

物理的クォーク質量における 2+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 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自動的に  $1/\sqrt{V}$  で減っていくことを発見した。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を master-field シミュレーションにより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 master-field シミュレーション用の格子 QCD ゲージ配位 (master-field 配位) を格子間隔 (0.085 fm, 0.065 fm) について生成してきた。本年度は更に格子間隔 0.042 fm に関して master-field 配位生成計算を実行した。一方、物理量としてはカビボ-小林-益川行列要素  $|V_{us}|$  の決定に関する物理量として  $K$  中間子のセミレプトニック崩壊 ( $K \rightarrow \pi \ell \nu$ ) の形状因子の計算を行った。図 1 に格子間隔 0.085 fm の最終結果(後述の成果発表[1,2])と 0.065 fm の中間解析結果を示す。0.065 fm の結果については、まだ系統誤差の全てを見積も

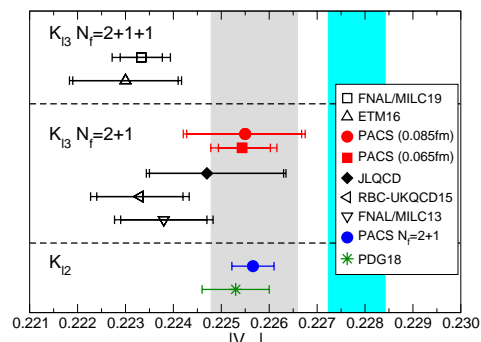


図 1  $|V_{us}|$  の結果。赤印は本課題計算結果。黒印は他グループの結果。青印と緑印は、 $K$  中間子レプトニック崩壊から決められた結果。灰色帯は標準模型の予言値で、水色帯はその最新値。

0.065 fm の結果については、まだ系統誤差の全てを見積も

ってはいないが、異なる格子間隔の結果は良く一致している。この結果は、有限格子間隔による系統誤差が小さいことを示唆している。今後、連続極限への外挿を行い、有限格子間隔の系統誤差を取り除いた結果を求め、標準模型の予言値(図中水色帯)とのズレの有無を明らかにしたい。

### 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

物理点直上での(格子間隔,格子サイズ)=(0.085 fm, 128<sup>4</sup>), (0.065 fm, 160<sup>4</sup>), (0.042fm, 256<sup>4</sup>)を持つゲージ配位は Oakforest-PACS 計算機で計算した。これらの配位は、京コンピュータで生成された 96<sup>4</sup> 格子サイズの配位と比較して各々3.2 倍, 7.7 倍, 50.6 倍の体積を有している。現在の日本国内において、これほど大きな時空体積の計算を実行できる計算環境は、本学際共同利用における Oakforest-PACS 計算機以外にはない。

### 4. 今後の展望

本プロジェクトでは、現実クォーク質量直上の、3つの格子間隔において時空体積 (10 fm)<sup>4</sup>の格子 QCD シミュレーションを行う。格子 QCD シミュレーションに伴う3つの系統誤差(現実クォーク質量への外挿、有限格子間隔、有限体積効果)をすべて制御したシミュレーションになるとともに、master-field シミュレーションとして統計誤差も制御したものとなる。本プロジェクトにおいて期待される特筆すべき成果として(i)世界で初めての master-field シミュレーションによる高精度計算を実現すること(ii)“master-field”の名前が示すように、単一の物理パラメータセットに固定されたゲージ配位を用いることで、QCD に絡むあらゆる物理量を高精度に計算することがある。これらの内(i)については一番格子間隔が細かい 256<sup>4</sup> の計算が進行中であるが、すでに2つの粗い格子を用いたこれまでの計算により(i)と(ii)が示されつつある。今後更に(i)の 256<sup>4</sup> のゲージ配位の生成の計算を進めつつ、(ii)を実現するために、 $\mu$  粒子異常磁気能率に対するハドロン真空偏極効果の計算、核子形状因子(陽子半径を含む)計算、陽子崩壊に寄与するハドロン行列要素計算、K 中間子形状因子計算など様々な物理量の計算を遂行中である。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

- [1] “ $K_{13}$  form factors at the physical point on a (10.9 fm)<sup>3</sup> volume”, J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration, Physical Review D 101 (2020) 094504, DOI: 10.1103/PhysRevD.101.094504
- [2] “ $K_{13}$  form factors in  $N_f = 2 + 1$  QCD at physical point on large volume,” J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS

Collaboration, Proceedings of Science (LATTICE2019) (2020) 186,

DOI: 10.22323/1.363.0186

(2) 学会発表

(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	○	40500	
Oakforest-PACS	○	1000000	
※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。			