

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り、それに対応した計算方法が望まれているため、ハドロン多体系の新しい計算方法の開発研究も行った。具体的には(1)軽原子核直接計算、(2)軽い中間子形状因子計算、(3)散乱物理量の新しい計算方法の開発、を行った。

2. 研究成果の内容

(1) 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。平成 30 年度末までに約 12 万測定を実施し、重陽子の束縛エネルギーについては、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。一方、3 核子、4 核子系については、統計誤差が大きく、有意な結果を求めることは難しい状況である。

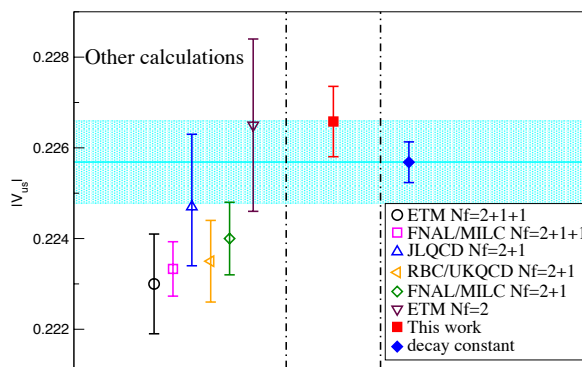
また、大きなクォーク質量以外の系統誤差として考えられている励起状態の寄与について、本計算で用いた計算方法での系統誤差を調べるため、異なる演算子を用いた重陽子計算を行った。超高精度での比較を実施するため、大きなパイ中間子質量(800MeV)で計算を行った。その結果、束縛エネルギー計算の必要条件を満たす解析を行えば、異なる演算子を用いた計算結果は一致することを示した。さらに、散乱状態に特化した演算子を用いた場合、体積が大きくなると散乱状態の寄与が体積に比例して大きくなり、束縛状態のエネルギーが取りづらくなることを示した。この結果から、これまで行ってきた計算方法では、励起状態起因の系統誤差は小さいと期待できる。

(2) 軽い中間子形状因子計算

最も粗い格子間隔の PACS10 配位を用いて、パイ中間子、K 中間子の内部構造に関する電磁氣的形状因子計算を行った。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。

さらに、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 $|V_{us}|$ の決定に不可欠な、レミレプトニック K 中間子崩壊形状因子の精密計算を実行した。この計算により統計精度 0.3% の形状因子が得られた。その結果を用いて見積もられた $|V_{us}|$ 及び、これまでに得られていた結果を右図にまとめた。本結果 (図中：赤四角記号) は、これまでの多くの格子 QCD 計算結果 (白抜き記号) と異なり、 1σ の誤差範囲内で標準模型の予言 (水色帯) と一致した結果が得られた。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 (青菱形記号) と一致している。今後、この結果の信頼性を確認するために系統誤差の調査を行う予定である。



その他にも、この計算ではクォーク伝搬関数計算アルゴリズムの改良を行い、数倍の計算速度高速化を達成した。

(3) 散乱物理量の新しい計算方法の開発

平成 29 年度から開始した、新しい散乱物理量の計算方法の開発を継続した。我々の提案した方法から得られた散乱振幅は、どのような特徴があるかを調査した。その結果、半質量殻外散乱振幅は計算に用いた演算子に依存するが、その依存性は打ち消すことができることを発見した。それ以外にも、質量殻上散乱振幅の時間依存性に注目し、散乱振幅を計算する際に用いる二体ハドロン波動関数に寄与する状態について、どのような制限が付くかを議論した。

3. 学際共同利用として実施した意義

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

(1) 軽原子核直接計算については、今後も計算を継続し、少なくとも重陽子の束縛エネルギーを 10% 程度の精度で求めることを目標とする。そのために、計算コード改良や計算方法の再検討も含め計算の高速化が重要であると考えている。この目標を達成した後に、束縛エネルギー計算で重要な有限体積効果の調査を実行する予定である。

(2) 軽い中間子形状因子計算では、最も粗い格子間隔の PACS10 配位の計算が終了したので、種々の系統誤差の調査を行った後に、本研究で得られた成果を論文としてまとめ、本年度中に Physical Review D へ投稿する予定である。その後、次の格子間隔の PACS10 配位を用いた計算を実行する。

(3) 散乱物理量の新しい計算方法の開発は、最も単純なハドロン散乱である、アイソスピン 2 の二体パイ中間子散乱系を用いた試験的計算が一段落した。今後は、我々の提案した新しい計算方法を現実的クォーク質量での計算へ応用することや、もっと複雑なハドロン散乱系へ用いることを検討している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Y. Namekawa and T. Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, *Physical Review D(Rapid Communication)*, 98, 1, 011501, 2018.
2. T. Yamazaki and Y. Kuramashi, “Reply to “Comment on ‘Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory’””, *Physical Review D*, 98, 3, 038502, 2018.
3. T. Yamazaki and Y. Kuramashi, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, *Proceedings of Science(LATTICE2018)*, 077, 印刷中
4. Y. Namekawa and T. Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, *Proceedings of Science(LATTICE2018)*, 078, 印刷中
5. 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, 印刷中
6. T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range”, *Springer Conference Proceedings*, 1~7, 査読有, 印刷中

(2) 学会発表

1. T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range”, XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics, (Caen Convention Center, フランス), 2018, 6/9~13, 招待講演
2. T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, Lattice 2018 (Kellogg Hotel & Conference Center, アメリカ), 2018, 7/22~28
3. Y. Namekawa, “Scattering length from BS wave function inside the interaction range”, Lattice 2018 (Kellogg Hotel & Conference Center, アメリカ), 2018, 7/22~28
4. J. Kakazu, “Calculation of $K \rightarrow \pi l \nu$ form factor in $N_f=2+1$ QCD at physical point on $(10 \text{ fm})^3$ ”, Lattice 2018 (Kellogg Hotel & Conference Center, アメリカ)

カ), 2018, 7/22~28

5. 滑川裕介, “格子 QCD による半質量殻外散乱振幅のクォーク質量依存性評価”, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本), 2018, 9/14~17
6. 賀数淳平, “物理点での大規模格子 QCD による軽中間子形状因子計算”, 日本物理学会 2018 年秋季大会(信州大学, 松本), 2018, 9/14~17
7. T. Yamazaki, “PACS10 project in lattice QCD”, 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences, 2018, 10/15~16 (筑波大学, つくば), 招待講演

(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	272,000
※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。			