

## 物理的クォーク質量における 2+1 フレーバー格子 QCD

### 2+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses

藏増 嘉伸

筑波大学計算科学研究センター

#### 1. 研究目的

現在の格子 QCD シミュレーションには、2 つの大きな問題点が存在する。まず、物理点(自然界のクォーク質量)直上でのシミュレーションが可能になったことは事実だが、実際に物理点のみで物理量の評価を行えるほどの精度を得るレベルには至っていない。もう一つは、単一の物理パラメータを持つゲージ配位(モンテカルロサンプル)からユニバーサルに様々な物理量の高精度精密計算ができていたわけではなく、そのことが格子 QCD 計算の予言能力を毀損している。本課題では、格子 QCD において世界初となる master-field シミュレーション(超大体積シミュレーション)を行うことによって上記 2 つの問題を克服し、格子 QCD 計算の予言能力を格段に向上させる。

#### 2. 研究成果の内容

従来の格子 QCD 計算では、体積を大きくすることとゲージ配位数を増やして統計精度を向上させることは相克する課題であった。つまり、体積を大きくするにせよ、統計精度を向上させるにせよ、各々独立に計算コストが増大するため、どちらかに注力した計算を行えば、他方は犠牲にせざるを得ないと考えられてきた。しかしながら、我々は京コンピュータを用いて(8 fm)<sup>4</sup>超の時空間体積を持つ大体積シミュレーションを行った結果、物理量の統計誤差が 4 次元時空間体積  $V$  に対して  $1/\sqrt{V}$  に比例して減少することを確認し、実は体積を大きくすることは統計精度を向上させることを明らかにした。これにより、我々は超大体積シミュレーションの優位性を提唱し、現在は(10 fm)<sup>4</sup>を超える時空間体積を持つシミュレーションを行っている(同時期に同様のアイデアが Lüscher により提唱され、“master-field” シミュレーションと名付けられた)。これは、現在の世界の格子 QCD 計算が(5~6 fm)<sup>4</sup>の体積で行われていることを考えると、格段に大きな時空間体積でのシミュレーションである。2019 年度は、物理点直上における(格子間隔,格子サイズ)=(0.085fm,128<sup>4</sup>)および(0.065fm,160<sup>4</sup>)のゲージ配位に加えて、更に格子間隔の細かい(0.045fm,256<sup>4</sup>)のゲージ配位生成を継続した。

物理量測定に関しては、2018年度に格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  (後者は現在世界の格子QCD計算で典型的に採用されている格子サイズ) の配位上で  $\pi$ , K メソン質量と崩壊定数の計算を行い、両格子サイズ上での結果を比較することによって、それらの物理量に対する有限サイズ効果(系統誤差の一つ)を定量的に評価した。2019年度は、より計算が困難なベクターメソン質量とバリオン質量の高精度計算を実現し、それらの有限体積効果の定量的解析に成功した。図1(左)は、格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  の配位上で計算された  $\rho$  メソンの2点相関関数  $C_\rho(t)$  を用いて、それぞれについて時間  $t$  における  $\rho$  メソンの局所有効質量  $m_\rho^{\text{eff}}(t) = \ln\{C_\rho(t)/C_\rho(t+1)\}$  をプロットしたものである。黒シンボルは  $128^4$  格子サイズの結果で、赤シンボルは  $64^4$  格子サイズの結果である。両データは統計誤差の範囲で重なっているため、有限サイズ効果は無視できることがわかる。局所有効質量は時間とともに単調減少していることが見て取れるが、これは  $\rho$  メソンが不安定粒子(共鳴状態)であり、2つの  $\pi$  メソンへの崩壊が許されているためである。参考のために、オレンジ色の水平線は実験的に観測されている  $\rho$  メソンのエネルギーを表している。図1(右)は、格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  の配位上で計算された  $\Xi$  バリオンの局所有効質量を時間の関数としてプロットしたものである。この場合も、異なる格子サイズのデータが重なっているため、有限サイズ効果は無視できることがわかる。 $\Xi$  バリオンは強い相互作用で安定な(崩壊しない)粒子であるため、 $t \geq 8$  の領域においてプラト的振る舞い(局所有効質量が時間に依存しない)を確認できる。青い横棒は2点相関関数をフィットすることによって求めた  $\Xi$  バリオンの質量を表しており、格子間隔決定のためのインプットとして用いている。その他のベクターメソン質量やバリオン質量においても、格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  の配位上での計算の結果、有限サイズ効果は無視できるレベルであった。これらの結果は、既に学術雑誌で発表済みである。

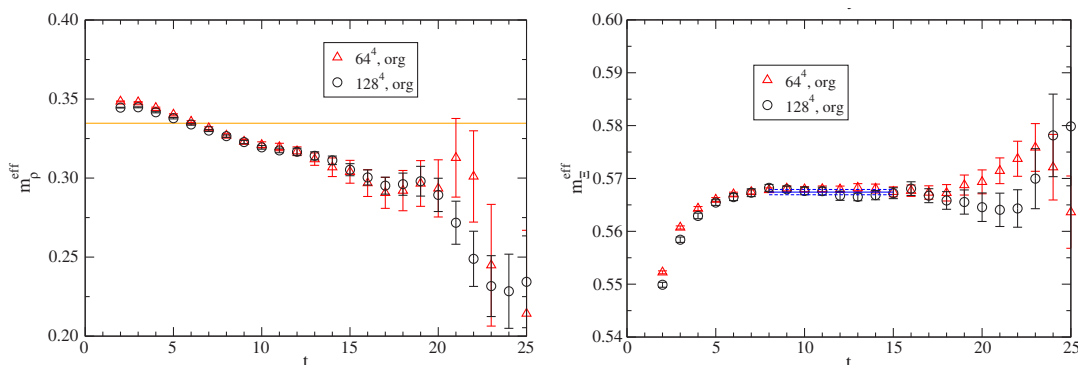


図1: 格子サイズ  $128^4$  と  $64^4$  における  $\rho$  メソン局所有効質量(左)と  $\Xi$  バリオン局所有効質量(右).

### 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,  $128^4$ ), (0.065 fm,  $160^4$ ), (0.045 fm,  $256^4$ )を持つゲージ配位は、京コンピュータで生成された  $96^4$  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

れほど大きな時空間体積の計算を実行できる計算機環境は、学際共同利用における Oakforest-PACS 以外には存在しない。

#### 4. 今後の展望

本プロジェクトでは、3つの格子間隔において物理点直上で(10 fm)<sup>3</sup>超の空間体積を持つシミュレーションを行う。これにより、3大系統誤差(クォーク質量に関する外挿誤差、体積依存性、格子間隔依存性)のすべてをコントロールすることが目標である(物理点シミュレーションであるためクォーク質量に関する外挿誤差はなく、ハドロン質量の体積依存性に関しては調査済み)。本プロジェクトにおいて期待される特筆すべき成果は、(i)世界で初めての **master-field** シミュレーションによる高精度精密計算であること、および(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て、ハドロン質量から核子形状因子まで、ユニバーサルに様々な物理量の高精度精密計算が可能なこと、である。現在、生成されたゲージ配位を用いて  $\mu$  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

“Finite size effect on vector meson and baryon sectors in 2+1 flavor QCD at the physical point”,

PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié,  
Physical Review D100 (2019) 094502.

##### (2) 学会発表

Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration,

“Study of finite size effect on hadron masses and decay constants with (5.4fm)<sup>4</sup> and (10.8fm)<sup>4</sup> lattices at the physical point in 2+1 flavor QCD”,

The 37th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2019),

Hilton Hotel Wuhan Riverside, Wuhan, China, June 16-22, 2019.

##### (3) その他

使用計算機	使用計算機	配分リソース*
-------	-------	---------

	に○	当初配分	追加配分
Cygnus	○	30,000	0
Oakforest-PACS	○	225,000	225,000
※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。			