

## 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 ( $\pi$  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 0.063 fm) での格子 QCD 計算を行い、前年度までに、核子の大きさに関連して核子のベクトルチャンネル (電氣的形状因子、磁氣的形状因子)、軸性ベクトルチャンネル (軸性形状因子、誘導擬スカラー形状因子) の4つの形状因子に関係する様々な物理量に対して、統計誤差 1-6%の計算精度での評価に到達した。

現在、3つ目の格子間隔 (0.041 fm) での格子 QCD 計算については、HPCI システム利用研究課題においてスパコン富岳を用いて進めており、最終的に、3つ目の格子点の計算結果を加えることで、連続時空間を格子化することによって生じる離散化誤差を取り除いた「連続極限」の結果を算出することを目指している。

すでに、論文として公表している、2つの格子間隔 (0.085 fm と 0.063 fm) での格子 QCD 計算の結果のうち、最も計算精度の高い核子軸性電荷  $g_A$  について、それぞれの誤差を中心値で規格化した相対的な統計誤差は、3.2% (格子点  $128^4$ 、格子間隔 0.085 fm) と 1.6% (格子点  $160^4$ 、格子間隔 0.063 fm) となっている。連続極限を算出するためには、3つ目の格子点  $256^4$  (格子間隔 0.041 fm) の計算結果が必要であると同時に、最終結果に対して、高い精度 (誤差として 2%以下) を維持するには、3つ目の格子点  $256^4$  の計算結果を得るだけでは十分とは言えず、格子点  $128^4$  と格子点  $160^4$  における計算精度の計算結果の精度もさらに上げておく必要がある。

そこで、本年度は、格子点  $128^4$  の計算の精度を上げるために、三点関数の測定を増やす試みを行った。核子軸性電荷の測定には、核子行列要素に含まれる軸性ベクトル  $A_k$  の  $k$  成分を、偏極軸の方向に選ぶ必要があるが、偏極軸の方向毎に計算コストが生じるため、これまでは、偏極軸を  $Z$  方向に固定して計算を実施してきた。そこで、測定結果に回転対称性を反映させて測定精度を上げることを考えた。 $X$  方向、 $Y$  方向を偏極軸に選んだ測定を追加で行い、3つの方向の平均を取ることで、最終的にどの程度、測定精度が良くなるか検証した。

図1では、これまでの  $Z$  方向のみの場合(上)と、 $X, Y, Z$  の3方向の平均を取った場合(下)の、核子軸性電荷  $g_A$  と核子三点関数に挿入したカレントの位置  $t$  の依存性をソース・シンク間隔  $t_{\text{sep}}=1.2$  fm に選んだ場合に比較した。中央付近5点を定数で異なる  $t$  のデータ相関考慮したフィットを試みた結果が赤い線と灰色領域 ( $1\sigma$  誤差範囲) で表している。偏極軸を3方向選択して平均を取った場合でも、同じ領域でフィットした場合には、0.5%程度の精度向上しか得られないが、 $Z$  方向のみの場合よりも明らかに、広い領域でカレントの位置  $t$  の依存性が消失し、励起状態の寄与の影響が排除できていることが確認できる。そのため、基底状態に対するフィット領域を中央付近5点から7点に拡大することが可能となり、中央付近7点によるフィット結果では、格子点  $160^4$  で得られている計算精度に匹敵する、1.9%精度 (黒い線と茶色領域) の結果が得られた。

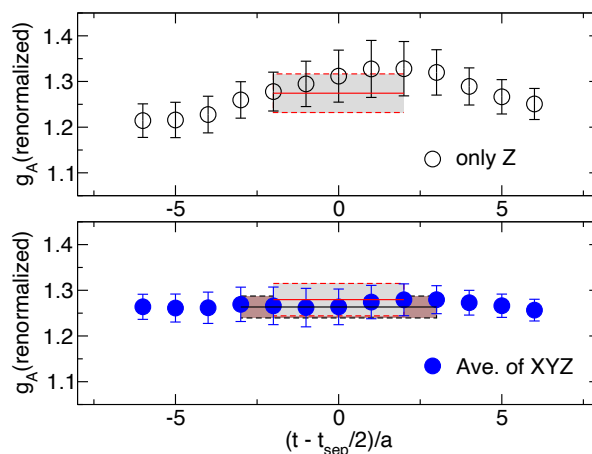


図1：核子軸性電荷  $g_A$  と核子三点関数に挿入したカレントの位置  $t$  の依存性 (格子点  $128^4$ 、 $t_{\text{sep}}=1.2$  fm)。偏極軸が  $Z$  方向のみ(上)、偏極軸を全3方向を取った場合(下)。

### 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  $128^4$  及び  $160^4$  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、Miyabi-G のように高性能なスパコン (特

に、64 以上の多数ノード並列) で初めて可能となった。また、Pegasus は、陽子電荷半径の評価に必要な核子三点関数の非連結ダイアグラム計算のテスト計算に利用した。

#### 4. 今後の展望

連続極限での値を評価をするには、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、Miyabi-G/Pegasus の利用では困難なため、HPCI 利用研究課題の富岳一般利用により、その計算を R05 年度より開始し、R08 年度も継続予定である。ただし、より精度の高い連続極限值を評価するためには、格子点  $256^4$  の計算を行うだけでなく、同時に、偏極軸に対して、取りうる 3 方向の測定を追加することで、Miyabi-G/Pegasus の利用により、格子点  $128^4$  と格子点  $160^4$  における計算精度も順次高めておくことも必要である。

#### 5. 成果発表

##### (1) 学術論文

- ① “Method for high-precision determination of the nucleon axial structure using lattice QCD: Removing  $\pi$ N-state contamination”, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, K. Sato, E. Shintani, R. Tsuji, H. Watanabe, T. Yamazaki, Physical Review D112 (2025) 074510.

##### (2) 学会発表

- ① “Hadron form factor from lattice QCD on large volumes at the physical quark mass”, Takeshi Yamazaki, The 2025 Asian Nuclear Physics Association (ANPhA 2025), Academia Sinica, Taiwan, November 27-29, 2025.
- ② “Nucleon axial structure on large-volume lattice QCD at the physical point”, Ryutaro Tsuji, Neutrino Interactions for Current and Future Experiments, KEK, Tsukuba, October 27-29, 2025.
- ③ “Kaon semileptonic form factors at the physical quark masses on large volumes in lattice QCD”, Takeshi Yamazaki, 16th European Research Conference on Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei (EINN 2025), Coral Beach Resort, Cyprus, October 28-November 1, 2025.
- ④ “Recent update of nucleon axial-vector charge with the PACS10 superfine lattice”, Masato Nagasuka, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Kohei Sato, Eigo

Shintani, Ryutaro Tsuji , Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, The 42nd International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2025), TIFR, Mumbai, India, November 2-8, 2025.

- ⑤ 「Axial structure of the nucleon on large-volume lattice QCD」, 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛, 「富岳」成果創出加速プログラム 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, ビジョンセンター田町, 2025 年 9 月 9-11 日
- ⑥ 「Lattice studies of the proton decay matrix elements at the physical point」, 辻竜太郎, 青木保道, 蔵増嘉伸, 新谷栄悟, 「富岳」成果創出加速プログラム 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, ビジョンセンター田町, 2025 年 9 月 9-11 日
- ⑦ 「PACS10 配位を用いた格子 QCD 計算で探る核子の軸性構造」, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 佐藤航平, 新谷栄悟, 辻竜太郎, 渡辺展正, 山崎剛, 日本物理学会第 80 回年次大会(2025), 広島大学, 2025 年 9 月 16-19 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	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	14,080		
Miyabi-G	○	39,600	+24,000	
Miyabi-C	○	30,000	-30,000	
※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				