

## 格子 QCD に基づく核子構造研究のための非摂動くりこみ

### Non-perturbative renormalization for nucleon structure in lattice QCD

辻 竜太郎

KEK

#### 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物理点格子 QCD 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、陽子崩壊や Non-standard なベータ崩壊などの標準模型を超えた物理に着目し、くりこみ因子の非摂動計算に焦点を当てる。

#### 2. 研究成果の内容

申請者を含むPACS Collaborationではこれまで、物理点 ( $\pi$  中間子質量が実験値を再現) かつ巨大体積 (一辺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2%という高い統計精度で再現することに成功し、格子QCDに基づく核子構造研究の有用性が示されている。

特に核子崩壊行列要素に着目し、物理点 ( $\pi$  中間子質量が実験値を再現) かつ巨大体積 (一辺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計算を行った。核子崩壊過程は、バリオン数を破る反応過程であるため、物質優勢宇宙の謎の解明や大統一模型の構築に関係する。格子QCDでは、核子崩壊過程に関わる低エネルギー領域におけるQCD寄与の第一原理的な決定を目標としている。実験から得られた崩壊寿命の情報と組み合わせることで、未知のモデルに制限をかけることができる。近年では物理点直上での計算や新規スキームの採用などで、より系統誤差を排除した計算が進められており、計算の高精度化も求められている。

核子崩壊行列要素を格子QCDの枠組みで評価するためには、対応する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が必須である。本課題では、巨大体積下で高速に計算を行うことを目的とした。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、Modified Minimal Subtraction ( $\overline{MS}$ )スキーム、くりこみ点2 GeVへと変換する。これにより陽子崩壊を引き起こす(大統一)理論とのマッチングが可能になる。ここでは、MOM3qとSYM3qの2つの中

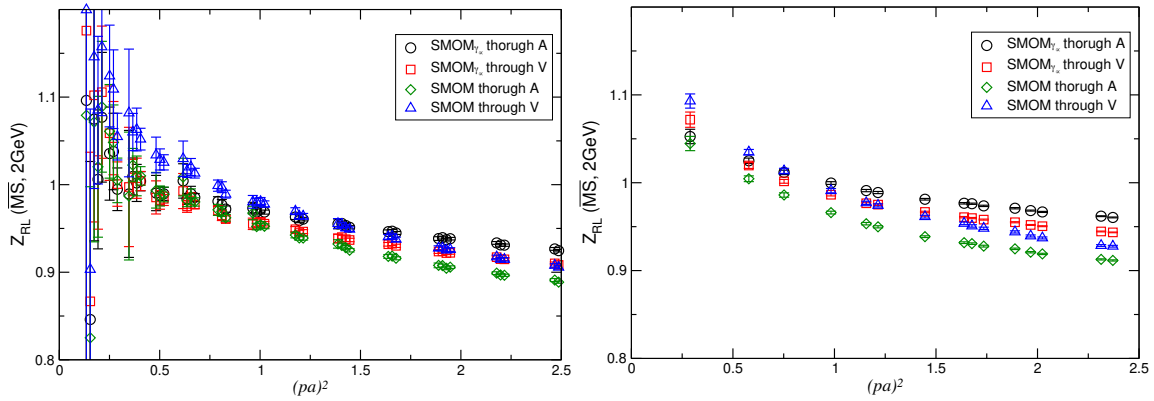


図1. LLチャンネルの非摂動くりこみ因子。MOM3q(左)とSYM3q(右)。

間スキーム依存性を調べた。 $\overline{MS}(2\text{GeV})$ への変換には摂動的な定式化が求められる。MOM3qがNLO[1]の一方、SYM3qはNNLOまで求められている[2]ため、系統誤差の改善が期待できる。図1に結果を示す。図の横軸はRIスキームでのくりこみ点に相当している。ここでは特にRLチャンネルについて $\overline{MS}$ スキーム、くりこみ点2GeVへと変換したものを示した。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。系統誤差は、[i]変換に用いた摂動論の次数、[ii]離散化誤差などの非摂動的効果、[iii]フィットモデル・区間の選定、を考慮した。現段階で得られたくりこみ因子は

$$\text{MOM3q} : Z_{RL}^{\overline{MS}}(2\text{ GeV}) = 1.002(30)_{\text{stat}}(39)_{\text{[i]}}(16)_{\text{[ii]}}(16)_{\text{[iii]}}$$

$$\text{SYM3q} : Z_{RL}^{\overline{MS}}(2\text{ GeV}) = 1.016(5)_{\text{stat}}(29)_{\text{[i]}}(26)_{\text{[ii]}}(6)_{\text{[iii]}}$$

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。両者の結果は誤差の範囲内で一貫しており、中間スキームの依存性が小さいことが確認できた。摂動の次数が上がったことにより、[i]の系統誤差はSYM3qを採用することで改善されているほか、フィットにも安定性がみられる[iii]。一方で、非摂動論的效果による系統誤差は大きくなる傾向にあり、全ての系統誤差を計上すると、系統誤差の改善は軽微であった。

[1] Y. Aoki et al., PRD 78 (2008) 054505 [PRD 96 (2017) 1, 014506].

[2] J. A. Gracey, JHEP 09 (2021) 052.

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

格子QCD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。更に非摂動くりこみ因子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、ゲージ場の大域的最適化が要求される。この観点から、本課題の目指す計算は、学際共同利用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、核子行列要素に関連するくりこみ因子を高い精度で評価し、スキームの依存性についても系統的に調べることができた。これらの成果は、今後行う $N_f=2+1+1$ の物理点かつ巨大体積での計算計画にも有用な情報を与える。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“Proton decay matrix elements on PACS configurations”, R. Tsuji et al., PoS LATTICE2024 (2025) 435.

(2) 学会発表

“Lattice studies of the proton decay matrix elements at the physical point”, R. Tsuji, 「富岳」成果創出プログラム 超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発 総括研究会

(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	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	14,400		
Miyabi-G	○	40,500		
Miyabi-C	○	5,760		
※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				