

格子 QCD を用いた現実的クォーク質量近傍でのハドロン物理量測定

Calculation of physical quantities of hadrons near physical quark masses from lattice QCD

山崎 剛
筑波大学数理物質系

1. 研究目的

筑波大学を中心とした格子 QCD 研究グループ (PACS Collaboration) では、アップ、ダウン、ストレンジクォークを動的に扱う計算において、現実的なクォーク質量かつ、一辺が 10fm を超える巨大体積を用いて、格子 QCD に含まれる主要な系統誤差を全て除いた計算から物理量を精密に求めることを目的とした PACS10 プロジェクトを実行している。2022 年度に、このプロジェクトで当初目標としていた、異なる格子間隔 3 点のゲージ配位「PACS10 配位」の生成が終了した。本課題の目標は、この PACS10 配位を用いた精密物理量計算の実施である。

本プロジェクトでは PACS10 配位を用いて、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD からハドロンの内部構造を解明すること、および、さらなる格子 QCD 計算の高度化に向けた計算方法の開発を目的とした。

2. 研究成果の内容

これまでに、パイ中間子、K 中間子の内部構造に関する電磁氣的形状因子を、2 種類の格子間隔の PACS10 配位、(格子サイズ, 格子間隔)=(128⁴, 0.085 fm), (160⁴, 0.065 fm)を用いて計算した。これらの微分係数で定義される荷電半径の結果は、実験値と良く一致している。特に、K 中間子荷電半径については、実験から得られた値よりも遥かに小さな統計誤差で求まっている。今後、この結果の系統誤差を見積もり、それが統計誤差と同程度以下であれば、格子 QCD 計算から K 中間子荷電半径についての高精度な予言を与えられる期待できる。

この系統誤差の要因の一つに、荷電半径を形状因子から求める際のフィット関数依存性がある。この系統誤差の排除を目指し、本課題では形状因子をフィットすることなく荷電半径を直接求める計算方法の開発研究を行った。直接計算法はこれまでも提案されていたが、素朴な計算を行うと荷電半径に大きな有限体積効果が含まれてしまうという問題があった。この問題を改善する方法が 2020 年に提案された。本課題

では、この方法を調査することにより、2020 年の方法では荷電半径が大きい場合、または体積が小さい場合に系統誤差が大きくなること明らかにするとともに、系統誤差を抑制する改良方法を提案した。

2023 年度には、2020 年の方法と我々の提案方法を使って一番大きな格子間隔での PACS10 配位上での計算を開始した。現在までに得られた、 π 中間子と K 中間子荷電半径の中間結果を図 1 に示す。上段の図に示した我々の π 中間子荷電半径の中間結果(赤丸印)は、これまでに得られている他グループの結果とよく一致している。誤差の大きさも、形状因子をフィットして得られた従来の方法と遜色なく、2020 年のフィットを行わない結果(青印)よりも精度のよい結果となっている。また、実験値(黒米印)ともよく一致した結果となっている。

一方、下段の図に示す K 中間子荷電半径の中間結果(赤丸印)も以前他グループの計算結果、および実験値とよく一致しているが、それらよりも遥かによい精度で結果が得られている。今後は、これらの計算を継続すると同時に、系統誤差を見積もり、最終結果を求める計画である。それ以外にも、更なる格子 QCD 計算の高度化へ向けて、アップ・ダウンクォークの違いを取り入れる計算方法の開発研究を進めた。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した大規模格子 QCD シミュレーションには、膨大な大型

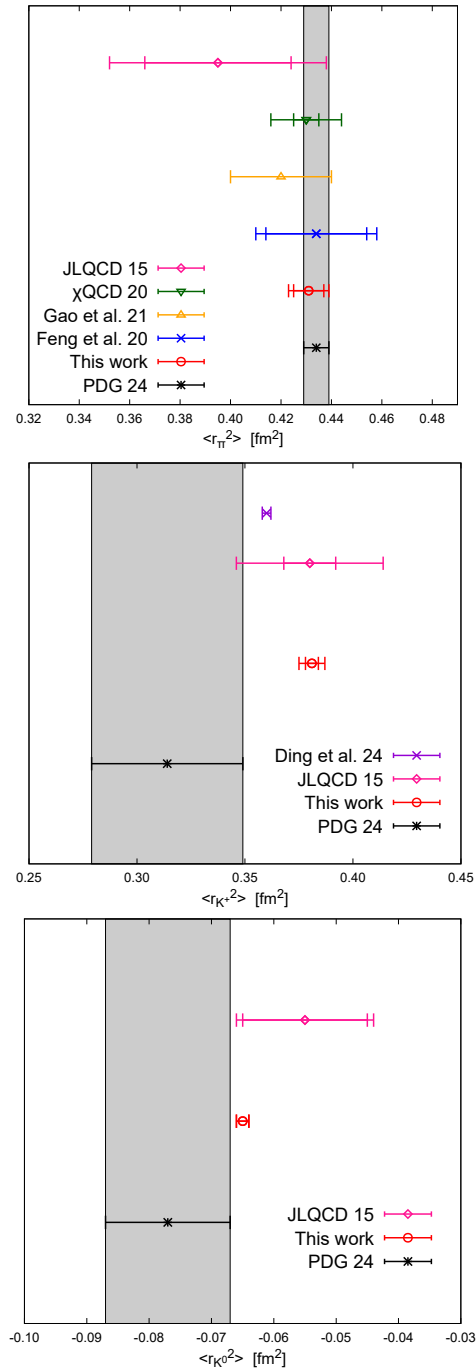


図 1 上段からパイ中間子、荷電 K 中間子、中性 K 中間子荷電半径の結果(以下の学術論文[2])。赤丸印は我々の中間結果。その他の印は、他グループによる従来の方法とモデル非依存の方法を用いた結果。星印と灰色帯は実験値。

並列計算機資源が不可欠であり、学際共同プログラム利用で配分されたリソースにより研究を実施することが可能になった。

4. 今後の展望

パイ中間子、K 中間子荷電半径については、形状因子のフィットを行わない計算結果の系統誤差の見積りと、形状因子をフィットする従来の計算方法で得られる結果との比較を行い、最終結果を求め論文としてまとめる。格子 QCD 計算の高度化に向けた研究では、アップ・ダウンクォーク質量を取り入れる計算についてはある程度の結果がえられた。今後はそれを発展させ、クォーク非連結項の計算方法の開発研究を進めていく。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of meson charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration”, Proceedings of Science(LATTICE2024), 324 (2025), p.1-8.
- [2] [Doctoral Thesis] Kohei Sato, “Mean-Square Charge Radius Calculation Without Fit Ansatz and Its Application to Large-Volume Lattice QCD Configuration at the Physical Point”, University of Tsukuba, 2025, p.1-64.

(2) 学会発表

- [1] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of meson charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration”, Lattice 2024, University of Liverpool, イギリス, 7/28-8/3, 2024.
- [2] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛 for PACS Collaboration, “PACS10 配位を用いたパイ中間子と K 中間子荷電半径の計算”, 日本物理学会 79 回年次大会, 北海道大学, 2024 年 9 月 16 日-19 日.
- [3] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of pion and kaon charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration”, German Japanese Seminar 2024, Mainz University, ドイツ, 9/25-27, 2024.
- [4] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of meson charge radius without fit ansatz”, 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Epochal Tsukuba International

Congress Center, 10/7-8, 2024.

- [5] 佐藤航平, “計算機を用いた中間子荷電半径の精密計算”, 博士後期課程学生支援プロジェクト (SPRING/BOOST) 採用者による研究発表会, 筑波大学, 2025 年 3 月 7 日.
- [6] 佐藤航平, “格子 QCD が切り開く中間子荷電半径の高精度な決定”, 計算物理春の学校 2025, 沖縄県市町村自治会館, 2025 年 3 月 10 日-14 日.
- [7] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛 for PACS Collaboration, “PACS10/L128 配位上のパイ中間子と K 中間子荷電半径の結果”, 日本物理学会 2025 年春季大会, オンライン, 2025 年 3 月 18 日-21 日.

(3) その他

- [1] 佐藤航平, 第 79 回年次大会(2024 年) 日本物理学会学生優秀発表賞 受賞, 2024 年 9 月.

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus	○	10000	-10000	0
Pegasus	○	84000	+5000	40000
Wisteria/BDEC-01	○	500000		125000
※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				