

非等方格子 QCD を用いた有限温度下でのグルーボール質量変化

Glueball mass spectrum at finite temperature using anisotropic lattice QCD

物理学専攻 原子核理論研究室

C1SM2003 蟻川 歳三

背景

我々の身の回りの物質を構成する原子の中心には、陽子と中性子で構成される原子核が存在している。さらに、陽子や中性子はクォークとグルーオンで構成されることが明らかになっている。グルーオンが媒介する強い相互作用の物理は量子色力学 (QCD) によって記述される。我々の日常のスケールでは、色荷 (カラー) を持つクォークやグルーオンは単体では存在せず、カラー 1 重項 (無色) であるハドロンの内部に閉じ込められている。これをカラーの閉じ込めという。一方で初期宇宙などの超高温状態では、クォークやグルーオンは閉じ込めから開放されて単独で存在することが理論的にも実験的にも知られている。この状態はクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる。ハドロン相から QGP 相への相転移は閉じ込め-非閉じ込め相転移と呼ばれ、その転移温度 T_c は 100 MeV ($\simeq 10^{12}$ K) のオーダーである。

QCD の特徴として、低エネルギー領域で結合定数 $\alpha_s = g^2/(4\pi)$ は強結合となり、 α_s による摂動計算で扱えないことが挙げられる。そのため、ハドロンの物理を調べるために非摂動的な定式化が必要とされ、格子 QCD による数値シミュレーションが様々な成功を収めてきた。また、熱場の摂動論では、 $T = 0$ における通常の摂動論とは異なり、結合定数 g の摂動展開となるため、転移温度よりもやや高い温度領域では、摂動論の適用条件 ($g \ll 1$) を満たさない [1]。したがって、ハドロンのみならず、閉じ込め-非閉じ込め相転移や QGP の理解のためにも格子 QCD による計算が必要である。

有限温度 QCD の興味深いテーマとして、ハドロンの質量変化が挙げられる。SU(3) 純ゲージ理論でも、この理論における唯一のハドロンであるグルーボールの質量変化を調べることで、ハドロン質量変化と相転移の関係が明らかにできると期待され、格子 QCD によるシミュレーションが行われた [2]。この研究では、グルーボールは温度増加につれて質量減少することが示されている。その後、文献 [3][4] では非閉じ込め相においてメソン 2 点関数に単独なクォークの伝搬による定数項が存在することが確認されており、グルーボール 2 点関数にも同様に相転移に由来する定数項が存在する場合、文献 [2] の結果は修正を受けると期待できる。

内容

格子 QCD によるグルーボールの計算の精度向上が文献 [5] によって達成されている。本研究では、有限温度 SU(3) 純ゲージ理論の格子計算において高精度のデータを得ることにより、グルーボール 2 点関数中の定数項の存在について確かめ、より厳密かつ正確な質量変化の様相を得ることを目標とした。グルーボール 2 点関数 $G(t)$ は以下のように質量を m_n として固有状態 n の線型結合で表され、定数項は $m_0 = 0$ の項あるいは境界を回り込む単独なグルーオンの効果として解釈することができる。

$$G(t) = \sum_n A_n \cosh[m_n(t - N_t/2)]$$

N_t は時間方向の格子点数であり、時間方向の格子間隔を a_t とすると、時間方向の周期境界条件により温度 $T = 1/(a_t N_t)$ の有限温度系とみなせる。文献 [2] と同様のパラメータを用いて、 $0 < T/T_c < 1.7$ ($T_c \simeq 280$ MeV) の範囲でシミュレーションを行い、 $J^{PC} = 0^{++}$ (スカラー) 及び 2^{++} (テンソル) のグルーボール基底状態について有効質量解析や 2 点関数のフィッティング、最大エントロピー法 (MEM) を用いて多角的に解析した。

結果

グルーボール 2 点関数に定数項が存在するとして評価した 0^{++} 及び 2^{++} のグルーボール基底状態の質量変化を図 1 に示す。文献 [2] とは異なり、グルーボール基底状態の質量が温度とともに増加していることがわかる。スカラーグルーボールの基底状態については転移温度 $T_c = 280$ MeV 近傍の $T \simeq 0.9T_c$ から温度増加が顕著になり、転移温度直上ではゼロ温度での質量 $m_G^{0^{++}}(T = 0) = 1456 \pm 35$ MeV のおよそ 1.3 倍にまで増加した。更に温度が上がると質量増加が続き、 $m_G^{0^{++}}(T = 468 \text{ MeV}) = 2221 \pm 90 \text{ MeV} \sim 1.5m_G^{0^{++}}(T = 0)$ となった。テンソ

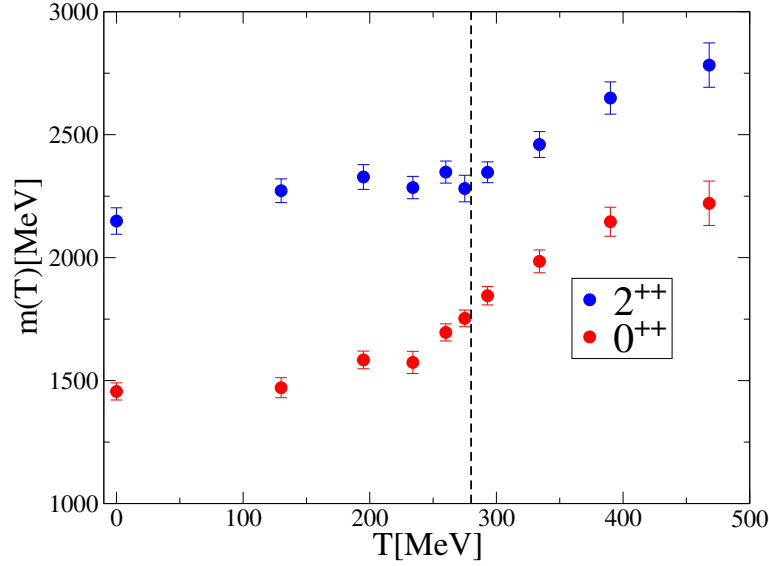


図 1: 2 点関数のフィッティングで評価したグルーボール 0^{++} (赤) 及び 2^{++} (青) 基底状態質量変化の様子

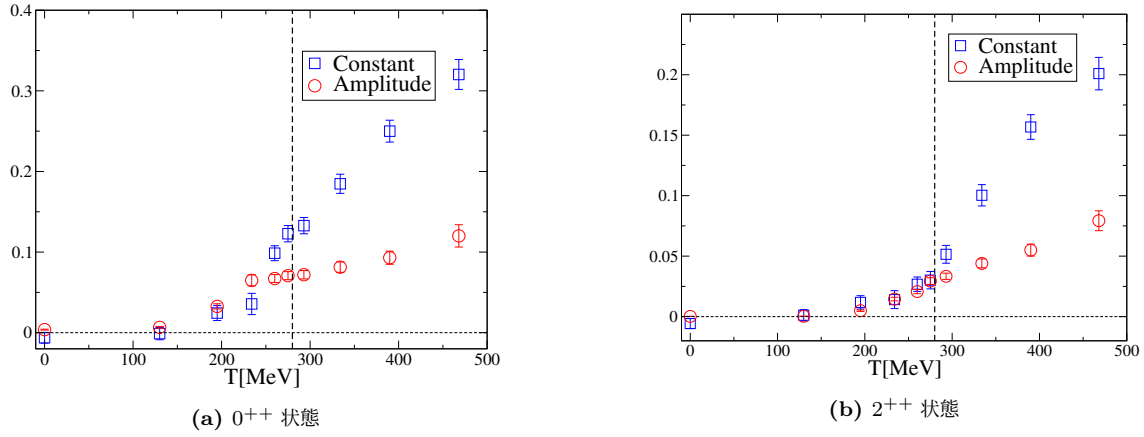


図 2: グルーボール 2 点関数の振幅と定数項

ルグルーボールの基底状態の質量増加は転移温度近傍ではわずかであったが、転移温度を超えると急激に増加し、 $m_G(T = 468 \text{ MeV}) = 2783 \pm 90 \text{ MeV} \sim 1.3m_G^{2^{++}}(T = 0)$ にまで増加した。

フィッティングで得られた 2 点関数の振幅と定数項の値を図 2 に示す。転移温度近傍から定数項の値が大きく増加していることから、メソンの場合と同様にグルーボール 2 点関数には相転移に由来する定数項が存在すると言える。

本研究では、グルーボール 2 点関数に相転移に由来する定数項が存在するとして様々な解析を行い、有限温度下でのグルーボール質量増加の様相と相転移とともに創発する定数項の存在を確かめることができた。今後の研究課題としては、南部・ベレー・サルピータ波動関数解析をすることで、相転移によってグルーボール状態からグルーオン多粒子状態に変化しているかを判別し、非閉じ込め相における質量がグルーオンの熱的質量に由来するか確認することができる。定数項の起源については、離散化の影響を調べるために異なる格子間隔での計算を行うことが必要である。また、 Z_3 対称性の破れに着目した議論の余地もある。

参考文献

- [1] 初田哲男, <http://www.genshikaku.jp/backnumber/52sp1PDF/hatsuda.pdf>.
- [2] N. Ishii, H. Suganuma, and H. Matsufuru, *Phys. Rev. D* **66**, 094506 (2002).
- [3] H. Ohno *et al.* (WHOT-QCD Collaboration), *Phys. Rev. D* **84**, 094504 (2011).
- [4] T. Umeda, *Phys. Rev. D* **75**, 094502 (2007).
- [5] K. Sakai and S. Sasaki, *Phys. Rev. D* **107**, 034510 (2023).