

受付 ID	17a-8
分野	原子核

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。

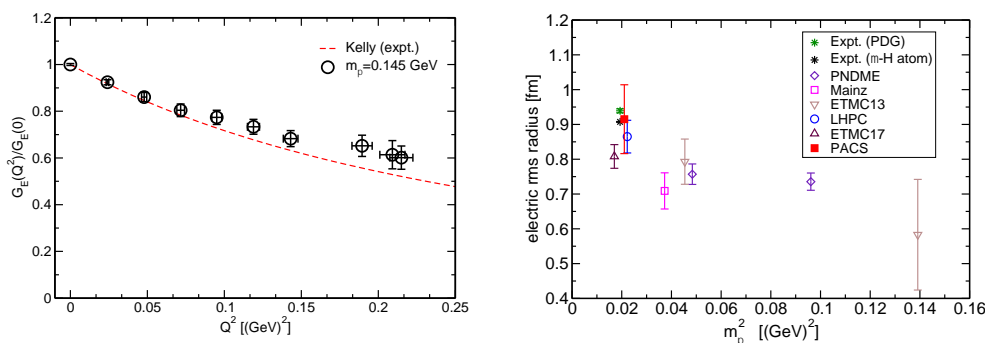
2. 研究成果の内容

最近の実験で指摘されている4%程度の核子の大きさに対するパズルに挑戦する以前に、これまでの格子QCD計算では核子の大きさとして常に実験で測られた平均二乗半径の約30%程度小さい値しか得ることができていないという問題が存在した。この理由として格子QCD計算が物理点(クォーク質量が現実世界と同じくらい軽い)から離れてシミュレーションが行われているため、つまりハドロンの中で最も軽い粒子である π 中間子の質量が現実世界よりも2-3倍程度大きいことが最大の原因とされてきた。しかし最新の物理点近傍の格子QCD計算においても依然実験値よりも優位に小さいことが報告されている。

本研究では、これまでの物理点近傍の格子QCD計算が十分に大きな格子空間サイズで行われていないことに着目した。HPCI戦略プログラム分野5において生成された物理点近傍(π 中間子質量が145 MeV)でかつ、核子間相互作用を計算することも可能なほど大きな格子空間サイズ(一辺8 fmの立方体)のQCDゲージ配位(HPCI配位)は、現在でも世界トップ5に入る計算速度を誇るスーパーコンピューター京なくしては生成できなかったものである。この唯一無二の物理点かつ巨大空間サイズQCDゲージ配位(HPCI配位)を利用した核子構造に関する格子QCD計算により、これまでに示唆されている主要な系統誤差を取り除いた格子QCD計算がようやく実現され、これまで再現が難しいとされてきた「核子の電荷半径」を世界で初めて格子QCD計算として統計誤差の範囲で再現できた。

下図左の○が、本研究の格子QCD計算により理論的に評価された核子の電氣的形状因子の運動量移行依存性を示す。図中の赤い破線によるカーブは、実験値に相当するKellyのフィットカーブである。低い運動量移行領域で我々の計算結果とカーブとの一

致が良い。形状因子のゼロ運動量移行に置ける傾きから核子の平均二乗半径(RMS)を読み取ることができる。下図右では、物理点に近い、軽いクォーク質量による格子QCD計算から求められたRMS半径を数値計算で使われた π 中間子質量の二乗の関数としてプロットした図である。赤い■記号が我々の結果で、統計誤差が大きいもののその中心値は、電子陽子散乱実験（黒い*記号）と μ 水素原子分光（緑の*記号）で測った二つの実験値を再現できる程大きなRMS半径になっている。我々以前の格子QCD計算（白抜き記号）では、二つの実験値に比べ優位に小さいRMS半径が報告されている。



3. 今後の展望

HPCI 配位を使った格子 QCD 計算において核子の電荷半径の実験値を再現することに成功したものの、その精度は未だ 4%程度の電荷半径のパズルを解決するのに十分な精度に達していない。より計算精度を向上させるために PACS Collaboration によって新たに Oakforest-PACS を用いて生成される QCD ゲージ配位 (PACS 配位) を用いた格子 QCD 計算に今後着手する。新しい PACS 配位では、これまでの HPCI 配位に比べて、よりパラメータが微調整され、ほぼ実際のクォーク質量直上 (物理点) で生成されている。さらに格子サイズも一辺の格子点 L が 96 から 128 に 25%増えるため、 L の逆数により量子化される運動量をより小さくでき、核子形状因子の低い運動量移行領域のより詳細な情報にアクセスできるようになる。そのため新しい PACS 配位においてさらに高精度の核子の電荷半径が計算可能となり、核子の大きさのパズルが最終決着するものと期待できる。

4. 成果発表

(1) 学術論文：

“Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD near the physical point”,
 Natsuki Tsukamoto, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki
 and Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,
 EPJ Web Conf. 175 (2018) 06007; arXiv:1710.10782.

(2) 学会発表：

- ① “Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD near the physical point”, Shoichi Sasaki for PACS Collaboration, CSSM International Workshop on QCD Downunder 2017, July 10-14, 2017, Cairns, Australia (招待講演)
- ② “Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD near the physical point”, Natsuki Tsukamoto for PACS Collaboration, 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017), June 18-24, 2017 Granada, Spain (一般講演)
- ③ 格子 QCD による陽子パズル解明のための理論的研究：藏増嘉伸、シンポジウム「多様な手法によって解き明かす陽子のパズル」、日本物理学会第 73 回年次大会、2018 年 3 月 22-25 日、東京理科大学野田キャンパス (招待講演)
- ④ 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 による格子形状因子の計算：山崎剛、石川健一、藏増嘉伸、佐々木勝一、塚本夏基 for PACS Collaboration、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12-15 日、宇都宮大学峰キャンパス、(一般講演)
- ⑤ 物理点格子 QCD シミュレーションによる核子構造の研究：佐々木勝一、5th JCAHPC Seminar、2017 年 10 月 12 日、東京大学柏キャンパス (招待講演)
- ⑥ 格子量子色力学を用いた核子構造の研究：山崎剛、第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会、2017 年 11 月 2 日、コクヨホール、東京 (招待講演)

(3) その他：

平成 28 年度実施課題における HPCI 利用研究課題優秀成果賞受賞

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
HA-PACS/TCA			
COMA	○	28800	7200
Oakforest-PACS	○	1037400	518700
※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。			