

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。2025 年度では特に、K 中間子-核子間 (KN) 相互作用の理解を進める。この相互作用は核媒質中でのカイラルダイナミクスの理解への重要なインプットとなる。しかし、低運動量領域における KN 散乱実験による決定が困難で実験データが乏しいことに起因して、その詳細な理解には至っていない。本研究はこの理解の不足を補うことを目的としている。

2025 年度は、MRCP-M 研究課題として、重いクォーク質量における KN 相互作用の計算を行った。これまでに我々は、物理点直上 (π 中間子質量 $m_\pi=137$ MeV) において KN 相互作用を導出している。しかし、物理点直上での散乱振幅の結果には実験値との乖離が見られ、無視できない系統誤差の存在が示唆されている。本年度は、相互作用のクォーク質量依存性の解明と系統誤差の評価を目的として、重いクォーク質量でのシミュレーションを実施した。KN 相互作用のクォーク質量依存性は、ストレンジクォークのカイラル凝縮の密度依存性を決定する上で重要である。また、重いクォーク質量での計算は統計誤差を抑制できるため、系統誤差の評価にも有効である。

2. 研究成果の内容

本年度では、重いクォーク質量での KN 相互作用を決定するため、格子間隔 $a = 0.08$ fm、体積 $(72a)^4 = (6.09 \text{ fm})^4$ 、 π 中間子質量 $m_\pi = 273$ MeV での 2+1 フレーバー格子 QCD 配位を用い、S 波 KN 系の Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数の測定を行った。この計算は、MPI + OpenMP 並列化に対応した計算プログラムを用いて、Miyabi-C および Miyabi-G の計算資源を利用して実施した。

本年度で得られたデータ (別の計算資源で得られたデータも含む) を用いた解析により、 $m_\pi = 273$ MeV における KN 相互作用ポテンシャルの予備的結果を得た (図 1 青色)。前回得られた物理点直上での結果 (図 1 赤色) と比較し、KN 相互作用のクォーク質量依存性を確認した。具体的には、 $m_\pi = 273$ MeV では両アイソスピンチャンネルにおいて短距離での斥力が弱まり、アイソスピン $I = 0$ において中距離での引力成分が増大する傾向が見られた。

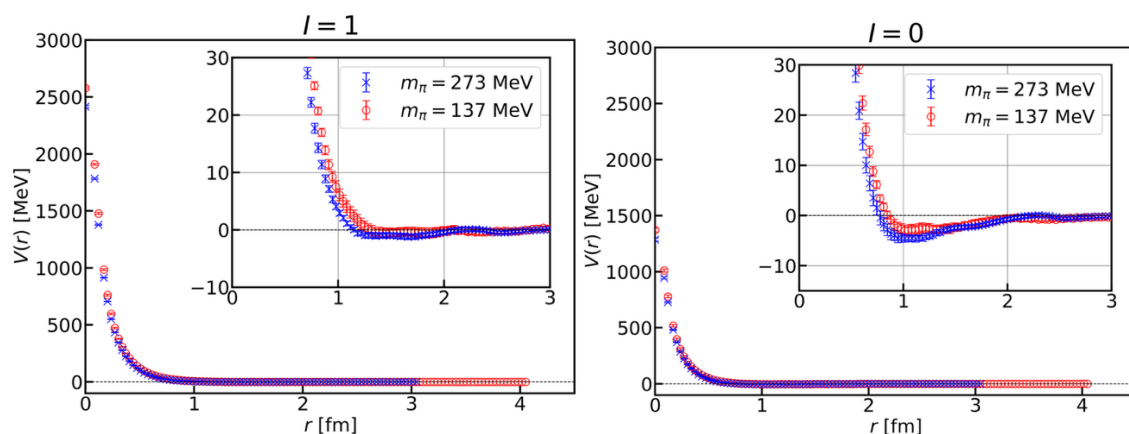


図 1 アイソスピン 1 (左図) および 0 (右図) の KN 相互作用ポテンシャルのクォーク質量依存性。青色が $m_\pi = 273$ MeV、赤色が物理点直上での結果。

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 KN 系の NBS 波動関数の測定は、HAL QCD 法による KN 相互作用の第一原理決定を目指すものである。特に重いクォークでの測定は、前回の物理点計算の系統誤差の解明へ貢献するだけでなく、カイラル対称性の部分的回復の理解において重要な役割を担う。特に、 $(72a)^4$ という大体積での 2+1 フレーバー格子 QCD 計算は大規模な計算資源を必要とし、学際共同利用プログラムによる Miyabi-C および Miyabi-G の計算資源を用いることで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

今後は、本年度に得られたデータを用いてさらなる解析を進め、散乱振幅のクォーク質量依存性を導出する。また、物理点直上での解析と同様の手法により、本研究で得られた計算結果における系統誤差の評価を行う。さらに、得られた $m_\pi = 273$ MeV での散乱振幅と物理点での結果を組み合わせることで、ストレンジクォークのカイラル凝縮の密度依存性を導出する予定である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

1. K. Murakami, S. Aoki, T. Doi, Y. Lyu, W. Yamada (HAL QCD Collaboration), “S-wave kaon-nucleon interactions from lattice QCD at the physical point,” Phys. Rev. D 113, no.5, 054506 (2026).

(2) 学会発表

1. Kotaro Murakami, “S-wave kaon-nucleon interactions and Θ^+ pentaquark from lattice QCD,” YITP International School on EIC Physics, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Japan, March 3, 2026.

2. Kotaro Murakami, “Interactions between (anti)kaon and nucleon from lattice QCD,” Workshop on ‘YN and YY interactions and neutron stars’, RIKEN, Japan, November 20, 2025 (invited talk).
3. Kotaro Murakami, Sinya Aoki, Takumi Doi, Yan Lyu, Wren Yamada, “S-wave kaon-nucleon interactions and Σ^+ pentaquark from lattice QCD,” The 2025 International Conference on the Structure of Baryons (Baryons 2025), International Convention Center, Jeju, Korea, November 10-14, 2025.
4. Kotaro Murakami, Sinya Aoki, Takumi Doi, Yan Lyu, Wren Yamada, “Lattice QCD study on kaon-nucleon interactions and Σ^+ pentaquark on the physical point,” The 42nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2025), Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, November 2-8, 2025.
5. Kotaro Murakami, Sinya Aoki, Takumi Doi, Yan Lyu, Wren Yamada, “S-wave kaon-nucleon interactions and Σ^+ pentaquark from lattice QCD,” The 15th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2025), The University of Tokyo, Tokyo, Japan, September 29-October 3, 2025.
6. Kotaro Murakami, “S-wave kaon-nucleon interactions and pentaquark from lattice QCD,” Multi-Particle Reactions 25 Workshop, University of California, Berkeley, USA, July 28-August 1, 2025.
7. 村上耕太郎, “Lattice QCD studies on meson-nucleon interactions and genuine pentaquarks,” 核力・ハドロン間相互作用と量子多体計算の進展, 2026 年 2 月 16 日-18 日, 京都大学.
8. 村上耕太郎, “S-wave kaon-nucleon interactions and Σ^+ pentaquark from lattice QCD,” RARiS 研究会 C047 「実験・有効理論・格子シミュレーションで探るハドロンダイナミクス」, 2025 年 11 月 25 日-26 日, 東北大学先端量子ビーム科学研究センター (招待講演).
9. 村上耕太郎, 青木慎也, 土井琢身, Yan Lyu, 山田廉仁 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による S 波 K 中間子-核子間相互作用および Σ^+ ペンタクォークの研究,” 日本物理学会 第 80 回年次大会, 2025 年 9 月 16 日-19 日, 広島大学 東広島キャンパス, 一般講演.

(3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
-------	---------	---------

筑波大学計算科学研究センター 2025 年度学際共同プログラム利用報告書

		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus		1,120		
Miyabi-G	○	31,500		
Miyabi-C	○	24,900		
	※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。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入			