

格子 QCD による物理点での核子構造の研究

Nucleon structure from lattice QCD at the physical quark mass

佐々木勝一
東北大学

1. 研究目的

本研究課題では、核子の内部構造に関する諸問題に焦点を合わせ、強い相互作用の第一原理計算である格子QCD 数値計算に基づく研究を行う。既に生成されている、物理点の2+1 フレーバー格子QCD ゲージ配位 (PACS10 配位) を利用して、核子の大きさを含む核子の内部構造に関する物理量の精密計算を行う。

2. 研究成果の内容

本研究では3種類の動的クォークの自由度 (アップ、ダウン、ストレンジネス) を物理的クォーク質量上で厳密に取り扱った、物理点における格子QCDを用いた第一原理計算によって、核子の構造の情報をもつ核子形状因子に対して、誤差数%レベルの精密計算を実施する。そこで、PACS Collaboration により「物理点 (π 中間子が135 MeV を再現)」かつ「超巨大体積 (物理空間が1辺10 fm 以上の4次元超立法体)」で生成されたゲージ配位 (PACS10配位) を利用し、これまで2 パターンの格子間隔 (0.085 fmと0.063fm) での格子QCD計算を行ってきた。

当該年度以前に格子点 128^4 のPACS10配位 (格子間隔0.085fm) の数値計算は完了しており、当該年度は、前年度より着手している格子点 160^4 のPACS10配位 (格子間隔0.063fm) を利用した格子QCD計算を引き続き実施した。特に、核子三点関数から核子行列要素の情報を引き出す際に生じる系統誤差の評価を行った。核子三点関数はソースとシンクに核子演算子を置き、ソース・シンク間に、クォーク双線形なカレント演算子を挟むことで計算される。ソース・シンク間距離 (t_{sep}) が短い場合、核子行列要素の情報を核子三点関数から引き出す際に、核子の基底状態による行列要素の寄与だけでなく、核子の励起状態や、核子- π 中間子の二粒子連続状態などの寄与が無視できなくなる。そのため、 t_{sep} の依存性を調べることで、核子の基底状態以外からの寄与による系統誤差が見積ることができる。格子点 160^4 においても、これまでの $t_{\text{sep}}/a=16, 19$ に加え、3つ目の $t_{\text{sep}}/a=13$ の計算を完了させた。

図1は、核子構造の計算精度の高さを測る指標である核子軸性電荷 g_A に対して、現時点までに得られている、2つの格子間隔0.085fmと0.063fmによる計算結果 (Schrödinger Functional法による軸性カレントの繰り込み因子 Z_A を使って繰り込みを行った) の比較である。水平の点線は g_A の実験値で、2つの帯は実験値からの1%以下の誤差 (黄色帯)、2%以下 (灰色帯) の誤差の範囲をそれぞれ表す。赤色の◇のシンボルが、格子点 160^4 の

格子間隔0.063fmで得られた結果、黒色の○のシンボルが、格子点 128^4 の格子間隔0.085fmで得られた結果である。この図から最も高精度で見積れる核子軸性電荷に対して、核子の基底状態以外からの寄与による系統誤差及び有限格子間隔に伴う系統誤差の2つの系統誤差が、現状、我々の計算において達成している統計誤差1-2%以下に抑えられていることが確認できる。

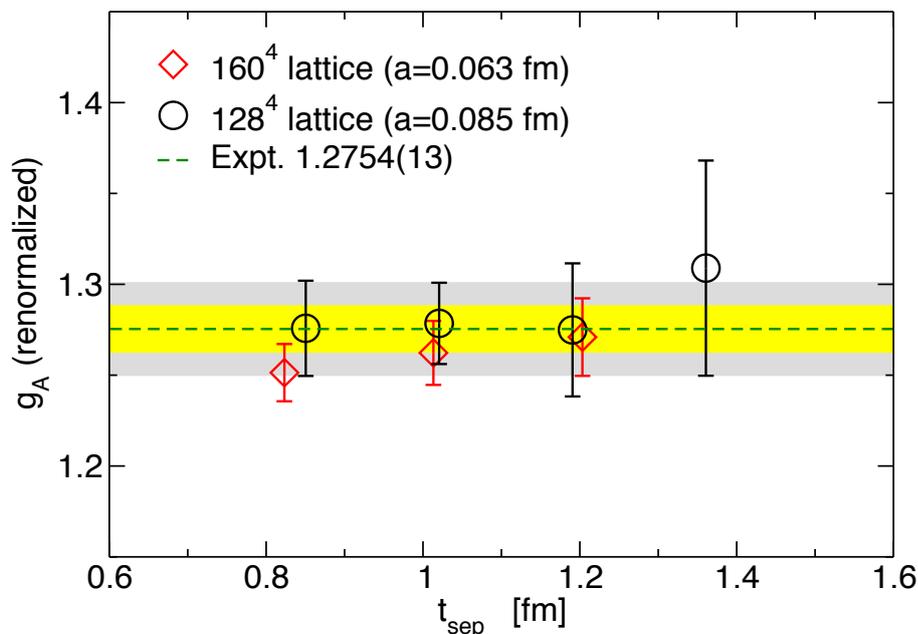


図 1

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 計算の必要メモリは体積（格子点数）に比例して多くなると同時に、計算時間も体積（格子点数）に比例することとなる。更にクォーク質量が小さくなるにつれ急激に計算時間が長くなるため、格子点 160^4 の計算規模の物理点での格子QCD シミュレーションは学際共同利用を通じて、世界最高性能を有するスパコン富岳と同じ富士通のプロセッサA64FXを搭載したWisteria/BDEC-01のように高性能なスパコンで初めて可能となった。また、Cygnusは非摂動的手法による繰り込み因子の計算に利用した。

4. 今後の展望

格子点 128^4 の PACS10 配位を利用した計算において、既に高い精度での評価に成功している、標準理論を超えた新物理の探求に有効とされる核子スカラー電荷 g_S や核子テンソル電荷 g_T 及び、核子中のクォーク運動量割合及びヘリシティ割合に対しても、核子軸性電荷 g_A と同様に、有限格子間隔（差分化）に由来する系統誤差を今後評価したい。そのため、格子点 160^4 の PACS10 配位の計算結果に対しても、場の量子論の手続きに沿って、計算に用いたそれぞれの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。そこで、格子点 160^4 の PACS10 配位の計算結果に対しても、次年度、繰り込み因子の評価に着手したい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Nucleon isovector couplings in $N_f=2+1$ lattice QCD at the physical point”, R. Tsuji, N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki (PACS Collaboration), Physical Review D106 (2022) 094505.
- ② “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, Proceedings of Science, Vol.396 (LATTICE 2021), (2022) 504.
- ③ “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, JPS Conf. Proc. 37 (2022) 020202.
- ④ “Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical points”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, EPJ Web Conf. 274 (2022) 06009.

(2) 学会発表

- ① “Nucleon structure from lattice QCD on $(10 \text{ fm})^4$ lattices at the physical point”, R-CCS workshop on “Challenges and opportunities in lattice QCD simulations and related fields”, S. Sasaki, RIKEN-CCS, Kobe, Feb. 15-17, 2023.
- ② “Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical points”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, XVth Quark confinement and the Hadron spectrum, Stavanger, Norway, Aug. 1-5, 2022.
- ③ “Towards the continuum limit of nucleon form factors at the physical point using lattice QCD”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory, Bonn, Germany, Aug. 8-12, 2022.
- ④ 「核子形状因子の物理点格子 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(2022), 岡山理科大学, 2022 年 9 月 6-8 日.
- ⑤ 「物理点格子 QCD に基づく核子軸性形状因子の研究」, 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, 日本物理学会春季大会(2023), オンライン, 2023 年 3 月 22-25 日.

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	○	9,800	
Wisteria/BDEC-01	○	212,500	212,500