

受付 ID	17a21
分野	素粒子分野

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 hadron physical quantities 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、近年、様々な大型計算機資源を活用して、現実的なクォーク質量、またはそれに極めて近い質量かつ、大体積でのゲージ配位生成を行っている。こ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、同じゲージ配位を用いて、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で大体積での計算は、これまでとは質的に異なる計算になるため、計算方法もそれに対応した方法を開発する必要がある。そこで、ハドロン多体系の新しい計算方法の開発研究も行った。具体的には行った研究は以下の3研究である。

(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

2. 研究成果の内容

(1) 軽原子核直接計算

我々が初期に行った、現実よりも重いクォークを用いた軽原子核計算からは、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行った。平成29年度以前の計算では測定数が約6万だったのを、平成29年度末までに約2倍の10万測定まで増やした。この結果、二核子系原子核である重陽子については、実験値から予測される値と一致する傾向が見え始めた。しかし、それ以外のヘリウム3、ヘリウム4原子核については、依然として統計誤差が大きく有意な結果が見えていない。今後も、統計誤差を抑えるため計算を継続していく予定である。

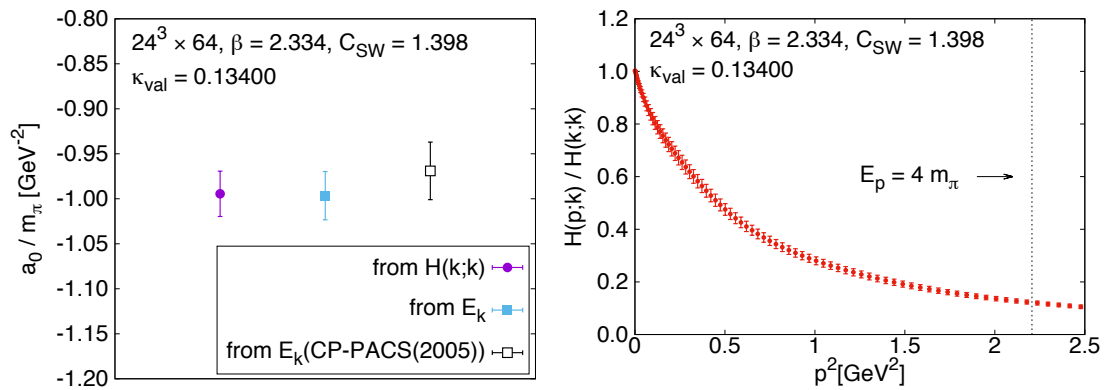
また、大きなクォーク質量以外の系統誤差として考えられている励起状態の寄与について、本計算で用いた計算方法での系統誤差の大きさを調べるため、異なる演算子を用いた重陽子計算の高精度比較を行った。この比較を行う為、以前の試験的計算で用いた、非常に大きなパイ中間子質量(800MeV)で計算を行った。その結果、束縛エネルギー計算の必要条件を満たす解析を行えば、異なる演算子を用いた計算結果は一致することを示した。この結果から、これまで行ってきた計算方法では、励起状態起因の系統誤差は小さいと予想できる。

(2) 軽い中間子形状因子計算

平成28年度では物理的クォーク質量近傍でのパイ中間子形状因子計算を行った。これを発展させた、物理的クォーク質量での軽い中間子形状因子計算を開始した。この計算は以前よりも大きな体積を用いており、系統誤差を小さくしたパイ中間子形状因子を求めることを一つの目標としている。さらに、以前の計算では求められなかった、 K 中間子形状因子と $K \rightarrow \pi l \nu$ 崩壊に関する行列要素の計算も行う予定である。平成29年度末までに、パイ中間子質量 500MeV での試験的計算を実行し、現在解析コード作成を進めている。

(3) 散乱物理量の新しい計算方法の開発

格子 QCD を用いて二体散乱位相差を求める有限体積法を再検討し、Bethe-Salpeter 波動関数を用いて散乱振幅を求める新しい方法を提案した。さらに、その方法を用いた試験的計算を行った。この計算は初めての計算であったので、計算が容易なアイソスピン 2 の 2 体パイ中間子散乱系を、非常に大きなクォーク質量とクエンチ近似を用いて行った。その結果を下図(下記 4. 成果発表 (1) 学術論文 3. から引用)にまとめる。



左図は、我々が提案した計算方法から得られた散乱長の結果(紫丸)とこれまでの有限体積法を用いた結果(水色四角)が、同じゲージ配位を用いた計算で一致することと、それらの結果が以前の計算結果(白抜き四角)とも一致していることを示している。この結果から、新しい計算方法はこれまでの方法と遜色ないことがわかった。右図は、新しい方法でないと計算できない、質量殻外散乱振幅の結果であり、非常に良い統計で計算が可能であることがわかった。

3. 今後の展望

(1)に関しては、統計誤差を大幅に抑えることが重要であるため、計算の高速化を検討する。(2)では、試験的計算の解析コード作成が完了し、試験的計算結果がこれまでの結果と無矛盾であることが確認され次第、これまでよりも大きな体積である 128^4 の格子サイズでの計算を開始する。(3)は、得られた成果を論文としてまとめる作業を進めると同時に、二体波動関数を使った新しい解析方法の開発や、質量殻外散乱振幅から物理量を求める方法の検討を進めていく。

4. 成果発表

(1) 学術論文

1. Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, and Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration, “Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass”, European Physical Journal, Web Conf. 175, 05019 (2018).
2. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, “Relation between scattering

amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”,
Physical Review D96, no.11, 114511 (2017).

3. Namekawa Yusuke and Takeshi Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, arXiv:1712.10141.

(2) 学会発表

1. 口頭発表: Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, and Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration, “Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass”, Lattice 2017 (Palacio de Congresos de Granada, スペイン), 2017 年 6 月 19 日～24 日.
2. 口頭発表: 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, “Electromagnetic pion form factor with strange quark mass reweighting in $N_f=2+1$ lattice QCD”, Lattice 2017 (Palacio de Congresos de Granada, スペイン), 2017 年 6 月 19 日～24 日.
3. 招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Binding energy of light nucleus from lattice QCD”, QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, オーストラリア), 2017 年 7 月 10 日～14 日.
4. 口頭発表: 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, “Electromagnetic pion form factor at physical point from $N_f=2+1$ QCD”, QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, オーストラリア), 2017 年 7 月 10 日～14 日.
5. ポスター発表: 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一, 浮田尚哉, 中村宜文, 滑川裕介, 賀数淳平, “格子 QCD を用いた軽い原子核計算”, 計算科学研究センター設立 25 周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」(つくば国際会議場, つくば), 2017 年 10 月 10 日～11 日.
6. ポスター発表: 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一, “格子 QCD を用いた軽原子核の直接計算”, 第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール、東京), 2017 年 11 月 2 日.
7. 招待講演: Takeshi Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, Multi-Hadron Systems from Lattice QCD (INT University of Washington, アメリカ), 2018 年 2 月 5～9 日.
8. 招待講演: Yusuke Namekawa, “Scattering length from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range”, Multi-Hadron Systems from Lattice

QCD (INT University of Washington, アメリカ), 2018 年 2 月 5～9 日.

9. 招待講演: 滑川裕介, “Successful prediction to charmed single baryons and attempt on two-hadron by lattice QCD”, ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造 (J-PARC, 東海村), 2018 年 3 月 5～7 日.
10. 招待講演: 山崎剛, “格子 QCD における Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱位相差の新しい計算方法”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 野田), 2018 年 3 月 22～25 日.
11. 口頭発表: 滑川裕介, 山崎剛, “格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱長計算”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 野田), 2018 年 3 月 22～25 日.
12. 口頭発表: 賀数淳平, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉, 山崎剛, 吉江友照 for PACS collaboration, “wrapping around effect を軽減した π 中間子形状因子の計算”, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 野田), 2018 年 3 月 22～25 日.

(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
HA-PACS/TCA	○	32,500	
COMA	○	211,500	52,875
Oakforest-PACS	○	1,117,200	558,600
※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。			