

格子 QCD に基づく核子構造研究のための非摂動的くりこみ

Non-perturbative renormalization for nucleon structure in lattice QCD

辻 竜太郎
東北大学

1. 研究目的

本プロジェクトでは、核子構造に関連した物理量の第一原理計算を研究主題とする。計算では物理量の核子行列要素のみならず、くりこみ因子も評価する必要がある。本課題では、目的のくりこみ因子を非摂動的に評価する研究に焦点を当てる。

2. 研究成果の内容

申請者を含む PACS Collaboration はこれまで、物理点 (π 中間子質量が実験値 135 MeV を再現) かつ巨大体積 (1 辺 10 fm の立方体で核子のサイズより十分大きい体積) という現実世界に近い環境下でのシミュレーションを行い、核子の内部構造に関連した研究を進めてきた。この成果として、格子 QCD による核子構造研究のマイルストーンであった核子軸性電荷の実験値を統計精度 2% という高い精度で再現し、格子 QCD に基づく核子構造研究の有用性が示されている。格子 QCD に基づく核子構造研究は実験的研究と異なり、様々な物理量を同一の環境下で系統的に調べることが可能である。そのため、実験的測定が難しい対象についても、同時に計算した軸性電荷の再現性を担保しつつ、有意な予言計算が行える強みを持つ。そこで次段として実験的測定の難しい、核子のテンソル、スカラー荷の評価を目的とした。

核子のテンソル、スカラー荷を格子 QCD の枠組みで評価するためには、対応する演算子の核子行列要素の評価だけでなく、場の量子論の手続きに従ってくりこみ因子を計算する必要がある。本課題では、これら 2 つのくりこみ因子を高い精度で非摂動的に計算することを目的とした。具体的な計算では、Regularization Independent (RI) スキームを中間スキームとして、非摂動的に計算されたフーリエ変換されたクォーク伝播関数を用いて目的の演算子に対応した頂点関数を構成し、適当なくりこみ条件の下でくりこみ因子を評価する。この際、クォークの外線運動量を通じてくりこみスケールが導入される。これに摂動論で求められているスキームとスケールの変換因子を乗じることで、実験値と比較する際は Modified Minimal Subtraction ($\overline{\text{MS}}$) スキーム、くりこみ点 2 GeV へと変換する。

本課題で得たくりこみ因子の結果を図 1 (左側がスカラー荷、右側がテンソル荷) に示す。図の横軸は RI スキームでのくりこみ点に相当している。このデータから目的のくりこみ因子をフィットによって抽出する。その際系統誤差は、[i]変換に用いた摂動論の次数、[ii]離散化誤差やグルーオン凝縮などの非摂動的効果 (データの横軸依

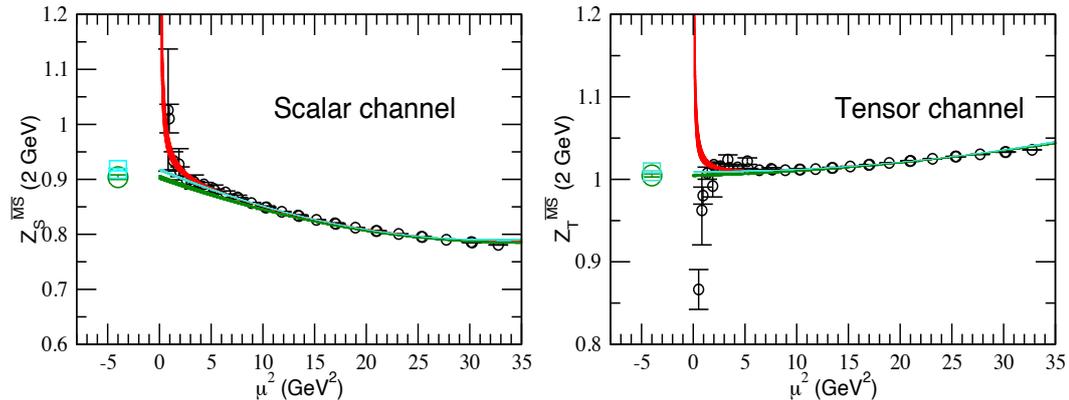


図 1. 非摂動くりこみ因子 (左：スカラー荷、右：テンソル荷)

存性)、[iii]フィットモデル・区間の選定、を考慮した。[ii]に関しては紫外領域の横軸依存性を適当な μ^2 の多項式で表現した上で、赤外領域のデータを極で表現することでその寄与を取り除いたモデル (青四角) と赤外領域を参照しないモデル (緑丸) の違いで非摂動効果に対する不定性を計上した。また [iii] に関しては、紫外領域も含め様々なフィットモデルや区間の中から最も安定なモデル及び区間の候補を選定し、その違いを [iii] に由来する不定性として計上した。ここで選定された候補は、上記の安定性に基づく選定とは独立な平均自乗誤差による選定でも候補として選定されており、妥当性も確認されている。本課題において、最終的に得られたくりこみ因子は

$$Z_T^{\overline{\text{MS}}}(2 \text{ GeV}) = 1.030(2)_{\text{sta.}}(23)_{[\text{ii}]}(5)_{[\text{iii}]}(3)_{[\text{iii}]} \quad \text{and} \quad Z_S^{\overline{\text{MS}}}(2 \text{ GeV}) = 0.910(3)_{\text{sta.}}(5)_{[\text{ii}]}(7)_{[\text{iii}]}(8)_{[\text{iii}]}$$

と評価された。1つ目の括弧は統計誤差を示しており、2つ目以降の括弧はそれぞれ上記の系統誤差を表している。全体としての誤差はそれぞれ 2.3% 及び 1.3% となっており、非常に高い精度での決定に成功したと言える。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

格子 QCD 計算に必要なメモリ及び計算時間は、系の体積 (格子点数) に比例して大規模なものが要求される。更に非摂動的くりこみ計算では多数の大規模逆行列計算 (クォーク伝播関数) やその高速フーリエ変換が要求される。故に、格子点数が大規模な $128^4(160^4)$ での計算は、学際共同利用での大規模 HPC で初めて可能となった。

4. 今後の展望

当該年度の成果として、実験的測定が困難な物理量を格子 QCD で計算する際に必須となるくりこみ因子を非摂動的に、かつ高い精度で計算することが可能となった。この精度向上でもって、標準理論を超えた新物理の探究へのさらなる有用性や他物理量の高精度測定も期待できる。一方で、本課題で計算されたくりこみ因子は単一カットオフでの計算であるため、時空の差分化に伴う系統誤差が評価できていない。次年度では、将来的に必須なコードの高速化開発も併せて、格子点数 160^4 での計算に着手したい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Calculation of the derivative of nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD at $M_\pi = 138$ MeV on a $(5.5 \text{ fm})^3$ volume” K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki (PACS Collaboration), Physical Review D104 (2021) 074514.

(2) 学会発表

- ① “The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 38th International Symposium on Lattice Field Theory, On-line, July 26-30, 2021.
- ② “Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 24th International Spin Symposium, online, Oct. 18-22, 2021.
- ③ “High-precision calculation of nucleon structure using HPC”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 4th R-CCS International Symposium The Supercomputer Fugaku: Simulation, Big data and AI supporting Society 5.0, online, Feb. 7-8, 2022.
- ④ 「核子軸性電荷及びテンソル、スカラー荷の物理点格子 QCD 計算」,辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 14-17 日
- ⑤ 「物理点近傍での 2+1 フレーバー QCD による核子形状因子の直接微分計算」, 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 日本物理学会秋季大会, オンライン, 2021 年 9 月 14-17 日
- ⑥ 「物理点格子 QCD による核子構造の計算」,辻竜太郎,青木保道,石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛 for PACS Collaboration, 日本物理学会 2022 年第 77 回年次大会, オンライン, 2022 年 3 月 15-19 日

(3) その他

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			
Oakforest-PACS	○	206,550	
※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。			