

令和 4 年 5 月 27 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2021

課題番号：16K05340

研究課題名(和文) 格子QCD計算による現実的一般化核力の研究と軽いハイパー核の精密物理への展開

研究課題名(英文) Study of realistic generalized nuclear forces from lattice QCD towards the precise determination of quantities in light hypernuclear systems

研究代表者

根村 英克 (Nemura, Hidekatsu)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究員

研究者番号：80391738

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：大体積かつ物理点に近いクォーク質量での格子 QCD 計算を行い、ラムダ核子、およびシグマ核子系のポテンシャルを、中心力、テンソル力を含む偶パリティ軌道について、その結合チャネルまで含めて、求めることに成功した。その結果、量子数がアイソスピン $I=3/2$ 、スピン三重項、パリティ正、角運動量 $L=1$ であるシグマ核子系の相互作用が斥力的であることを示す位相差を予言した。この結果は、その後行われた J-PARC のハイペロン散乱実験 (E40実験) の最新報告による位相差解析の結果と定性的にきわめて良い一致を示すものとなっている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ハイペロン核子相互作用は中性子星の内部のような高密度核物質の状態方程式を正確に評価するために重要であるが、実験が難しいために、詳細な性質はこれまで分かっていなかった。本研究課題では、格子QCDの数値計算を行い、現在HAL QCD法と呼ばれる方法を用いて、ラムダ核子やシグマ核子の散乱位相差を計算することに成功した。とりわけ従来クォーク模型にもとづいて斥力的な振る舞いが指摘されていたチャネルについて、クォークとグルーオンの動力学に基づいた計算から斥力的振る舞いが現れることを示した。定量的予言として散乱位相差を実験に先駆けて発表しており、その結果は最近行われた実験の結果と極めて良い一致を示している。

研究成果の概要(英文)：Lattice QCD calculations at large volume and almost physical quark masses have been performed to obtain the potentials of the Lambda-Nucleon and Sigma-Nucleon systems for even-parity orbitals. The central and tensor forces have been obtained. The phase shifts of the Sigma-Nucleon system with the quantum numbers of isospin  $I=3/2$ , spin triplet, parity positive, and angular momentum  $L=1$ , calculated from the potentials, shows that the interaction is repulsive. This result is qualitatively in good agreement with the phase shift analysis of the latest report of the Hyperon Scattering Experiment (E40 experiment) at J-PARC.

研究分野：原子核理論

キーワード：格子QCD 少数多体問題 ストレンジネス 理論核物理 計算物理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

陽子及び中性子（核子）の間に働く力（核力）の記述に関しては、二体散乱並びに重陽子の実験データを再現するように現象論的核力を決定し、さらに三体力を考慮することにより、核子数 10-12 個程度までの軽い原子核の基底状態のエネルギーが再現できることが知られている。一方、ラムダなどハイペロンを含む場合の相互作用については、例えばラムダ核子系の散乱長や位相差など、実験データが無い部分については、現象論的なモデルでは、模型ごとに著しく異なっている。ハイパー核の束縛状態における結合エネルギーの実験値をもとに、ハイペロン核子相互作用のより定量的な性質を調べる研究が、これまでに進められているが、核力に匹敵する精度でハイペロン相互作用が決定されているとはまだ言えない状況である。

そのいっぽうで、格子 QCD 計算によるハドロン間相互作用の研究が、近年急速な進展を遂げている。低エネルギーでの  $\pi\pi$  散乱の波動関数を格子 QCD から求め、散乱長を計算する研究が行われたことをきっかけとして、核力ポテンシャルを調べる研究が行われ、ハイペロンを含んだ系への応用も進みつつあり [1, 2]、とりわけこれらの計算は、他の類似の計算に比べても、大型計算機を効率よく利用するためのアルゴリズム上の工夫がなされている [3]。

### 2. 研究の目的

ラムダ核子相互作用並びにシグマ核子相互作用について、中心力、テンソル力およびスピン軌道力の性質を、できるだけ物理点に近いクォーク質量領域でかつ大きな空間体積を持った格子 QCD 計算から調べる。そうして得られたハイペロンポテンシャルを用いて、s-殻ハイパー核に加えて中性子過剰ハイパー核である  ${}^7_{\Lambda}\text{He}$  の精密計算を実行する。s-殻ハイパー核の計算の目的は、ハイペロンポテンシャルがこれらハイパー核の結合エネルギー ( $B_{\Lambda}$ ) の実験値を矛盾無く説明できるかを調べることである。さらに、そのような成果に基づいて中性子過剰ハイパー核の精密計算を実行することにより、通常核（および中性子過剰核）の研究で行われている精度にせまるほどの理論研究をハイパー核でも行えるように進めていくことを目指す。

### 3. 研究の方法

ラムダ核子およびシグマ核子の結合チャンネル相互作用を調べるために、大体積かつ物理点近傍のクォーク質量の格子 QCD 計算を行い、同時刻 Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数の高統計のデータを蓄積する。大規模数値計算では、例えば、以下のような 52 チャンネルの NBS 波動関数が同時に計算される。

$$\langle p\bar{p}\bar{n} \rangle, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} &\langle p\Lambda\bar{p}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p\Lambda\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle p\Lambda\bar{\Sigma}^0p \rangle, \\ &\langle \Sigma^+n\bar{p}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^+n\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle \Sigma^+n\bar{\Sigma}^0p \rangle, \\ &\langle \Sigma^0p\bar{p}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0p\bar{\Sigma}^+n \rangle, \quad \langle \Sigma^0p\bar{\Sigma}^0p \rangle, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} &\langle \Lambda\Lambda\bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Lambda\Lambda\bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \\ &\langle p\bar{\Xi}^- \bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^- \bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^- \bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^- \bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^- \bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle p\bar{\Xi}^- \bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\ &\langle n\bar{\Xi}^0 \bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0 \bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0 \bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0 \bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0 \bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle n\bar{\Xi}^0 \bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\ &\langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^+\bar{\Sigma}^- \bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \\ &\langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0 \bar{\Lambda}\bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0 \bar{p}\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0 \bar{n}\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Sigma}^0 \bar{\Sigma}^0\bar{\Sigma}^0 \rangle, \\ &\quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}p\bar{\Xi}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}n\bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^+\bar{\Sigma}^- \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^0\bar{\Lambda} \rangle, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\langle \Xi^- \bar{\Lambda}\bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Xi^- \bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Xi^- \bar{\Lambda}\bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \\ &\langle \Sigma^- \bar{\Xi}^0\bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^- \bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^- \bar{\Xi}^0\bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\langle \Sigma^0\bar{\Xi}^- \bar{\Xi}^- \bar{\Lambda} \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Xi}^- \bar{\Sigma}^- \bar{\Xi}^0 \rangle, \quad \langle \Sigma^0\bar{\Xi}^- \bar{\Sigma}^0\bar{\Xi}^- \rangle, \\ &\langle \Xi^- \bar{\Xi}^0\bar{\Xi}^- \bar{\Xi}^0 \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

そこから中心力、テンソル力、及びスピン軌道力ポテンシャルを結合チャンネル型の Schrödinger 方程式を逆に解くことによって求める。例えば、偶パリティスピン一重項状態に対しては、

$$V_{\lambda\lambda'}^{(Central)}(r; J=0) = (\theta_{\lambda\lambda'})^{-1} (R^{-1})_{\epsilon'\lambda'} \left( \frac{\nabla^2}{2\mu_{\lambda}} - \frac{\partial}{\partial t} \right) R_{\lambda\epsilon'}. \quad (6)$$

偶パリティスピン三重項状態に対しては、波動関数を  $S$ -波および  $D$ -波に分離し、

$$R(\vec{r}; {}^3S_1) = \mathcal{P}R(\vec{r}; J=1) \equiv \frac{1}{24} \sum_{\mathcal{R} \in \mathcal{O}} \mathcal{R}R(\vec{r}; J=1), \quad (7)$$

$$R(\vec{r}; {}^3D_1) = \mathcal{Q}R(\vec{r}; J=1) \equiv (1 - \mathcal{P})R(\vec{r}; J=1). \quad (8)$$

その上で以下の式に従って中心力およびテンソル力を求める。

$$\begin{Bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{Q} \end{Bmatrix} \times \left\{ V_{\lambda\lambda'}^{(0)}(r) + V_{\lambda\lambda'}^{(\sigma)}(r) + V_{\lambda\lambda'}^{(T)}(r) S_{12} \right\} \theta_{\lambda\lambda'} R_{\lambda'\epsilon}(\vec{r}, t - t_0) = \begin{Bmatrix} \mathcal{P} \\ \mathcal{Q} \end{Bmatrix} \times \left\{ \frac{\nabla^2}{2\mu_\lambda} - \frac{\partial}{\partial t} \right\} R_{\lambda\epsilon}(\vec{r}, t - t_0), \quad (9)$$

得られたポテンシャルを用いて、軽いラムダハイパー核の少数系の精密計算を、確率的変分法を用いて実行する。アンナチュラルパリティ成分も考慮することにより、高精度の解を求め、計算されたラムダ粒子の結合エネルギー ( $B_\Lambda$ ) を実験値と比較する。s-殻ラムダハイパー核の  $B_\Lambda$  が実験値を再現することを踏まえた上で、 ${}^7_\Lambda\text{He}$  の少数多体精密計算に挑戦する。

#### 4. 研究成果

図1に単一バリオン(核子、ラムダ、シグマ、クシー)の有効質量を横軸を格子間隔を単位とする虚時間、縦軸をエネルギー(単位は MeV)としてプロットしたものを示す。格子間隔を単位として  $t - t_0 = 14$  の辺りから基底状態の情報が得られていることがわかる。

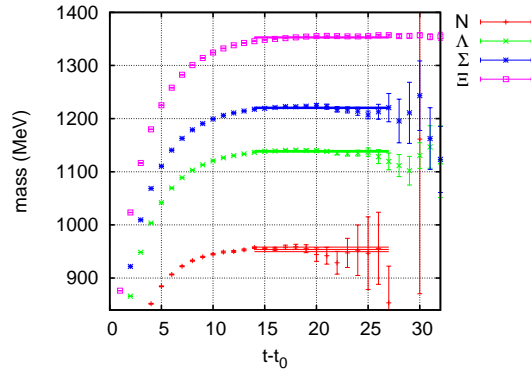


図1 単一バリオンの有効質量を横軸を格子間隔を単位とする虚時間、縦軸をエネルギー(単位は MeV)としてプロットしたもの。

図2にシグマ核子ポテンシャル(アイソスピン  $I = 3/2$  チャンネル)を示す。このうち、図2左側の (i)  ${}^1S_0$  中心力は、核力の  ${}^1S_0$  中心力と定性的に似た振る舞いを示すことが確かめられた。また、図2中央の (ii)  ${}^3S_1 - {}^3D_1$  中心力は、斥力的な振る舞いを示している。クォーク・グルーオンの動力学に基づく格子QCD計算の結果として、このチャンネルが斥力的であることが確かめられたことは大きな成果である。図3に  ${}^1S_0$  状態の位相差を示す。既に述べたように、このチャンネルは定性的に核力を似た振る舞いを示していることがわかる。図4に  ${}^3S_1 - {}^3D_1$  状態の位相差の図を示す。 $\bar{\delta}_0$  の振る舞いは、この系が斥力的であることを示している。この結果は2018年の国際会議で報告されたものである。本研究課題の重要な成果として、クォーク・グルーオンの動力学に基づき、ほぼ物理点に近いクォーク質量のもとで、シグマ核子系(アイソスピン  $I = 3/2$ )のスピン三重項状態が斥力であり、その強さが位相差の形で定量的に示されたことを強調しておく。その後、J-PARCのハドロン実験施設において行われたハイペロン散乱実験(E40実験)が公表した位相差解析の結果[4]は、本研究によるものときわめて良い一致を示すものとなっている。

図5はラムダ核子系のポテンシャルを単一チャンネル用のHAL QCD法によって求めた場合の結果を示している。このポテンシャルはシグマ核子系のエネルギー閾値以下において有効であり、結合チャンネル用のHAL

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

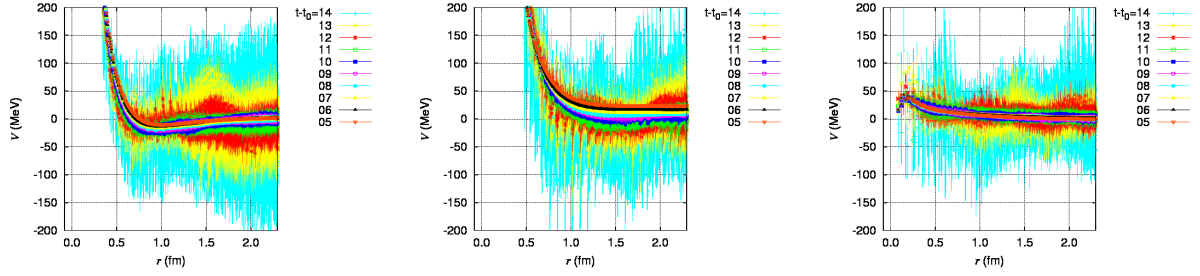


図2  $\Sigma N(I = 3/2)$  に関する 3 つのポテンシャルを示す。(i)  $^1S_0$  中心力 (左), (ii)  $^3S_1 - ^3D_1$  中心力 (中), (iii)  $^3S_1 - ^3D_1$  テンソル力 (右).

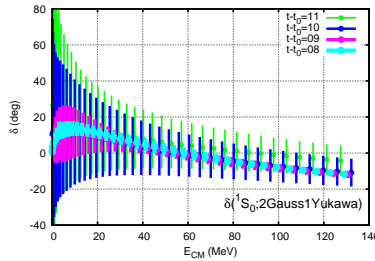


図3 シグマ核子 ( $I = 3/2$ ) 系の  $^1S_0$  状態の位相差。

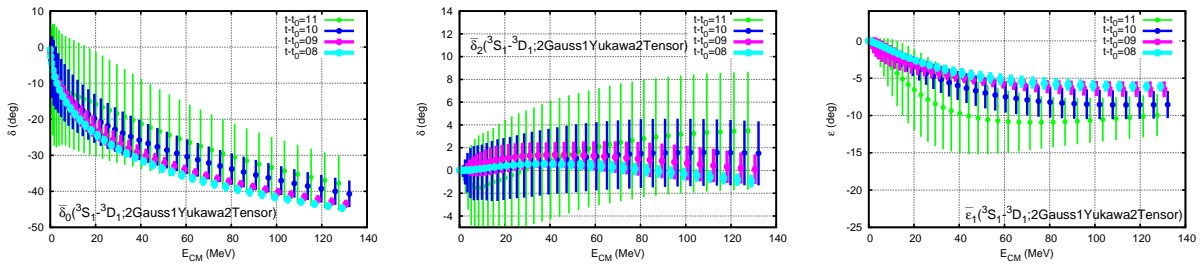


図4 シグマ核子 ( $I = 3/2$ ) 系の  $^3S_1 - ^3D_1$  状態の位相差。

QCD 法によってポテンシャルを求めた場合に比べて統計誤差の良好な結果が得られることが分かった。シグマ核子系は強い斥力芯を持っており、それ自身のポテンシャルも統計誤差が大きく、散乱位相差を求める際に障害となっているが、このシグマ核子系の波動関数を、ラムダ核子系のポテンシャルを求めるための結合チャンネル型 HAL QCD 法の解析手順の中に直接入れてしまうと、大きな統計誤差の影響がラムダ核子系にまで及んでしまうことが示された。図 6 にラムダ核子系の  $^1S_0$  状態の位相差を示す。このチャンネルは束縛状態を持たない程度の引力であることがわかった。図 7 はラムダ核子系の  $^3S_1 - ^3D_1$  状態の位相差である。この状態も束縛状態を持たない程度の引力であることが分かった。これまで、ラムダ核子系の位相差は、散乱実験による直接の位相差解析の結果はまだ無く、軽いハイパー核の結合エネルギーや中間子交換モデルなどによる現象論的解析による理論的予想がなされているのみである。本研究によって得られたラムダ核子系の位相差は、これまでに行われている現象論的な研究から予想されているラムダ核子系の位相差と比べると全体的な引力の弱さが見られている。こういった結果の要因の一つとしては、本研究で行われた格子 QCD 計算で用いられたクォーク質量が現実よりも若干重くなっていることが挙げられる。このことは、パイ中間子および K 中間子質量が  $(m_\pi, m_K) \approx (146, 525)$  MeV と現実の値よりもやや重くなっていることに現れている。より現実に近い

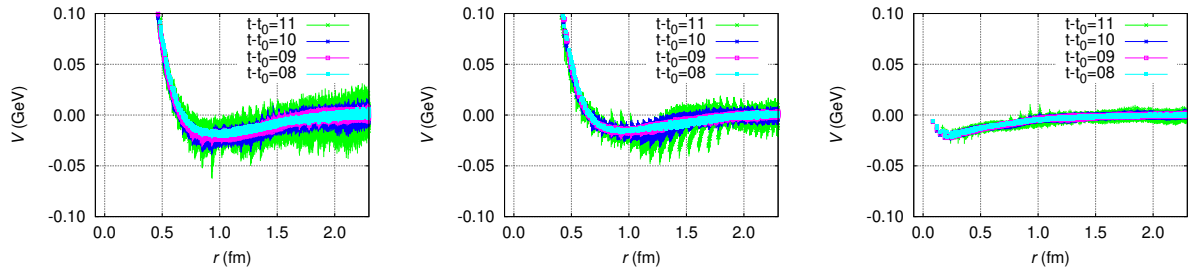


図5 ラムダ核子系の単一チャンネル処方によるポテンシャルを示す。(左)  $^1S_0$  中心力、(中)  $^3S_1 - ^3D_1$  中心力、(右)  $^3S_1 - ^3D_1$  テンソル力。

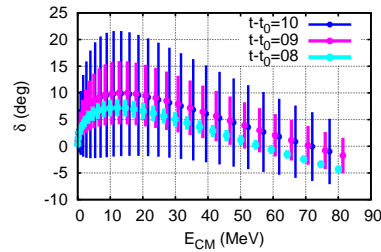


図6 ラムダ核子系の  $^1S_0$  状態の位相差。

クォーク質量を用いた格子 QCD 計算の実行は、今後の課題のひとつである。また、ラムダ核子系の相互作用を研究する上で、スピン依存相互作用の大きさの評価は、最も関心の高い課題のひとつであったが、現在の結果では、統計誤差がまだまだ大きい。そのため、スピンスピン相互作用をさらに詳しく調べるためにも、より高統計の計算が必要である。また、現在の HAL QCD 法もまだ発展途上の方法であり、より定量的な、精密物理への展開を目指すためには、様々な改良、工夫が必要と考えられる。

## 参考文献

- [1] H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Lett. B **673**, 136 (2009).
- [2] H. Nemura [for HAL QCD Collaboration], PoS LATTICE **2011**, 167 (2011).
- [3] H. Nemura, Comput. Phys. Commun. **207**, 91-104 (2016) [doi:10.1016/j.cpc.2016.05.014].
- [4] T. Nanamura *et al.* [J-PARC E40], [arXiv:2203.08393 [nucl-ex]].

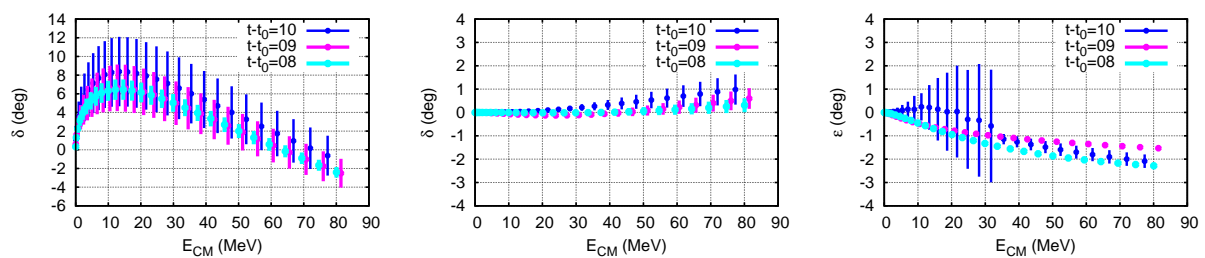


図7 ラムダ核子系の  $^3S_1 - ^3D_1$  状態の位相差を示す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 H. Nemura, for HAL QCD Collaboration	4. 巻 2130
2. 論文標題 Hyperon-nucleon interaction from lattice QCD at ( $m_\pi$ , $m_K$ ) (146, 525) MeV	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conf. Proc.	6. 最初と最後の頁 040005-1--8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5118402	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 H. Nemura (for HAL QCD Collaboration)	4. 巻 1810
2. 論文標題 Hyperon-Nucleon Interaction from Lattice QCD at ( $m_\pi$ , $m_K$ ) (146, 525) MeV	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 arXiv:1810.04046 [hep-lat]	6. 最初と最後の頁 4046
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Iritani Takumi, The HAL QCD collaboration, Aoki Sinya, Doi Takumi, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Ishii Noriyoshi, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji	4. 巻 2019
2. 論文標題 Consistency between Lüscher's finite volume method and HAL QCD method for two-baryon systems in lattice QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP03(2019)007	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Iritani Takumi, Aoki Sinya, Doi Takumi, Gongyo Shinya, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Ishii Noriyoshi, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji, HAL QCD Collaboration	4. 巻 99
2. 論文標題 Systematics of the HAL QCD potential at low energies in lattice QCD	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.99.014514	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 HAL QCD Collaboration, Kawai Daisuke, Aoki Sinya, Doi Takumi, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Iritani Takumi, Ishii Noriyoshi, Miyamoto Takaya, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji	4. 巻 2018
2. 論文標題 l = 2 scattering phase shift from the HAL QCD method with the LapH smearing	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 1-19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/pty032	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Miyamoto Takaya, Aoki Sinya, Doi Takumi, Gongyo Shinya, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Iritani Takumi, Ishii Noriyoshi, Kawai Daisuke, Murano Keiko, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji	4. 巻 971
2. 論文標題 N interaction from lattice QCD and its application to hypernuclei	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Nuclear Physics A	6. 最初と最後の頁 113 ~ 129
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nuclphysa.2018.01.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Gongyo Shinya, Sasaki Kenji, Aoki Sinya, Doi Takumi, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Iritani Takumi, Ishii Noriyoshi, Miyamoto Takaya, Nemura Hidekatsu, HAL QCD Collaboration	4. 巻 120
2. 論文標題 Most Strange Dibaryon from Lattice QCD	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.120.212001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto, K. Sasaki,	4. 巻 175
2. 論文標題 Baryon interactions from lattice QCD with physical masses --- strangeness $S=-1$ sector ---	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 EPJ Web Conf.	6. 最初と最後の頁 5030
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/epjconf/201817505030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Iritani Takumi, Aoki Sinya, Doi Takumi, Hatsuda Tetsuo, Ikeda Yoichi, Inoue Takashi, Ishii Noriyoshi, Nemura Hidekatsu, Sasaki Kenji, HAL QCD Collaboration	4. 巻 96
2. 論文標題 Are two nucleons bound in lattice QCD for heavy quark masses? Consistency check with Lüscher's finite volume formula	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34521
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.96.034521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Nemura	4. 巻 207
2. 論文標題 Instructive discussion of an effective block algorithm for baryon-baryon correlators	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Comput. Phys. Commun.	6. 最初と最後の頁 91-104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cpc.2016.05.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 T.Iritani, T. Doi, S. Aoki, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki, (HAL QCD Collaboration),	4. 巻 1610
2. 論文標題 Mirage in temporal correlation functions for baryon-baryon interactions in lattice QCD	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 JHEP	6. 最初と最後の頁 101 - 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP10(2016)101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto, K. Murano, K. Sasaki	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A Fast Algorithm for Lattice Hyperonic Potentials	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 JPS Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto, K. Murano, K. Sasaki	4. 巻 LATTICE 2016
2. 論文標題 Lambda-Nucleon and Sigma-Nucleon interactions from lattice QCD with physical masses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 101 - 101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 T. Doi, S. Aoki, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki	4. 巻 LATTICE 2016
2. 論文標題 Baryon interactions from lattice QCD with physical masses -- Overview and S = 0, -4 sectors --	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 110 - 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, T. Miyamoto, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki	4. 巻 LATTICE 2016
2. 論文標題 Baryon interactions from lattice QCD with physical masses ---S=-3 sector: and - - --	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 PoS	6. 最初と最後の頁 127 - 127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 格子QCDによる一般化核力研究のための高速アルゴリズムの活用
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会(オンライン開催)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 格子QCDによる一般化核力研究と $N_c$ , $N_f$ ポテンシャル
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会(オンライン開催)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 格子QCDによる一般化核力研究のための高速アルゴリズムの応用
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会(現地開催中止)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Nemura (for HAL QCD Collaboration)
2. 発表標題 `Hyperon-Nucleon Interaction from Lattice QCD at $(m_\pi, m_K) = (146, 525)$ MeV`
3. 学会等名 The 13th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Nemura, (for HAL QCD Collaboration)
2. 発表標題 `Hyperon forces from lattice quantum chromodynamics at almost physical masses`
3. 学会等名 YITP long-term workshop: New Frontiers in QCD 2018 --- Confinement, Phase Transition, Hadrons, and Hadron Interactions --- (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 「物理点格子QCDによるストレンジネスS=-1セクタのバリオン間力」
3. 学会等名 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 「ストレンジネスS=-1系の格子QCD計算に基づく研究」
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会(2019年)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Nemura, for HAL QCD Collaboration,
2. 発表標題 "Baryon interactions from lattice QCD with physical masses --- strangeness S = -1 sector ---,"
3. 学会等名 The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Nemura, for HAL QCD Collaboration,
2. 発表標題 "Sigma-N and Lambda-N interactions from 2+1 lattice QCD,"
3. 学会等名 International Workshop on Hadron and Nuclear Physics 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根村英克, for HAL QCD Collaboration
2. 発表標題 「HAL 法を用いた物理点格子 QCD 計算による $N$ および $N$ 相互作用と軽いハイパー核の研究」
3. 学会等名 日本物理学会 2017 年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 根村英克, for HAL QCD Collaboration
2. 発表標題 「物理点格子 QCD 計算に基づくストレンジネス $S = -1$ 系の研究」,
3. 学会等名 日本物理学会 第 73 回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根村英克, (for HAL QCD Collaboration)
2. 発表標題 「 $-N$ and $-N$ interactions from 2+1 lattice QCD with almost realistic masses」
3. 学会等名 新学術領域「中性子星核物質」主催第 6 回「中性子星核物質」研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 H. Nemura
2. 発表標題 Hyperon-nucleon interaction from lattice QCD and hypernuclear few-body problem
3. 学会等名 INT Program INT-16-1 Nuclear Physics from Lattice QCD (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Nemura
2. 発表標題 Lambda-Nucleon and Sigma-Nucleon interactions from lattice QCD with physical masses
3. 学会等名 The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Nemura
2. 発表標題 N and $\Lambda$ interactions from 2+1 lattice QCD with almost realistic masses
3. 学会等名 The International Symposium on Neutron Star Matter (NSMAT2016) --- Recent Progress in Observations, Experiments and Theories --- (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 HAL QCD法によるハイペロンポテンシャルとハイパー核の少数多体系計算の研究
3. 学会等名 日本物理学会 2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 根村英克
2. 発表標題 HAL QCD法で探る $\Lambda$ , $\Sigma$ 相互作用の性質と軽いハイパー核への展開
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------