

格子 QCD を用いた現実的クォーク質量近傍でのハドロン物理量測定

Calculation of physical quantities of hadrons near physical quark masses from lattice QCD

山崎 剛

筑波大学数理物質系

1. 研究目的

筑波大学の格子 QCD グループ(PACS Collaboration)では、現実的なクォーク質量かつ、一辺が 10fm を超える大体積の計算から、格子 QCD に含まれる主要な系統誤差を全て除いた物理量を求める、PACS10 プロジェクトを実行している。最終的には異なる格子間隔 3 点でのゲージ配位「PACS10 配位」を生成する計画であり、現在までに最も格子間隔の小さいゲージ配位以外は生成が終了している。現在は Oakforest-PACS を用いて、最後のゲージ配位を生成中である。これらのゲージ配位を用いて、格子 QCD の大きな目的の一つである実験値の再現へ向けた研究が進められ、これまでに基本的な物理量であるハドロン質量や崩壊定数について実験値と良い一致を示す結果が得られている。

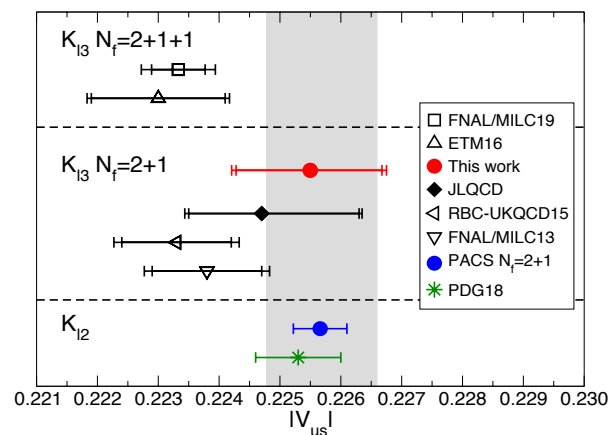
本プロジェクトでは PACS10 配位を用いて、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD から軽原子核の性質及びハドロンの内部構造を解明することを目的とした研究を行った。これらの研究は軽原子核の内部構造研究へ向けた基礎研究という位置付けでもある。また、現実的なクォーク質量かつ大体積での計算は、これまでとは質的に異なる計算になるため、それに対応した計算方法の開発研究も行った。

2. 研究成果の内容

(1) K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算

素粒子標準模型を超える物理探索に重要なクォーク混合行列(CKM 行列)要素の一つである $|V_{us}|$ の決定には、K 中間子セミレプトニック崩壊に関する形状因子の精密計算が不可欠である。本研究では、この形状因子の精密計算のため、一辺が 10fm を超える大体積かつ物理的クォーク質量での計算を、PACS10 配位の一つ(格子サイズ 128^4)を用いて行った。本研究結果は 5.(1) 8.の論文としてまとめた。

右図に赤丸の本研究結果と、これまでの格子 QCD 計算結果(黒色印)の比較を示す。本研究結果は、これまでの結果と比べ若干大きな値になっ



ているが、灰色帯で表わしている標準模型からの予言と矛盾しない結果になっている。また、我々の結果は $|V_{us}|$ の異なる決定方法である、崩壊定数から求められた値(青丸と緑星)とも一致している。つまり、本研究結果は素粒子標準模型を超える物理に関しては否定的な結果を示唆している。しかし、近年、標準模型から予言される $|V_{us}|$ は、灰色帯を超えて大きな値が報告されている。素粒子標準模型を超える物理探索のためには、さらに精密な $|V_{us}|$ 決定が望まれている。今後、本計算の最も大きな不定性である有限格子間隔起因の系統誤差を取り除く計算を行っていく。

(2) パイ中間子, K 中間子電磁的因子計算

パイ中間子, K 中間子の内部構造に係る電磁的因子計算を、上記の K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算と同じ、PACS10 配位の一つ(格子サイズ 128⁴)を用いて行った。どちらの形状因子も非常に良い精度で結果が得られた。それらから得られた荷電半径は、実験値をよく再現した。特に K 中間子荷電半径については、系統誤差の調査は今後必要であるが、実験値の精度を上回る統計精度の結果が得られた。

(3) 軽原子核直接計算

現実よりも重いクォークを用いた軽原子核の試験的計算では、実験値よりも大きな束縛エネルギーが得られていた。この主要な原因は、計算に用いたクォーク質量が大きいためと考えられる。そこで、現実のクォークと同程度の質量を用いた計算から、実験値を再現できるかの検証を目的とした計算を近年継続している。軽原子核計算は、典型的な格子 QCD 計算よりも多くの計算機資源が要求されるうえに、現実のクォーク質量では統計揺らぎが大きくなり、統計誤差を抑えることが非常に難しい。これまでの現実的クォーク質量近傍の計算から、重陽子の束縛エネルギーについて、有限体積効果を含めた実験値を大きな誤差ではあるが再現することができた。しかし、統計誤差を格段に小さくするためには、これまでと同じ計算方法では難しいため、計算コード高速化と計算方法の改良を行った。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した大規模格子 QCD シミュレーションには、膨大な大型並列計算機資源が不可欠であり、学際共同利用で配分されたリソースにより実施することが可能になった。

4. 今後の展望

K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子については、本計算の最も大きな系統誤差を与える有限格子間隔からの系統誤差を取り除くため、連続極限での形状因子を求めるため、異なる格子間隔の PACS10 配位(格子サイズ 160⁴)を用いた計算を行う計画である。パイ中間子, K 中間子電磁的因子は、格子間隔起因の系統誤差を含め、種々の系統誤差評価を実行したのち、研究成果を論文としてまとめる。軽原子核直接計算につ

いては、計算方法の改良について継続した研究を行っていく。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Y. Namekawa and T. Yamazaki, “Quark mass dependence of on-shell and half off-shell scattering amplitudes from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, *Physical Review D*, 99, 11, 114508, 2019.
2. T. Yamazaki and Y. Kuramashi, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, *Proceedings of Science(LATTICE2018)*, 077, 2019.
3. Y. Namekawa and T. Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, *Proceedings of Science(LATTICE2018)*, 078, 2019.
4. 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, “Calculation of $K \rightarrow \pi l \nu$ form factor in $N_f = 2+1$ QCD at physical point on $(10 \text{ fm})^3$ ”, *Proceedings of Science(LATTICE2018)*, 265, 2019.
5. T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range”, *Springer Conference Physics*, 238, 427, 2020.
6. T. Yamazaki and Y. Namekawa, “Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary”, *Proceedings of Science(LATTICE2019)*, 032, 印刷中.
7. 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, “ K_{13} form factors in $N_f=2+1$ QCD at physical point on large volume”, *Proceedings of Science(LATTICE2019)*, 186, 印刷中.
8. 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, “ K_{13} form factors at the physical point on $(10.9 \text{ fm})^3$ volume”, arXiv:1912.13127[hep-lat], *Physical Review D*, 印刷中.

(2) 学会発表

1. T. Yamazaki, “Direct calculation of two-nucleon energy from lattice QCD”, *Frontiers in Lattice QCD and related topics*, (京都大学, 京都), 2019, 4/15~

26, 招待講演

2. T. Yamazaki, “Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary”, Lattice 2019, (Hilton Hotel Wuhan Riverside, 中国), 2019, 6/16~22
3. J. Kakazu, “Kl3 form factors in Nf=2+1 QCD at physical point on large volume”, Lattice 2019, (Hilton Hotel Wuhan Riverside, 中国), 2019, 6/16~22
4. 山崎剛, “相互作用境界の Bethe-Salpeter 波動関数を使った二体パイ中間子散乱振幅”, 日本物理学会 2019 年秋季大会 (山形大学, 山形), 2019, 9/17~20

(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	○	30,000	
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。			