非等方格子上での有限温度での screening mass の測定

野村幸治[1]、宮村修 (広島大学理学研究科)、
梅田貴士 (筑波大学計算物理学研究センター)、
松古栄夫 (京都大学基礎物理学研究所)

1 はじめに

有限温度での QCD では、ある温度においてカイラル対称性が回復し閉じ込め相から非閉じ込め相への相転移を起して、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれるクォークとグルーオンが弱く相互作用している状態になると考えられている。しかしながら、相転移温度付近でどのような状態となっているかは、理論、実験の両面でまだ良く解っていないことが多い。有限温度の QCD の構造を知るための重要な量として、ハドロンの相関関数がある。ある量子数の演算子の二点相関関数を測ることにより、その量子数を持ったハドロンが二点間でどのような中間状態として相関に寄与しているのかを調べることができる。この研究では、有限温度での種々の相関関数を、格子 QCD シミュレーションを用いて調べることによって、相転移温度付近での QCD の構造を明らかにすることを目指している。格子 QCD は本来四次元ミンコフスキー空間の連続時空上の QCD を、四次元ユークリッド空間の格子上で定式化した理論である。これによって経路積分をモンテカルロ法によって数値的に評価することが可能となり、非摂動論的な解析を行うことができる。

格子 QCD では、温度 T の状態は (ユークリッド) 時間方向のサイズを $1/T$ と取ることによって得られるため、高温になるに従って時間方向の自由度を十分に取ることが難しくなる。このような、ユークリッド時間方向の相関関数から本来の有限温度スペクトル関数と関係付けられる情報を引き出す方法は、現在開発が進められているが、現段階では十分な信頼性を持つには至っていない。一方、空間方向への相関関数の計算は、有限温度格子 QCD の計算では古くから行われているが、$T \geq T_c$ での カラー一重項モードの存在の可能性など、確定していない興味深い問題も多い [1, 2, 3, 4]。そこでこの研究では、空間方向の相関関数を解析して遮蔽の構造を調べる。時間方向と空間方向の相関関数の関係は明らかではないが、これらを相補的に調べることによって、有限温度での QCD の性質を深く理解することが出来ると思われる。今回は、このような解析のための手法の開発を中心に述べる。

2 我々のアプローチ

相関関数の構造の解明には出来るだけ多くの相関関数の点の自由度が必要である。我々は空間方向のハドロンの相関関数を高解像度で測定するために、z 方向に格子間隔の小さい非等方格子を用いた。非等方格子上では、非摂動論的に調節すべきパラメータが増えるというデメリットがあるが、これによる系統誤差は制御することが可能である [5]。今回の研究では、z 方向のメソンの相関関数の計算を行った。空間方向の相関関数に対して、時間方向の場合と同様なスペクトル関数を対応させて考えることが出来る。このスペクトル関数の構造を調べるために、以下のような二つの方法による解析を行う。

- スペクトル関数の形を仮定したフィット。
  今回は、スペクトル関数がいくつかのデルタ関数的なピークを持っている場合を仮定、すなわち single/two/three pole の形によるフィットを行い、質量を求める。

- 最大エントロピー法 (MEM) による、相関関数からスペクトル関数の再構成 [6]。

これらの方法の結果を比較し、コンシステントかどうか等を検討することによって、その有効性や信頼性などについて議論する。

[1] 発表は野村が行った。

3　シミュレーションと結果

数値計算は、ダイナミカルクォークの効果を無視したクエンチ近似で行った。ゲージ場は、非等方ウィルソン・プラケット作用を用いて、$\beta = 5.75$、格子の非等方性 $\xi = a/a_z = 4$ で生成された。ここで、a_z は z 方向の、a は他の方向の格子間隔であり、ストリングテンションから決めた格子間隔は、$a_z^{-1} \cong 4$ GeV である。格子サイズは、$12^2 \times 96 \times N_t$、 N_t =12, 5, 3, 2 で、相転移温度 T_c と比較して、それぞれほぼ 0, $0.8T_c$, $1.3T_c$, $2T_c$ の温度に対応する。統計数はゼロ温度では 400、その他の温度では 510 である。クォーク場としては、非等方 $O(a)$ 改良ウィルソン作用 [5] を用いている。ホッピングパラメータ κ は 0.124, 0.122, 0.120 の 三点を取り、そのクォーク質量は $m_q = (0.5 \sim 1.5)m_s$ (m_s はストレンジクォーク質量) に相当する。

以下では、$m_q \simeq 0.5m_s$ の場合の、擬スカラーチャンネルについて、ポールフィットの結果とスペクトル関数の結果について示す。フィットの結果は、フィット領域を $L_{min} \sim L_{max}$、$L_{max} = 48$ (固定) とし、L_{min} 変化させたときの質量を示している。その時、各状態の質量の値が一定になる領域では、その領域での相関関数に対して、スペクトル関数をポール構造の形に表すことがよい近似になっていると考えられる。また、スペクトル関数の結果に見えているピークの幅は、現在の解析では、最大エントロピー法の不定性に起因するものであり、物理的な幅を表しているわけではないと考えるべきである。

図 1 は、ゼロ温度での結果である。まず左図のフィットの結果では、それぞれのフィットにおいて、質量の値がフィットレンジに対しほとんど変化しない領域が存在し、そこでは基底状態、第一励基状態ともに各フィットがコンシステントな質量の値を与えている。このことから、これらの状態に対しては、スペクトル関数に対するポール近似はかなり良いものと考えられ、物理的に予想されることに一致している。またスペクトル関数の結果ともコンシステントになっている。

同様の解析を温度 $0.8T_c$ で行ったのが図 2 である。フィットの方法では、ゼロ温度の場合とほぼ同じ結果が得られた。このことから、この温度での空間方向の相関関数は、ゼロ温度の場合と比較して構造に大きな変化がないと考えられる。一方、スペクトル関数の結果は、フィットの結果の第一励基状態を二つのピークで表したような形となっている。この場合、フィットの方法の方が不定性の影響が小さいと考えられるので、MEM によるスペクトル関数が正しく再現されていないと見るべきだと思われる。

図 3 は温度 $1.3T_c$ の場合である。フィットの結果では、それぞれのフィットでの質量の値がフィットレンジにほぼ依らない領域が存在し、基底状態、第一励基状態ともにコンシステントな質量となっている。スペクトル関数の結果もコンシステントな位置にピークを持っている。これらより、スペクトル関数をポール構造で近似することはかなりよいデータの記述になっていると考えられる。また基底状態の質量は二倍の最低松原振動数よりやや下にあるが、クォークの束縛状態等について定量的な議論を行うことは、今回用いた格子がかなり粗いため難しい。

4　まとめ

有限温度格子 QCD シミュレーションを用いて、空間方向のメソン相関関数を測定し、single/two/three ポールフィット と最大エントロピー法によるスペクトル関数の再構成という二つの方法で解析した。その結果、定性的にはほぼコンシステントな結果を得ることができたが一部の励基状態についてコンシステントでない結果がとなった。このことから、スペクトル関数の性質の調べるためには、いくつかの相補的な方法を用いて、結果を比較しながら注意深く見て行く必要があると考えられる。今回の二つの解析法は、有限温度の空間方向の相関関数の解析に有望であり、今後、統計を上げたり、より小さい格子間隔の格子を用いることによって、より定量的な解析が可能になると思われる。また、フィットで他のスペクトル関数の形 (たとえば励基状態の質量の幅など) を仮定することや、メソンの励基状態に対するグルーボール等の寄与などを調べてみることも興味深い。

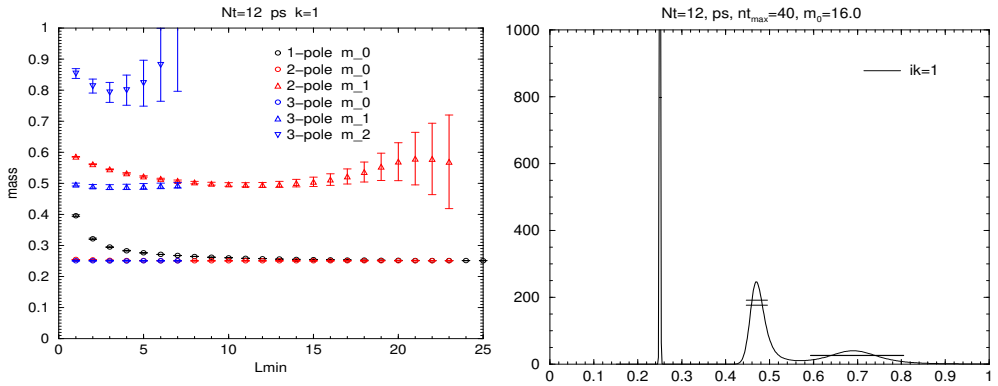

図 1: 温度ゼロでの結果。 左図はフィット、右図は MEM によって求めたスペクトル関数。

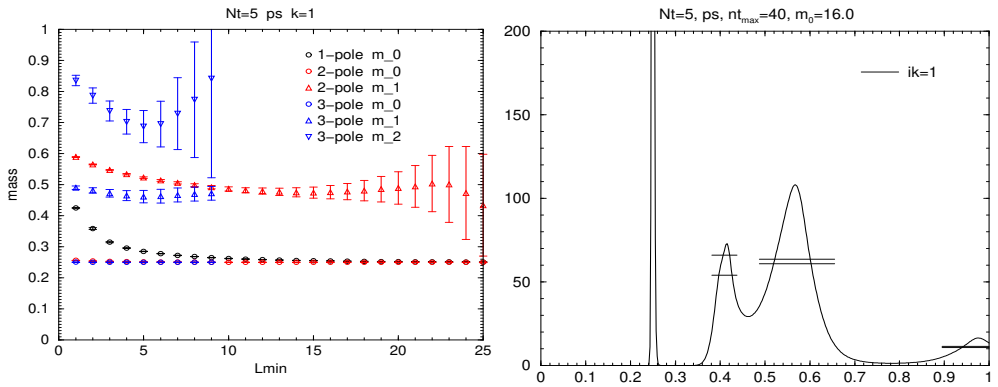

図 2: 温度 0.8Tc での結果。

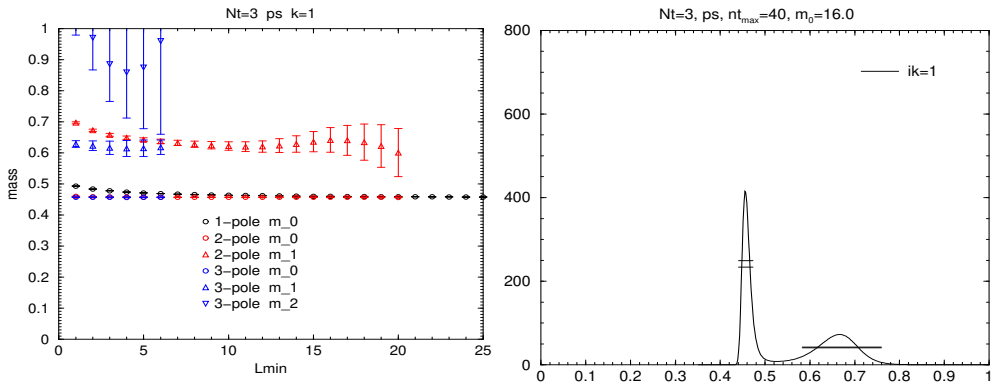

図 3: 温度 1.3Tc での結果。

参考文献

[1] C. Deter, Phys. Rev. D 32 (1985) 276.

[2] E. Laermann and P. Schmidt, hep-lat/0103037.

[3] K. D. Born *et al.*, Phys. Rev. Lett. 67 (1991) 302.

[4] S. Gupta Phys. Lett. B 288 (1992) 171.

[5] H. Matsufuru, T. Onogi and T. Umeda, hep-lat/0107001, to appear in Phys. Rev. D.

[6] Y. Nakahara, M. Asakawa and T. Hatuda, Phys. Rev. D 60 (1999) 091503.