

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。ハドロン間相互作用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。近年はさらに様々なエキゾチックハドロン共鳴状態（の候補）が大規模加速器実験により発見されており、対応する系におけるハドロン間相互作用の決定が喫緊の課題となっていた。

2021 年度の研究では、主にハドロン共鳴／束縛状態の統一的理解に向けて、 $I=0$ $K\bar{K}^*$ 相互作用と Ω バリオン状態を対象とした格子 QCD 計算を目的とした。これは我々が学際共同研究で開発した 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・バリオン系の計算を HAL QCD 法で初めて可能にしたものである。さらに奇パリティチャンネルの核力の計算に向けて、LapH 法を二体バリオン系に適用した研究も行った。

2. 研究成果の内容

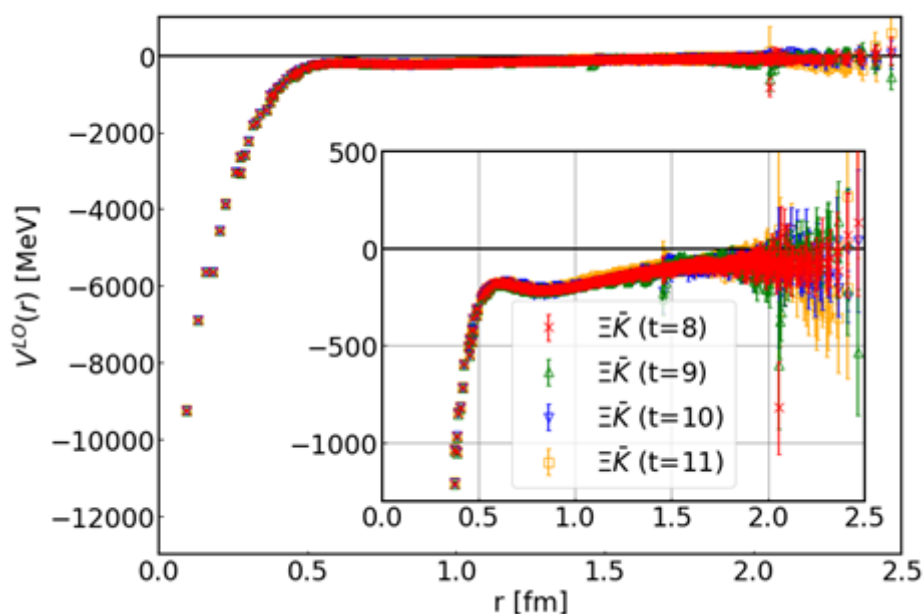
本研究では HAL QCD 法による格子 QCD 計算により、P 波の $I=0$ $K\bar{K}^*$ 相互作用を計算し、このチャンネルにあらわれる Ω バリオンについて解析した。本研究では、PACS-CS Collaboration によって生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位を用い、主に OFP を用いた計算を行った。格子サイズは $32^3 \times 64$ 、格子間隔は $a = 0.0907$ fm、パイ中間子の質量が 410 MeV である。この配位での 2 点関数を用いたハドロン質量の評価からは、 Ω バリオンは 300 MeV 程度の束縛状態として現れることがわかった。

本研究ではポテンシャルの微分展開の第 0 次オーダー (L0) での解析を行い、相関関数のソース演算子として Ω バリオンに対応する 3 クォーク型のものを用いた。この際、従来のノイズ法と all-mode averaging を用いて all-to-all 伝搬関数の計算を行った。また本研究では、シンク演算子に対して小さな smearing を導入することで、クォーク・反クォーク対が存在するときに起こる部分波展開の離散化誤差に起因する、HAL QCD 法における困難を回避した。

本研究により得られた $K\bar{K}^*$ 相互作用の結果を下図に示す。全領域で引力となっていることが明らかになった。このポテンシャルを基に 2 体のシュレーディンガー方程

式を解くと、 Ω バリオンに対応する束縛状態があることがわかり、またその束縛エネルギーは 2 点相関関数から計算したものと無矛盾であることが解った。

また、我々は学際利用とは別途に $I=3/2$ π -N 相互作用 (Δ バリオン) を計算しており、本研究の結果と比較すると、ポテンシャルは $K\bar{K}$ - Ξ 相互作用とほぼ類似しているものの、 Δ バリオンは Ω バリオンより浅い、100MeV 程度の束縛状態として現れることが解った。このことは、閾値からみた Δ バリオンと Ω バリオンの質量の違いの大部分は、ポテンシャルそのものの違いよりも、対応するメソン-バリオン系の換算質量、すなわち運動学的な違いからくることがわかった。



$I=0$ $K\bar{K}$ - Ξ 相互作用ポテンシャル。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究は、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初めての計算であり、ハドロン共鳴/束縛状態の統一的解明に向けて重要な一歩である。これ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

本計算はクォーク質量が重い領域での計算であったため、今後は物理点に向かってより軽いクォーク質量での計算を行う必要がある。またハドロン物理での長年の課題である $\Lambda(1405)$ 状態の解明に向けて、 π - Σ 、 $K\bar{K}$ -N 系の結合チャネル相互作用の研究が次の重要なテーマであると考えている。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi, “Emergence of the ρ resonance from the HAL QCD potential in lattice QCD”, Phys. Rev. D 104, 054510 (2021), arXiv:2106.08175 [hep-lat].
2. T. Sugiura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, T. M. Doi, T. Doi, “Nuclear force with LapH smearing”, PoS LATTICE2021, 565 (2022), arXiv:2202.12532 [hep-lat].
3. Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi, “Emergence of the rho resonance from the HAL QCD potential”, PoS LATTICE2021, 625 (2022), arXiv:2111.15138 [hep-lat] (submitted)
4. Kotaro Murakami, Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Kenji Sasaki, “Investigations of decuplet baryons from meson-baryon interactions in the HAL QCD method”, PoS LATTICE2021, arXiv:2111.15563 [hep-lat] (submitted)
5. Sinya Aoki, Yutaro Akahoshi, “HAL QCD potentials with non-zero total momentum and an application to the $I=2$ $\pi\pi$ scattering”, PoS LATTICE2021, arXiv:2112.00929 [hep-lat] (submitted)

(2) 学会発表

1. K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki and K. Sasaki, “Investigations of decuplet baryons from meson-baryon interactions in the HAL QCD method”, Lattice2021, 2021/07/26-30
2. “T. Sugiura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, T. M. Doi, T. Doi, “Nuclear force with LapH smearing”, Lattice2021, 2021/07/26-30
3. Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi, “Emergence of the rho resonance from the HAL QCD potential”, Lattice2021, 2021/07/26-30
4. S. Aoki and Y. Akahoshi, “HAL QCD potentials with non-zero total momentum and an application to the $I=2$ $\pi\pi\pi\pi$ scattering”, Lattice2021, 2021/07/26-30
5. 赤星友太郎, 青木慎也, for HAL QCD Collaboration, “実験室系 NBS 波動関数を用いた相互作用ポテンシャルの計算”, 日本物理学会, 2021/09/14-17
6. 杉浦拓也, 青山龍美, 土井琢身, 赤星友太郎, 土居孝寛, “HAL QCD+LapH 法による核力の計算(1)”, 日本物理学会, 2022/03/15-19
7. 村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Collaboration, “HAL QCD 法による共鳴状態を含んだメソン-バリオン散乱の解析”, 日本物理学会, 2022/03/15-19

(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	○	2,000	
Oakforest-PACS	○	929,500	
※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。			