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3種類の動的クォークの自由度(アップ、ダウン、ストレンジネス)を物 理的クォーク質量上で厳密に取り扱った、物理点における格子QCDを用いた第一原理計 算によって、核子の構造の情報をもつ核子形状因子に対して、誤差数%レベルの精密計 算を実施する。そこで、PACS Collaboration により「物理点(π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 れてたゲージ配位(PACS10配位)を利用し、これまで2パターンの格子間隔(0.085 fmと 0.063fm)での格子QCD計算を行い、前年度までに、核子の大きさに関連して核子の電気 的形状因子、磁気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 平均二乗半径やその平方根であるRMS半径」、及び磁気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つの物理量に対して、統計誤差1-6%の計算精度での評価に到達した。

当該年度は、核子の軸性ベクトル構造に着目し、軸性ベクトルチャンネルにおけるも う一つの誘導擬スカラー形状因子(F_P)および、擬スカラーチャンネルの擬スカラー形 状因子(G_P)に対して研究を行なった。この2つの核子形状因子は、他の形状因子と異 なり、核子-π中間子の連続状態の寄与が強く、実験値をうまく再現できていなかった。 そこで、核子-π中間子の連続状態のうち、特定の状態の影響を取り除く新しい解析方 法を考案し、図1の左図で示すように、F_P形状因子に関しては、陽子によるミューオン 捕獲実験(左図の◆記号)とπ中間子の電磁生成実験(左図の●記号)により得られた 値を再現することに成功した。さらに、軸性ベクトル対称性に対するウォード・高橋恒 等式を背景として、前述の2つの形状因子と、軸性ベクトル形状因子(F_A)の3つの形状 因子の間に成り立つ関係(一般化されたゴールドバーガー・トライマン関係式)

 $2M_N F_A(q^2) - q^2 F_P(q^2) = 2mG_P(q^2)$

が 2-3%精度で再現できること、2 つの形状因子($F_P \ge G_P$)のそれぞれに対して、南部によ り QCD の発見以前より提案されていた、図 1 中の実線のカーブで示される、 π 中間子の極 構造に基づく運動量移行の依存性の仮説(Pion-Pole-Dominance)の正当性を、初めて QCD の第一原理計算により示すことができた。



3. 学際共同利用プログラム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160⁴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、世界最高性能を有するスパコン富岳と同じ富士 通のプロセッサーA64FXを搭載した Wisteria/BDEC-01 のように高性能なスパコンで初 めて可能となった。また、Cygnus, Pegasus は、陽子電荷半径の評価に必要な核子三点 関数の非連結ダイアグラム計算のテスト計算に利用した。

4. 今後の展望

これまで非連結ダイアグラムが寄与しないアイソベクター量に関しては、新たに高 い精度で評価することに成功した2つの形状因子(FpとGp)を含め、5つの核子形状因 子に対し、2パターンの格子間隔(0.085 fm と 0.063fm)の格子 QCD 計算による結果が 得られた。それらの連続極限での値を評価をするには、さらに格子点256⁴の PACS10 配 位(格子間隔 0.04 fm 程度)を使った3パターン目の格子間隔における結果を得ること が必要不可欠である。格子点256⁴の計算規模は、Wisteria/BDEC-01の利用では困難な ため、HPCI利用研究課題の富岳一般利用により、その計算をR05年度より開始し,R07 年度も継続予定である。また、陽子電荷半径の評価のためには、アイソスカラーの核子 三点関数の評価に必要な非連結ダイアグラムの計算が必須となる。これまでの数値計 算により評価してできている連結ダイアグラムの統計揺らぎに比べて、非連結ダイア グラムの評価は統計揺らぎの制御が難しい。しかし、近年、軽いクォークとストレンジ クォークの非連結ダイアグラム差の評価に対して大幅な精度改善が可能な Split-Even 法が提案されている。今後、Split-Even 法を利用することで、アイソスカラーの非連 結ダイアグラムの寄与に対して精度の高い評価を行う予定である。

5. 成果発表

- (1) 学術論文
 - "Nucleon form factors in Nf=2+1 lattice QCD at the physical point: Finite lattice spacing effect on the root-mean-square radii", R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, K. Sato, E. Shintani, H. Watanabe, T. Yamazaki, Physical Review D109 (2024) 94505.
 - (2) "A proposal for removing π N-state contamination from the nucleon induced pseudoscalar form factor in lattice QCD", Shoichi Sasaki, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Kohei Sato, Eigo Shintani, Ryutaro Tsuji, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, Proceedings of Science, Vol. 466 (LATTICE 2024), (2025) 310.
 - ③ "Studies of nucleon isovector structures with the PACS10 superfine lattice", Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Kohei Sato, Eigo Shintani, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, Proceedings of Science, Vol. 466 (LATTICE 2024), (2025) 318.
- (2) 学会発表
 - "Status of lattice QCD determination of nucleon form factors at the physical point and its challenge for the proton charge radius", S. Sasaki, Low-Energy Electron Scattering for Nucleon and Exotic Nuclei (LEES2024), Tohoku University, Sendai, Japan, October 28 - November 1, 2004.
 - (2) "Lattice studies of the nucleon structures for the PACS collaboration", Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Kohei Sato, Eigo Shintani, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, German Japanese Workshop 2024, Johannes gutenberg university mainz, Germany, September 23-27, 2024.
 - ③ "Studies of nucleon isovector structures with the PACS10 superfine lattice", Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Kohei Sato, Eigo Shintani,

Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, The 41st International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2024), University of Liverpool, United Kingdom, July 28-August 3, 2024.

- (4) "A proposal for removing π N-state contamination from the nucleon induced pseudoscalar form factor in lattice QCD", Shoichi Sasaki, Yasumichi Aoki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Kohei Sato, Eigo Shintani, Ryutaro Tsuji, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, The 41st International Symposium on LATTICE FIELD THEORY (LATTICE 2024), University of Liverpool, United Kingdom, July 28-August 3, 2024.
- ⑤ 「物理点における核子構造の高精細格子 QCD 計算」, 辻竜太朗, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 佐藤航平, 新谷栄悟, 渡辺展正, 山崎 剛, 日本物理学会第 79 回年次大会(2024), 北海道大学, 2024 年 9 月 16-19 日.
- ⑥ "Nucleon structures in large-volume lattice QCD at the physical point", 辻竜太朗, 青木保道, 石川健一, 蔵増嘉伸, 佐々木勝一, 佐藤航平, 新谷栄悟, 渡辺展正, 山崎剛, 第4回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会, 富士ソフトアキバプラザ, 東京, 2025 年 2 月 21 日.
- ⑦ 「Split-Even 法を用いた非連結ダイアグラム差の精度向上」,長塚正人,青木保道,石川健一,藏増嘉伸,佐々木勝一,辻竜太朗,新谷栄悟,山崎剛,日本物理学会春季大会(2025),オンライン,2025年3月18-21日.

| 使用計算機 | | 使用計算機に | 配分リソース* | | |
|------------------|--------------------------------------|--------|---------|-----|--------|
| | | 0 | 当初配分 | 移行* | 追加配分 |
| Cygnus | | 0 | 6,400 | | |
| Pegasus | | 0 | 12,800 | | |
| Wisteria/BDEC-01 | | 0 | 160,000 | | 40,000 |
| | ※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。 | | | | |
| | * バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入 | | | | |