

有限温度量子色力学のダイナミクス

鈴木 博 (九州大学)

概要

クォークとグルーオンの強い相互作用を記述する基礎理論である量子色力学の有限温度における各種物理量を第一原理から計算する。これは、初期宇宙の進化、宇宙の元素合成に重要な中性子星の内部構造、重イオン衝突のダイナミクス、アキシオンダークマターの残存量などを解明する上での基本的データとなる。このために、ウィルソンフェルミオンを用いた格子ゲージ理論に基づき、大規模数値シミュレーションによりゲージ場の配位を生成する。今年度の JHPCN 共同研究では特に、PACS10 Collaboration で決定された格子パラメータを用い、格子間隔が 0.085 fm、空間方向の格子サイズが 48^3 、時間方向の格子サイズが 12 (これは 193 MeV という温度に対応する) という特定のパラメータに対する配位生成を行った。結果として、合計 433 個のゲージ場配位を得ることができた。これらの配位を用い、近年提案されたグラディエントフローに基づく物理量の構成法 [Small Flow-time eXpansion (SFtX) 法] により各種熱力学量を計算するのが今後の課題である。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

大阪大学 九州大学

1.2 共同研究分野

■超大規模数値計算系応用分野

1.3 参加研究者の役割分担

鈴木博	研究の総括・理論的整備・シミュレーションの実行とデータ解析
金谷和至	研究の方向性へのアドバイス・シミュレーションの実行とデータ解析
谷口裕介	コード開発・シミュレーションの実行とデータ解析
江尻信司	シミュレーションの実行とデータ解析

梅田貴士 シミュレーションの実行とデータ解析

北沢正清 シミュレーションの実行とデータ解析

2 研究の目的と意義

量子色力学とはクォークとグルーオン間の強い相互作用を記述する素粒子基礎理論である。この量子色力学の有限温度における各種物理量を、格子ゲージ理論に基づいた大規模数値シミュレーションにより第一原理から計算するのが最終目標である。こうした物理量は、初期宇宙の進化、宇宙の元素合成に重要な中性子星の内部構造、重イオン衝突のダイナミクス、アキシオンダークマターの残存量などを解明する上での理論からの基本的なデータとなる。これまで、この計算に用いられてきたスタッガー

ドフェルミオンの理論的正当性は常に批判を受けてきており、我々は、理論的基礎の明確なウィルソソフェルミオンという定式化を用いる。ウィルソソフェルミオンには、多くの計算量を必要とする、カイラル対称性が保たれないという欠点があり、これがこれまで研究の大きな妨げとなってきた。当研究計画では、近年提案されたグラディエントフローに基づく物理量の構成法 [Small Flow-time eXpansion (SFtX) 法] を用いることで、これらの困難を回避しようとする点に新しさがある。

上記の目標のため、現実世界と同じアップ・ダウンクォーク質量とストレンジクォーク質量に対応した格子作用を用い、厳密な配位生成アルゴリズムであるハイブリッドモンテカルロ法により、有限温度量子色力学でのゲージ場の配位の生成を行う。これらの配位にわたる平均値として物理量が計算される。SFtX 法により物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減が期待されるが、この配位生成には極めて多くの計算資源を要する。当研究計画の計算量割り当てが、64 ノード×8 ヶ月 (2020 年 5 月 2020 年 12 月) ということもあり、ここでは、格子間隔が 0.085 fm、空間方向の格子サイズが 48^3 、時間方向の格子サイズが 12 (これは 193 MeV という温度に対応する) という特定のパラメータに目標を絞って配位生成を行った。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

格子ゲージ理論に基づく、物理点質量の動的クォークを含む量子色力学の数値シミュレーション (配位生成・物理量測定) は多大の計算資源を必要とし、スーパーコンピュータで年単位の計算時間が掛かることも珍しくない。個人が通常研究室で用意できる計算機のスケールではとても不可能な計算である。昨年度に引き続

き JHPCN の計算機資源を使わせて頂いたことは、我々の研究遂行上大きな助けとなった。

4 前年度までに得られた研究成果の概要

前年度の当 JHPCN 共同研究では、CP-PACS Collaboration において決定された格子パラメータを用い、格子間隔が 0.09 fm、格子サイズが $32^3 \times 18$ (これは 122 MeV という温度に対応する) でのゲージ場配位生成を、ITO サブシステム A の 32 ノード (1 ノード 36 コア) を用いた並列計算により 2 系列分行い、計 213 個のゲージ場配位を得た。1 配位が平均 1.3 日で得られたことになる。当研究開始時点では、他計算機資源で得たものも合わせて配位数は 50 個程度であったので、これは大幅な増加である。現在、ここで得られたゲージ場配位を用いた有限温度物理量の測定が進行中である。

5 今年度の研究成果の詳細

格子ゲージ理論の数値シミュレーションを行うにあたっては、まず、物理的な単位で計った格子間隔とクォーク質量を再現する格子作用のパラメータを決定する必要があり、このステップが極めて多大の計算量を必要とする。ただ、このパラメータは、ゼロ温度の状況で一旦決定すれば、同じパラメータを有限温度でも用いることができる。前年度まで我々は、CP-PACS Collaboration により決定された格子間隔 0.09 fm に対するパラメータを用いて有限温度のゲージ場配位生成を行っていた。しかし、CP-PACS Collaboration ではこの単一の格子間隔に対する格子パラメータのみが決定されており、最終的に格子間隔を 0 に外挿する連続極限に対する情報が欠けている。この点を検討の結果、(最終目標は変わらないが) 今年度

我々は戦略を変更し、PACS10 Collaborationにより決定された格子パラメータを用いることで、格子間隔が 0.085 fm、空間方向の格子サイズが 48^3 、時間方向の格子サイズが 12（これは 193 MeV という温度に対応する）に対するゲージ場の配位生成を行った。PACS10 Collaboration は、既に、格子間隔 0.064 fm と 0.04 fm に対する格子パラメータも決定しており、これらを用いた有限温度シミュレーションを今後行う（実際は現在進行中である）ことで、連続極限への外挿が期待できる。ここでは、2020 年 5 月より 2020 年 12 月まで、九州大学情報基盤研究開発センターのスーパーコンピュータ ITO サブシステム A の 64 ノード上で並列計算を行うことで、上記のパラメータに対して 433 個のゲージ場の配位を得ることができた。

6 今年度の進捗状況と今後の展望

上で述べたように、今年度は、研究計画期間の 8 ヶ月間に、格子間隔が 0.085 fm、温度が 193 MeV でのゲージ場配位を 433 個得ることができた。今後は、ここで得られたゲージ場の配位を用いて、熱力学量の測定と解析を早急に行い、なるべく早く論文として発表したい。特に、同じ ITO システムは HPCI の課題としても利用させて頂いており、そこでは、上記と同じ格子間隔と温度で、空間方向のサイズが小さい（48 の代わりに 32）ものに対して、1732 個の配位を得ている。空間サイズに対する物理量の変化は有限サイズ効果の評価として重要であり、ここで得られたゲージ場配位は貴重な情報を与えると期待される。

7 研究業績一覧（発表予定も含む）

学術論文（査読あり）

- Y. Taniguchi *et al.* [WHOT-QCD], “ $N_f = 2+1$ QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients,” *Phys. Rev. D* **102**, no.1, 014510 (2020) [erratum: *Phys. Rev. D* **102**, no.5, 059903 (2020)] doi:10.1103/PhysRevD.102.014510 [arXiv:2005.00251 [hep-lat]].
- A. Suzuki, Y. Taniguchi, H. Suzuki and K. Kanaya, “Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow,” *Phys. Rev. D* **102**, no.3, 034508 (2020) doi:10.1103/PhysRevD.102.034508 [arXiv:2006.06999 [hep-lat]].
- M. Shirogane *et al.* [WHOT-QCD], “Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method,” *PTEP* **2021**, no.1, 013B08 (2021) doi:10.1093/ptep/ptaa184 [arXiv:2011.10292 [hep-lat]].

国際会議プロシーディングス（査読あり）

国際会議発表（査読なし）

- M. Kitazawa, “Anisotropic pressure induced by finite-size effects at nonzero temperature in SU(3) YM theory”, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (KEK, Japan (online), 8.04, 2020)
- Kazuyuki Kanaya, “Thermodynamic observables in (2+1)-flavor QCD applying the gradient-flow method”, CCS 12th in-

ternational symposium 2020 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba, Japan (online), 10.06, 2020)

- Masakiyo Kitazawa, “Energy-momentum tensor on the lattice”, Extreme Nonequilibrium QCD (ONLINE) (ICTS, India (online), 10.5-9, 2020)

国内会議発表 (査読なし)

- 江尻信司, “End point of first order phase transitions and sign problem in finite density lattice gauge theories”, 第3回クラスター階層 領域研究会 (online 開催, 5.18, 2020)
- 金谷 和至, “Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the SFtX method based on the gradient flow”, 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS) セミナー (R-CCS, 神戸市, 兵庫県 (online), 5.20, 2020)
- 谷口 裕介, 金谷 和至 (Y. Taniguchi, K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda), “物理的なクォーク質量におけるエネルギー運動量テンソルの研究”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7.09, 2020)
- 鈴木 博 (Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Takashi Umeda, Masakiyo Kitazawa), “有限温度量子色力学のダイナミクス”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区

(online), 7.09, 2020)

- 北澤 正清, “格子量子色力学に基づく初期宇宙の諸性質の精密解析”, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区 (online), 7.09, 2020)
- 金谷 和至, “Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f = 2 + 1$ QCD”, 熱場の量子論とその応用 2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
- 馬場 惇, “SFtX 法を用いたカイラル感受率の測定”, 熱場の量子論とその応用 2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
- 江尻 信司, “有限密度格子ゲージ理論におけるセンター対称性による符号問題の回避法を用いた粒子密度確率分布関数”, 熱場の量子論とその応用 2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 8.24-26, 2020)
- 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北澤 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, “SFtX 法を用いたカイラル感受率の測定”, 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
- 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北澤 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, “Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f=2+1$ QCD”, 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
- 江尻 信司, “センター対称性による有限密度格子ゲージ理論における符号問題の回避”, 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つ

くば市 (online), 9.14-16, 2020)

- 鈴木博, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 谷口 裕介, 馬場 惇, “Small Flow time eXpansion (SFtX) 法による 2+1 フレーバー QCD の熱力学”, 日本物理学会 (筑波大学, 茨城県, つくば市 (online), 9.14-16, 2020)
- 谷口 裕介, 金谷 和至, “勾配流法を用いたクォーク・グルオン プラズマの物性的研究”, 第 7 回「京」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, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
- 鈴木 博, 金谷 和至, 谷口 裕介, 江尻 信司, 梅田 貴士, 北沢 正清, 馬場 惇, “ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究”, 第 7 回「京」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, 東京都, 品川区 (online), 10.30, 2020)
- 金谷 和至, “Gradient flow に基づく SFtX 法による物理点 QCD の熱力学特性の研究”, 大阪大学サイバーメディアセンター 2020 年度公募型利用制度成果報告会 (大阪大学吹田キャンパス, 大阪府, 茨木市 (online), 3.10, 2021)
- 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, “SFtX 法を用いた Wilson fermion の下でのカイラル感受率の測定”, 日本物理学会第 76 回年次大会 (オンライン開催, 3.12-15, 2021)
- 江尻 信司, 白銀 瑞樹, 石見 涼, 金谷 和至, 北沢 正清, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士, “Small flow-time expansion 法による SU(3) 格子ゲージ理論の一次相転移点における潜熱と圧力差”, 日本物理学会第 76 回

年次大会 (オンライン開催, 3.12-15, 2021)

公開したライブラリ等

その他 (特許, プレス発表, 著書等)