

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 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、グラジエントフロー(gradient flow)に基づく SFtX 法(small flow-time expansion method)を応用して、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。SFtX 法は、連続極限のくりこまれた物理量を格子上で直接評価する一般的な計算方法である。格子正則化に由来する並進対称性やカイラル対称性の破れのために、エネルギー運動量テンソル(EMT)やカイラル感受率、位相感受率などの評価にはこれまで複雑で重い処理が要求されていたが、SFtX 法により直接評価できるようになった。さらに、輸送係数などの重要な情報も、EMT の非対角成分や相関関数から直接計算できると期待される。

我々は、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 SFtX 法で研究し、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数値的に示していることを示した。これらにより、SFtX 法が極めて有用であることがわかった。並行して、SFtX 法の基本的性質と改良方法などを研究し、SFtX 法の正しさと実用性を確認した。2022 年度には、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進め、相転移点の精密決定や総転移点近傍における熱力学量の測定を行う。

物理点 QCD の相転移はクロスオーバーであり、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、臨界点が、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 側の両方に期待されている。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を精密に解明することが重要になった。そこで、物理点の研究と並行して、クォークが重い場合の QCD 臨界点を SFtX 法と再重み付け法で研究する。先行研究ではアスペクト比 $LT = N_s/N_t$ (温度 T がほぼ一定の場合は格子の空間サイズ L に比例する) で 4~7 の格子が研究されているが、臨界点の位置などに空間格子サイズ依存性が大きいことがわかっている。そこで、先行研究より大きな空間格子サイズの格子を使った研究を遂行する。

2. 研究成果の内容

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。その解析の結果、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、ゼロ温度配位生成を開始した。ゼロ温度シミュレーションには大きな計算資源と計算時間が要求されるため、予定していた最終的解析にはまだ着手できないと判断した。

クォークが重い領域における QCD 相転移の研究では、大格子で高統計を実現するために、重いクォークの効果をホッピングパラメータ展開 (HPE) で取り入れる方法を採用した。2022 年度には、まず $Nt=4$ 格子でアスペクト比 12 までをシミュレーションし、臨界スケーリングが先行研究よりも大きなアスペクト比 9 以上で実現することを示し、臨界スケーリングを使って臨界点を高精度で測定した。並行して、HPE の信頼性を研究し、 $Nt=4$ の臨界点近傍までなら上記研究で採用した低次の HPE で十分だが、連続極限に向けて Nt が大きくなるとより高次まで取り入れる必要があることを示した。同時に、計算時間をほとんど増やすことなく HPE の高次効果を有効的に取り入れる手法も開発した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用による計算機資源は、主に物理点での 2+1 フレーバー QCD シミュレーションに使われ、物理量のくりこみに必要なゼロ温度配位の統計を増強する上で重要な役割を果たした。また、クォークが重い QCD の解析の一部にも使われた。

4. 今後の展望

物理点 QCD のゼロ温度配位生成を継続しつつ、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 $Nt=6$ と $Nt=8$ のシミュレーションを進めており、 $Nt=6$ 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。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① Shinji Ejiri, Canonical partition function and center symmetry breaking in finite density lattice gauge theories, Phys. Rev. D 106, No.11, ref.114505, pp.1-16 (2022), DOI:10.1103/PhysRevD.106.114505
- ② Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, Phase structure and critical point

in heavy-quark QCD, PoS (LATTICE 2022), ref.177, pp.1-9 (2023),
DOI:10.22323/1.430.0177

- ③ Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku, PoS (LATTICE 2022), ref.284, pp.1-10 (2023),
DOI:10.22323/1.430.0284

(2) 学会発表

- ① Masakiyo Kitazawa, "Flux-tube structure via energy-momentum tensor", Gauge Topology, Flux Tubes And Holographic Models: The Intricate Dynamics Of QCD In Vacuum And Extreme Environments (ECT* - Villa Tambosi, Italy (hybrid), 5.23-27, 2022)
- ② Masakiyo Kitazawa, "From lattice to observables: Real and virtual experiments for exploring hot and dense medium", The 20th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2022) (Busan, Korea (hybrid), 6.13-17, 2022)
- ③ Masakiyo Kitazawa, "Lattice QCD and physics at nonzero temperature", Nuclear Physics School (NPS2022) (Pukyong National University, Busan, Korea (hybrid), 6.27-7.1, 2022)
- ④ Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, "Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature", The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022)
- ⑤ Hideo Matsufuru, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Tatsumi Aoyama, Yusuke Namekawa, "Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku", The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022)
- ⑥ Masakiyo Kitazawa, "Critical points in hot and dense QCD", The 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (Korea (online), Aug. 21-26, 2022)
- ⑦ 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, "重クォーク QCD 臨界点の $N_t=6$ における格子数値解析", 日本物理学会 (岡山理科大学, 岡山市, 岡山, 9.6-8, 2022)
- ⑧ 堀越 優弥, 江尻 信司, "グラディエントフローさせた U(1)格子ゲージ理論におけるセンター対称性とディラックストリング", 日本物理学会 (岡山理科大学, 岡山市, 岡山, 9.6-8, 2022)

- ⑨ 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, ``重クォーク QCD 臨界点の格子数値解析: 微小格子間隔かつ大体積での解析'', 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
- ⑩ 堀越 優弥, 江尻 信司, ``グラディエントフローによる U(1)格子ゲージ理論の磁気単極子'', 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
- ⑪ 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 若林 直輝, ``重クォーク領域における有限密度格子 QCD の臨界点決定のためのホッピングパラメータ展開'', 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学 基礎物理学研究所, 京都, 9.20-22, 2022)
- ⑫ Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, and Naoki Wakabayashi, ``Critical point in heavy-quark QCD at finite temperature'', Tsukuba Global Science Week (TGSW2022) (Univ. of Tsukuba (online), Sep. 27, 2022)
- ⑬ Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, ``Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient flow'', The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epocal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 10.13-14, 2022)
- ⑭ H. Nemura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, I. Kanamori, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, ``Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture'', The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epocal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, 10.13-14, 2022)
- ⑮ Masakiyo Kitazawa, Ashikawa Ryo, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, ``Lattice study of the critical point in heavy-quark QCD'', Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD2022) (Switzerland (online), Nov. 22 - Dec. 2, 2022)
- ⑯ Tatsumi Aoyama, *Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa and Keigo Nitadori, ``Benchmark result of Lattice QCD code set Bridge++ 2.0 on Fugaku'', The 5th R-CCS

International Symposium "Fugaku and Beyond: Simulation, BigData and AI in the Exascale Era" (R-CCS, RIKEN, Kobe, Japan (hybrid), Feb 6-7, 2023)

- ⑰ 芦川 涼, 北沢 正清, 江尻 信司, 金谷 和至, ``Nt=6 における重クォーク QCD 臨界点の精密測定'', 日本物理学会 (オンライン開催, 3.22-25, 2023)
- ⑱ 江尻 信司, 芦川 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, ``有限温度格子 QCD の重クォーク領域での一次相転移の終点の化学ポテンシャル依存性'', 日本物理学会 (オンライン開催, 3.22-25, 2023)

(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	○	4,410	0
Wisteria/BDEC-01	○	212,500	0
※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。			