

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。

標準模型中の素粒子-クォークは QCD 相互作用をし、そこから作られる複合粒子-ハドロンが実験施設や宇宙線中に観測される。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放され、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。

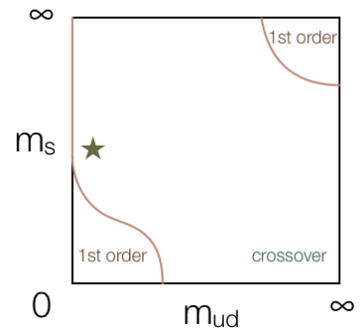
QCD の有限温度での振る舞いの理論的研究は、このハドロン相とプラズマ相の間の相転移の性質がメインテーマであり、現在のコンセンサスによると、相転移はなく、クロスオーバー的な遷移でこれらの「相」が繋がっている。実際実験でも相転移の兆候は発見されていない(充分弱い相転移の場合には発見は難しいことに注意)。

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る。理論的興味からこのパラメタをずらす(実験でできない操作)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(クォークの進行方向に対するスピン方向の交換に対する対称性)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。現実世界に相転移が無いならば、それは、たまたま、現実世界のクォーク質量がそのような領域にあったと言うことである。当然、現実世界の質量の近

傍の理解をすることは、現実世界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(実験室や中性子星で実現する)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。そのためにはゼロ密度の相境界を求めることが先決である。

## 【研究目的】

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ッ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に取り組む。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を究極の目標としている。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り、その数値計算上の基本的性質や特徴の理解に多大な蓄積がある。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きるよう開発されたオープンソースソフトウェアを用いる。今年度は、等質量 3 フレーバー理論の臨界終点の同定を時間方向の格子サイズ  $N_t=4$ 、空間方向の格子サイズ  $N_s=16$  に固定して行った。ゲージ結合定数と、クォーク質量を変えたシミュレーションを行い、プラケットとトポロジーを測定して相転移点を決定する。全てのパラメタに対し、Hybrid Monte Carlo 計算を 10,000 MD トラジェクトリ行った。

### 3. 結果

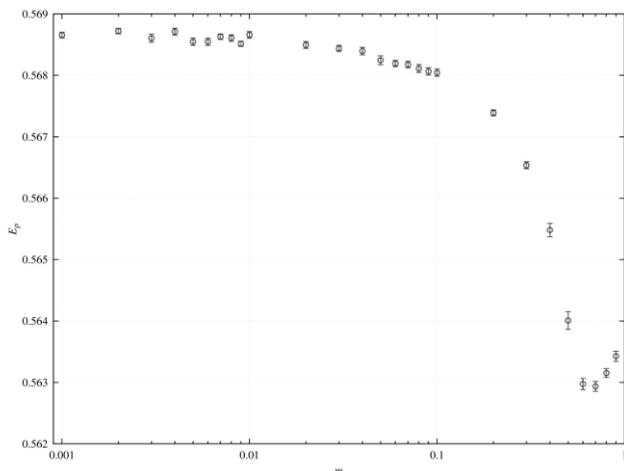


図 1  $\beta=4$  におけるプラケットをクォーク質量の対数関数としてプロットした図

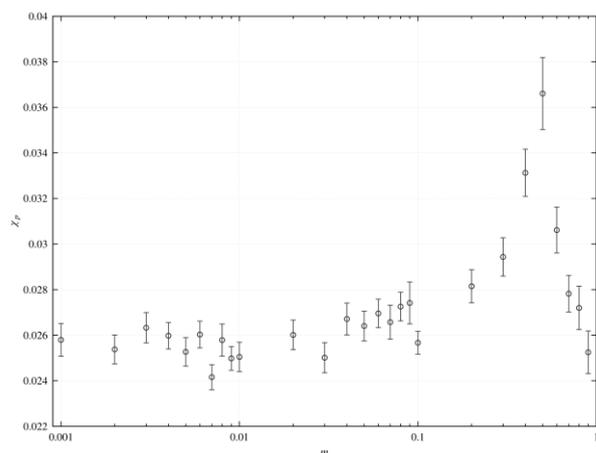


図 2  $\beta=4$  におけるプラケットサセプタビリティをクォーク質量の対数関数としてプロットした図

図 1 は、ゲージ結合定数  $\beta=4$  におけるプラケットの期待値をクォーク質量の対数関数としてプロットしたものである。

図 2 は、ゲージ結合定数  $\beta=4$  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対数関数としてプロットしたものである。図 1 から、プラケットがクォーク質量  $m=0.5$  付近で急激に変化していることがわかる。また、図 2 では、プラケットサセプタビリティがクォーク質量  $m=0.5$  付近でピークを持っていることがわかる。これらは、クォーク質量  $m=0.5$  付近に相転移点があることを示している。

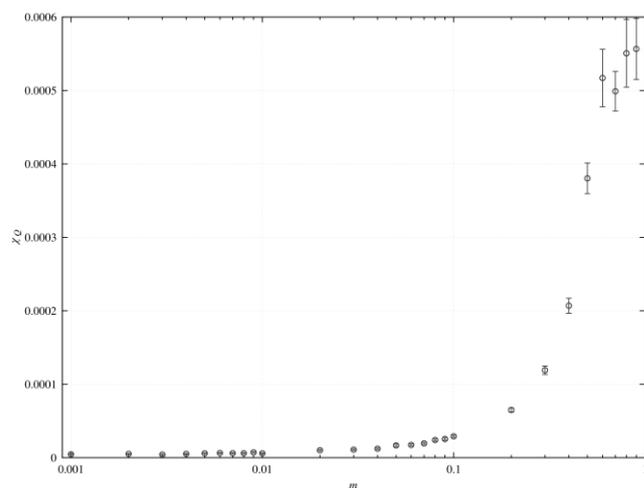


図 3  $\beta=4$  におけるトポロジカルサセプタビリティをクォーク質量の対数関数としてプロットした図

図 3 は、ゲージ結合定数  $\beta=4$  におけるトポロジカルサセプタビリティをクォーク質量の対数関数としてプロットしたものである。この図からもクォーク質量  $m=0.5$  付近でピークを持っていることがわかる。これもクォーク質量  $m=0.5$  付近に相転移点があることを示

ている。クォーク質量  $m=0.5$  付近において、ビンダーキウムラントの測定も行ったが統計が不十分であり、また空間方向の格子サイズも一つであったため、相転移の次数が1次であるか2次であるか、それともクロスオーバーであるかはまだ判別できていない。

#### 4. まとめ

コロンビアプロットの左下四半の解明に向けた格子QCDの有限温度計算を3フレーバーのDomain Wall Fermionを用い、時間方向の格子サイズが4で空間方向の格子サイズが16で行った。ゲージ結合定数とクォーク質量を変えたシミュレーションを10,000トラジェクトリ行い、プラケットとトポロジカルチャージを測定し、 $\beta=4$ において、 $m=0.5$ 近傍が相転移点であることを発見した。ビンダーキウムラントの測定には統計が不十分であったため、相転移の次数はまだ判別できていない。

#### 5. 今後の計画・展望

引き続き、コロンビアプロットの左下四半の解明に向けた格子QCDの有限温度計算を3フレーバーのDomain Wall Fermionを用いて行う。時間方向の格子サイズが4においては、 $\beta=4$ において、 $m=0.5$ 近傍に的を絞って、大きな空間方向の格子サイズでのシミュレーションも行い、ビンダーキウムラントを測定して、相転移の次数を確定させる予定である。これと並行して、時間方向の格子サイズが6もしくは8において、おおよその相転移点を探す準備研究を始める予定である。