

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

格子 QCD シミュレーションによる計算では、大きな物理体積を保ちながらモンテカルロ計算の統計誤差を減らすことは難しいと考えられていた。しかしながら我々が京コンピュータを用いた計算では物理 4 次元時空体積 V を大きくすると、それにともない統計誤差が $1/\sqrt{V}$ に比例して減少することを確認し、超大体積シミュレーションの優位性を示した。この発見に基づき我々は 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 シミュレーションを用いることで初めて可能になることとして、陽子の形状因子やカビボ・小林・益川行列要素の精密決定がある。これらの物理量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 フレーバーおよび 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

われわれ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) で生成した。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 4 年度は、格子間隔 0.065 fm の計算を完了させ、これらの計算結果をまとめ学術論文として発表した(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、それ以前の結果(赤四角印)よりも小さな誤差になっている。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。我々の最新結果の誤差を与える主要な原因は、有限格子間隔による系統誤差である。今後、3 点目の格子間隔を用いた計算を実行することにより、この系統誤差の大幅な削減

を目指す。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 4 年度は、2+1 フレーバー master-field シミュレーションのゲージ配位生成計算の目処が立ったことから、新たなプロジェクトとして、チャームクォーク真空偏極効果を取り入れた 2+1+1 master-field シミュレーションに着手した。Cygnus を用いて 2+1+1 フレーバー master-field シミュレーションに必要なクォーク作用改良係数決定計算を行い、その係数を用いて master-field シミュレーションに向けたパラメータ調整(クォーク質量と格子間隔を調整)のための小体積の小規模シミュレーションを Wisteria-O で実行した。図 2 には、その計算により得られた様々な中間子質量の結果と実験値の相対差を示す。我々の計算結果は、5%程度以内で実験値を再現している。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ている。一方、パイ中間子のずれは有限体積効果と予想している。今後は、この試験計算結果を基に master-field シミュレーションを実行する。

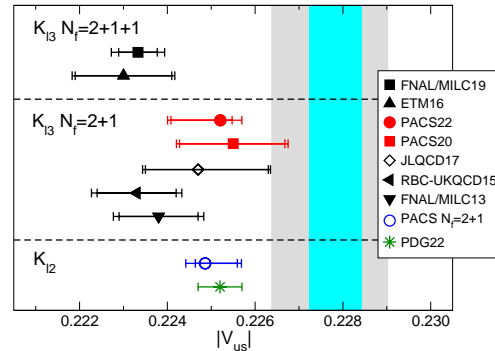


図 1 $|V_{us}|$ の結果。赤丸印と赤四角印は我々の結果。黒印は他グループの結果。青印と緑印は K 中間子レプトニック崩壊から決められた結果。内側の誤差は統計誤差、外側の誤差は統計誤差と系統誤差を合わせた総合誤差。灰色、水色帯は標準模型からの予言値。

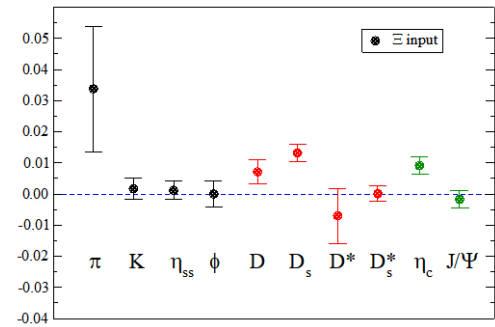


図 2 アップ、ダウン、ストレンジ、チャームクォークに関する中間子質量計算結果と実験値の相対差。横破線が実験値を表す。

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クォーク作用改良係数の計算には Cygnus を用いた。このクォーク作用改良係数の計算には多くのモンテカルロ統計数とパラメータの組み合わせの探索が必要であり、GPU を搭載した Cygnus の複数ノードの利用ができなければこの計算を完了することはできなかった。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, 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

3 点目の格子間隔での 2+1 フレーバー配位を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形

状因子計算を実行し、これまでよりも高精度な結果を得ることを目指す。この配位の格子サイズは 256^4 であるため、Wisteria-O ではメモリ制限により実行できないため「富岳」を用いた計算を予定している。一方、2+1+1 フレーバーシミュレーションについては、令和 4 年度に導入された Pegasus も有効活用し、任意の格子間隔でのクォーク作用改良係数の決定計算を完了させ、その結果を用いて 2+1+1 フレーバー master-field を用いた物理量計算のためのゲージ配位生成を行う予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- [1] K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration, “K₁₃ form factors at the physical point: Toward the continuum limit”, *Physical Review D* 106, 9 (2022), 094501, p.1-25.
- [2] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration”, *Proceedings of Science(LATTICE2021)*, 563 (2022), p.1-9.
- [3] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration”, *Proceedings of Science(LATTICE2022)*, 425 (2023), p.1-10.
- [4] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Kaon semileptonic form factors at the physical quark masses on large volumes in N_f=2+1 lattice QCD”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2446, 1 (2023), 012007, p.1-5.

(2) 学会発表

- [1] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Momentum transfer dependence of kaon semileptonic form factor on $(10 \text{ fm})^4$ at the physical point”, *Lattice 2022*, ボン大学, ドイツ, 8/8-13, 2022.
- [2] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Kaon semileptonic form factors at the physical quark masses on large volumes in $N_f=2+1$ lattice QCD”, *KAON2022*, 大阪大学, 9/13-16, 2022.
- [3] 山崎剛、石川健一、石塚成人、藏増嘉伸、中村宜文、滑川裕介、谷口裕介、

浮田尚哉、吉江友照 for PACS Collaboration, “格子 QCD を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊位相積分計算”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 岡山理科大学, 9/6-9, 2022.

[4] [招待講演] 山崎剛、藏増嘉伸、石塚成人、浮田尚哉、新谷栄悟、石川健一、滑川裕介、中村宜文、渡辺展正, “2+1 フレーバー格子 QCD master field を用いた標準理論を超える物理の探索”, 第 9 回 HPCI システム利用研究課題成果報告会, オンライン, 10/28-29, 2022.

[5] [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.

(3) その他

[1] [受賞] 山崎 剛, 藏増 嘉伸, 石塚 成人, 浮田 尚哉, 新谷 栄悟, 石川 健一, 滑川 裕介, 中村 宜文, 渡辺 展正, 第 9 回成果報告会における HPCI 利用研究課題優秀成果賞

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	○	45000	
Wisteria/BDEC-01	○	800000	800000
※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。			