

## 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

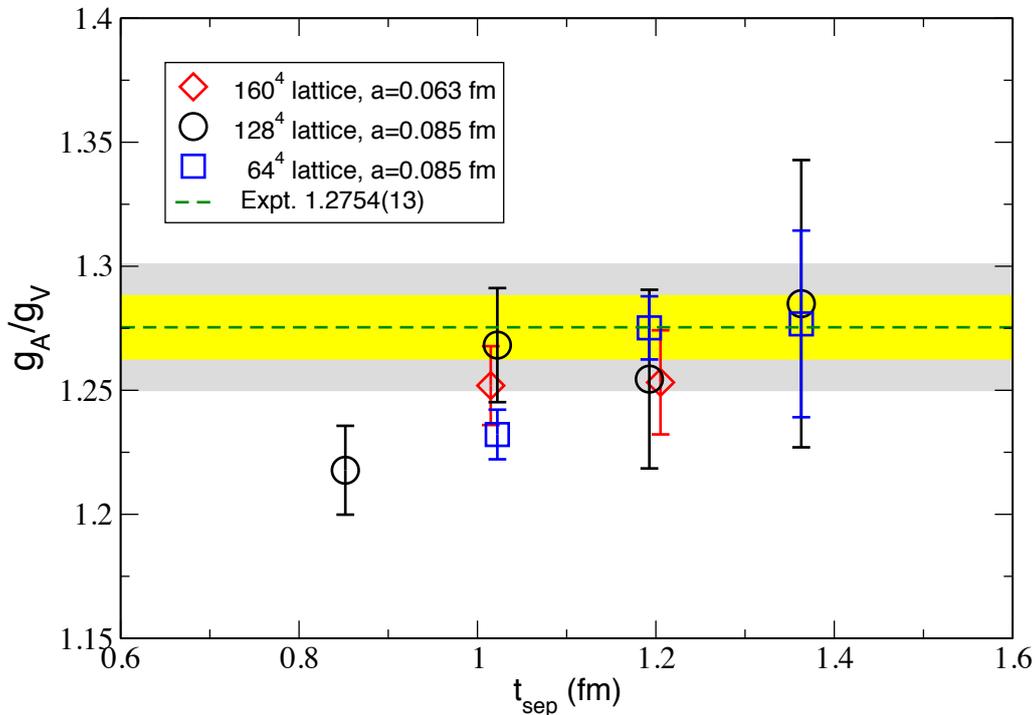
本研究課題では、核子の内部構造に関する諸問題に焦点を合わせ、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD 数値計算に基づく研究を行う。既に生成されている、物理点の 2+1 フレーバー格子 QCD ゲージ配位 (PACS10 配位) を利用して、核子の大きさを含む核子の内部構造に関する物理量の精密計算を行う。

### 2. 研究成果の内容

本研究では核子の内部構造に関連した研究を縮退した軽いアップ・ダウンクォークと、それらよりも重いストレンジクォークの真空偏極を取り入れた、2+1 フレーバー格子 QCD 計算により行なっている。格子 QCD 計算では、「クォーク質量」、「有限体積」、「有限格子間隔」の 3 つの系の物理スケールに関するパラメータがある。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) を利用することで、「クォーク質量」、「有限体積」に伴う系統誤差の生じない格子 QCD 計算が実施できる。これまで、格子点  $128^4$  の PACS10 配位 (1 つ目の格子間隔 0.085fm に相当する配位) 上での核子形状因子の数値計算により、当該年度以前に、核子の大きさに関連した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」、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」、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」の 5 つ物理量に対して、統計誤差 2-5% の計算精度での評価に成功してきた。

格子点  $128^4$  の PACS10 配位による格子 QCD 計算だけでは評価することができない「有限格子間隔 (差分化)」に由来する系統誤差を評価すべく、昨年度より着手している格子点  $160^4$  の PACS10 配位 (2 つ目の格子間隔 0.063fm に相当する配位) を利用した格子 QCD 計算を当該年度も引き続き実施した。

次の図は、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  $\diamond$  のシンボルが、当該年度に計算された格子点  $160^4$  の格子間隔 0.063fm で得られた結果である。格子間隔 0.085fm では、格子点  $128^4$  (1 辺 10.9 fm) のこれまでの結果に加え、当該年度中に新たに格子点



(1辺 5.5 fm) による計算も実施し、2つの物理体積の結果が得られている。

図中の横軸は核子3点関数の計算におけるソース・シンク間距離  $t_{\text{sep}}$  の変位に対して評価された  $g_A$  の結果がどれだけ安定であることを示した図である。核子3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。軸性ベクトルの演算子に対する核子3点関数は、評価したい軸性電荷  $g_A$  に比例した値となるが、ソース・シンク間距離  $t_{\text{sep}}$  の値に依存した因子にも比例する。この因子は核子質量  $M$  を係数として  $t_{\text{sep}}$  に対して漸的に  $\exp(-Mt_{\text{sep}})$  の指数関数的振る舞いをするため、数値計算の実用上なるべく小さな  $t_{\text{sep}}$  を選ぶ方が、核子3点関数の S/N 比がよくなり、数値的に高い精度で評価できる。その結果、より少ない統計数でより精密な軸性電荷  $g_A$  の評価が可能となる。しかし、小さな  $t_{\text{sep}}$  を選ぶと核子3点関数に核子状態よりも大きなエネルギー状態である、「核子の励起状態」や「核子と  $\pi$  中間子の多粒子状態」からの寄与が加法的に現れ、その寄与の存在が無視できなくなる。そのため、これら励起状態の寄与に由来する系統誤差が統計誤差よりも有為に小さくなるように大きな  $t_{\text{sep}}$  を選ぶ必要がある。

すでに完了している格子点  $128^4$  の格子 QCD 計算では、4 パターンのソース・シンク間距離  $t_{\text{sep}}$  を使って核子3点関数を計算した。図に示したように最終結果の軸性電荷  $g_A$  において、2%程度の統計誤差の範囲内では  $t_{\text{sep}}$  の依存性が  $t_{\text{sep}} \gtrsim 1.0$  fm の計算において無視できることを確認した。この結果を踏まえ、当該年度に行った格子点  $160^4$  の格子

QCD 計算において  $t_{\text{sep}}=1.0$  fm と 1.2 fm の 2 点で軸性電荷  $g_A$  を計算し、格子点  $128^4$  の計算結果と同程度の統計誤差の範囲では明示的な  $t_{\text{sep}}$  の依存性がないことを追認している。この図から、「有限体積」、「有限格子間隔」の 2 つ系の物理スケールに由来する系統誤差、さらには、核子 3 点関数の計算方法に由来する励起状態の寄与に関する系統誤差を含め、本研究の精密第一原理計算において、核子軸性電荷  $g_A$  に対して誤差 1-2% レベルでの実験値の再現に成功していることがわかる。

### 3. 学際共同利用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、国内最大規模となる Oakforest-PACS のように高性能なスパコンで初めて可能となった。

### 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、早急に繰り込み因子の評価に着手したい。また励起状態の寄与による系統誤差を格子点  $128^4$  においてなされたのと同程度の定量的な評価を達成するために、格子点  $160^4$  においても 3 つ目のソース・シンク間距離  $t_{\text{sep}}$  での計算を追加することも検討している。

### 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

使用計算機	使用計算機	配分リソース*	
	に○	当初配分	追加配分
Cygnus	○	15000	
Oakforest-PACS	○	255000	76500
※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。			