

グラジエントフローによる 2+1 フレーバー QCD の熱力学

Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow

金谷和至

筑波大学 数理物質系 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 2+1 フレーバー格子 QCD の大規模数値シミュレーションにより研究している。

我々は、プロジェクト 1 として、グラジエントフローに基づく SFtX 法(small flow-time expansion method)を応用した、QCD シミュレーションを進めている。最初に、u,d クォークが現実よりやや重い場合の 2+1 フレーバー QCD を研究し、従来の方法による状態方程式を良く再現することや、カイラル感受率や位相感受率が物理的に期待される性質を満たすことなど、SFtX 法の有用性を示した。また、SFtX 法の基本的性質と改良法を研究した。これらを発展させ、現実のクォーク質量（物理点）における QCD シミュレーションを推進している。

並行して、プロジェクト 2 として、クォークが重い QCD の相構造解明も進めている。物理点 QCD の相転移はクロスオーバーだが、近傍の臨界点のスケーリングの影響を受けている可能性がある。クォーク質量の関数として相転移次数を示す「コロンビア・プロット」において、クォークが軽いカイラル極限側と、クォークが重いクエンチ QCD 側の両方に臨界点が存在する。近年の格子研究の結果、カイラル極限側の臨界点が物理点から遠い可能性が高まり、クォークが重い側の臨界点も精密に解明することが重要になった。臨界スケーリングの研究では、系の空間サイズが十分大きい必要がある。我々は、重クォーク QCD を効率的にシミュレーションする手法を開発し、空間格子サイズを先行研究より大きく拡大した研究を遂行している。

2. 研究成果

プロジェクト 1 の物理点 QCD の熱力学研究では、相転移温度近傍や低温領域の統計を増強した解析の結果、熱力学量のくりこみで必要なゼロ温度配位の統計が不十分である可能性が示唆されたので、ゼロ温度配位の追加生成を進めている。ゼロ温度シミュレーションには大きな計算時間が要求されるが、2023 年度には大型の計算資源申請が採択されなかったため、解析方法の改良を検討している。

プロジェクト2のクォークが重い領域における QCD 相転移の研究では、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ている。2022 年度までに実行した $N_t=4$ 格子での臨界スケーリング研究を拡大して、2023 年度には、より連続極限に近づけた $N_t=6$ での研究を遂行し、 $N_t=8$ のシミュレーションも開始した。

図1に $N_t=6$ におけるポリアコフ・ループのビンダー・キュムラントの結果を示す。系の空間サイズはアスペクト比 $LT=N_s/N_t$ でコントロールする（臨界点探索では温度 $T=1/(aN_t)$ が臨界温度近傍でほぼ一定なので、 LT は空間サイズ $L=aN_s$ に比例する。ここで N_s, N_t は空間方向、温度軸方向の格子サイズで、 a は格子間隔）。臨界スケーリングが実現していれば、ビンダー・キュムラントは臨界点で空間サイズ依存性が無くなる。図から、アスペクト比 10 以上の大格子で臨界スケーリングが実現し、その交点から臨界点を高精度で決定できることがわかる。 $N_t=8$ の研究はまだ進行中だが、同様の中間結果を得ている。

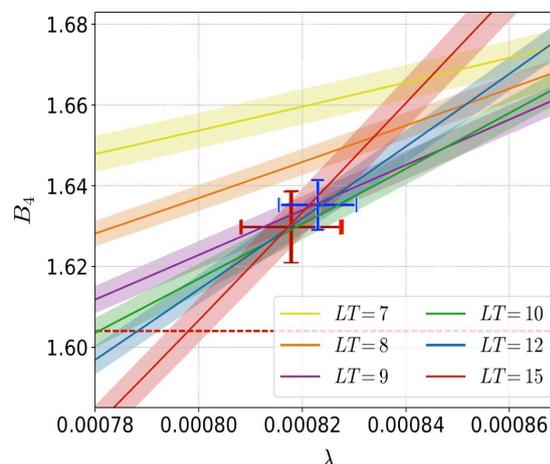


図1： $N_t=6$ における Binder cumulant の中間結果[1]。横軸 λ はクォーク質量に対応するパラメータで、クォークが軽くなると大きくなる。赤い十字は $LT=N_s/N_t=10\sim 15$ 、青は $LT=9\sim 15$ を用いた FSS フィットによる交点の結果。

3. 展望

物理点 QCD のゼロ温度配位生成と SFEX 法による解析を継続しつつ、クォークが重い領域における QCD 相転移の研究を推進する。後者については、現在、我々で開発した手法を応用して $N_t=6$ と $N_t=8$ のシミュレーションを進めており、 $N_t=6$ については解析がほぼ完成して、論文にまとめる作業に着手した。また、我々の手法は容易に有限密度の場合に拡張できるので、その方向にも研究を展開している。

4. 成果発表

(1) 学術論文

1. M. Kitazawa, R. Ashikawa, S. Ejiri, K. Kanaya, H. Sugawara, “Critical point in heavy-quark region of QCD on fine lattices,” PoS (LATTICE 2023), 190 (2024), DOI:10.22323/1.453.0190
2. S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, “Chemical potential dependence of the endpoint of first-order phase transition in heavy-quark region of finite-temperature lattice QCD,” PoS (LATTICE 2023), 174 (2024),

DOI:10.22323/1.453.0174

(2) 学会発表

1. Masakiyo Kitazawa, "Critical Point and Fluctuation", Workshop on Highly Baryonic Matter at RHIC-BES and Future Facilities — beyond the Critical Point towards Neutron Stars — (WHBM 2023) (Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Apr. 29-30, 2023)
2. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, "Chemical potential dependence of the endpoint of the first-order phase transition in the heavy-quark region of finite-temperature lattice QCD", International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023) (Fermilab, Chicago, USA, 7.31-8.4, 2023)
3. M. Kitazawa, R. Ashikawa, S. Ejiri, K. Kanaya, "Critical point in heavy-quark region of QCD on fine lattices", International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2023) (Fermilab, Chicago, USA, 7.31-8.4, 2023)
4. Masakiyo Kitazawa, "Exploring strongly interacting matter in heavy-ion collisions", The 52nd edition of the International Symposium on Multiparticle Dynamics (ISMD 2023) (Károly Róbert Campus of MATE, Gyöngyös, Hungary, 8.21-27, 2023)
5. 菅原 寛人, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, "Nt=8 格子 QCD 計算による重クォーク領域の QCD 臨界点近傍での有限体積スケーリング", 熱場の量子論とその応用 2023 (TFQT 2023) (KEK, つくば市, 茨城, 8.28-30, 2023)
6. Masakiyo Kitazawa, "An efficient numerical solver for relativistic hydrodynamics with an implicit Runge-Kutta method", The XXXth International Conference on Ultra-relativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2023) (Houston, USA, 9.3-9, 2023)
7. 菅原 寛人, 江尻 信司, 北沢 正清, 金谷 和至, "Nt=8 格子 QCD シミュレーションによる重クォーク領域の QCD 臨界点の測定", 日本物理学会 第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 9.16-19, 2023)
8. Masakiyo Kitazawa, "Thermodynamics of SU(3) Yang-Mills theory with boundary conditions", KEK Journal Club (KEK (online), つくば市, 茨城, 9.29, 2023)
9. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, "Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow", CCS 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, 10.2-3, 2023)

10. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, ``Gradient flow による物理点 QCD の熱力学'', 第 10 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (The Grand Hall, 品川, 東京, 10.25-26, 2023)
11. 鈴木 博, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, ``量子色力学の有限温度物理量の第一原理計算'', 第 10 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (The Grand Hall, 品川, 東京, 10.25-26, 2023)
12. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroto Sugawara, ``Phase structure of finite temperature and density lattice QCD in the heavy quark region'', International workshop ``Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning'' (CCS, Univ. Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 11.22-25, 2023)
13. Masakiyo Kitazawa, ``Theoretical Study of QCD Phase Diagram at High Baryon Density'', The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society and the Physical Society of Japan (Waikoloa, Hawaii, USA, 11.26-12.03, 2023)
14. Masakiyo Kitazawa, ``Lee-Yang zeros around critical point of heavy-quark QCD'', Condensed Matter Physics of QCD 2024 (YITP, Kyoto, Japan, 3.11-22, 2024)
15. 菅原 寛人, 江尻 信司, 北沢 正清, 金谷 和至, ``有限温度格子 QCD における重クォーク領域の臨界質量'', 日本物理学会 2024 年春季大会 (オンライン開催, 3.18-21, 2024)
16. 江尻 信司, 北沢 正清, 金谷 和至, 和田 辰也, ``有限温度・密度格子 QCD の重クォーク領域の臨界点付近における Lee-Yang ゼロ解析'', 日本物理学会 2024 年春季大会 (オンライン開催, 3.18-21, 2024)

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	○	115,000	
Wisteria/BDEC-01			
※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。			