

## 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。これまで PACS Collaboration の下、Oakforest-PACS を用いて生成されたゲージ配位 (PACS10 配位) を利用した格子 QCD 計算において中性子  $\beta$  崩壊を特徴付ける核子軸性電荷  $g_A$  に対して、統計精度 1-2% での評価が可能となった。さらに、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  $g_T$  に対しても数%の統計精度で評価することに成功している。さらなる核子の内部構造の理解には、核子をクォーク・グルーオンの量子多体系として扱うために必要な構造関数やそのモーメントに関する研究は欠くことができない。

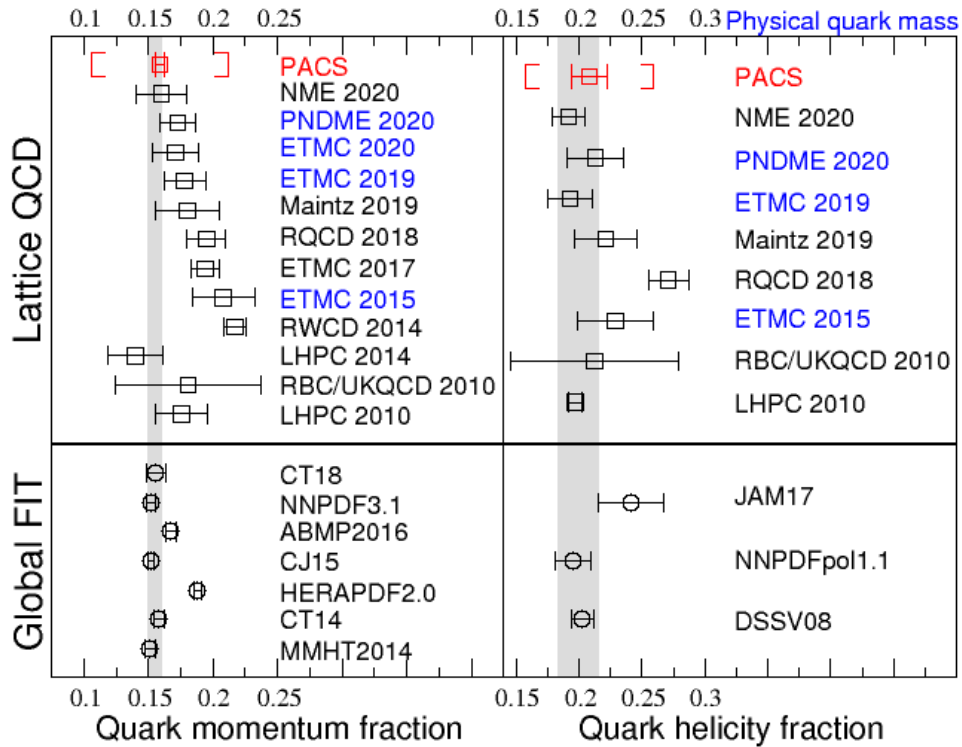
当該年度は、構造関数に関する物理量、核子中のクォーク運動量割合及びヘリシティ割合という新たな物理量の評価に着手した。それらの物理量进行评估するには、格子上でクォーク運動量割合及びヘリシティ割合に相当する行列要素を計算するだけでなく、場の量子論の手続きに沿って、計算に用いたカレント演算子の繰り込み因子を非摂動的に格子 QCD 計算で別途評価する必要がある。本研究では、Regularization-independent (RI) スキームによる非摂動的繰り込みの手法を採用した。

最終的に、物理点直上 ( $\pi$  中間子質量が 135 MeV) で、かつ一辺が差し渡し 10 fm を超える巨大な空間体積で生成された格子間隔が 2.33 GeV カットオフ相当の PACS10 配位を用いた格子 QCD 計算により、アイソベクター型のクォーク運動量割合及びヘリシティ割合はそれぞれ、 $\overline{\text{MS}}$  スキームを使って 2 GeV での繰り込み点で

$$\langle x \rangle_{u-d}^{\overline{\text{MS}}(2 \text{ GeV})} = 0.159(3)_{\text{stat.}}(33)_{\text{ren.}}, \quad \langle x \rangle_{\Delta u - \Delta d}^{\overline{\text{MS}}(2 \text{ GeV})} = 0.208(14)_{\text{stat.}}(49)_{\text{ren.}}$$

を得た。この結果とこれまでに得られている他のグループの物理点近傍の格子 QCD による理論計算の結果 (上段) 及び、実験から現象論的に求められた値 (下段) を比較し

たものが下図（右側がクォーク運動量割合、左側がヘリシティ割合）である。ここで図の最上位に位置する本研究の結果（赤い□）に付いている誤差棒は統計誤差であり、外括弧は繰り込み因子の評価に伴う系統誤差を含めた総合的な誤差を表す。



灰色の帯は、図の下段にある実験から現象論的に求められた幾つかの値を元に推定される参考値である。図に示したように、クォーク運動量割合及びヘリシティ割合の研究は、世界中の様々な格子 QCD 研究グループで行われてきたが、灰色の帯で示された誤差精度に匹敵する精度内でこの参考値の再現には成功していなかった。本研究の結果（赤い□）は誤差棒で表された統計誤差の範囲でそれら参考値をよく再現していることが分かる。

### 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  $128^4(160^4)$  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

これまでの格子間隔 (2.33 GeV カットオフ相当で格子点  $128^4$ ) と異なる格子間隔 (3.06 GeV カットオフ相当で格子点  $160^4$ ) の PACS10 配位による格子 QCD 計算（該当する物理量の裸の行列要素のみ）にも着手したが、残念ながら当該年度中に十分な統計

精度を得るには至っていない。次年度も継続して格子点  $160^4$  の格子 QCD 計算を行い、2 つの格子間隔による計算結果を使って、有限格子間隔に伴う系統誤差を見積もる必要がある。また、繰り込まれたクォーク運動量割合及びヘリシティ割合の計算に必要な繰り込み因子の評価に際して、比較的大きな系統誤差が残っているため、その系統誤差を減らすための方法も現在検討中である。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

- ① “Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point”  
N. Tsukamoto, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, E. Shintani, S. Sasaki and T. Yamazaki (PACS Collaboration), Proceedings of science, LATTICE2019 (2020) 132.
- ② “Erratum: Nucleon form factors and root-mean-square radii on a  $(10.8 \text{ fm})^4$  lattice at the physical point”  
E. Shintani, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki and T. Yamazaki (PACS Collaboration), Physical Review D102 (2020) 19902.

### (2) 学会発表

- ① “Nucleon structure at physical point from 2+1 flavor Lattice QCD”  
R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT 2020), On-line, Aug. 4-7, 2020.
- ② “Nucleon structure with 2+1 flavor lattice QCD at physical quark mass”  
R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, International School for Strangeness Nuclear Physics (SNP school 2020), KEK 東海キャンパス, Dec. 2-5, 2020.
- ③ 「物理点 2+1 フレーバー格子 QCD による核子構造研究」, 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 2020 年秋季大会, オンライン, 2020 年 9 月 14-17 日
- ④ 「格子場の理論に基づく核子構造研究」, 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, 日本のスピン物理学の展望, オンライン, 2021 年 2 月 23-24 日
- ⑤ 「核子内クォークの担う運動量及びヘリシティ割合の物理点格子 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 2021 年第 76 回年次大会, オンライン, 2021 年 3 月 12-15 日

## 筑波大学計算科学研究センター 2020 年度学際共同利用 報告書

### (3) その他

- ① 修士論文：辻竜太郎、東北大学、修士（理学）、“2+1 フレーバー格子 QCD による核子構造関数の研究”

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	○	36000	
Oakforest-PACS	○	240000	240000
※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。			