

## 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研究センター

#### 1. 研究目的

本研究では、格子 QCD の数値シミュレーションにより、ハドロン間相互作用を QCD から第一原理的に決定することを目指している。特に近年、いわゆる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。

2024 年度は、2022 年度より継続している、 $\Lambda(1405)$  粒子の性質解明に向けたフレーバー SU(3) 極限における反 K 中間子-核子間相互作用の研究を進めた。2023 年度には、低エネルギー近似のもとで有効な、二つの 8 表現の相関関数を組み合わせる手法により、特異的な振る舞いを回避した相互作用の導出を行った。2024 年度では、より厳密な相互作用の導出を目指した、特異性を回避した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

昨年度に引き続き、 $\Lambda(1405)$  粒子の性質解明に向け、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 重項表現チャンネルにおけるメソン-バリオン相互作用ポテンシャルの計算を実施した。本年度は、相互作用ポテンシャルの特異性問題の新たな解決策として、局所型の代わりに分離型相互作用ポテンシャルを用いる方法を提案した。この方法は昨年度の解析に必要とされた近似を要せず、かつ 1 重項・8 重項表現チャンネルの両方への適用が可能である。まず、擬スカラーメソン質量 670 MeV で既に計算済みの 3 点相関関数を用いて導出を試みたところ、分離型ポテンシャルの特異性回避は達成されたが、引力成分が不十分であることが判明した。これは、擬スカラーメソン質量が重い場合には運動項が減少し NBS 波動関数がよりコンパクトになるため、離散化誤差が増大し、さらにこの誤差が分離型ポテンシャルの導出過程において顕著な影響を及ぼすことが原因であると考えられる。したがって、本研究では、より軽い擬スカラーメソン質量 460 MeV での 3 点相関関数を新たに計算し、これを用いた分離型ポテンシャルの導出を行った。その結果、1 重項・8 重項いずれにおいても十分な引力成分を持つポテンシャルが得られ、シュレーディンガー方程式を解くことで  $\Lambda(1405)$  粒子に対応する束縛状態が得られた。さら

に、擬スカラーメソン質量 460 MeV での 4 点相関関数の計算も行った。今後は、3 点・4 点相関関数を併用し、分離型ポテンシャルよりも自由度の高い相互作用導出方法の開発を目指す。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本研究で実施した 3 点および 4 点相関関数の計算は、HAL QCD 法においてクォーク対生成消滅ダイアグラムを含む有効的なメソン・バリオン間相互作用の決定を目指すものである。これは、 $\Lambda(1405)$ の解明のみならず、ハドロンの共鳴／束縛状態の統一的解明を目指す上でも重要な役割を担う。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

本年度では、分離型ポテンシャルを用いた HAL QCD 法による、フレーバーSU(3)極限における  $\Lambda(1405)$ 束縛状態の導出を行った。一方、SU(3)対称性が破れた現実のクォーク質量において、 $\Lambda(1405)$ は共鳴状態として現れる。

共鳴状態の解析には、分離型ポテンシャルよりも自由度が高い相互作用ポテンシャルが必要である。加えて、SU(3) 対称性が破れた状況では結合チャンネル解析およびそれに適用可能な相互作用ポテンシャルの導入が求められる。今後は、分離型ポテンシャルに基づく、これらの要請を満たす新たな相互作用ポテンシャルおよびその導出方法の開発を進める予定であり、その際には本年度に計算した 3 点・4 点相関関数を利用する計画である。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

1. K. Murakami and S. Aoki, “ $\Lambda(1405)$  in the flavor SU(3) limit using a separable potential in the HAL QCD method,” PoS **LATTICE2024**, 101 (2025).

#### (2) 学会発表

1. Kotaro Murakami, “Lattice QCD studies on  $K\bar{b}N$  interactions and  $\Lambda(1405)$  in the flavor SU(3) limit,” Hadron in Nucleus 2025 (HIN25), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, April 2-4, 2025.
2. Kotaro Murakami, “ $\Lambda(1405)$  in the flavor SU(3) limit from lattice QCD,” Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2024 (HHIQCD 2024), Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, October 28, 2024 (invited talk).

3. Kotaro Murakami, Sinya Aoki “Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit using a separable potential in the HAL QCD method,” The 41st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2024), the University of Liverpool, UK, July 28-August 3, 2024.
4. Kotaro Murakami, “Lattice QCD studies on Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit,” International workshop on J-PARC hadron physics 2024 (J-PARC Hadron 2024), J-PARC, Japan, July 23-25, 2024 (invited talk).
5. Kotaro Murakami, “Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit from lattice QCD,” SPICE: Strange hadrons as a Precision tool for strongly InterActing systEms, ECT\*, Italy, May 13-17, 2024 (invited talk).
6. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Collaboration, "分離型ポテンシャルを用いた HAL QCD 法による Lambda(1405)の研究," 日本物理学会 第 79 回年次大会, 2024 年 9 月 16 日-19 日, 北海道大学 札幌キャンパス, 一般講演.

(3) その他

| 使用計算機            | 使用計算機に<br>○                                                        | 配分リソース※ |     |      |
|------------------|--------------------------------------------------------------------|---------|-----|------|
|                  |                                                                    | 当初配分    | 移行* | 追加配分 |
| Cygnus           | ○                                                                  | 2,800   |     |      |
| Pegasus          | ○                                                                  | 245     |     |      |
| Wisteria/BDEC-01 | ○                                                                  | 308,400 |     |      |
|                  | ※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。<br>*バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入 |         |     |      |