

課題名(タイトル):

カイラルフェルミオンで探る QCD 相図

利用者氏名:

○青木保道(1)、金森逸作(1)、中村宜文(1)

理研における所属研究室名:

(1) 計算科学研究センター 連続系場の理論研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

QCD の有限温度相転移の研究は長い歴史をもち、今なお多くの研究が続けられているが、その全容はまだ明らかになっていない。

QCD (量子色力学) は素粒子標準模型のパーツの一つであり、目に見える宇宙を構成する物質の 99% の質量をその動力学で生み出す。その質量の殆どを担う陽子や中性子を構成するクォークはその電荷(カラー)の閉じ込めという QCD の著しい性質により単独では発見されない。この閉じ込めの性質は、しかし、充分高温では失われることが予想され、実際、米国 RHIC での重イオン衝突実験やヨーロッパの LHC 実験では、充分高温でクォークとクォーク間に働く力を媒介するグルーオンが閉じ込めから解き放たれ、プラズマと解釈される状態に到達したことが観測されている。

宇宙の歴史を紐解き、その開闢から今日に遡る過程で、これら実験室で実現されるプラズマ状態から、宇宙が冷えて陽子や中性子(ハドロン)が作られる(従って 99% の質量を生み出す)際、閉じ込めの発動によって、宇宙の熱力学に大きな変化が生じる。この変化が真の相転移であるか、発散のないクロスオーバーなのかの答えは、物質生成の謎の解明に大きな影響を与え、また、実際に相転移が存在したならば、その残骸の重力波による検出も期待される。

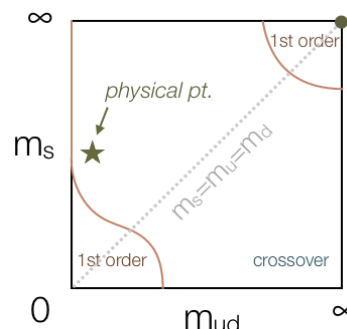
QCD の有限温度での振る舞いの定量的解析には、格子ゲージ理論に基づく数値的手法が強力である。これまでの格子ゲージ理論に基づく計算結果から、このプラズマ相とハドロン相に遷移する温度では相転移はなく、クロスオーバー的な遷移であるとされるが、その理論的背景の全容が理解されているわけではない。実際実験でも相転移の兆候は発見されていないが、充分弱い相転移の場合には発見は難しいことに注意が必要である。

QCD は標準模型のパラメタであるクォーク質量を決

定すると完全に決まる理論で、現実世界を記述するパラメタセットは唯一無二であり、これを物理点と呼ぶ。理論的興味からパラメタを物理点からずらす(実験ではできない操作)と、まず、相転移が必ずどこかにある事が分かる。これはカイラル対称性(クォークのスピンの右巻と左巻きのそれぞれの状態で独立にフレーバー(u(p), d(own), s(trange)等の種類)を交換する対称性)が自発的に破れた低温相とそれが回復する高温相は、クォーク質量がゼロの極限で解析的に接続できないからである。少なくともゼロ質量点は相転移が必須で、さらにその周辺でも相転移が起こりうる。現実世界(物理点)に相転移が無いならば、それは、たまたま、物理点のクォーク質量がそのような領域にあったということである。当然、物理点の質量の近傍の理解をすることは、現実世界のより深い理解にもつながる。ここまでは、クォークの密度がゼロの場合の議論であったが、有限密度(RHIC など様々な実験で探索されている)の相転移を探るためにゼロ密度の相境界を伸ばして探る方法が有力である。この物理の理解は、究極的には、中性子星など密度が更に高い状態の理解に繋がっていく。このような興味深い有限密度方向の探索を始めるために、ゼロ密度の相境界を求めることが先決であることは言うまでも無い。

[研究目的詳細]

QCD の有限温度相転移を理解するためにもっとも基本的な図示の方法が所謂コロンビアプロット(右図)である。QCD の相互作用を行う全部で 6 種類(フレーバ



ー)のクォークのうち、重い方3つは相転移に対して摂動的な小さい影響しかない。従って、シミュレーションでは軽い方3つ(u, d, s クォーク)のみを扱えば充

分である。さらに、アイソスピン(u と d の交換)が極めて良い対称性であるため、質量  $m_u = m_d = m_{ud}$  と表記し、一つのパラメタと見なす。もう一つのパラメタは s クォークの質量  $m_s$  である。コロンビア大学の共同研究 (Brown et al, 1990) は格子 QCD 数値計算により、 $m_{ud}$  と  $m_s$  の値を横軸と縦軸に取り、相転移の領域と相境界を表す線を初めて図示した。このときから、より精密な計算が行われるに至った現在まで、一般的に認知されている「コロンビアプロット」はここに図示されているものであるが、連続極限の予言が得られているのは右上の頂点 ( $m_{ud} = m_s = \infty$ ) と★(物理点)のみで、その他の全ての情報は、想像図に近く、実際、**相境界の位置や形は未定**である。また、物理点の情報も、連続極限はとっているものの、それに疑義があり得るスタガードフェルミオンによる計算である事が不満足な点である。

本研究では QCD 相図: コロンビアプロットのうち左下四半の決定を行う。これにより QCD 相図の重要なピースが埋まり、物理点直上での相転移の有無について揺るぎない基礎を与えると共に、決定した相境界線から有限密度方向への伸展(相境界面)を行う応用研究の基盤構築を図る。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究ではコロンビアプロットの左下四半の解明をめざし、対角線上のスキャンにより相境界を求めことを目標とする。格子 QCD に基づく大規模数値計算により、いくつかの格子間隔で結果を導き、それをゼロ間隔に外挿することにより連続極限の結果を導出することが最終目標である。格子 QCD シミュレーションでは、カイラルフェルミオンの実用的な定式化である、Domain Wall Fermion (DWF) — Möbius 定式化と stout smearing をゲージ場に施したものをフェルミオンに作用させる改良をおこなったものを用いる。全く同じ定式化は JLQCD 共同研究の2フレーバー相転移の解析や、ゼロ温度の 2+1 フレーバーシミュレーションで実績がある。シミュレーションには、「Grid」と呼ばれる Intel Xeon Phi や Skylake で高い演算効率がでるよう開発されたオープンソースソフトウェアを、本課題用にパラメタチューニングしたものを用いる。昨年度は時間方向の格子点数  $N_t=4$  として、粗い格子のシミュレーションを行った。これにより、連続極限に連続的に移行できる弱結合領域(プラケット)が 0.5 より大きいことが目安)では、温度が高く、そこでは擬

臨界点のクォーク質量が大きすぎて、相境界を探ることが困難である可能性が高いことが分かった(格子点数が一つのため、離散化誤差であることも否定できていなかった)。このため、今年度は温度を 33% 落とした、 $N_t=6$  のシミュレーションを中心に行った。有限温度計算の時間方向サイズを  $N_t=6$  に、空間サイズを  $12^3$  に固定し、ゲージ結合  $\beta=3.8, 3.9, 4.0, 4.1, 4.2$  にとり、それぞれでクォーク質量をスキャンする。また、高温側の  $\beta=4.1$  と  $4.2$  ではゼロ温度シミュレーション( $N_t=24$ )を行い、有限温度との比較を行う。

3. 結果

$\beta=4.0$  のプラケットを図1に、その感受率を図2に示す。

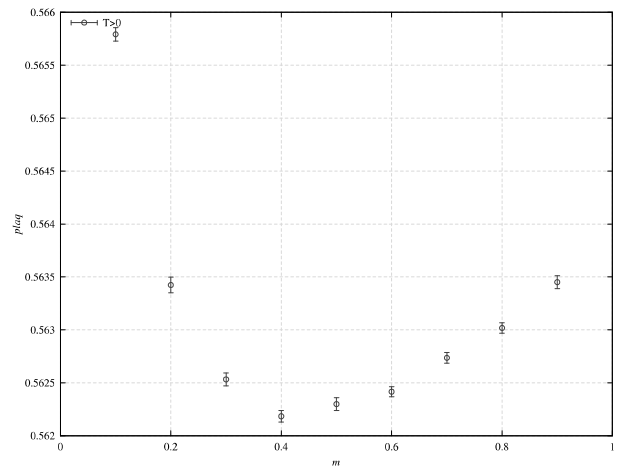


図 1  $\beta=4$  におけるプラケットをクォーク質量の関数としてプロット

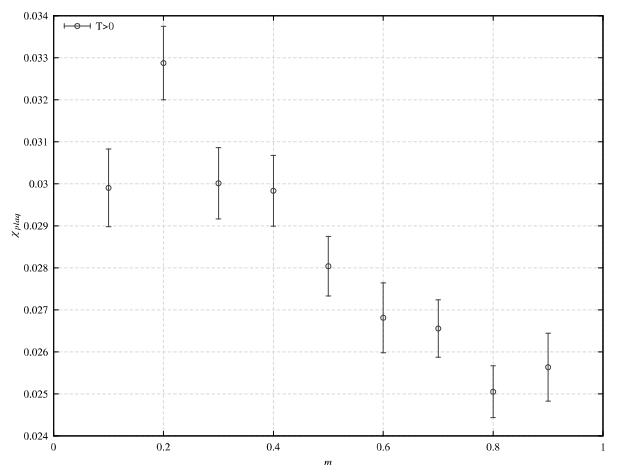


図 2  $\beta=4$  におけるプラケットサセプタビリティをクォーク質量の関数としてプロット

図に見られるように、 $m=0.2$  付近にクロスオーバー的な振る舞いが確認される。昨年の  $\beta=4.0, N_t=4$  (50%高温) では  $m=0.5$  付近に同様の遷移現象がみられたので、温度の低下により、擬臨界点質量が小さくなっている。これは、質量

とともに擬臨界点温度が上昇していることになり、物理的な転移現象を見ていることの傍証となる。

$Nt=6$  を固定したまま、 $\beta$  を上げて  $\beta=4.1$  とすると、温度が高くなる。この際のプラケットの振る舞いを図 3 に示す。

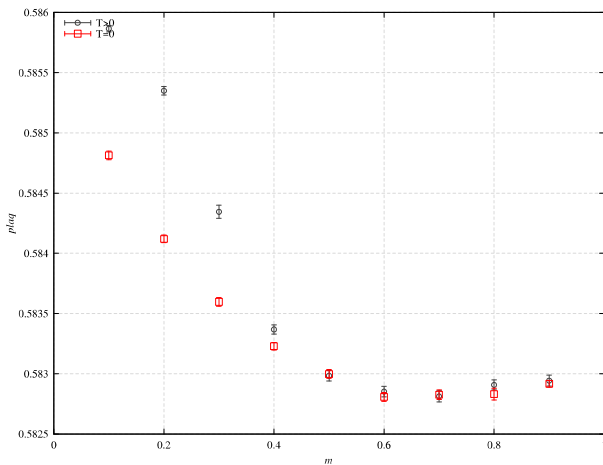


図 3  $\beta=4.1$ におけるプラケットをクォーク質量の関数としてプロット

$\beta=4.0$ (図 1)に比べ、プラケットの変化が大きい領域が右にシフトしており、擬臨界点は  $m=0.3$  当りになりそうである。このパラメタでは、ゼロ温度のシミュレーションも行い、結果を赤で示している。 $m>0.5$  では温度依存性がなく、その質量域では  $Nt=6$  に相当する温度は低温相側で有る事を示している。一方、 $m<0.5$  での両者の違いは確かに温度効果がある事を示している。

図 4 は、 $\beta=3.9$  の結果である。 $\beta=4.0$ (図 1)より低温を見ていることになる。

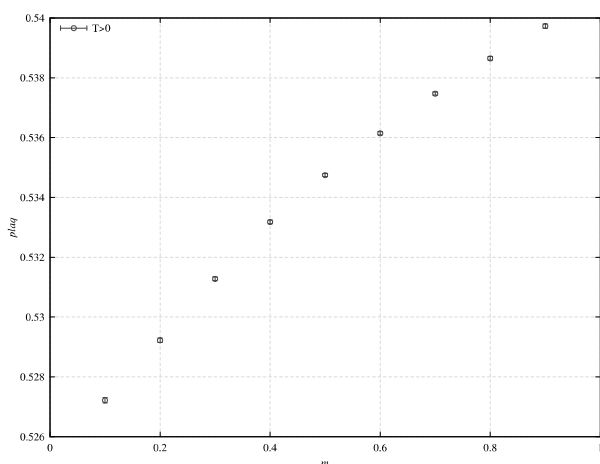


図 4  $\beta=3.9$ におけるプラケットをクォーク質量の関数としてプロット

ここでは、プラケットは、クォーク質量の関数として単調増大であり、 $\beta \geq 4.0$  と異なる。また、プラケットの値自体も 0.5 に近く、強結合領域との境界域であることが示唆される。また逆に、 $\beta \geq 4.0$  では弱結合領域で擬臨界現象が見られていることから、連続極限で生き残る擬臨界点で有る事が示

唆される。

以上の結果から、 $Nt=6$ 、 $\beta \geq 4.0$  のプラケットの振る舞いから見られる擬臨界現象は離散化誤差起因ではなく、温度によるもので、また、 $Nt=4$  の結果とも矛盾がない。 $\beta=4.0$  では、 $Nt=4, 6$  で物理的な擬臨界現象を捉えていると考えられる。

#### 4. まとめ

コロンビアプロットの対角線上の相境界を求めるために、カイラル対称性がほぼ厳密なドメインウォールフェルミオンのシミュレーションにより相構造の調査を行っている。ゲージ結合が  $\beta \geq 4.0$  では意味のある有限温度クロスオーバーが観測されている可能性が高く、 $\beta=4.0$  では、温度の異なる  $Nt=4$ (昨年度)と  $Nt=6$ (今年度)で、クロスオーバークォーク質量の変化は、温度が高く( $Nt=4$ )なると増大するという、期待された通りの方向に認められている。

#### 5. 今後の計画・展望

コロンビアプロットの対角線上の相境界は、擬臨界を示すクロスオーバー(クォーク質量  $m$  大)と一次転移( $m$  小)領域の境である。 $\beta \geq 4.0$  を固定して  $m$  を下げたとき、擬臨界温度は下がるので、臨界点をプローブするためには、温度  $T=1/(a \cdot Nt)$  ( $a=a(\beta)$  は  $\beta$  で決まる格子間隔)の関係により、 $Nt$  を大きくする必要がある。これまで、 $Nt=4$  および、6 を調べたが、今後は 8 以上を系統的に調べて行く必要がある。また、空間方向の格子サイズ  $N_s$  は十分大きく取る必要があり、最終的にはサイズを複数用意して体積スケーリングを行う必要がある。

こらまではパラメタスキャンのため、QCD のゲージ場の自由度から求められる物理量を調べてきたが、精密なスケーリング研究には、フェルミオンの自由度も調べる必要がある。ゲージ場の幾何学的性質も含めた多角的な解析を進めて、端緒を掴んだ対角線上の相構造の追跡を進めたい。

2020 年度 利用研究成果リスト

**【ポスター発表】**

- [1] “カイラルフェルミオンで探る QCD 相図”, 青木保道, 中村宜文, 金森逸作, 橋本省二, 金児隆志、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、令和 2 年 10 月 29 日(木)~30 日(金)、オンライン
- [2] “Finite temperature phase transition for three flavor QCD with domain wall fermions”, Yoshifumi Nakamura, the 3rd R-CCS international symposium, February 15 - 16, 2020, RIKEN R-CCS, Kobe, Japan, ONLINE