

## 格子 QCD を用いたグルーボール質量計算におけるノイズ低減

Noise reduction in the glueball mass calculation using lattice QCD

東北大学 理学研究科 物理学専攻 原子核理論研究室

C4SM2033 佐藤 玲王

## 背景

自然界に存在する 4 つの相互作用のうち、原子核を構成する陽子や中性子などのハドロンを束縛する強い相互作用はグルーオンによって媒介される。グルーオンは互いに自己相互作用することが知られており、結果として自ら束縛状態を形成する。この複合粒子をグルーボールと呼ぶ。グルーボールは量子色力学 (QCD) によってその存在が予言されているが、実験的には未だ確認されていない。グルーボールの性質を解明することにより、強い相互作用の理解が深まり、QCD におけるさまざまな未解決問題の解決の糸口となる可能性がある。

グルーボールは、主に格子 QCD シミュレーションを用いて理論的に研究されている。格子 QCD は QCD を第一原理的に計算する手法であり、特に低エネルギーの非摂動領域において QCD を理解するための有効な手段である。格子 QCD 計算により、グルーボールの質量スペクトルが高い精度で予測されており [1]、実験値と比較するための重要な理論的予測を提供している。

しかし、現在の格子 QCD シミュレーションによるグルーボール質量計算は、グルーオンのみの効果を含む Quenched 近似の範囲内で行われているため、実験値と比較するには十分ではない。現実の世界ではグルーオンのみならず、クォーク・反クォーク対も存在することから、これらの効果を含む Full QCD 計算が必要となる。その一方、Full QCD 計算はゲージ配位生成のための計算コストが非常に高く、十分な統計数を確保することが難しい。また、軽いクォークの寄与によりノイズが大きくなるため、正確な質量抽出が困難である。以上の理由から、これまでの Full QCD 計算では真空のゆらぎが増大し、ノイズが大きいうまくシグナルが見えないのが現状である。したがって、ノイズ低減手法の開発と適用が重要な研究課題となっている [2]。

## 内容

本研究では、グルーボール計算における統計的ノイズに着目し、それを効果的に低減することを目的とする。そこで、先行研究としてクラスター分解原理に基づくノイズ低減手法が提案されており [3]、その有効性を検証した。具体的には、2 点相関関数の計算において、(1) 式に示すようにカット関数  $f(\vec{s})$  を導入することで、ノイズにのみ大きく寄与する十分に離れた点同士の相関を除去することでノイズ低減が期待できる。本研究では、まず Quenched QCD シミュレーションでクラスター分解原理が有効であることを確認し、ノイズ低減のための計算手法を確立する。続いて、確立した手法を Full QCD シミュレーションに適用し、動的クォークを含む QCD ゲージ配位での  $0^{++}$  グルーボール質量を計算する。これを複数の  $\pi$  中間子質量  $m_\pi$  の配位で行い、最終的に  $0^{++}$  グルーボール質量の  $m_\pi$  依存性を調べ、物理点へ外挿することで物理点でのグルーボール質量を推定する。

$$G(t) = \sum_{\vec{s}} \sum_{\vec{r}} f(\vec{s}) \langle 0 | \tilde{O}(\vec{r} + \vec{s}, t) \tilde{O}^\dagger(\vec{r}, 0) | 0 \rangle \quad (1)$$

## 結果

まずは Quenched QCD シミュレーションにおいて、図 1 のように 2 点相関関数の計算からクラスター分解原理に基づくノイズ低減手法が有効であることを確認した。続いて (1) 式のカット関数  $f(\vec{s})$  を空間

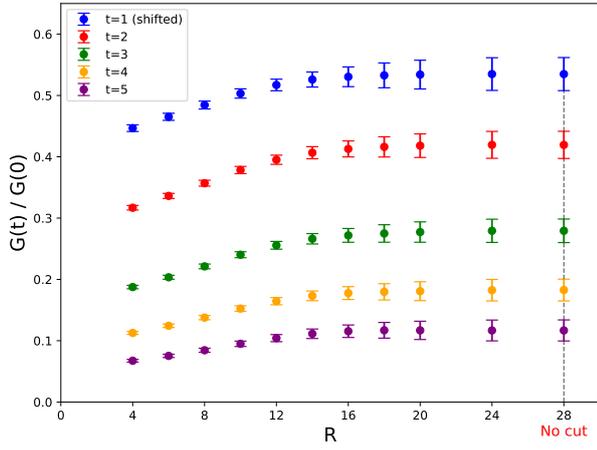


図 1: 3次元球形カットによる2点相関関数  $G(t)/G(0)$  のカットオフ距離  $R$  依存性

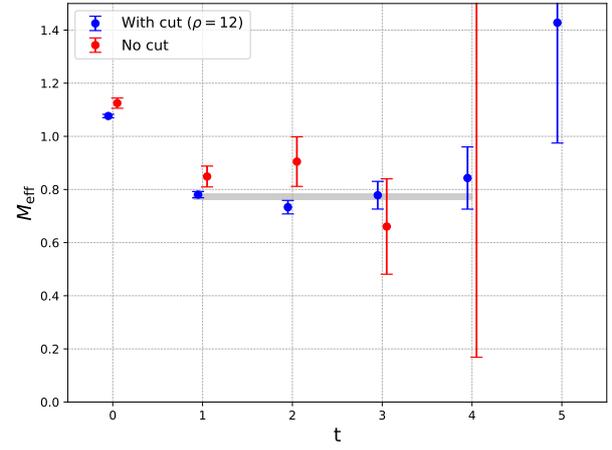


図 2:  $m_\pi = 411$  MeV における有効質量  $M_{\text{eff}}(t)$  の時間  $t$  依存性

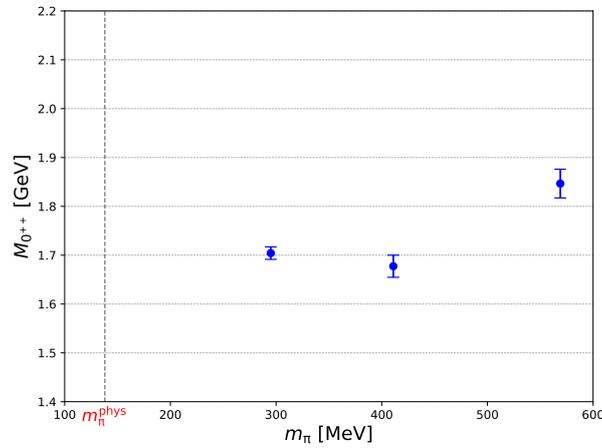


図 3:  $0^{++}$  グルーボール質量の  $m_\pi$  依存性

3次元の球形カット、箱形カット、マンハッタンカット、および時間方向も含めた4次元球形カットの4種類で比較検討した。その結果、特に4次元カットが優れたノイズ低減効果を示したため、4次元球形カットを採用してFull QCDシミュレーションに適用した。

続いてFull QCDシミュレーションにおいて、 $m_\pi = 295, 411, 569$  MeVの3種類の $\pi$ 中間子質量に対応する2+1フレーバーCP-PACSゲージ配位[4]を用い、 $0^{++}$  グルーボール質量を計算した。その結果、図2のようにグルーボールの有効質量プロットにおいて明確なプラトーが観測され、ノイズが大幅に低減された。また、図3に示すように、 $0^{++}$  グルーボール質量を上記の3種類の $\pi$ 中間子質量のFull QCDで計算することにより、 $m_\pi$ 依存性についても調べることができた。その結果、観測される $m_\pi$ 依存性は小さく、特に物理点に近い2点の結果から、物理点でのグルーボール質量を約1.7 GeVと推定することができた。本研究の成果は、グルーボール質量計算におけるノイズ低減手法の有効性を示すものであり、今後の物理点のFull QCDシミュレーションにおける本格的な数値解析に向けて重要な成果と位置付ける。

## 参考文献

- [1] C. J. Morningstar and M. J. Peardon, *Phys. Rev. D* **60**, 034509 (1999).
- [2] C. Morningstar, *PoS LATTICE2024*, 004 (2024).
- [3] K.-F. Liu, J. Liang, and Y.-B. Yang, *Phys. Rev. D* **97**, 034507 (2018).
- [4] S. Aoki *et al.* (PACS-CS), *Phys. Rev. D* **79**, 034503 (2009).