

Gradient flow を用いた (2+1)-flavor QCD 熱力学量の研究

(2+1)-flavor QCD thermodynamics using the gradient flow

金谷 和至

筑波大学数理物質系

1. 研究目的

宇宙論として広く受け入れられているビッグバンモデルによると、宇宙初期には高温高密度の状態が実現されており、そこでは通常ならば核子の中に閉じ込められているクォークとグルーオンが解放されて自由に飛び回るプラズマ状態が実現されていたと予想されている。高温でクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)が実現されていることを確かめるために、重イオン衝突の実験が行われ、通常の原子核からプラズマ状態への相転移が起きていることを示すいくつかの証拠が得られている。QGP の存在に対して確証を深めつつある中、実験の興味の対象は QGP の満たすべき状態方程式の解明を始めとするプラズマ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、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に変化する様子を第一原理から計算することを目的とする。このプロジェクトでは、勾配流法 (gradient flow) という、ゲージ場や物質場を粗視化する新しい計算技法の応用に挑戦した。勾配流法に基づく鈴木の方法を用いれば、これまで複雑な処理が要求されていたエネルギー運動量テンソル(EMT)などを格子で直接評価できる。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情報が不要であるだけでなく、勾配流法によるクーリングの効果によって、誤差の大部分を占める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。

これまでに、クエンチ近似では勾配流法を用いた高精度計算が行われ、その有効性が示されている。このプロジェクトでは、動的クォークを含む 2+1 フレーバー full QCD で、鈴木の方法に基づく様々な熱力学量の評価を組織的に遂行した。

2. 研究成果の内容

我々の研究グループではクォーク・グルーオン・プラズマの研究に関して、主に二つのテーマに取り組んでいる。

- a. エネルギー運動量テンソルの一点関数から導出されるエネルギー密度、圧力、エントロピー密度等の熱力学量とその状態方程式。
- b. エネルギー運動量テンソルの相関関数から導出される粘性係数等の輸送係数。

更にそれぞれのテーマに対しては計算コストの観点から次の二段階に分けて取り組んでいる。

- 1) コストを抑えるために up, down クォークの質量を現実のものよりも重くした計算を行い、手法のテストを行う。
- 2) up, down クォークの質量を現実に近い物理的な値においた計算を遂行する。

a.のテーマに関しては重いクォークを用いた 1)の計算を完了し、2)の計算に移行している。物理的なクォーク質量における計算には既に前年度から取り組んでいたが、温度 190 MeV 以下にあるはずの相転移点を観測できないでいた。本研究では温度 122, 137 MeV におけるゲージ配位の生成を行い、相転移点の確認を主目的として設定した。図 1 はカイラル対称性に関するカイラル感受率を温度の関数として描いたものである。そのピークの位置がカイラル対称性が回復する相転移点を表す。図から明らかなように 137 MeV 付近にピークがあることが示唆される。熱力学量の測定も同時に行っており、図 2 にはエントロピー密度を温度の関数として描いてある。

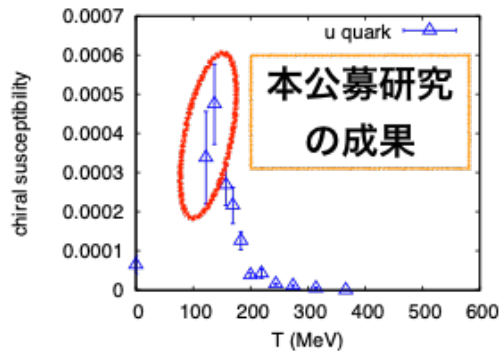


図 1

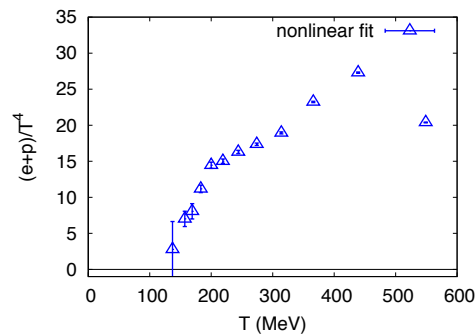


図 2

b.のテーマに関しては重いクォークを用いた 1)の研究に取り組んでいる。本プロジェクトではエネルギー運動量テンソルの相関関数の計算を行い、そこから粘性係数を引き出す取り組みを遂行した。図 3 は温度 $T=232[\text{MeV}]$ におけるエネルギー運動量テンソルの 2 点関数をユークリッド時間の関数として描いたものである。Gradient flow の仮想時間を変化させた時の様子を色の違いとして書いている。実線は Breit-Wigner 型のモデルを仮定したフィットである。図 4 は Breit-Wigner 型および hard thermal loop 型のモデルを仮定したフィットから引き出された粘性係数を温度の関数として描画したものである。相転移温度以上では、モデルによる不定性の範囲内で、実験値である $\eta/s \sim 0.12$ や AdS/CFT の予言である $\eta/s = 1/4\pi$ と大きくは矛盾しない値を得たが、信頼できる系統誤差の評価に向けて、更なる研究が必要である。

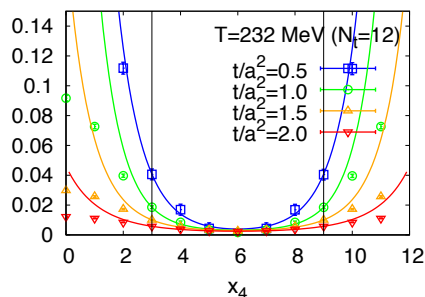


図 3

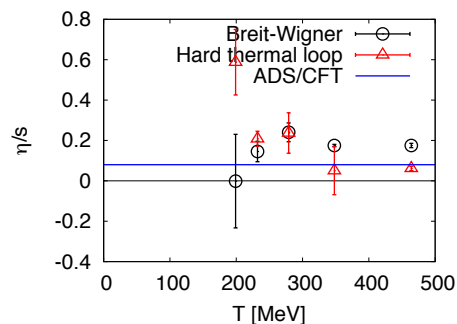


図 4

3. 学際共同利用として実施した意義

2で述べた研究段階の内、1)に関してはゲージ配位の生成は既に完了しており、本プロジェクトではエネルギー運動量テンソルの観測量の計算を行った。その中で相関関数の計算には大きなコストがかかり大規模計算機が必須であった。

更に2)の段階に関してはゲージ配位の生成から行わなければならない、膨大なコストが要求される。特に温度122, 137[MeV]ではゲージ配位の生成とエネルギー運動量テンソルの測定を行う必要があり、大規模計算機なくしては達成不能な研究テーマである。

4. 今後の展望

重いクォークを用いる1)の段階に関しては大規模計算機を用いるべき計算はほぼ完了している。物理的なクォークを持ちる2)の段階については図1、2の該当するデータから明らかなように統計精度が不十分である。従ってこれらの温度においてゲージ配位の生成とエネルギー運動量テンソルの測定を続ける必要がある。またスタッガードフェルミオンを用いた先行研究から物理的なクォーク質量における相転移温度は145[MeV]付近にあることが示唆されている。そのため温度146[MeV]におけるゲージ配位の生成にも取り組む必要がある。これらのテーマに関しては平成31年度の大規模共同利用に申請を行っている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- Y. Taniguchi, A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, T. Shimojo, A. Suzuki, H. Suzuki, T. Umeda, “Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD for QGP viscosities”, Proceeding of Science, LATTICE2018, pp166 (1-7)
- A. Baba, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, T. Shimojo, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, “Measuring of chiral susceptibility using gradient flow”, Proceeding of Science, LATTICE2018, pp173 (1-7)
- M. Shirogane, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, “Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow”, Proceeding of Science, LATTICE2018, pp164 (1-7)

(2) 学会発表

- Y. Taniguchi, “Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD for QGP viscosities”, July 26 2018, Kellogg Hotel and Conference Center, Michigan State University (USA)
- A. Baba, “Measuring of chiral susceptibility using gradient flow”, July 26

2018, Kellogg Hotel and Conference Center , Michigan State University (USA)

- M. Shirogane, “Equation of state near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory using gradient flow”, July 26 2018, Kellogg Hotel and Conference Center , Michigan State University (USA)
- 谷口裕介, “QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究”, 2018/9/16, 信州大学 (松本市)
- 鈴木博, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 白金瑞樹, 鈴木遊, 鈴木博, 谷口裕介, 馬場惇, “Thermodynamic quantities in the $N_f = 2 + 1$ QCD; the case of somewhat heavy u, d quarks”, 2018/9/16, 信州大学 (松本市)
- 谷口裕介, “QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究”, 2018/8/28, 理化学研究所 (和光市)
- 金谷和至, “グラジエントフローによる $2+1$ フレーバーQCD の状態方程式 -- 格子間隔依存性の検証”, 2018/8/28, 理化学研究所 (和光市)
- 谷口裕介, “QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究(II)”, 2019/3/15, 九州大学 (福岡市)
- 金谷和至, “グラジエントフローによる格子 $2+1$ フレーバーQCD の熱力学研究”, 2019/3/15, 九州大学 (福岡市)

(3) その他

本研究による学位取得：博士1名

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
COMA	○		
Oakforest-PACS	○		
※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。			