

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

1. 研究目的

本研究では、格子 QCD による計算を用い、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。特に近年は様々なエキゾチックハドロン共鳴状態（の候補）が世界各地の大規模加速器実験により発見されており、その性質を解明するには対応する系におけるハドロン間相互作用の格子 QCD 計算が喫緊の課題となっている。またハドロン間相互作用のうちバリオン間力は、原子核物理を構築する上で最も基礎となる量であると共に、中性子星の構造や宇宙における元素合成など、宇宙天文学における現象の解明にも重要な役割を果たす。

2022 年度の研究では、ハドロン共鳴／束縛状態の統一的理解に向けて、特に $\Lambda(1405)$ 粒子の性質解明に向けた研究を行った。これは我々が学際共同プログラムで開発した all-to-all 伝搬関数の効率的計算方法を用い、クォーク対生成消滅ダイアグラムがあるメソン・バリオン系の相互作用を決定する研究となっている。また、物理点直上におけるバリオン間力の決定に向けた研究を行った。これは富岳における物理点配位生成計算を受けて、測定計算のためにゲージ固定を計算する研究である。

2. 研究成果の内容

$\Lambda(1405)$ 粒子の性質解明を目指す研究としては、特に反 K 中間子-核子系および π 中間子- Σ バリオン系の結合チャンネル散乱の解析に着目し、対応する相互作用ポテンシャルの計算を行った。そのための第一段階の研究として、2022 年度における具体的な計算セットアップとしては、フレーバー $SU(3)$ 極限でのメソン-バリオン散乱の計算を行った。この極限では単一チャンネルでの解析が可能となり、物理的に重要な性質を保ちつつ計算コストを抑えられるという利点がある。このとき、反 K 中間子-核子および π 中間子- Σ バリオン系の情報から 8 重項および 1 重項表現のチャンネルを取り出すことが可能となり、カイラル模型の先行研究ではこれらの散乱振幅に $\Lambda(1405)$ 粒子に対応する極の存在が示唆されている。したがって、上記の解析方法を用いてこれらの極の探索を試みた。相互作用の決定に必要な NBS 相関関数としては、3 クォーク型のソース演算子を用いた 3 点相関関数を用い、擬スカラーメソン質量 670 MeV での計算を行った。得られた相互作用ポテンシャルは、強い引力成分があることが明らかになった。一方でポテンシャルは 3 点相関関数が持つゼロ点や近距離極限の振る舞

いに由来して、有限の半径で特異的な振る舞いをしていることを発見した。得られたポテンシャルからシュレディンガー方程式を解くと非物理的な束縛状態があらわれるが、これも同様にポテンシャルの特異性に起因すると考えられ、解決手法として 4 点相関関数の情報と組み合わせるための研究を進めた。

物理点直上バリオン間力計算に向けては、富岳スパコンにおいて大体積・大統計の配位生成を行った。得られた配位を用いた測定計算に向けて、クーロンゲージへのゲージ固定計算を学際共同プログラムにおいて行った。一般利用を通じた資源も併せて用いることで、必要な 1600 配位 x 4 回転分の計算のほとんどを **Cygnus** で実行することができた。得られたゲージ固定配位を用いた **NBS** 相関関数の測定計算は富岳で進め、物理点直上におけるバリオン間力の結果が得られつつある。

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 **NBS** 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メソン・バリオン間相互作用の決定を目指すものであり、 $\Lambda(1405)$ の解明のみならず、ハドロン共鳴／束縛状態の統一的解明に向けた重要なステップとなる。また、本研究で行ったゲージ固定の計算は、物理点直上におけるハドロン間相互作用の決定に不可欠なものであり、富岳スパコンと組み合わせることで特に物理点ハイペロン力の予言へと繋がっている。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 $\Lambda(1405)$ の研究では、3 点相関関数を用いてメソン-バリオン散乱の研究を行ったが、今後は 4 点相関関数を新たに計算し、3 点相関関数の情報と組み合わせた解析を行う予定である。これにより、特異的な振る舞いのないポテンシャルを導くことを目指す。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。

さらに物理点直上バリオン間力計算も含め、今後は格子間隔を変えて連続極限を取ることにも必要であり、そのために格子作用を改善する研究も予定している。そこで配位の性質を調べるために必要な測定計算について、本年度と同様、ゲージ固定計算を学際共同プログラムで行うことを計画している。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Kotaro Murakami, Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Takumi Doi, Kenji Sasaki

(HAL QCD Collaboration), "Lattice quantum chromodynamics (QCD) studies on decuplet baryons as meson–baryon bound states in the HAL QCD method", Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2023, Issue 4, 043B05 (2023). (Editor’s Choice)

2. Yan Lyu, Hui Tong, Takuya Sugiura, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Jie Meng, and Takaya Miyamoto, “Optimized two-baryon operators in lattice QCD”, Physical Review D 105, 074512 (2022).

(2) 学会発表

1. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による SU(3)極限での Lambda(1405)の研究”, 日本物理学会 2022 年秋季大会, 2022 年 9 月 6 日-8 日, 岡山理科大学, 一般講演
2. Kotaro Murakami, “Studies on baryon resonances from meson-baryon scatterings in lattice QCD”, International workshop on “Hadron physics with kaon beam and related topics”, online, 3-4 October 2022.
3. Kotaro Murakami, “Studies on baryon resonances from lattice QCD”, Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS), J-PARC, 14-16 March 2023.
4. 伊藤 悦子 for HAL QCD collaboration, “物理点におけるハドロン間力計算に向けての QCD 配位生成”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24
5. 土居孝寛 for HAL QCD collaboration, “物理点 QCD 配位におけるバリオン間相互作用(Strangeness=-1,-3)”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24
6. 土井琢身 for HAL QCD collaboration, “物理点 QCD 配位におけるバリオン間相互作用(Strangeness=-4,0)”, 日本物理学会 2023 年春季大会 (オンライン), 2023/3/24

(3) その他

なし

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	○	212,500	
Wisteria/BDEC-01	○	3,600	

※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。