

平成 30 年 6 月 15 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800130

研究課題名(和文)有限温度・密度QCDの臨界点探索

研究課題名(英文)Search for critical point of QCD with finite temperature and density

研究代表者

武田 真滋 (Takeda, Shinji)

金沢大学・数物科学系・助教

研究者番号：60577881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、有限温度・密度量子色力学の臨界点をモンテカルロ法により決定することが目標である。この系には符号問題が存在することから、その方策として位相再重み付け法を採用した。特に、その位相を厳密に計算することにより揺らぎを抑え、かつ、申請者が開発した高速計算アルゴリズムの開発により高統計を実現したことによって、符号問題をある程度制御することに成功した。その結果、目標であった温度方向格子サイズ6での臨界点を定めることができた。具体的には、クォーク質量とクォーク化学ポテンシャルで張られる空間では臨界点が集合を成し「臨界線」を形成するのであるが、その曲率を統計的有意に決定することができた。

研究成果の概要(英文)：A purpose of this study is to locate a critical point of QCD with finite temperature and density. We applied the phase re-weighting method to the system to deal with the complex Boltzmann weight. In particular, we succeeded to obtain very precise results thanks to computing the phase factor exactly up to numerical precision with a new algorithm we developed. As a result, we were able to determine the critical point at temporal lattice size 6, which was a goal of the study. Furthermore, we have fixed a curvature of critical line spanned in the quark mass-chemical potential plane.

研究分野：素粒子理論

キーワード：量子色力学 モンテカルロ法 臨界点 有限温度 有限密度

1. 研究開始当初の背景

宇宙創成直後の世界はクォークやグルオンなどの素粒子が自由に飛び回るようなクォーク・グルオンプラズマ相 (QGP 相) と呼ばれる超高温状態であった。その後、宇宙の膨張とともに温度が下がり、クォークやグルオンがハドロン (陽子や中性子など) に凝縮し、現在我々の身の回りにあるような物質が存在する状態 (ハドロン相) になったと考えられている。この QGP 相からハドロン相への移行において急激な状態の変化、つまり、相転移が起きていたと考えられている。この「相転移の強さ (次数)」や「相転移が起きる温度」などを定量的に決定することは当該分野において非常に重要なテーマである。

これらの情報を理論的に引き出すにはクォークやグルオンの相互作用を統一的に記述できる理論：量子色力学 (QCD) が出発点となる。しかし、低温のハドロン相では理論の強結合性によってクォークがハドロン内に閉じ込められているため、弱結合性を利用した摂動展開法は適用できない。そのため、展開法に依拠しないモンテカルロ法による格子 QCD シミュレーションが第一原理計算として重宝されており、これまで有限温度 QCD の相構造解析において重要な役割を果たしてきた実績がある。しかし、クォーク密度が非零になった場合、モンテカルロ法が適用できないという「符号問題」が生じてしまう。そのため、高密度領域の相構造の定量的な理解は進んでいないというのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では 2 つの目的を設定し、各々について以下で述べる。

(1) 有限温度・密度 QCD の臨界線：

まず、3 つの軽いクォーク (アップ、ダウン、ストレンジ) が存在し、その質量と化学ポテンシャルが縮退している状況を考える。その場合、質量パラメータと化学ポテンシャルのパラメータが各々 1 つずつとなる。そして、そのクォーク質量とクォーク化学ポテンシャルを軸とする 2 次元平面を考え、その平面上的各点における相転移の次数を示した図 (拡張されたコロンビアプロットと呼ぶ) を完成させることが 1 つ目の目標である。この図において、1 次相転移の領域とクロスオーバーの領域を分ける境界線上では 2 次相転移を示すことが知られており、その線は臨界線とも呼ばれる。その臨界線の形状を定量的に決定することが具体的な目標である。

(2) コロンビアプロット (ゼロ密度)：

格子 QCD シミュレーションは量子色力学の第一原理計算という位置づけであるとすでに述べた。これは、現実世界を忠実に再現することはもちろんのことであるが、一方で、理論のパラメータを変化させることによ

って仮想的な世界を作り出し、そこでの理論の性質を調べることも可能になる。例えば、現実世界のクォーク質量では QCD の有限温度相転移の「強さ」は非常に弱くクロスオーバーであることが知られているが、クォーク質量を現実世界の値から離れた時に相転移の次数はどうなるかなどを調べることができる。このような研究は純粋にアカデミックな興味で行われるだけでなく、素粒子現象論において新モデルを構築する際などにダイナミクスを適切に取り込んだ定量的な情報を提供できるなど、様々な用途に使われるという側面も持ち合わせている。

本研究で行った零密度計算の目的は下の通りである。まず、クォーク化学ポテンシャルをゼロに固定し、3 つの軽いクォークを用意する。そのうち 2 つのクォーク (アップとダウン) の質量を縮退させ、残りの 1 つのクォーク (ストレンジ) 質量は別のパラメータとして扱う。つまり、2 つのクォーク質量パラメータ空間 (平面) を考える。このセットアップを 2 + 1 フレーバー QCD と呼ぶこともある。その平面上で相転移の次数を表したものをコンビアプロットと呼ぶ。この平面上においても臨界線が存在し、その形状を定量的に調ることが本研究のもう一つの目標である。

3. 研究の方法

格子 QCD シミュレーションはハイブリッドモンテカルロ法に基づいて行い、実行プログラムは Berlin QCD を採用した。これらの計算を実行するためには大規模計算機が必要であったため、筑波大学計算科学センターによる学際共同利用の制度を使い COMA や HA-PACS などの計算資源を利用した。また、理化学研究所の Hokusai Great Wave なども利用した。

有限密度系の場合に生じる符号問題への対策としては位相再重み付けを採用した。これは、空間体積を大きくすると破綻する方法ではあるが、小体積では符号問題を制御することができる。さらに、クォーク行列式に由来する位相を数値精度内で厳密に計算することにより、統計的な揺らぎをある程度抑制することに成功した。

4. 研究成果

(1) 有限温度・密度 QCD の臨界線：

本研究で得られた、拡張されたコロンビアプロットを図 1 に示す。横軸はクォーク化学ポテンシャルに比例する量、縦軸はクォーク質量に比例する量である。赤と青の線が臨界線である。線の色の違いは物理インプットの違いであるが、結果はその差が小さいことを示している。結果として、臨界線は化学ポテンシャルを大きくすると臨界クォーク質量が大きくなる。つまり、曲率が正であることを示している。一方、先行研究ではその曲率がほぼゼロであるという結果が得られていた

のとは対照的に、本研究によってそれが正であることが統計的に有意な形で示されたことになる。しかし、ここで得られた結果は有限の格子間隔で得られたものであり、格子離散化の系統誤差を含んでいる。将来的にはその不定性を除去するために、さらに細かい格子間隔での計算を行い最終的には連続極限を実行する必要がある。

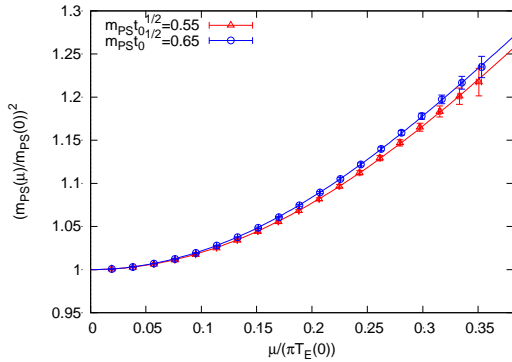


図 1 コーク質量(縦軸)と化学ポテンシャル(横軸)平面上の臨界線

(2) コロンビアプロット(ゼロ密度):
2 + 1 フレーバークォーク QCD のコロンビアプロット上の臨界線の結果を図 2 に示した。横軸はアップ・ダウンクォーク質量、縦軸はストレンジクォーク質量に比例する量である。図 2 の上図中の endpoints を繋ぎ合わせた線が臨界線であり、それより下側は 1 次相転移領域、上側はクロスオーバー領域である。図中の左下から右上に伸びる直線は 3 フレーバ対称な場所を表している。図 2 の下図は臨界線の傾きを表している。3 フレーバ対称線と臨界線が交わる点での傾きが -2 であることが本研究により明らかとなった。先行研究では有意に -2 からずれた結果が出ていたが、本研究ではそれとは異なる結果が得られた。ただし、この結果もまだ連続極限を実行していないため、将来的には大規模計算が必要となる。

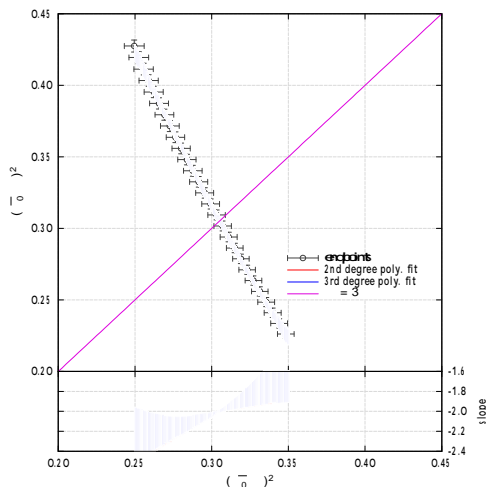


図 2 コロンビアプロット

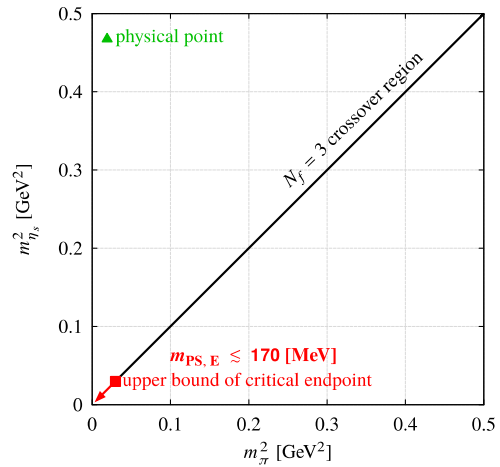


図 3 コロンビアプロット上の臨界点の上限値

これまで有限格子間隔の結果を示してきたが、最後に 3 フレーバ対称という条件付きではあるが、臨界点の連続極限を取った結果を図 3 に示す。縦軸と横軸は図 2 と同じようなものである。同図上の黒い 3 フレーバ対称な線上の臨界点が格子間隔を細かくするにつれて左下に移動し、最終的に臨界点の上限値として赤四角の点を評価するに至った。その上限値はパイ中間子質量換算で 170MeV となることがわかった。(現実世界のパイ中間子の質量は約 140MeV)つまり、1 次相転移領域は非常に狭いことが分かった。この上限値は、先行研究で得られた上限値には及ばないものの、計算のセットアップに平方根化という特殊なトリックを使わずに得られた点を強調しておきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 9 件)

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Continuum extrapolation of critical point for finite temperature QCD with $N_f=3$ ”, Lattice 2017 proceedings, 査読無 <https://arxiv.org/abs/1710.08057>

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Critical point phase transition for finite temperature 3-flavor QCD with non-perturbatively $O(a)$ improved Wilson fermions at $N_t=10$ ”, Phys. Rev. D. 96, 034523 (2017), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.96.034523

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Update on $N_f=3$ finite temperature QCD phase

structure with Wilson-Clover fermion action”, Lattice 2016 proceedings, 査読無

<https://arxiv.org/abs/1612.05371>

Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Critical endline of the finite temperature phase transition for 2+1 flavor QCD around the SU(3)-flavor symmetric point”, Phys. Rev. D. 94, 114507 (2016), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.94.114507

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Phase structure of QCD at finite temperature and density by Wilson-Clover fermions”, Lattice 2015 proceedings, 査読無 <https://arxiv.org/abs/1510.07734>

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudo scalar meson mass for three-flavor QCD”, Phys. Rev. D. 92, 114511 (2015), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.92.114511

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Scalar correlators near the 3-flavor thermal critical point”, Lattice 2014 proceedings, 査読無 <https://arxiv.org/abs/1501.06555>

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Critical endpoint of finite temperature phase transition for three flavor QCD”, Phys. Rev. D. 91, 014508 (2015), 査読有 DOI:10.1103/PhysRevD.91.014508

X-Y. Jin, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, A. Ukawa, “Critical end point of Nf=3 QCD at finite temperature and density”, Lattice 2014 proceedings, 査読無 <https://arxiv.org/abs/1411.1148>

[学会発表](計5件)

Shinji Takeda, “Continuum extrapolation of critical point for finite temperature QCD with Nf=3”, The 35th International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2017 (Granada, Spain, June 20, 2017).

Shinji Takeda, “Update of Nf=3 finite temperature QCD phase structure with Wilson-Clover fermions”, The 34th International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2016 (UK, Southampton, July 26, 2016).

Shinji Takeda, “Phase structure of Nf=3 QCD at finite temperature and density by Wilson Clover fermions”, The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2015 (Japan, Kobe, July 14, 2015).

Shinji Takeda, “Critical end point in Nf=3 QCD with finite density and temperature”, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory, Lattice 2014 (Columbia Univ. USA, NY, June 24, 2014).

Shinji Takeda, “Curvature of critical line in μ - T plane for 3-flavor QCD”, Lattice QCD at finite temperature and density (Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, March, 12 2015)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 真滋 (TAKEDA, Shinji)
金沢大学・理工研究域数物科学系・助教
研究者番号：60577881

(2) 研究協力者

中村 宜文 (NAKAMURA, Yoshifumi)
理化学研究所・計算科学研究センター・研究員
研究者番号：40598231