

格子 QCD による核子テンソル、スカラー結合の

非摂動論的繰り込み

Non-perturbative renormalization of nucleon tensor
and scalar couplings in lattice QCD

塚本 夏基
東北大学

1. 研究目的

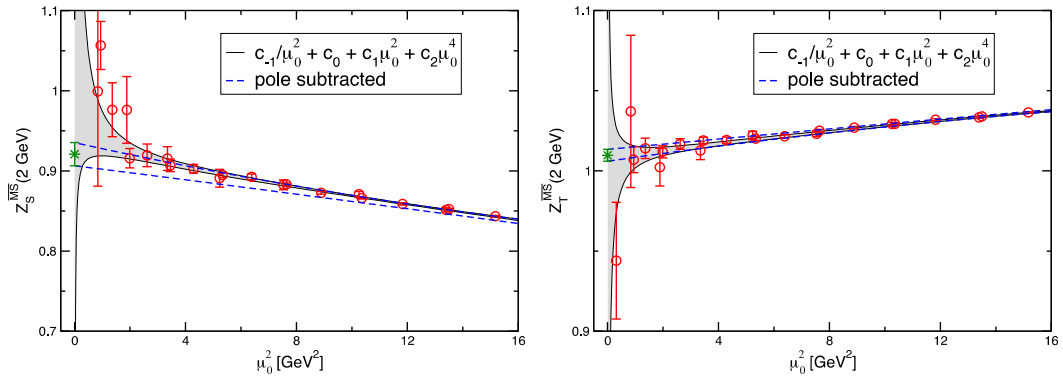
本研究課題では、格子 QCD による核子構造の計算のうち、核子テンソル及びスカラー結合といった物理量とそれを得るために必要な非摂動論的な繰り込みに焦点を当てて研究を行う。

2. 研究成果の内容

申請者を含む PACS Collaboration はこれまで「格子 QCD による物理点での核子構造の研究」と題し、物理点直上(π 中間子の質量が 135MeV)の格子 QCD シミュレーションを行い、核子の構造に関する最も基礎的な物理量である、核子の大きさ(平均二乗半径)、軸性電荷、磁気モーメントを再現することに成功した。自然な流れとして、この成果を一里塚とし、QCD に基づく「理論数値計算」の強みを生かし、実験的には不定性の大きい物理量に対して研究を発展させることが次の目標となる。核子の内部構造の理解には、核子をクォーク・グルーオンの量子多体系として扱うために必要な構造関数やそのモーメントに関する研究は欠くことができない。本研究ではその最初の一步として実験的に観測の難しい、繰り込まれた核子のテンソル、スカラー結合の評価を行うことが目標となる。

ただし、スカラーやテンソルのチャンネルは、該当するカレント演算子の繰り込み係数を何らかの方法で精度よく評価しなければならない。そのため繰り込まれた核子スカラー、テンソル結合を評価するには単に格子上で核子スカラー、テンソル結合を計算するだけでなく、場の量子論の手続きに沿って、カレント演算子の繰り込み因子を非摂動的に格子 QCD 計算で別途評価する必要がある。本研究では、Regularization-independent(RI)スキームによる非摂動論的繰り込みの手法を採用した。そのためにランダウゲージ固定をしたゲージ配位の上で、クォークの伝搬関数を計算し、カレント演算子を含むクォークの三点関数を構成し、その頂点関数に繰り込み条件を課すことでカレント演算子の繰り込み因子を計算する。繰り込みスケールは外部運動量で入れるため、外線のクォークの伝搬関数に対してフーリエ変換を通してクォークの運動量を調節することで様々な繰り込みスケール μ_0 で繰り込み因子が計算可能となる。

このRIスキームでの繰り込み因子は摂動論、非摂動論を問わず同じ定義で行えるのが特徴である。そのため、実験値と比較する場合に有用な \overline{MS} スキームへの繰り込みスキームの変換は摂動論を使って行った。以下は \overline{MS} スキームへ変換後のスカラー及びテンソルカレント演算子に対する繰り込み因子の結果である。最終的に評価したいのは繰り込みスケールが2GeVでの \overline{MS} スキームの繰り込み因子である。



上図の横軸は最初にRIスキームで採用した繰り込みスケール μ_0 を表す。本来であれば、採用した μ_0 に寄らず、一定の値となることが予想されるが、データは μ_0 に依存している。大きい μ_0 での μ_0 依存性は、格子上で頂点関数を計算したことによる有限格子間隔による系統誤差に起因するため、 μ_0 の偶数の冪級数の振る舞いで理解できる。小さい μ_0 での μ_0 依存性は、ランダウゲージ固定をしたことにより、本来存在しない次元2の真空期待値 $\langle A^2 \rangle$ による非摂動的な効果で μ_0 に対して2次の極構造を生じていると理解できる。それらのゲージ不変な連続理論には現れない効果を取り除くために、データを μ_0 に対して2次の極と4次までの正冪を合わせた μ_0 依存性を仮定してフィットし、 μ_0 に依存しない定数を最終的な繰り込みスケールが2 GeVでの \overline{MS} スキームの繰り込み因子として評価した。(図中における緑の印)

$$Z_S^{\overline{MS}}(2 \text{ GeV}) = 0.921 \pm 0.014_{\text{stat}} \pm 0.012_{\text{sys}} \quad Z_T^{\overline{MS}}(2 \text{ GeV}) = 1.010 \pm 0.004_{\text{stat}} \pm 0.021_{\text{sys}}$$

1つ目の誤差は統計誤差によるもの、2つ目の誤差は、本解析で想定される系統誤差を評価したものである。

1. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point”

N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani,

S. Sasaki and T. Yamazaki, Proceedings of science, LATTICE2019
(2020) 132.

(2) 学会発表

- ① 「物理点 2+1 フレーバー格子 QCD による核子のアイソベクター結合の計算」, 塚本夏基, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 山形大学, 2019 年 9 月 17-20 日

(3) その他

- ① 博士論文：塚本夏基、東北大学、博士（理学）、「Renormalized nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD」

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	30000	
Oakforest-PACS	○	225000	

※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。