

## 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

ビッグバン直後の宇宙初期はきわめて高温高密度であり、現在の宇宙で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。QGP 状態の実現を確かめるために、重イオン衝突実験が行われ、QGP 状態への相転移を示すいくつかの証拠が得られている。実験の興味の対象は、状態方程式の解明を始めとする QGP の物性研究へと移りつつある。

本プロジェクトでは、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、動的クォークを含む 2+1 フレーバー QCD で、ウィルソン型クォーク作用を用いた格子 QCD の大規模数値シミュレーションにより研究した。相転移前後で圧力、エネルギー密度、エントロピーなどの熱力学量が増加する様子を第一原理から計算することを目的とする。本プロジェクトでは、グラジエントフロー (gradient flow) という新しい計算技法に基づく SFtX 法 (small flow-time expansion method) の応用に挑戦した。SFtX 法は、連続極限のくりこまれた物理量に対応する量を格子上で評価する一般的な計算方法で、これまで、格子による連続的な並進対称性の破れやカイラル対称性の破れのために複雑で重い処理が要求されていたエネルギー運動量テンソル(EMT)やカイラル感受率、位相感受率などの物理量が格子で直接評価できるようになる。EMT の対角成分は状態方程式だが、この方法では、従来の方法で要求されていた非摂動的ベータ関数等の計算が不要であるだけでなく、フローによるクーリング効果によってゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の計算手法に比べて高精度の計算が可能になることが期待される。また、EMT の非対角成分や相関関項から、輸送係数などの熱力学特性を格子上で直接計算することが可能になる。

我々は、動的クォークを含む QCD への SFtX 法の応用の第一段階として、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 の研究を実行し、従来の方法による状態方程式を良く再現することや、カイラル感受率の disconnected 部分がクロスオーバー温度でピークを示すことを示した。また、位相感受率を、グルーオンを用いた定義と、それを、連続理論のカイラル関係式を用いてクォークで表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを初めて示した。これらより、SFtX 法が極めて有用であることがわかった。

本プロジェクトでは、これを発展させ、現実のクォーク質量 (物理点) での研究や、

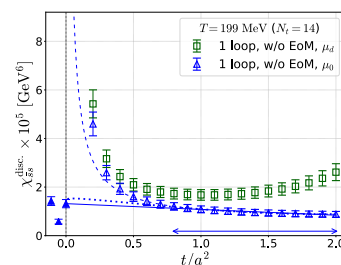
SF $\epsilon$ X 法の基本的性質の研究、SF $\epsilon$ X 法の改良に向けた研究などを推進した。

## 2. 研究成果の内容

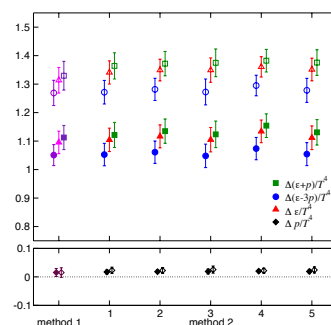
SF $\epsilon$ X 法でフローさせた演算子と物理量を結びつけるマッチング係数の効果を研究し、マッチング係数を摂動計算するときのくりこみスケールを適切に選ぶことで、シグナルが大きく改善され、SF $\epsilon$ X 法の安定性と適用範囲が改善されることを示した。この研究では、マッチング係数における 2 ループ項の効果や、2 ループ計算で使われた運動方程式の影響も研究したが、我々の研究している 2+1 フレーバー QCD の熱力学量では改良に大きくは寄与しないことがわかった[5]。

また、SF $\epsilon$ X 法を応用して、クエンチ QCD の有限温度 1 次相転移点における潜熱と圧力ギャップを研究した。3 つの格子間隔、2 つの空間体積を使った系統的シミュレーションにより、SF $\epsilon$ X 法に必要な連続極限とフロー時間ゼロへの二重外挿が、外挿の順番を変えても同じ結果が得られ、信頼できる形で遂行できることを示した。また、圧力ギャップの最終結果が期待どおりゼロとなることを示した。こうして、連続極限における潜熱を精密で信頼性が高く測定することに成功した[7]。

SF $\epsilon$ X 法の改良に関する研究成果を応用した、現実のクォーク質量（物理点）での 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを推進し、熱力学量と相転移温度に関する中間結果を発表した[2,3,9 他]。また、SF $\epsilon$ X 法の応用に向けた研究を行なった[1,4,6,8 他]



ud クォークが重い  $N_f=2+1$  QCD におけるカイラル感受率のフロー時間依存性。従来のくりこみスケール  $\mu_d$  と新しい  $\mu_0$  スケールの比較。[5]



クエンチ QCD の潜熱と圧力ギャップ。二重外挿の順番が違う method 1, 2 の比較。[7]

## 3. 学際共同利用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、2+1 フレーバー QCD における SF $\epsilon$ X 法の改良に向けた研究、クエンチ QCD を使った SF $\epsilon$ X 法の基本的性質と潜熱の研究、および、現実のクォーク質量（物理点）での 2+1 フレーバー QCD シミュレーションの一部に使われ、研究を進める上で重要な役割を果たした。

## 4. 今後の展望

SF $\epsilon$ X 法の改良に関する研究成果を使って、現実のクォーク質量（物理点）での 2+1 フレーバー QCD の研究を推進する。物理点での配位生成には大きな計算が要求されるので、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを系統的に遂行している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

[1] Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Determination of the endpoint of the first order deconfinement phase transition in the heavy quark region, PoS (LATTICE 2019) 071, pp.1-7 (2020) , DOI:10.22323/1.363.0071

[2] Kazuyuki Kanaya, Atsushi Baba, Asobu Suzuki, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Study of 2+1 flavor finite-temperature QCD using improved Wilson quarks at the physical point with the gradient flow, PoS (LATTICE 2019) 088, pp.1-7 (2020) , DOI:10.22323/1.363.0088

[3] Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Calculation of PCAC mass with Wilson fermion using gradient flow, PoS (LATTICE 2019) 191, pp.1-7 (2020) , DOI:10.22323/1.363.0191

[4] Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Atsushi Kiyohara, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), End point of the first-order phase transition of QCD in the heavy quark region by reweighting from quenched QCD, Phys. Rev. D 101, No.5, ref.054505, pp.1-17 (2020) , DOI:10.1103/PhysRevD.101.054505

[5] Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration),  $N_f=2+1$  QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients, Phys. Rev. D 102, No.1, ref.014510, pp.1-25 (2020) , DOI:10.1103/PhysRevD.102.014510, 10.1103/PhysRevD.102.059903

[6] Asobu Suzuki, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow, Phys. Rev. D 102, No.3, ref.034508, pp.1-13 (2020) , DOI:10.1103/PhysRevD.102.034508

[7] Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, 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, Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, ref.013B08, pp.1-26 (2021), DOI:10.1093/ptep/ptaa184 <<http://dx.doi.org/10.1093/ptep/ptaa184>>

(2) 学会発表

[8] 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 (東工大, 東京都 (online), 5.18, 2020)

[9] 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)

[10] 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)

[11] 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)

[12] 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)

[13] 金谷 和至, "Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature N<sub>f</sub>=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)

[14] 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)

- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 金谷 和至, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 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)
- [18] 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)
- [19] 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)
- [20] Kazuyuki Kanaya, ``Thermodynamic observables in (2+1)-flavor QCD applying the gradient-flow method'', CCS 12th international symposium 2020 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba, Japan (online), 10.06, 2020)
- [21] Masakiyo Kitazawa, ``Energy-momentum tensor on the lattice'', Extreme Nonequilibrium QCD (ICTS, TIFR, Bengaluru, India (online), 10.5-9, 2020)
- [22] 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)
- [23] 鈴木 博, 金谷 和至, 谷口 裕介, 江尻 信司, 梅田 貴士, 北澤 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)

[24] 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)

[25] 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)

[26] 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)

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	○	25,200	
Oakforest-PACS	○	994,560	
※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。			