

ハドロン間相互作用の格子 QCD 第一原理計算

First-principles Lattice QCD calculation of Hadron interactions

土井琢身

理化学研究所数理創造プログラム

1. 研究目的

本研究では、格子 QCD 数値シミュレーションによる、ハドロン間相互作用の QCD からの第一原理的な決定を目指している。特に、近年ではエキゾチックハドロン（の候補）が世界各地の大規模加速器実験によって次々に発見されており、それらの性質の解明には格子 QCD 計算によるハドロン間相互作用の決定が喫緊の課題となっている。

2023 年度では 2022 年度に引き続き、 $\Lambda(1405)$ 粒子の性質解明に向けた第一段階の研究として、フレーバー SU(3) 極限における反 K 中間子-核子間相互作用の導出を行った。2022 年度では 3 クォーク型のソース演算子を用いた 3 点相関関数から相互作用の計算を行い、ポテンシャルの特異的な振る舞いを観測した。そこで 2023 年度では、特異的な振る舞いの解決方法として、4 点相関関数の計算や新たな解析手法の開発を研究目的とした。

2. 研究成果の内容

$\Lambda(1405)$ 粒子の性質解明に向けた研究では、昨年度に引き続き、フレーバー SU(3) 極限において反 K 中間子-核子系に対応する 8 重項および 1 重項表現のチャンネルに着目し、対応するメソン-バリオン相互作用ポテンシャルの計算を行った。本年度では、昨年度に観測された特異的な振る舞いの解決方法として、複数の NBS 相関関数を組み合わせて相互作用を決定する方法を新たに提唱した。そして、昨年度と同様に擬スカラーメソン質量 670 MeV での計算を行い、特異的な振る舞いの解決に試みた。まずは、メソン・バリオン型のソース演算子を用いた 4 点相関関数の計算を行い、昨年度に計算した 3 点相関関数と組み合わせる方法を試みた。得られた相互作用ポテンシャルは特異的な振る舞いが消えたものの、引力が弱くなり束縛状態が消えてしまうことを発見した。これは、3 点相関関数と 4 点相関関数を組み合わせることにより、これらに含まれる束縛状態の成分が相殺されてしまい、有効な相互作用ポテンシャルが得られないことに起因すると考えられる。次に、2 つの 8 表現の 3 点相関関数を組み合わせることで、低エネルギーで有効な近似のもとで特異的な振る舞いを持たない相互作用ポテンシャルの導出を行った。これにより、強い引力成分を持つポテンシャルが得られ、近似的・部分的であるが、 $\Lambda(1405)$ 粒子に対応する有効的な束縛状態が得られた。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究で行った、8重項および1重項表現の4点相関関数の計算や新たな解析手法の提唱は、 $\Lambda(1405)$ の解明のみならず、HAL QCD法におけるクォーク対生成消滅ダイアグラムを含むハドロン間力の決定、およびハドロン共鳴/束縛状態の統一的解明を目指す上で重要な研究成果である。これらの計算は学際共同研究ならではの大規模計算資源を用いることで初めて可能となったものであり、その意義は大きい。

4. 今後の展望

本年度の解析により、相互作用ポテンシャルの特異的な振る舞いは、 $\Lambda(1405)$ を構成する相互作用ポテンシャルの非局所性が大きいことに起因すると考えられる。本解析では、HAL QCD法において局所型ポテンシャルを用いて相互作用の導出を行った。しかし、この方法では非局所性の寄与が取り入れられていない。したがって、今後は分離型ポテンシャルを用いて非局所性を含んだ相互作用を導出することで、特異的な振る舞いを持たない有効的な相互作用の抽出を目指す。そのためには、4点相関関数の統計数を増やすことで統計誤差を減らし、精度を上げることが必要になると予想している。また、現在はクォーク質量が重い領域かつフレーバーSU(3)極限での計算のため、将来的にはクォーク質量を軽くし、またSU(3)の破れを取り入れた計算が重要なテーマと考えている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki, T. Doi and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), “Lattice quantum chromodynamics (QCD) studies on decuplet baryons as meson–baryon bound states in the HAL QCD method”, PTEP 2023, 043B05 (2023). (Editor’s Choice)
2. Y. Akahoshi and S. Aoki, “Interaction potentials for two-particle states with nonzero total momenta in lattice QCD”, Phys. Rev. D 108, 034510 (2023).
3. Etsuko Itou for HAL QCD collaboration, “New configuration set of HAL QCD collaboration”, PoS LATTICE2023, 140 (2024).
4. K. Murakami, S. Aoki, “Study on Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit in the HAL QCD method”, PoS LATTICE2023, 63 (2024).

(2) 学会発表

1. K. Murakami, “Understanding exotic hadrons from the first-principle

- calculation in lattice QCD”, The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society and the Physical Society of Japan, Hawaii, USA, Nov. 16 – Dec. 1, 2023.
2. K. Murakami, “Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit from lattice QCD”, Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023, Nov. 14-17, 2023.
 3. K. Murakami, S. Aoki, “Study on Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit in the HAL QCD method”, The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023), Jul. 31 – Aug. 4, 2023.
 4. S. Aoki, “Recent results on hadron interactions in the HAL QCD method”, 2023 Santa Fe Workshop, "Lattice QCD and Probes of New Physics", Santa Fe, NM, USA, Aug. 7-11, 2023.
 5. S. Aoki, “Lattice studies on hadron interactions including strange, charm and bottom quarks in the HAL QCD method”, The 2nd Korea-Japan Nuclear Physics Workshop, Daejeon, Korea, Nov. 13-15, 2023.
 6. T. Doi, “Hadron interactions and Exotics from Lattice QCD in the HAL QCD method”, Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023, Nagoya, Japan, Nov. 14-17, 2023.
 7. T. Doi, “Hadron-hadron interactions from Lattice QCD with the HAL QCD method”, International workshop on J-PARC hadron physics 2023 (J-PARC Hadron 2023), Tokai, Japan, Sep. 12-15, 2023.
 8. T. Doi, “Hadron interactions from Lattice QCD”, 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023), Kobe, Japan, Aug. 4-8, 2023.
 9. K. Sasaki, “Baryon interaction from the time-dependent HAL QCD method on the lattice”, The sixth joint meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society (APS) with the nuclear physicists of the Physical Society of Japan (JPS), Hawaii, USA, Nov. 26 – Dec. 1, 2023.
 10. T. M. Doi, “Nucleon-Lambda interaction from lattice QCD”, BISHOP 2023, online, May 17, 2023.
 11. T. M. Doi, “Baryon-baryon interaction from lattice QCD”, 41st SPP Physics Conference, Siargao Island, Philippines, Jul. 19-21, 2023.
 12. T. M. Doi, “Nucleon-hyperon interaction from lattice QCD on physical point”, 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023), IL, USA, Jul. 30 – Aug. 5, 2023.
 13. T. M. Doi, “物理点ゲージ配位における HAL QCD 法による YN/YY 相互作用”, ELPH 研究会 C035 「実験、反応・構造計算、格子 QCD で解き明かすハドロン分光」, Sendai, Japan, Nov. 8-9, 2023.

14. E. Itou, “QCD と第一原理計算”, 計算物理春の学校 2024, Okinawa, Japan,
Feb. 19-21, 2024.

(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	○	9,400	
Wisteria/BDEC-01	○	537,300	
※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。			