

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 2016 年度から master-field シミュレーションという名前で超大体積シミュレーションを行い、QCD 物理量の精密計算を目指してきた。特に、master-field シミュレーションが有効である計算として、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

我々はこれまでの研究で 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 ($K \rightarrow \pi \ell \nu$) 形状因子の計算を行った。令和 5 年度は、最小の格子間隔 0.045 fm の計算を進め、中間結果を国際会議 Lattice2023 で発表した(後述の学術論文[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、昨年度のわれわれの結果(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、昨年度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、抑制されたことによると考えられる。また、この結果は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。今後、種々の系統誤差を見積もり、最終結果を求める。また、高精度の結果を用いて、標準模型の予言値(図中灰色、水色帯)とのズレの有無を明らかにすることで、標準模型を超える物理探索研究を行う。

さらに令和 5 年度は、昨年度から開始した、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 0.085fm 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 128⁴ のゲージ配位生成計算を実行した。

図 2 に示すように、この計算により得られた様々な中間子質量は、実験値を 3% 程度以内で再現した。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。今後、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予想される。

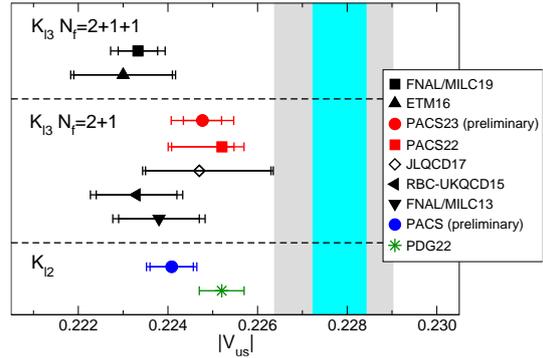


図 1 $|V_{us}|$ の結果。赤丸印と赤四角印は我々の結果。黒印は他グループの結果。青印と緑印は K 中間子レプトニック崩壊から決められた結果。内側の誤差は統計誤差、外側の誤差は統計誤差と系統誤差を合わせた総合誤差。灰色、水色帯は標準模型からの予言値。

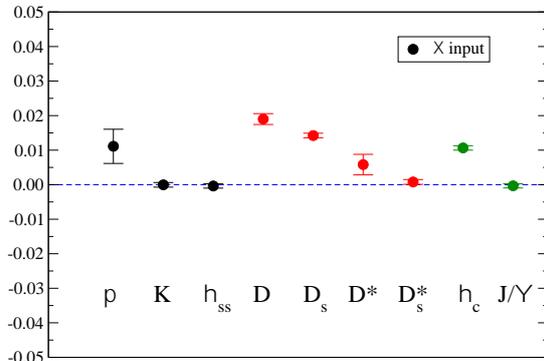


図 2 2+1+1 フレーバーシミュレーションから得られた、アップ、ダウン、ストレンジ、チャームクォークに関する中間子質量計算結果と実験値の相対差。赤はチャームクォークを一つ、緑はチャームクォークを二つ含む中間子群。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

2+1+1 フレーバー master-field シミュレーションに必要な繰り込み係数の計算に Cygnus, Pegasus を用いた。GPU を搭載した Cygnus, 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)=(0.085 fm, 64⁴)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

本年度に生成した格子間隔 0.085 fm の $2+1+1$ 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] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “ $|V_{us}|$ from kaon semileptonic form factor in $N_f=2+1$ QCD at the physical point on $(10 \text{ fm})^4$ ”, Proceedings of Science(LATTICE2023), 276 (2023), p.1-7.

(2) 学会発表

- [1] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “ $|V_{us}|$ from kaon semileptonic form factor in $N_f=2+1$ QCD at the physical point on $(10 \text{ fm})^4$ ”, Lattice 2023, Fermi National Laboratory, アメリカ, 7/31-8/4, 2023.
- [2] [招待講演] Takeshi Yamazaki, “Hadron form factors from PACS10 configurations”, Lattice QCD and Probes of New Physics, McKibbin Conference Center, アメリカ, 8/7-11, 2023.
- [3] 浮田尚哉、石川健一、石塚成人、藏増嘉伸、中村宜文、滑川裕介、谷口裕介、山崎剛、吉江友照 for PACS Collaboration, “Light hadron spectrum of $2+1$ flavor QCD on PACS10 configurations”, 日本物理学会 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16 日-19 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、吉江友照 for PACS Collaboration, “Kaon semileptonic form factor from the PACS10 configuration of the 256^4 lattice”, 日本物理学会 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16 日-19 日.
- [5] 青木保道、藏増嘉伸、新谷栄悟、辻竜太郎 for PACS Collaboration, “Computation of proton decay matrix elements on top of the physical point”, 日本物理学会 78 回年次大会, 東北大学, 2023 年 9 月 16 日-19 日.
- [6] [招待講演、パネリスト] 山崎剛, “「富岳」、これからの利用と若手プロジェクト・リーダーによる先進アプリ課題への期待”, 第 6 回 HPCI コンソーシアム

シンポジウム, THE GRAND HALL, 2023 年 10 月 25 日.

- [7] T. Yamazaki, “Calculations using PACS10 configuration”, Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning, 筑波大学, 2023 年 11 月 23 日-25 日.
- [8] [招待講演] K.-I. Ishikawa, “Wilson-Clover quark solver implementation on the supercomputer Fugaku”, Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning, 筑波大学, 2023 年 11 月 23 日-25 日.
- [9] 山崎剛, “大規模格子 QCD 計算による標準模型を超えた物理探索”, 「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム, 筑波大学, 2023 年 12 月 18 日-20 日.

(3) その他

- [1] 山崎剛, 2023 年度筑波大学 BEST FACULTY MEMBER 受賞, 2024 年 2 月 14 日.

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/Pegasus	○	120,000	40,000
Wisteria/BDEC-01	○	550,000	
※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。			