

## 格子 QCD による物理点での核子構造の研究

### Nucleon structure from lattice QCD at nearly 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。

中性子  $\beta$  崩壊は、クォークの素過程レベルではベクトル型 (V) と軸性ベクトル型 (A) の差、V-A 型の結合によって引き起こされるが、当該年度では、通常の  $\beta$  崩壊では現れない、標準理論を超えた新物理の探求に有効とされる、「非 V-A 型」の中性子崩壊としてスカラー (S) 型とテンソル (T) 型の崩壊に着目して研究を行なった。非 V-A 型の崩壊過程は V-A 型のようなアイソスピン対称性やカイラル対称性に相当する対称性がないため、強い相互作用の量子補正の影響を強く受ける可能性がある。その量子補正の強さを表すのが、核子スカラー荷  $g_S$  と核子テンソル荷  $g_T$  という核子構造を反映した物理量で、それ自体実験で直接測定することは困難な物理量である。

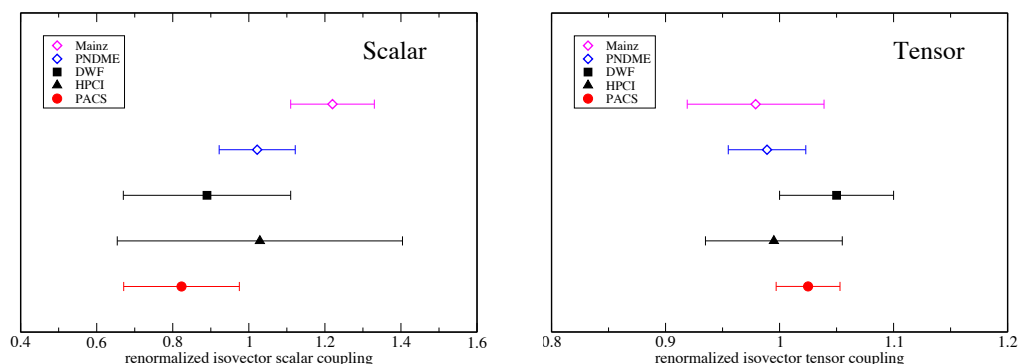
格子上のカレント演算子の繰り込み係数を格子 QCD 計算で非摂動的に別途評価の上、物理点直上 ( $\pi$  中間子質量が 135 MeV) で、かつ一辺が差し渡し 10 fm を超える巨大な空間体積で生成された PACS10 配位を用いて繰り込まれたアイソベクターの核子スカラー荷  $g_S$  と核子テンソル荷  $g_T$  を第一原理計算として理論的に評価した。

最終的に、 $\overline{\text{MS}}$  スキームを使って 2 GeV の繰り込み点で評価した、核子スカラー荷  $g_S$  と核子テンソル荷  $g_T$  はそれぞれ

$$g_S = 0.823(152)_{\text{stat}}(11)_{\text{sys}} \quad g_T = 1.025(19)_{\text{stat}}(21)_{\text{sys}}$$

となった。一つ目の誤差は、統計誤差、二つ目の誤差はカレントの繰り込み係数を評価する際の系統誤差に相当する。

以下の図ではこれまで得られている他のグループの格子QCD計算との比較である。



左から、アイソベクターの核子スカラー荷 $g_S$ 、核子テンソル荷 $g_T$ で、それぞれの図中の■は研究責任者が以前行ったDomain wall fermionsを使った計算結果で▲がHPCI配位 ( $\pi$ 中間子質量が146MeVで一辺8.1fmの差し渡しの空間体積)で行われた我々の過去の計算結果、一番下にある赤い●が今回のPACS10配位の計算結果である。比較のために合わせて、FLAG2019の結果からMainzグループとPNDMEグループの最終結果も合わせて載せてある。今回の我々の結果(赤い●印)はFLAG2019で推奨された結果と遜色ない精度を達成している。PACS10とこれら先行研究との違いは、PACS10においては核子軸性電荷 $g_A$ の統計精度1-2%に達し、実験値もその精度で再現できている点が挙げられる。

さらにPACS10の結果を使い実験の制限から強い相互作用の量子補正を取り除き、標準理論を超えた新物理に対する直接的な制限も評価した。現状では実験精度が高くないため、標準理論を超えた新物理の存在に対して残念ながらゼロコンシステントな結果となった。しかし超冷中性子を利用した中性子崩壊の超精密測定が今後計画されており、本研究で理論的に評価したアイソベクターの核子スカラー荷 $g_S$ と核子テンソル荷 $g_T$ の値、特に3%以下の精度に達した $g_T$ の結果は、新しい実験結果から標準理論を超えた新物理を探るための一助になると期待できる。

### 3. 今後の展望

これまでの格子間隔(0.08 fm)と異なる格子間隔(0.06 fm)の新しいゲージ配位の提供がPACS Collaborationにより既にあり、今後は有限格子間隔に伴う系統誤差を見積もるための格子点数 $160^4$ の大規模格子QCD計算を実施することが必要である。また、陽子の電荷半径を直接評価するには、アイソベクターの物理量だけでなく、アイソスカラーの物理量も合わせて計算する必要がある。そのためには、核子三点関数の計算において連結型のみならず、比較的計算コストが高くなる非連結型の計算も必須となる。

4. 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) 学会発表

- ① “Nucleon form factors from PACS10 configuration”  
 Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Lattice QCD workshop, La Posada de Santa Fe, Santa Fe, NM, USA, Aug. 26-30, 2019.
- ② “Nucleon couplings in  $N_f = 2+1$  lattice QCD”  
 Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Workshop on Nucleon electric dipole moments and spin structure in 2020, KEK 東海キャンパス, Jan. 11, 2020
- ③ 「物理点 2+1 フレーバー格子 QCD による核子のアイソベクター結合の計算」, 塚本夏基, 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 2019 年秋季大会, 山形大学, 2019 年 9 月 17-20 日

(3) その他

- ① 博士論文: 塚本夏基、東北大学、博士 (理学)、“Renormalized nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD”

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	○	30000	
Oakforest-PACS	○	225000	
※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。			