

課題名 (タイトル) :

有限温度量子色力学の臨界点の精密決定

利用者氏名 : ○武田真滋 藏増嘉伸 中村宜文

所属 : 計算科学研究機構 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

本研究課題の目的は有限温度量子色力学の相構造をモンテカルロシミュレーションによる第一原理計算によって決定することである。特に、本課題ではアップ、ダウン、ストレンジクォークのすべての質量が縮退した系（3フレーバー理論）に対する相構造を調べる。これは将来行う予定である、現実世界に近いアップとダウンの質量は縮退しているがストレンジ質量だけが異なる 2 + 1 フレーバー理論に向けての第一ステージという位置づけである。先行研究によれば、軽い質量領域では 1 次相転移を示す一方で、比較的重い領域ではクロスオーバーであると考えられている。特に一次相転移線の終点である臨界点の特定が我々の研究コミュニティにおける喫緊の課題であり、それが本課題の具体的な目標である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

量子色力学の基本的物理自由度はクォーク場とグルオン場である。クォークの寄与はフェルミオン演算子の行列式として表されることから、実質的には、純粋グルオン場系へと帰着される。ただし、相互作用が非局所的になるが、そのような場合でも効率が良いとされるハイブリッドモンテカルロ法によってグルオン配位を生成する。これらの配位を用いて諸々の物理量を計算し、その平均値と誤差を評価するというのが格子量子色力学シミュレーションの基本方針である。具体的には、上記計算手法により生成されたグルオン配位を用いて、秩序変数に対応するカイラル凝縮の感受率・歪度・尖度を計算した。

カイラル凝縮の計算にはノイズ法を用い、各配位に対して 10 回のノイズを生成した。統計誤差に対してノイズの誤差は十分小さいことも確認した。

3. 結果

実際のシミュレーションで必要となる主なパラメータは、温度方向格子サイズ、3次元空間格子サイズ、結合定数 β 、クォーク質量に関するパラメータ κ である。温度方向格子サイズは 10 に固定し、一方で、空間格子サイズは有限サイズスケールリングを行うために 16^3 , 20^3 , 24^3 , 28^3 を採用した。結合定数は 5 点とり、それぞれの結合定数に対してクォーク質量を 2~8 点ほど振って、感受率のピーク位置や歪度がゼロとなる点を特定し、転移点を決定した。感受率の典型的な結果を図 1 に示した。また、転移点での尖度も同時に求めた。この解析ではマルチアンサンブル法を採用し、得られたグルオン配位の情報を最大限活用している。また、各パラメータセットに対して、グルオン配位は数千個生成することができた。

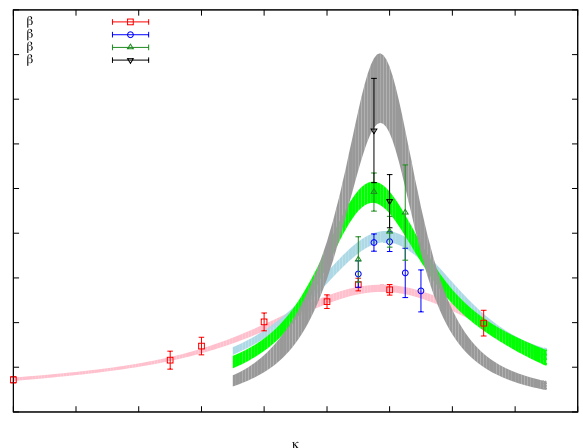


図 1 結合定数 $\beta=1.78$ の場合のカイラル凝縮の感受率。横軸はクォーク質量に関するパラメータ κ である。空間体積は 16^3 から 28^3 まで変化させた。帯はマルチアンサンブル法による 1σ の範囲を表している。体積を大きくすると感受率のピークが有意に高くなる様子が捉えられ、有限サイズスケールリング法の感度が十分あることを示している。

次に、尖度交差法により臨界点を特定した。具体的には、転移点上での尖度の値(尖度の最小値)を結合定数の関数としてプロットし、様々な空間格子サイズの線が交わる場所を臨界点と特定した(図 2 参照)。

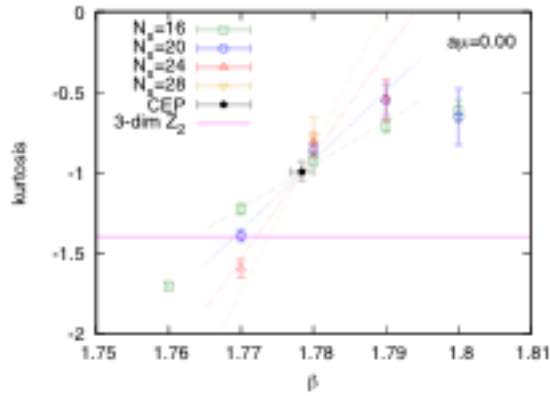


図 2 尖度交差法。横軸は結合定数 β 、縦軸は転移点上での尖度の値である。様々な体積の線が交わる点が臨界点(黒五角形の点)である。

4. まとめ

本課題で得られた臨界点の情報は以下の通りである。

$$\beta = 1.77796(48)$$

$$\kappa = 0.1396661(17)$$

$$K_E = -0.974(25) : \text{臨界点上での尖度の値}$$

$$\chi^2/\text{dof} = 0.22$$

5. 今後の計画・展望

本課題で得られた臨界点は、あくまでシミュレーションパラメータ空間上におけるものである。今後は、物理スケールを設定するために、その臨界点上でのハドロン質量を求め、ハドロン質量を軸に持つ相空間上での臨界点を特定することが課題である。この結果と、これまで得られた小さい温度格子サイズの結果とを組み合わせ、連続極限を実行する予定である。

また、本課題で得られた臨界点上での尖度の値 K_E が 3 次元 Z_2 ユニバーサリティークラスの値 (-1.396) から有意にずれていることが確認された。これは、小さい温度方向サイズで得られた既存の結果では相容れないものであった。これを説明する理由として以下の 2 つのことが考えられ

る。①空間体積が小さいために最も支配的であるべき有限サイズ効果が見えていない可能性。②カイラル凝縮にはベキ型発散が内在していると考えられているがそれが見えている可能性。今後は、まず①の可能性を追求するために、混合演算子解析などを行い、本意でない有限サイズ効果の軽減を試みる。②については、発散の特定とそれを除去する方法を試みる方針である。

この問題に決着がついた後は、現実世界により近い 2 + 1 フレーバー理論に進む予定である。

平成 27 年度 利用研究成果リスト

【国際会議、学会などでの口頭発表】

口頭発表：中村宜文、「Toward the continuum limit of the critical endline of finite temperature QCD」、
LATTICE 2015、2015 年 7 月 15 日、神戸国際会議場