

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) を利用した核子形状因子の格子QCD計算を継続して実施し、最終的に、核子の大きさに関連して核子の電氣的形状因子、磁氣的形状因子および軸性ベクトル形状因子の「3つの形状因子に対する平均二乗半径やその平方根であるRMS半径」、及び磁氣的形状因子のゼロ運動量における値、「磁気モーメント(μ_N)」、軸性ベクトル形状因子のゼロ運動量における値、「軸性電荷 (g_A)」の5つの物理量に対して、統計誤差1-6%の計算精度での評価に到達した。

図1は、前述5つの物理量に対して、これまでの格子QCD数値計算の結果 (□記号) とPACS10配位による計算結果 (◆記号) を比較したものである。◆記号で表された結果のうち、coarse とラベルされている方が当該年度以前の格子点 128^4 のPACS10配位 (格子間隔0.085fm) の結果で、fine とラベルされている方が、当該年度の計算により得られた格子点 160^4 のPACS10配位 (格子間隔0.063fm) の結果である。内側の誤差棒は統計誤差、外側の誤差棒が統計誤差と系統誤差を二乗和の平方根で求めた総合誤差である。

軸性電荷 (g_A) に対しては、系統誤差を加味しても誤差1-2%の範囲内で格子間隔依存

性は認められず、実験値とも矛盾ない計算結果になっていることがわかる。coarse の計算において、実験値より過小評価されていた電気的な RMS 半径や軸性ベクトルの RMS 半径の結果は、fine の計算において、より実験値に近づく傾向が統計誤差の範囲を超えて見て取れる。このことは、RMS 半径に対してチャンネルに寄らず、大きな格子間隔依存性が存在していることを示唆している。しかし、軸性電荷 (g_A) 以外の 4 つの物理量に関しては、系統誤差が統計誤差に比べて十分に制御できていない。そのため、総合誤差で表される 10-15% 程度の不定性を勘案すると、coarse と fine の計算に明白な差異が生じているとは断定できない。今後、少なくとも 3 パターンの格子間隔の計算結果を使って、連続極限での値を評価をすることが重要である。

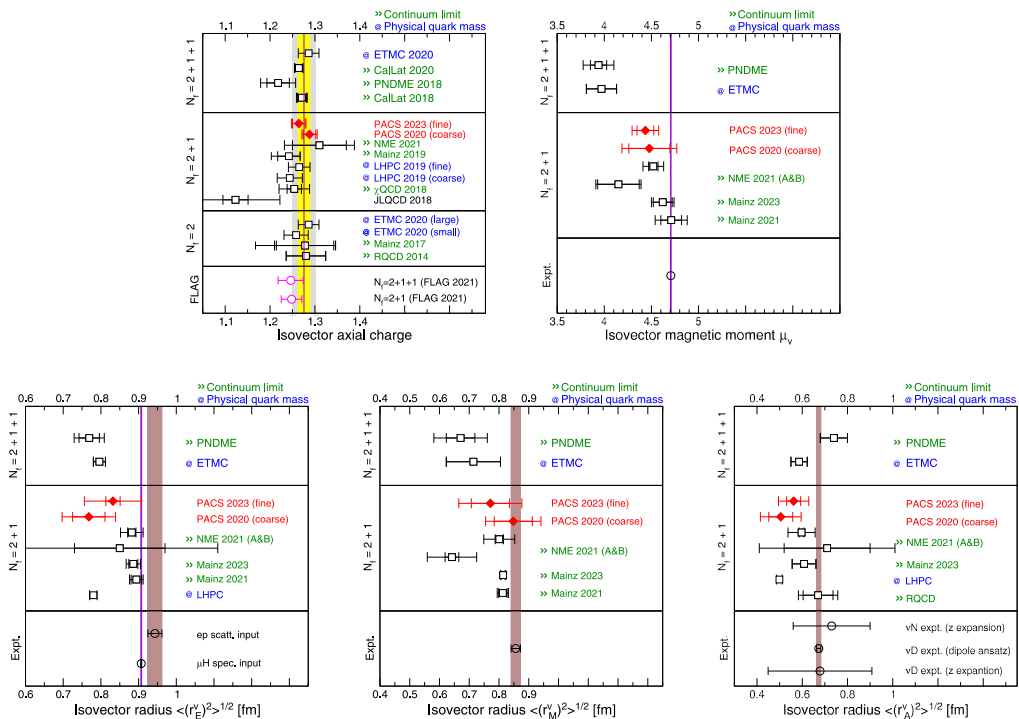


図 1

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

5つの物理量に対して、連続極限での値を評価するには、格子点 256^4 の PACS10 配位 (格子間隔 0.04 fm 程度) を使った 3 パターン目の格子間隔における結果を得ることは必要不可欠である。格子点 256^4 の計算規模は、Wisteria/BDEC-01 の利用では困難なため、R05 年度 HPCI 利用研究課題の富岳一般利用により、その計算を開始している。より精度の高い連続極限值を評価するためには、格子点 256^4 の計算を新たに行うだけでなく、同時に、格子点 128^4 と格子点 160^4 における計算精度も高めておくことも必要である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “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, Proceedings of Science, Vol.430 (LATTICE 2022), (2023) 127.
- ② “Discretization effects on nucleon root-mean-square radii from lattice QCD at the physical point”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, Proceedings of Science, Vol.453 (LATTICE 2023), (2024) 323.

(2) 学会発表

- ① “Recent progress on nucleon form factors in lattice QCD at the physical point”, S. Sasaki, Sixth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, Hilton Waikoloa Village, Hawaii, USA, Nov.26-Dec.1, 2023.
- ② “Discretization effects on nucleon root-mean-square radii from lattice QCD at the physical point”, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, The 40th International Symposium on Lattice Field Theory, FNAL, Illinois, USA, Jul.31-Aug.4, 2023.
- ③ “Axial structure of the nucleon in large-volume lattice QCD at the physical point”, R. Tsuji, Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning, Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Nov.23-25, 2023.
- ④ “Hadron form factors from PACS10 configurations”, T. Yamazaki, Lattice QCD and Probes of New Physics, McKibbin Conference Center, USA, Aug.7-11, 2023.

- ⑤ 「連続極限を目指した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(2023), 東北大学, 2023 年 9 月 16-19 日
- ⑥ 「格子 QCD を用いた素粒子原子核物理の精密計算」, 佐々木勝一, 第 10 回 HPCI 利用研究課題 成果報告会, 東京都港区, 2023 年 10 月 25-26 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	○	120,000	
Wisteria/BDEC-01	○	550,000	

※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。