jh190003-NAJ

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。当 JHPCN 共同研究では特に、格子間隔が 0.09 fm、空間方向の格子サイズが 32^3、時間方向の格子サイズが 18（これは 122 MeV という温度に対応する）という特定のパラメターに対する配位生成を行った。結果として、合計 213 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-*t*ime eXpansion (SF*t*X) 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

九州大学情報基盤研究開発センター

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ンフェルミオンという定式化を用いる。ウィルソンフェルミオンには、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-*t*ime eXpansion (SF*t*X) 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ので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。SF*t*X 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 × 9 ヶ月（2019 年 5 月 2020 年 1 月）ということもあり、ここでは、格子間隔が 0.09 fm、空間方向の格子サイズが 32^3、時間方向の格子サイズが 18（これは 122 MeV という温度に対応する）という特定のパラメター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。今回、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

5　今年度の研究成果の詳細

当 JHPCN の研究計画では、上記パラメター（格子間隔 0.09 fm、格子サイズが $32^3 \times 18$）でのゲージ場配位生成を、計算資源が割り当てられた 2020 年 1 月まで、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 系列分行った。当研究開始の 2019 年 4 月 25 日から最終日（1 月 31 日）までに、計 213 個のゲージ場配位が得られた。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り、当 JHPCN 共同研究の計算資源に大変感謝している。参考までに、エントロピー密度と呼ばれる熱力学量（横軸は温度）の研究計画開始時点（2019 年 3 月）でのものと、2019 年 10 月 7 日時点で他の計算資源も用いて得ていた 308 個の配位を用いた preliminary な計算結果を掲載する。 これらを比較すると、

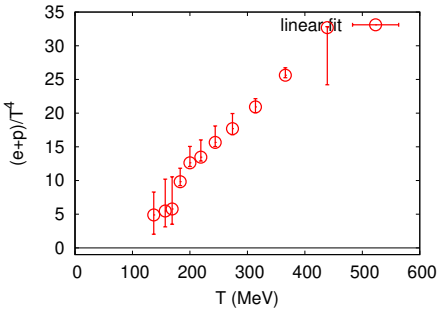

図 1　エントロピー密度（2019 年 3 月時点での計算結果）

誤差は少ししか削減されていないように見えるが、後者の結果では系統誤差の慎重な評価が含

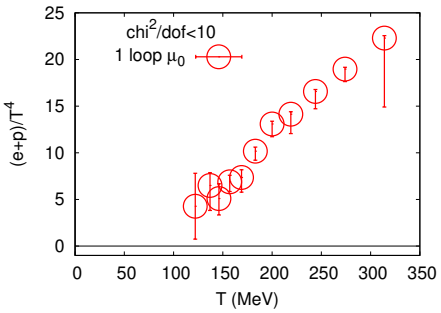

図 2　エントロピー密度（2019 年 10 月時点での計算結果）

まれており、より信頼できる結果と言える。実は、当研究計画で得られた 122 MeV の配位のほとんどは、まだ熱力学量の測定に用いておらず、122 MeV のものは依然統計誤差が大きい。この計算は早急に進める必要があると考えている。

6　今年度の進捗状況と今後の展望

上で述べたように、研究計画期間の 9 ヶ月間に、格子間隔が 0.09 fm、温度が 122 MeV でのゲージ場配位を計 213 個得ることができた。これは申請時に予想していた 500 個程度の半分以下であるが、計算待ち時間を考えると、ほぼの 100% の稼働率と考えられる。今後は、得られた 122 MeV での配位を用いて、熱力学量の測定を早急に行い、論文として発表したい。

7　研究業績一覧（発表予定も含む）

学術論文　（査読あり）

- S. Ejiri, S. Itagaki, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Kiyohara, M. Shirogane, T. Umeda [WHOT-QCD], "End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD", Physical Review D **101**, no.5, 054505 (2020) [arXiv:1912.10500 [hep-lat]].

国際会議プロシーディングス　（査読あり）

- K. Kanaya, A. Baba, A. Suzuki, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, "Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow", Proceeding of Science **LATTICE2019**, 088 (2019) [arXiv:1910.13036 [hep-lat]].
- S. Ejiri, S. Itagaki, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Kiyohara, M. Shirogane, Y. Taniguchi, T. Umeda [WHOT-QCD], "Determination of the endpoint of the first order deconfiniement phase transition in the heavy quark region of QCD", [arXiv:1912.11426 [hep-lat]], Proceeding of Science **LATTICE2019** (2019) に掲載予定
- A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, "Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow", [arXiv:2001.01524 [hep-lat]], Proceeding of Science **LATTICE2019** (2019) に掲載予定

国際会議発表　（査読なし）

- H. Suzuki, "Gradient flow and the EMT on the lattice", invited talk at "Frontiers in Lattice QCD and related topics", 15–26 April (2019), Kyoto, Japan
- K. Kanaya, "Study of $2+1$ flavor finite-temperature QCD with improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow", talk given at Lattice

2019, 16–22 June (2019), Wuhan, China

- Y. Taniguchi, "Non-perturbative renormalization of Kaon B parameter using gradient flow", talk given at Lattice 2019, 16–22 June (2019), Wuhan, China
- S. Ejiri, "Determination of the endpoint of the first order deconfiniement phase transition in the heavy quark region of QCD", talk given at Lattice 2019, 16–22 June (2019), Wuhan, China
- M. Kitazawa, "Stress Tensor on the Lattice", invited talk at "Frontiers in Lattice QCD and related topics", 15–26 April (2019), Kyoto, Japan
- H. Suzuki, "Application of the gradient flow to the energy–momentum tensor", invited talk at the international workshop "Advances in Lattice Gauge Theory 2019", 22 July–9 August (2019), CERN, Geneva, Switzerland

国内会議発表　（査読なし）

その他（特許，プレス発表，著書等）

- 鈴木博, "グラディエントフロー—エネルギー運動量テンソルへの応用を中心として—", 原子核研究, 2019 年 9 月 64(1) 52–64
- 鈴木博, Summer School, "Frontiers in Lattice QCD" における集中講義 "Gradient Flow", 1–3 July (2019), 北京大学, Beijing, China
- Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda [WHOT-QCD], "Nf=2+1 QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients", [arXiv:2005.00251 [hep-lat]]. Physical Review D に投稿中