

クォーク・グルーオン・プラズマ中の中間子の遮蔽効果*

前澤 祐 (Brookhaven National Laboratory)

概要

本研究では有限温度中における中間子の遮蔽質量を格子QCDシミュレーションにより計算した。遮蔽質量は空間方向の相関関数の指数減衰として定義され、高温媒質中における中間子内のクォーク構造の表出の指標となる。本研究ではクォーク場の格子化として高改良スタガード型作用を用い、特にストレンジとチャームからなる中間子に注目した。その結果、ストレンジ中間子には相転移温度以下でも大きな温度効果があらわれ、一方チャーモニウムは1.2倍の転移温度程度まで熱的影響を受けないことを見出した。これはハドロン相でさえも熱媒質の影響によりストレンジ中間子は強く遮蔽されるのに対し、チャーモニウムはクォーク・グルーオン・プラズマ相でもある温度までは安定に存在できることを示唆する。

1 序

有限温度での中間子の性質の解明は、重イオン衝突実験により生成された高温媒質中でのクォークとグルーオンの振舞いを理解する上で重要である[1]。特に熱媒質中では重い中間子の生成が抑制される重中間子抑制(Quarkonium suppression)が起き、その観測は実験におけるクォーク・グルーオン・プラズマ生成の直接のシグナルになると期待されている[2]。重中間子抑制は中間子の熱的変形と深く関係するため、その性質の理論的解明は重要な課題である。

QCDが導く多彩な物理現象は、格子シミュレーションにより第一原理から非摂動的に計算できる。一般に格子QCDはユークリッド時空上で定義され、中間子の質量や構造は時間方向の相関関数から計算される。しかしながら有限温度では松原形式により時間方向は温度の逆数($1/T$)で物理的に制限されるため、このような計算が難しくなる。限られた時間方向の相関から定量的な情報を得るための方法がいくつか提案されているが(例えば、最大エントロピー法や変分法など[3])、それらの手法は非等方格子上で有用となるため多くの計算が媒質中の動的なクォークを無視したクエンチ近似で行われている。

一方、空間方向には原理的な制限がないため、中間子相関関数の空間方向への計算から多くの物理的な情報を得ることができる。また、中間子の質量と構造を決めるスペクトル関数は空間相関関数とも関係するため、この関数の計算からも熱媒質中での中間子の性質を引き出すことができる。空間相関関数は遠距離で指数関数的に減衰し、その減衰は遮蔽質量により特徴づけられる。遮蔽質量の温度依存性($M(T)$)は、以下のように熱媒質中の中間子の性質を反映する。熱的影響のない十分低温では、中間子の空間相関関数は時間方向の相関関数と一致するため、遮蔽質量の大きさは対応する中間子のゼロ温度での極質量(pole mass; m_0)と等価になる。温度が上昇すると熱媒質の効果により遮蔽質量は変化し、高温極限では漸近的自由性のため、中間子を構成するクォークと反クォークは束縛状態を作ることができず自由粒子として振舞う。このとき遮蔽質量は2つの自由クォークによる値、 $M_{\text{free}}(T) = 2\sqrt{(\pi T)^2 + m_q^2}$ に収束する。ここで πT はフェルミオンの最低次の松原振幅、 m_q は裸のクォーク質量を表す。従って遮蔽質量の温度依存性は中間子の熱的変形を特徴づけることができる。

本研究では遮蔽質量の温度依存性を、高改良スタガード型作用(Highly Improved Staggered Quarks; HISQ)を用いた格子QCDシミュレーションにより計算する。HISQ作用は従来の作用に比べ、スタガード型固有の格子化による誤差であるテイスト対称性の破れを小さく抑えることに成功した[4]。そのため高い精度で遮蔽質量の温度依存性を見積もることができる。本研究では特にストレンジネス($s\bar{s}$)、オープンチャーム($s\bar{c}$)、チャーモニウム($c\bar{c}$)に注目し、擬スカラー(pseudo-scalar; PS)とベクター(vector; V)チャンネルの基底状態の遮蔽質量を計算する。これらの中間子はそれぞれ($\eta_{s\bar{s}}, \phi$)、(D_s, D_s^*)、($\eta_c, J/\psi$)に対応する。ここで $\eta_{s\bar{s}}$ は軽いフレーバーの混ざりを考慮しない η 状態であり、その質量は $M_{\eta_{s\bar{s}}} = \sqrt{2M_K^2 - M_\pi^2}$ で与えられる。

*本抄録はA. Bazavov氏(Iowa), F. Karsch氏(BNL, Bielefeld), S. Mukherjee氏(BNL), P. Petreczky氏(BNL)との共同研究の結果である。

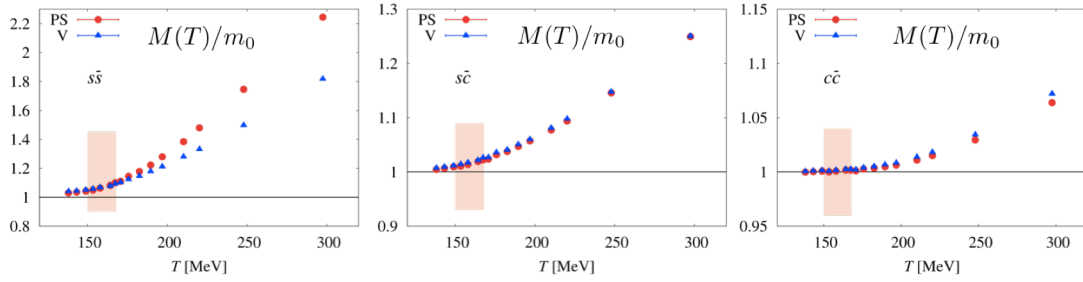


図1: 遮蔽質量の温度依存性。結果は遮蔽質量を対応するゼロ温度での極質量で規格化している。左からストレンジネス($s\bar{s}$)、オープンチャーム($s\bar{c}$)、チャーモニウム($c\bar{c}$)に対応する。

2 格子QCDシミュレーションの結果

本シミュレーションはHISQ作用による2+1フレーバーQCDに基づいて行われる。格子サイズは $N_s^3 \times N_\tau = 48^3 \times 12$ とし、温度領域 $T = 138 \sim 245$ MeVで計算を行う。さらに高温での計算のため比 $N_s/N_\tau = 4$ を固定し、 $N_\tau = 10, 8, 6, 4$ で同様のシミュレーションを行う。これは温度領域 $T = 297 \sim 743$ MeVに対応する。ストレンジクォーク質量(m_s)は現実の値に固定し、軽いクォーク質量は $m_l = m_s/20$ とする。これらの値ではゼロ温度でパイ中間子とK中間子の質量がそれぞれ160 MeV、504 MeVとなる。本研究では動的なチャームクォークの寄与は無視している。文献[4]において同様のパラメータでカイラル相転移の振舞いについて研究され、 $O(N)$ スケーリング則の結果から相転移温度は $T_c \sim 159 \pm 9$ MeVと見積もられている。

図1は遮蔽質量の温度依存性の計算結果である。横軸は温度、縦軸は $M(T)/m_0$ すなわち、遮蔽質量を対応するゼロ温度での極質量で規格化した大きさを表す。左からストレンジネス($s\bar{s}$)、オープンチャーム($s\bar{c}$)、チャーモニウム($c\bar{c}$)の結果であり、バンドはクロスオーバー相転移の転移温度を表す。●(▲)は擬スカラー(ベクター)チャンネルの結果である。共通の傾向として、低温では1に近い値になり温度上昇に伴い遮蔽質量は徐々に増加することが分かる。これは熱媒質の効果を受けにくい低温では遮蔽質量のスペクトル関数はゼロ温度の形から大きな変更を受けず、一方高温では中間子は大きな熱的変形を受けるため遮蔽質量の値が極質量から大きく変化する。遮蔽質量は高温極限で $M_{\text{free}}(T) = 2\sqrt{(\pi T)^2 + m_q^2}$ という値に収束するため、その振舞いは高温で温度に比例して増加する。

さらに定量的な温度依存性に注目すると、ストレンジネスは転移温度以下で既に1からずれているのに対し、オープンチャームは転移温度以上で顕著なずれが見られ、一方チャーモニウムは約200 MeVまで遮蔽質量と極質量の値が変わらないことがわかる。従って、ストレンジネス中間子は転移温度以下でも大きな熱的影響を受けているのに対し、チャーモニウムは少なくとも1.2 T_c 程度の温度まで熱の影響を受けず安定に存在することを意味する。

またチャンネル間の温度依存性に注目すると、転移温度以上ではチャーモニウムとオープンチャームではチャンネル間に大きな差異が現れないのに対し、ストレンジネスでは擬スカラーの増加がベクターに比べて非常に大きくなる。このような擬スカラー中間子の強い熱的変形はストレンジフレーバーのカイラル対称性の回復に関係する。実際に先攻研究においてストレンジカイラル凝縮も転移温度以上でその値が徐々に小さくなることが知られており[4]、本研究の結果は、ストレンジフレーバーにおいてもカイラル対称性の回復は対応する中間子の性質に大きな影響を与えることを示唆している。

次に高温における遮蔽質量の振舞いに注目する。本研究により計算された遮蔽質量の全温度領域での結果は図2に示される。高温での比較のため遮蔽質量は温度で規格化($M(T)/T$)されている。図は再び左からストレンジネス($s\bar{s}$)、オープンチャーム($s\bar{c}$)、チャーモニウム($c\bar{c}$)の結果であり、図中の点線は高温での収束値 2π を示す。図からオープンチャームとチャーモニウムでは、 $M(T)/T$ は温度上昇とともに単調に減少し 2π に収束する。この振舞いは高温極限における自由クォークの振舞い $M_{\text{free}}(T) = 2\sqrt{(\pi T)^2 + m_q^2}$ に一致する。一方、ストレンジネスではどちらのチャ

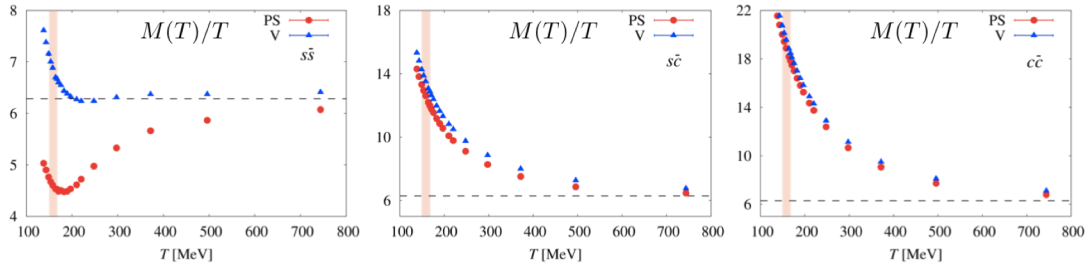


図 2: 高温における遮蔽質量の振舞い。結果は温度で規格化した遮蔽質量を表す。

ンネルでも転移温度直上程度まで減少するが、その後増加するという特徴的な振舞いを見せる。そして高温での収束が 2π に対しベクター(V)は正から、擬スカラー(PS)は負から近づく。

高温での遮蔽質量の振舞いは弱結合有効理論による予想があり、十分高温では全てのチャンネルが縮退し、その温度依存はクォーク質量がゼロの極限で、 $M_{\text{weak}}(T)/T = 2\pi(1 + 0.033g^2)$ と与えられる($N_f = 3$ のとき)[5]。ここで g はQCDの結合定数である。すなわち高温極限では最低次松原振幅である $2\pi T$ に収束するが、その収束は正から近づくことを示唆する。この振舞いは図2のストレンジネスにおけるベクターの振舞いと一致する。一方、擬スカラーは異なる振舞いを見せる。また、 $T \sim 750$ MeVにおいてもチャンネル間の縮退は見られない。すなわち $T \sim 4.7T_c$ では中間子相関関数の弱結合有効理論による記述は十分とは言えず、遮蔽質量にはさらに非摂動的な寄与が多く含まれていることを意味する。このような中間子遮蔽質量の格子QCDシミュレーションと弱結合有効理論の差異は先行研究でも報告されている[6]。高温における格子QCDと弱結合有効理論の比較は摂動論的手法の適用可能温度領域を検討する上でも重要であるため、今後有限体積効果などに配慮したさらに高温での遮蔽質量の格子シミュレーションが必須である。

3 まとめ

本研究では遮蔽質量の温度依存性から熱媒質中における中間子の温度変化を調べた。その結果、ストレンジネス中間子は相転移温度以下でも熱媒質により強く影響を受けるが、一方オープンチャーム中間子は転移温度以上、チャーモニウムは転移温度の1.2倍以上でないと熱媒質の影響を受けないことを見出した。すなわちチャーモニウム抑制は、重イオン衝突実験におけるクォーク・グルーオン・プラズマ生成のシグナルになることが第一原理計算により裏付けられた。またストレンジネスでは転移温度以上で、擬スカラー中間子にストレンジフレーバーのカイラル対称性の回復が起因すると考えられる強い熱的变化が現れた。

また、 $T \sim 750$ MeVにおいても格子QCDの結果と弱結合有効理論の予想には差異が見られた。高温での両計算の定量的な比較は、非摂動的手法の有効温度領域を見積もる上でも重要なため、今後さらなる研究が必要である。

参考文献

- [1] H. Satz, Lect. Notes Phys. 841, 1 (2012).
- [2] T. Matsui and H. Satz, Phys. Lett. B 178, 416 (1986).
- [3] 例えば最近のレビューとして、A. Mocsy, P. Petreczky and M. Strickland, Int. J. Mod. Phys. A 28, 1340012 (2013).
- [4] A. Bazavov, T. Bhattacharya, M. Cheng, C. DeTar, H. T. Ding, S. Gottlieb, R. Gupta and P. Hegde et al., Phys. Rev. D 85, 054503 (2012).
- [5] M. Laine and M. Vepsalainen, JHEP 0402, 004 (2004).
- [6] M. Cheng, S. Datta, A. Francis, J. van der Heide, C. Jung, O. Kaczmarek, F. Karsch and E. Laermann et al., Eur. Phys. J. C 71, 1564 (2011).