) (Liverpool, UK, 7.28-8.3, 2024)
2. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "First-order phase transitions in the heavy quark region of lattice QCD at high temperatures and high densities", The 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) (Liverpool, UK, 7.28-8.3, 2024)
 3. Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "Finite-size scaling of Lee-Yang zeros and its application to 3-state Potts model and heavy-quark QCD", The 41st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2024) (Liverpool, UK, 7.28-8.3, 2024)
 4. Masakiyo Kitazawa, "Finite-size scaling of Lee-Yang zeros", XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (Cairns, Australia, 8.19-24, 2024)
 5. 和田 辰也, 北沢 正清, 金谷 和至, "Lee-Yang ゼロの有限サイズスケーリングと 3 状態ポッツ模型への応用", 熱場の量子論とその応用 2023 (TFQT 2023) (京都大学基礎物理学研究所, 京都市, 京都, 9.9-11, 2024)
 6. 北澤 正清, 和田 辰也, 金谷 和至, "臨界点近傍でのスケーリング関数の埋め込みにおける Lee-Yang ゼロの活用", 日本物理学会第 79 回年次大会 (北海道大学, 札幌, 北海道, 9.16-19, 2024)
 7. 和田 辰也, 金谷 和至, 北澤 正清, "Lee-Yang ゼロを用いた重クォーク QCD 臨界点の精密解析", 日本物理学会第 79 回年次大会 (北海道大学, 札幌, 北海道, 9.16-19, 2024)
 8. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa and Hiroto Sugawara for the WHOT-QCD collaboration, "Finite temperature critical point in heavy-quark QCD", German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, 9.25-27, 2024)
 9. Masakiyo Kitazawa, Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, "Lee-Yang-zero ratio for critical-point searches", German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, 9.25-27, 2024)
 10. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Masanori Koiida, "Phase structure of finite temperature-density QCD in heavy quark regime by hopping parameter expansion", German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, 9.25-27, 2024)
 11. K. Kanaya, R. Ashikawa, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Sugawara, "Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow", CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba,

Japan, 10.7-8, 2024)

12. H. Nemura, T. Aoyama, W.-L. Chen, I. Kanamori, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, K. Nitadori, "Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture", CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 10.7-8, 2024)
13. Masakiyo Kitazawa, "Lee-Yang zeros for locating a critical point", YITP long-term workshop "Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2024 (HHIQCD2024)" (YITP, Kyoto, Kyoto, 10.14-15, 2024)
14. Issaku Kanamoari, Tatsumi Aoyama, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Keigo Nitadori, and Hidekatsu Nemura (Bridge++ project), "GPU Implementation of Lattice QCD code with OpenACC", The 7th R-CCS International Symposium -- Science beyond Fugaku: Classical, Quantum, and AI (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, 1.22-24, 2025))
15. 和田 辰也, 北澤 正清, 金谷 和至, "Lee-Yang ゼロを用いた 3 次元イジング模型の臨界点の精密解析", 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン, 3.18-21, 2025)
16. 和田 辰也, 北澤 正清, 金谷 和至, "3 次元イジング模型の臨界点の Lee-Yang ゼロを用いた精密解析", 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン, 3.18-21, 2025)
17. 青山 龍美, ○金森 逸作, 金谷 和至, 松古栄夫, 滑川裕介, 根村英克, 似鳥啓吾 (Bridge++ project), "汎用格子 QCD コード Bridge++ の GPU 版について", 日本物理学会 2025 年春季大会 (オンライン, 3.18-21, 2025)

(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	移行*	追加配分
Cygnus	○	5880		
Pegasus				
Wisteria/BDEC-01	○	160,000		
※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				