

物理的クォーク質量における 2+1+1 フレーバー格子 QCD を用いた 標準模型を超えた物理の探索

Search for physics beyond the standard model from 2+1+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses

石川 健一

広島大学大学院先進理工系科学研究科

1. 研究目的

我々は QCD 物理量の精密計算を目指し、2016 年度から大体積かつ現実的クォーク質量での master-field シミュレーションと呼ばれる超大規模シミュレーションを行っている。master-field シミュレーションの特性を活用した計算として、陽子の形状因子やカビボ-小林-益川行列要素の精密計算がある。これらは標準模型を超えた物理を探索する上で重要な物理量である。長さ L の格子上での運動量の解像度は $\Delta p \propto 1/L$ となることから、master-field シミュレーションの超大体積 ($V = L^4 > (10\text{fm})^4$) 格子上では、形状因子の運動量移行 $q^2 = 0$ 近辺の解像度が高くなり、かつ、統計誤差も小さくなり、高精度での計算が可能となる。本研究の目的は 2+1 フレーバー master-field シミュレーションの結果を踏まえ、2+1+1 フレーバー master-field シミュレーションにより、標準模型を超えた物理を探索する上で必要な強い相互作用に関する物理量である K 中間子の崩壊形状因子や陽子崩壊行列要素を高精度で求めることである。

2. 研究成果の内容

これまでの計算により 2+1 フレーバー master-field シミュレーション用の格子 QCD ゲージ配位を格子間隔 (0.085 fm, 0.065 fm, 0.045 fm) で生成し、これらのゲージ配位を用いて、カビボ-小林-益川行列要素 $|V_{us}|$ の決定に関する物理量である K 中間子のセミレプトニック崩壊 ($K \rightarrow \pi l \nu$) 形状因子の計算を行った。2024 年度は、最小の格子間隔 0.045 fm の追加計算を進め、その中間結果を国際会議 Lattice2024 で発表した(学術論文 [1])。図 1 に我々の $|V_{us}|$ の結果(赤丸印)と、他グループを含めたそれ以前の結果を示す。我々の最新結果は、異なる格子間隔 3 点を使った連続極限を取ったことにより、我々の 2022 年の結果(赤四角印)よりも格子 QCD 計算の誤差(内側誤差)が小さくなっている。これは、以前の結果で懸案であった有限格

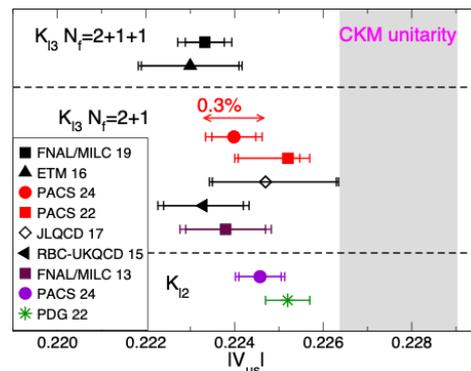


図 1 $|V_{us}|$ の結果。赤丸印と赤四角印は我々の結果。その他の印は他グループの結果。紫丸印と緑米印は K 中間子レプトニック崩壊から決められた結果。内側の誤差は統計誤差、外側の誤差は統計誤差と系統誤差を合わせた総合誤差。灰色は標準模型からの予言値。

計算の誤差(内側誤差)が小さくなっている。これは、以前の結果で懸案であった有限格

子間隔に起因する系統誤差が、3 点の格子間隔のデータを用いることで軽減できたことによる。また、この結果は種々の系統誤差も含まれた 2+1 フレーバー計算での最終段階の結果である。格子 QCD 計算と実験値の不定性を合わせた合計の不定性が 0.3%程度となっており、最高精度の他グループの結果(黒四角印)と同程度の精度となっている。

陽子崩壊行列要素の精密決定のための計算については、2+1 フレーバーの 64^4 , $a = 0.085\text{fm}$ の配位を用い、励起状態や繰り込み係数に伴う系統誤差の評価の計算を行い国際会議 Lattice2024 にて発表した(学術論文[2])。

さらに 2024 年度は、2022 年度から開始した、アップ・ダウン・ストレンジ・チャームの 4 クォークの真空偏極効果を取り入れた 2+1+1 master-field シミュレーションを継続した。Wisteria-O で格子間隔 0.045fm で現実的クォーク質量を実現するパラメータ調整のための予備計算を実行したのち、「富岳」を用いて格子サイズ 256^4 のゲージ配位生成計算を開始した。また、「富岳」で生成した格子間隔 0.065fm、格子サイズ 168^4 のゲージ配位を用いて計算した様々なハドロン質量は実験値を 3%

程度以内で再現した。その結果を図 2 に示す。緑印や赤印のチャームクォークを含む中間子の一部が実験値からやや離れているのは、有限格子間隔による系統誤差と考えられる。実際に大きな格子間隔 0.085fm の結果では、図 2 よりも大きなズレが確認されており、有限格子間隔からの系統誤差であることを示唆している。今後、さらに格子間隔を小さくした計算では、これらの実験値との差は小さくなると期待できる。

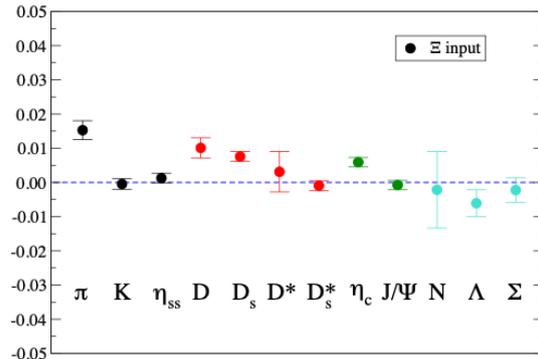


図 2 格子サイズ 168^4 の 2+1+1 フレーバーシミュレーションから得られた、アップ、ダウン、ストレンジ、チャームクォークに関するハドロン質量計算結果と実験値の相対差。赤(D, D_s, D^{*}, D_s^{*})はチャームクォークを一つ、緑(η_c, J/ψ)はチャームクォークを二つ含む中間子群。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

Pegasus は 2+1+1 フレーバー 格子サイズ 168^4 のゲージ配位を用いた様々なハドロン質量計算に用いた。GPU を搭載した Pegasus の複数ノードを利用することにより速やかに計算を完了させることができた。クォーク質量と格子間隔パラメータ調整のための中体積でのシミュレーション(格子間隔, 格子サイズ)=(0.042 fm, 64^4)は Wisteria-O を用いて実行した。このような規模の計算を複数実行できる計算環境は国内で「富岳」以外には Wisteria-O のみである。

4. 今後の展望

これまでに生成したゲージ配位および、今後生成する 2+1+1 フレーバー master-field ゲージ配位を用いて、標準模型を超えた物理の探索に必要な形状因子などの計算

を行う。これらの物理量の精密決定には連続極限が必要である。そのためのより小さい格子間隔の 2+1+1 フレーバー-master-field シミュレーションをおこなう。master-field シミュレーションを用いて精密に求めた物理量を通じて標準模型を超えた物理の探索に貢献する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Naruhito Ishizuka, Yoshinobu Kuramashi, Yusuke Namekawa, Yusuke Taniguchi, Naoya Ukita for PACS Collaboration, “Update of kaon semileptonic form factor using $N_f=2+1$ PACS10 configurations”, Proceedings of Science (LATTICE2024), 227 (2024), p.1-10.
- [2] Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Yoshinobu Kuramashi, Eigo Shintani for PACS Collaboration, “Proton decay matrix elements on PACS configurations”, Proceedings of Science (LATTICE2024), 435 (2025), p.1-9.
- [3] [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] Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Naruhito Ishizuka, Yoshinobu Kuramashi, Yusuke Namekawa, Yusuke Taniguchi, Naoya Ukita for PACS Collaboration, “Update of kaon semileptonic form factor using $N_f=2+1$ PACS10 configurations”, Lattice 2024, University of Liverpool, イギリス, 7/28-8/3, 2024.
- [2] Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Yoshinobu Kuramashi, Eigo Shintani for PACS Collaboration, “Proton decay matrix elements on PACS configurations”, Lattice 2024, University of Liverpool, イギリス, 7/28-8/3, 2024.
- [3] [招待講演]青木保道, “陽子崩壊行列要素の格子 QCD 計算”, 素粒子物理学の進展 2024, 京都大学, 2024 年 8 月 19-23 日.
- [4] 山崎剛, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉 for PACS Collaboration, “ $N_f=2+1$ PACS10 配位を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算”, 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.
- [5] 浮田尚哉, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 佐藤航平, 谷口裕介, 渡辺展正, 山崎剛 for PACS Collaboration, “ $N_f=2+1, 2+1+1$

PACS10 配位生成と基本物理量測定”, 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.

- [6] Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of K_{l3} form factor at the physical point on large volume”, German Japanese Seminar 2024, Mainz University, ドイツ, 9/25-27, 2024.
- [7] Naoya Ukita for PACS Collaboration, “Search for physics beyond the standard model from 2+1+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses”, 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, Epochal Tsukuba International Congress Center, 10/7-8, 2024.
- [8] 浮田尚哉 for PACS Collaboration, “Search for physics beyond the standard model using very large scale lattice QCD simulation and development of AI technology toward next generation lattice QCD”, 第 11 回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会, 東京, 2024 年 10 月 24 日-25 日.
- [9] 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 辻竜太郎, 新谷栄悟, 山崎剛, “Proton decay matrix elements on PACS configurations”, 27th New Physics Forum, 東京, 2024 年 11 月 21 日.
- [10] 山崎剛, “スーパーコンピュータと AI を使った新しい極微世界の探索”, 第 4 回「富岳百景」シンポジウム, オンライン, 2024 年 12 月 25 日.
- [11] 山崎剛, “超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発”, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム, 東京, 2025 年 1 月 8 日-10 日.
- [12] Naoya Ukita for PACS Collaboration, “Lattice QCD simulation in very large volumes”, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム, 東京, 2025 年 1 月 8 日-10 日.
- [13] Yasumichi Aoki, “Lattice QCD computations of proton decay matrix elements”, SNSF-INT Joint Workshop: Baryon Number Violation: From Nuclear Matrix Elements to BSM Physics, University of Washington, Seattle, 1/13-17, 2025.

(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.

筑波大学計算科学研究センター 2024 年度学際共同プログラム利用報告書

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	○	30000	-29999.54	0
Pegasus	○	72000	+29999.54	113100
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				