

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)⁴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/√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)⁴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(同じ頃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)⁴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。

平成 29 年度内に、物理点直上で(格子間隔,格子サイズ)=(0.085 fm, 128⁴)および(0.065 fm, 160⁴)のゲージ配位生成が終了したため、平成 30 年度は、系統的な格子間隔依存性調査のために、(格子間隔,格子サイズ)=(0.045 fm, 256⁴)のより細かい格子間隔のゲージ配位生成を行った。このゲージ配位生成は現在も継続されており、平成 31 年度内に終了予定である。

また、平成 29 年度は、物理点直上で(格子間隔,格子サイズ)=(0.085 fm, 128⁴)と

(0.085 fm, 64⁴)のゲージ配位を用いて、擬スカラーメソンの質量と崩壊定数に対する有限体積効果を調べたが、平成30年度は同じゲージ配位を用いてベクターメソンとバリオンの質量に対する有限体積効果を調べた。その結果、殆どのベクターメソンとバリオンの質量に対しては、現在の統計精度(～0.1%)の範囲内において有意な有限体積効果は確認できなかった。ただし、 Ω バリオンの質量に対しては、有限体積効果を示唆する結果が得られている。図1(左)は、格子サイズ128⁴と64⁴(現在世界の格子QCD計算で典型的に採用されている格子体積)の配位上で計算された ϕ メソン(ベクターメソンの一つ)の2点相関関数 $C_\phi(t)$ を用いて、それぞれについて時間 t における ϕ メソンの局所有効質量 $m_\phi^{\text{eff}}(t)=\ln\{C_\phi(t)/C_\phi(t+1)\}$ をプロットしたものである。格子サイズ128⁴と64⁴の結果に統計精度を超える差異は見られない。しかしながら、図1(右)の Ω バリオンの局所有効質量においては、 $t>15$ の領域において有意な差異が見て取れる。 Ω バリオンは自然界では安定粒子(強い相互作用で崩壊しない粒子)であるため、このような有限体積効果は全く期待されていない。そのため、より詳細な調査が必要であると判断し、計算方法の抜本的な改良を施し、 Ω バリオン質量の更なる高精度計算を遂行中である。

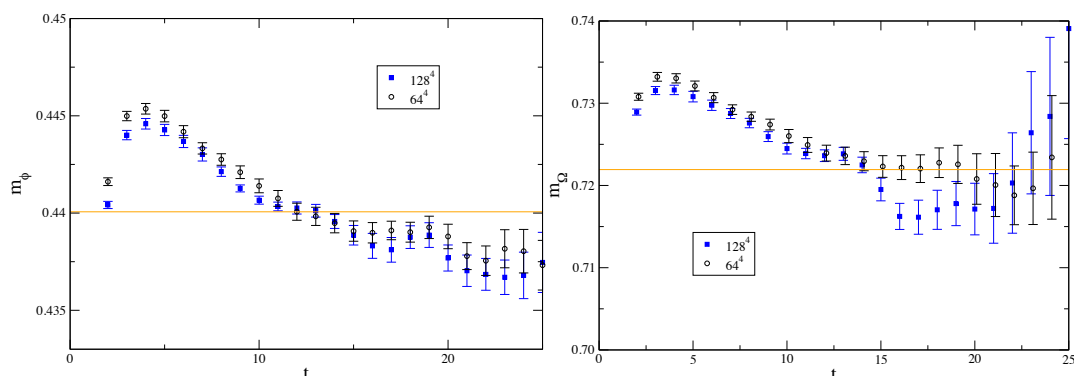


図1: 格子サイズ128⁴と64⁴における ϕ メソン局所有効質量(左)と Ω バリオン局所有効質量(右). 横線は実験値を表す. ϕ メソンは不安定粒子(強い相互作用で崩壊する粒子)であるため、時間 t が大きくなる領域において局所有効質量が実験値より小さくなることを期待されている。

3. 学際共同利用として実施した意義

物理点直上での(格子間隔,格子サイズ)=(0.085 fm, 128⁴), (0.065 fm, 160⁴), (0.045 fm, 256⁴)を持つゲージ配位は、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 $(10 \text{ fm})^3$ 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、体積依存性に関しては調査中)。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。今後は、生成されたゲージ配位を用いて様々な物理量を計算していく予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“Utility of geometry in lattice QCD simulations”,
 PACS Collaboration: N. Ukita, K.-I. Ishikawa, and Y. Kuramashi,
 Physical Review D98 (2018) 014515.

“Finite size effect on pseudoscalar meson sector 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 D99 (2019) 014504.

(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
COMA	○	104,000	26,000
Oakforest-PACS	○	680,000	408,000

※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。