

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

素粒子標準模型はミクロな世界を記述する人類が手に入れた最も精密な理論と考えられているが、前世紀終盤から今世紀に入り標準模型では説明できない実験事実が見えてきた。発見科学の範疇ではニュートリノの質量やダークマターなどは標準模型では説明できない。精密科学の範疇では、重いクォークに関する反応や、 μ 粒子の磁気モーメント、陽子の荷電半径などの実験値が標準模型の予言と食い違いを見せつつある。これら精密科学の範疇での標準模型の予言には QCD の非摂動効果を取り扱う必要があり、第一原理計算の格子 QCD シミュレーションの精度が非常に重要である。そこで我々は 2016 年度から超大体積シミュレーション (master-field 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いる。master-field シミュレーションは、物理 4 次元時空体積 V を大きくすると統計誤差が $1/\sqrt{V}$ で減少するという我々が発見した性質に基づいており、統計誤差と有限体積効果による誤差を同時に減少できる。この master-field シミュレーションにより、陽子の形状因子やカビボ・小林・益川行列要素などの精密決定ができる。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 QCD 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 $V=(10\text{fm})^4$ 以上の物理大体積の 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 ゲージ配位を格子間隔 (0.085 fm, 0.065 fm) で生成してきた。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。2021 年度は特に格子間隔 0.065 fm での計算を重点的に実行した。図 1 に我々の計算の格子間隔 0.085 fm だけで得られた $|V_{us}|$ の結果 (赤白抜丸: 2020 年度論文発表済) と、0.065 fm の計算を含めて連続極限を取った中間解析結果 (赤丸: 後述の成果発表[1]) を示す。この図には他に

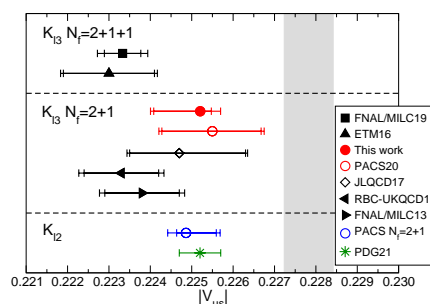


図 1 $|V_{us}|$ の結果。赤印は本課題計算結果。黒印は他グループの結果。青印と緑印は、K 中間子レプトニック崩壊から決められた結果。灰色帯は標準模型からの予言値。

も、他グループからの結果と K 中間子レプトニック崩壊から決定された結果も含まれている。異なる格子間隔で得られた結果の中心値は良く一致していたが、格子間隔 2 点の結果からでは、有限格子間隔による系統誤差を精度良く見積もることが難しいため、最終的に連続極限での結果には若干大きな誤差が付いている。今後、更に小さな格子間隔で生成しているゲージ配位を用いて、連続極限外挿の系統誤差を抑制した結果を求め、標準模型の予言値（図中灰色帯）とのズレの有無を明らかにしたい。また、(格子間隔,格子サイズ)=(0.042fm, 256⁴)の master-field シミュレーション用のゲージ配位の計算を開始しておりパラメーター調整と配位の蓄積を行った。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

物理点直上での (0.085 fm, 128⁴), (0.065 fm, 160⁴), (0.042fm, 256⁴)を持つゲージ配位は Oakforest-PACS 計算機で計算した ((0.042fm, 256⁴)は未完了であり計算は 2022 年度へ継続予定)。これらの配位は、京コンピュータで生成された 96⁴ 格子サイズの配位と比較して各々 3.2 倍, 7.7 倍, 50.6 倍の格子サイズを有している。富岳稼働開始前において、これほど大きな格子サイズ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)⁴ の格子 QCD シミュレーションを行なう。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 256⁴ 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。本年度は128⁴ と 160⁴ の格子間隔の物理点大体積ゲージ配位を用いて K 中間子崩壊形状因子の予備的値を求めた。さらに検討を進めて K 中間子崩壊の実験値との比較からカビボ-小林-益川行列要素 $|V_{us}|$ の精度の良い値を求める予定である。

今後は(i)の256⁴のゲージ配位の生成の計算を富岳や Wisteria-O を用いて進めつつ、(ii)を実現するために、 μ 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（陽子荷電半径を含む）計算、陽子崩壊に寄与するハドロン行列要素計算、 K 中間子崩壊形状因子計算などの物理量の計算を遂行する。

5. 成果発表

(1) 学術論文

(2) 学会発表

[1] T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yoshie for PACS Collaboration, “Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configurations”, Lattice2021, 7/26-30, 2021, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.00744>

[2] 藏増嘉伸, 「Physics explored by master-field simulation in lattice QCD」, 日本物理学会第 77 回年次大会, 3/15-19, 2022.

(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	○	50000	
Oakforest-PACS	○	1000000	300000
※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。			