

## 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

筑波大学の格子 QCD 研究グループ(PACS Collaboration)では、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、PACS10 プロジェクトを実行している。最終的には異なる格子間隔 3 点のゲージ配位「PACS10 配位」を生成する計画であり、現在までに最も格子間隔の小さいゲージ配位以外は生成が終了し、最も格子間隔の小さいゲージ配位生成も完了間近である。これら既存のゲージ配位を用いて、格子 QCD の大きな目的の一つである実験値の再現へ向けた研究が進められ、これまでに基本的な物理量であるハドロン質量や崩壊定数について高精度の結果が得られている。

本プロジェクトではこの 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を目的とした研究を行った。また、さらなる格子 QCD 計算の高度化に向けた計算方法の開発も目的とした。

#### 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)=( $128^4$ , 0.085 fm), ( $160^4$ , 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。この系統誤差を排除を目指し、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が判明した。この系統誤差を抑

制する改良方法を提案し、重いパイ中間子質量での計算ではあるが、実際の格子 QCD データへ我々の方法を適用し、体積が小さな場合に系統誤差が軽減されていることを確認した。図 1 では、パイ中間子 0.5GeV での荷電半径の結果が示されている。小さな体積(L=32、白抜き印)では、我々の提案した改良された方法による結果(黒丸印、赤菱形印)は、2020 年の方法を用いた結果(青四角印)よりも統計誤差を超えて大きな値になっている。理想的な形状因子を仮定したモデルを用いた解析や大きな体積での計算結果(L=64、塗りつぶし

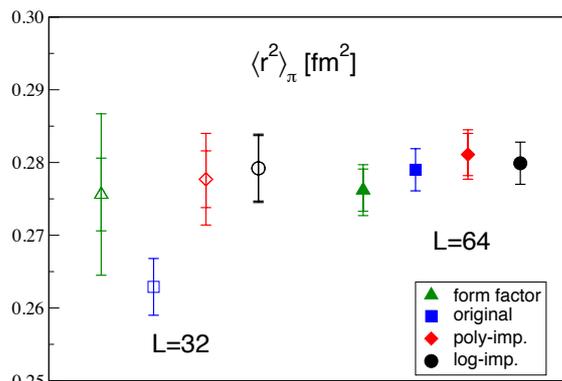


図 1 パイ中間子荷電半径の結果。白抜き、塗りつぶしデータは L=32, 64 の体積での結果。黒丸、赤菱形は我々の提案した改良された方法による結果。青四角は 2020 年に提案された方法、緑三角は形状因子をフィットした結果。内側の誤差は統計誤差、外側は統計誤差と系統誤差を合わせた総合誤差。

印)から考えると、この差が 2020 年の方法に含まれる系統誤差と考えられる。一方、小さな体積で形状因子をフィットして荷電半径を求める(緑三角印)と、フィット関数による大きな系統誤差が付くことがわかった。そのため、小さな体積の場合、このパイ中間子質量では我々の方法により最も不定性の小さな結果が得られることがわかった。

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行った。現実世界では、アップ・ダウンクォークの違いは、質量と電荷による効果がある。後者を取り入れる計算は複雑であるため、2022 年度は質量の違いを取り入れる計算を再重みつけ法を用いて行い、PACS10 配位(格子サイズ, 格子間隔)=(128<sup>4</sup>, 0.085 fm)を用いた計算から、アップ・ダウンクォーク質量の異なる QCD、1+1+1 フレーバー QCD でこれまでに予測されている軽いハドロン質量差を概ね再現する良好な結果が得られた。

### 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、膨大な大型並列計算機資源が不可欠であり、学際共同利用で配分されたリソースにより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 中間子電磁的形状因子については、2 種類の格子間隔での結果を用

いて、格子間隔起因の系統誤差及び荷電半径を求める際のフィット関数依存性などの系統誤差評価を実行する。荷電半径直接計算方については、異なるパイ中間子質量での計算結果を追加し、軽いパイ中間子でも同様の改善が見られるかの調査を行う。また、この直接計算法を用いた PACS10 配位での計算を実行し、従来の方法で得られた荷電半径の結果との比較から、モデルを仮定したことによる系統誤差の大きさを調査する。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、一番大きな格子間隔の PACS10 配位を用いた計算では良好な結果が得られたので、次に格子間隔の小さな PACS10 配位での計算を進めていく。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

- [1] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, “Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method”, Proceedings of Science(LATTICE2022), 122 (2023), p.1-10.

### (2) 学会発表

- [1] Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, “Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method”, Lattice 2022, ボン大学, ドイツ, 8/8-13, 2022.
- [2] [招待講演] Takeshi Yamazaki, “Challenges and progress in multi-nucleon calculations with Lattice QCD”, Next-Generation Computing for Low-Energy Nuclear Physics: from Machine Learning to Quantum Computing, IQuS, University of Washington, USA, 8/15-19, 2022.
- [3] [招待講演] Takeshi Yamazaki, “PACS10 Project”, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, 理研 CCS, 2/15-17, 2023.
- [4] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, “改良されたモデルに依存しない方法によるパイ中間子電荷半径計算”, 日本物理学会, 岡山理科大学, 2022 年 9 月 6 日-8 日.
- [5] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, “パイ中間子電荷半径のモデルに依存しない解析と系統誤差の評価”, 日本物理学会, オンライン, 2023 年 3 月 22 日-25 日.
- [6] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, “改良されたモデルに依存しない方法による形状因子の計算”, 原子核三者若手夏の学校 2022, オンライン, 2022 年 8 月 6 日-9 日.
- [7] 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, “改良されたモデルに依存しないパイ中間子電荷半径の解析”(ポスター発表), 計算物理春の学校 2023, 沖縄県市町村自治会館, 2023 年 3 月 13 日-15 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
Cygnus	○	45,000	
Wisteria/BDEC-01	○	800,000	
※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。			