

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、物理点近傍の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。

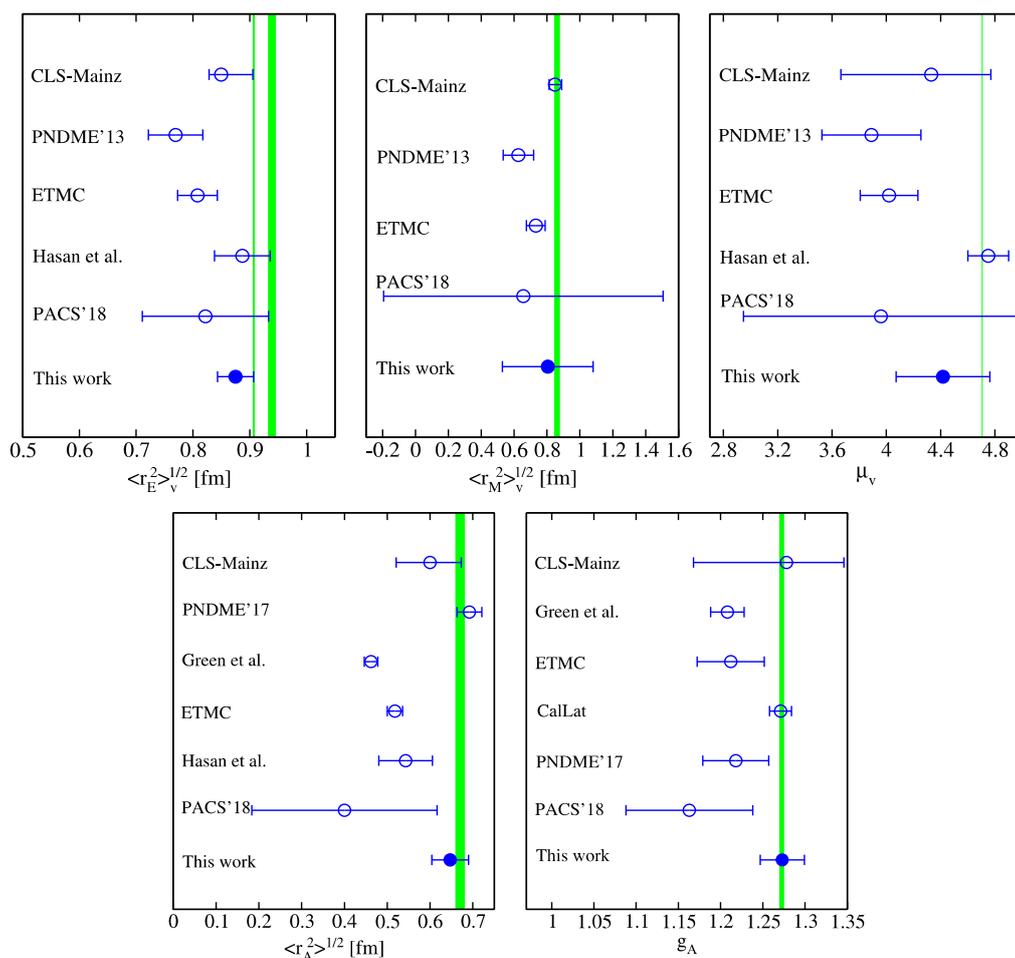
2. 研究成果の内容

本研究では核子の構造を特徴づける物理量である核子形状因子の理論計算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計算により行なった。これまで、HPCI戦略プログラム分野5の下で生成されたゲージ配位(HPCI配位)を利用した我々の研究により、格子QCDでは陽子電荷半径を含む核子の大きさに対する実験結果を再現できないという長年の問題に対して、一応の決着を見た。しかし最近の実験で指摘されている、電子-陽子弾性散乱の実験で見積もられたものと、 μ 粒子が電子の代わりに水素原子核に束縛した μ 水素原子の軌道半径を利用して評価したものと間に4%ほどの有為な差異に由来する「陽子電荷半径に対するパズル」の解明に至るほどの計算精度は得られなかった。

そこで当該年度は、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計算を行った。HPCI配位は物理点近傍(π 中間子質量が146MeV)でかつ核子間相互作用が計算可能なほど大きな空間サイズ(一辺8.1fmの立方体)で生成されたが、PACS10配位は、さらなるパラメータの微調整により物理点直上(π 中間子質量が135MeV)で、かつ空間サイズも25%増大(一辺10.8fmの立方体)して生成されている。格子上では取り得る運動量が空間サイズの逆数で量子化されるため、PACS10配位はHPCI配位に比べ、さらに空間サイズが大きくなったことで低運動量領域の核子形状因子の情報に、より重点的にアクセスできる。平均二乗半径は、核子形状因子のゼロ運動量における傾きから決まるため、PACS10配位の計算では核子の大きさに対してより高精度の計算が可能となった。さらにクォーク伝搬関数の計算に対して新しいall-mode-averaging (AMA)アルゴリズムを採用して、HPCI配位を利用した計算の際と同程度の計算時間で、より多くの統計数を得ることができた。

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」、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_v)」、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2-7%の計算精度での評価に到達した。下図は、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。各図中のPACS'18のデータは我々のHPCI配位の計算結果であるが、我々のHPCI配位の計算と比べて飛躍的に計算精度が上がり、PACS10配位による計算結果は1-1.5 σ の範囲で実験値を再現することに成功していることが確認できている。



3. 今後の展望

実験で指摘されている4%程度の核子の大きさの差異を識別可能なレベルの精密測定(統計誤差1-2%以下のレベル)を目標として、引き続きPACS10配位利用による格子QCD計算を継続して行う。さらに現在PACS Collaborationにより異なる格子間隔のゲージ配位の生成が行われており、順次その2つ目の格子間隔による格子QCD計算も実施することによって、有限格子間隔による系統誤差の見積もりも今後行っていく必要がある。

4. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Nucleon form factors on a large volume lattice near the physical point in 2+1 flavor QCD” ,
K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, N. Tsukamoto, A. Ukawa and T. Yamazaki, Physical Review D 98 (2018) 074510.
- ② “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, Physical Review D 99 (2019) 014510.

(2) 学会発表

- ① “Nucleon form factors from lattice QCD near the physical point” ,
S. Sasaki, Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and the JPS, Hilton Waikoloa Viillage, Hawaii, USA, Oct 23-27, 2018.
- ② “Nucleon form factors on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point in 2+1 flavor QCD” , Y. Kuramashi for PACS Collaboration, The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2018), East Lansing MI, USA, July 22-28, 2018.
- ③ “Lattice calculation of nucleon form factor at physical point” , E. Shintani, 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2018), Tsukuba, Ibaraki, Nov.13-17, 2018.
- ④ 格子 QCD を用いた核子形状因子及び電荷半径の計算：新谷栄悟，藏増嘉伸，石川健一，佐々木勝一，塚本夏基，山崎剛 for PACS Collaboration, 日本物理学会 2018 年秋季大会，信州大学松本キャンパス，2018 年 9 月 14 日-17 日.
- ⑤ ウィルソンフェルミオンを用いた物理点近傍での 2+1 フレーバー QCD による核子形状因子の計算：軸性ベクトル、擬スカラー形状因子再考：塚本夏基，藏増嘉伸，石川健一，佐々木勝一，山崎剛 for PACS Collaboration, 日本物理学会 2018 年秋季大会，信州大学松本キャンパス，2018 年 9 月 14 日-17 日.
- ⑥ “Lattice QCD studies on nucleon form factors” , 山崎剛, KEK 研究会：「QCD と核子構造の進展 2019」, KEK つくばキャンパス, 2019 年 2 月 28 日-3 月 1 日.
- ⑦ “Nucleon isovector charges from 2+1 flavor lattice QCD ” , 塚本夏

基, KEK 研究会: 「QCD と核子構造の進展 2019」, KEK つくばキャンパス, 2019 年 2 月 28 日-3 月 1 日.

- ⑧ “Prospects on nucleon structure studies by PACS”, 佐々木勝一, KEK 研究会: 「QCD と核子構造の進展 2019」, KEK つくばキャンパス, 2019 年 2 月 28 日-3 月 1 日.
- ⑨ “Nucleon form factors from lattice QCD at the physical point”, 佐々木勝一, ELPH 研究会「電子散乱による原子核研究—陽子半径、不安定核の電荷密度分布を中心に—」, 東北大学電子光理学研究センター、2019 年 3 月 20 日-21 日.
- ⑩ “PACS10 project in lattice QCD”, 山崎剛, 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, 筑波大学, 2018 年 10 月 15 日-16 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	追加配分
COMA	○	34,000	8,500
Oakforest-PACS	○	675,000	405,000
※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。			