

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400244

研究課題名(和文) 格子QCDによる核力・ハイペロン力((反)対称LS力と負パリティ相互作用)の研究

研究課題名(英文) Nuclear force and hyperon forces from Lattice QCD((anti-)symmetric LS force and odd parity interactions)

研究代表者

石井 理修 (Ishii, Noriyoshi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：40360490

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：momentum wall sourceを用いた負パリティセクタの核力及びLS力の格子QCDによる計算法をハイペロン力に拡張して、flavor SU(3)極限でflavor singlet sectorを除く他のチャンネルで、負パリティハイペロン力(対称・反対称LS力を含む)を求めた。特に、Lambda Nセクタにおいて実験的に期待されている対称LS力と反対称LS力の相殺については、Lambda N-Sigma N結合が重要な働きをする事が確認された。この他に、解析的に取り扱える模型を使って、HAL QCD法の定式化に関するいくつかの研究を行った。

研究成果の概要(英文)：We have extended the calculation of the nuclear force in the negative parity sector with the momentum wall source to obtain the hyperon-nucleon and hyperon-hyperon potentials. By considering the idealized flavor SU(3) limit, we have obtained the lattice QCD results of hyperon potentials in the negative parity sector which include the symmetric LS and the anti-symmetric LS potentials. We found that Lambda N-Sigma N coupling plays an important role in understanding the cancellation between the symmetric and the anti-symmetric LS potentials in the Lambda N sector which is phenomenologically expected from the high precision spectroscopy of hyper nuclei. Besides, we have performed several studies concerning the theoretical formulation of HAL QCD method by using an almost analytically treatable model, i.e., the Birse model.

研究分野：原子核物理理論

キーワード：核力 格子QCD 核子 ハイペロン ハドロン

1. 研究開始当初の背景

2006年に我々は格子QCDで核力ポテンシャルを求める我々独自の方法 (HAL QCD法) を提案した。この方法は、それまで定番だった方法 (質量が無限大のスタティック・クォークを用いて計算する方法) と違い、格子QCDで生成した Nambu-Bethe-Salpeter (NBS) 波動関数を二核子の量子力学的波動関数と見なして、シュレディンガー方程式を逆解きして核力ポテンシャルを求める新しい方法である。

この方法の最大の魅力は、散乱位相差に忠実なポテンシャルを散乱実験のデータ無しに決定できる点である。このため、ハイペロン力ポテンシャル等、直接の散乱実験が困難な系に対しても有効となる。我々はこの方法に対して様々な拡張を重ね (中心力からテンソル力への拡張、ハイペロンポテンシャルへの拡張、結合チャンネルポテンシャルへの拡張、3体力への拡張、ground state saturationを経由せず、高精度にポテンシャルを計算する方法への拡張等)、ハイペロンポテンシャルやエキゾチックハドロンを始めとする様々な系に適用してきた。

HAL QCD法は、主として wall source (一個一個の quark を空間平面に一樣に平らに並べたような 6 quark 状態を作る operator) を採用した正パリティ・セクタの中心力とテンソル力の計算に限られてきた。しかしながら、核子やハイペロン多体系を考えるためには、正パリティ・セクタと同様に負パリティ・セクタの核力やハイペロン力も必要となる。特に、負パリティ・セクタのスピンの軌道力 (LS 力) は、殻模型で原子核の魔法数を議論する際、必須の役割を果たす平均場のスピン・軌道成分と深い関連性を持つ重要な核力成分であるため、石井と村野はこの科研費の期間以前から核力の格子 QCD 計算を負パリティ・セクタや LS 力の計算への拡張を進めてきた。その結果がこの科研費の期間中に出版された物が雑誌論文③である。

一方、K computer 等の高性能なスーパーコンピュータの登場により、物理的クォーク質量を直接採用し、二個の核子を充分に収容できるような巨大な空間体積を採用した格子 QCD 計算が可能となってきた。そして、このような物理点ゲージ配位を直接利用した核力・ハイペロン力の直接計算を始める段階にあった。

2. 研究の目的

負パリティ・セクタの核力やスピン軌道力の計算を進展させ、負パリティ・セクタのハイペロン力、特に対称・反対称スピン軌道力を格子 QCD を用いて研究する事が目的である。以下、少し詳しく説明する。

ハイペロンはその寿命の短さから、直接散乱実験に用いる事が難しいため、核力と同じような方法で現象論的にハイペロン力を決定する場合、結果として得られる現象論的ハ

イペロン力ポテンシャルは、大きな不定性が避けられない。しかしながら、ハイペロン力の決定は、現象論的に非常に重要である。ハイペロンを含んだ原子核であるハイパー核の構造を議論する際に必須であるだけでなく、中性子星の内部のような高密度状態を議論する際にも必要不可欠で重要な情報を与える。実際、J-PARC においてハイペロン力の実験的決定は原子核物理の最重要課題の一つになっている。一方で、格子 QCD に基づいた HAL QCD の方法は、ハイペロン力ポテンシャルにも適用可能であるばかりか、むしろストレンジクォークが入ったハイペロン力の方が、計算が安定して統計誤差が小さくなるので実は扱いやすい。

負パリティ・セクタのハイペロン力ポテンシャルを計算する事によって、今回特に注目したい点は、ハイパー核の励起スペクトルから現象論的に期待されている対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺という現象である。通常の原子核においては、殻模型で平均場中の一粒子軌道のスピン・軌道分離は非常に大きいことが知られており、このため、真空中の核力中の LS 力 (負パリティ・セクタ) は強いと信じられている。一方、ハイパー核における Λ のスピン・軌道分離は (通常の原子核の場合と違って) 微小である。この違いの有力な説明の一つに、対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺がある。 Λ の LS 力は、対称 LS 力と反対称 LS 力の和であるため、この2つの相殺が起こって小さくなってしまっている可能性が指摘されている。有効模型を用いた研究では結果が割れており、クォーク模型はこの相殺は強い事を指示する一方で、中間子交換模型ではこの相殺は弱い事が示唆されている。ここでは、格子 QCD 第一原理計算によって、対称・反対称 LS 力の相殺について議論を進める事が目的である。

3. 研究の方法

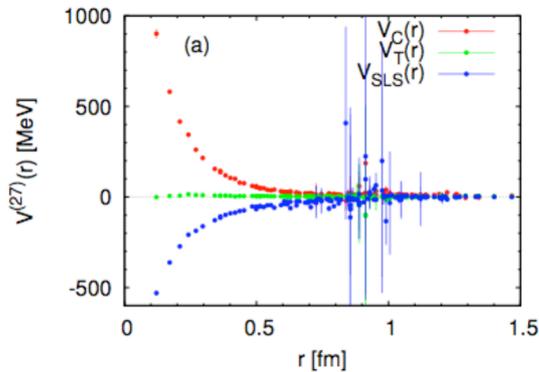
u, d, s の三つのクォークの質量が等しい極限であるフレーバーSU(3)極限のゲージ配位を用いて、スーパーコンピュータ上で4点関数で生成する。今回用いたゲージ配位は、ILDG/JLDG から公開されているCP-PACS/JLQCD生成の $16^3 \times 32$ 格子上のゲージ配位で、基本パラメータは格子間隔 $a=0.121(2)$ fm ($a^{-1} = 1630.58$ MeV)、 $L=16a=1.9$ fm, PS meson 質量は $m(\text{PS})=1013(1)$ MeV, octet baryon の質量は $m(\text{B})=2051(3)$ MeV である。4点関数の生成には、フレーバーSU(3)へ拡張した momentum wall source を用いる。この momentum wall source は、直感的には、重心系において座標軸に平行に飛ぶ2つのバリオンが正面衝突する状況に対応する状態を生成する operator である。生成されたバリオン4点関数は、workstation 上で様々な処理を加えて、負パリティセクタのハイペロン力ポテンシャルを求める。まず、フレーバーSU(3)と点

群の既約表現論の理論を使って、フレーバー SU(3)の既約表現 27, 10, 10*, 8 への分離と、 $J^P=0^-, 1^-, 2^-$ の抽出を行い、時間依存型 HAL QCD 法を用いて、負パリティ・ハイペロン力ポテンシャルをフレーバー SU(3)の既約表現毎に求める。フレーバー SU(3)の既約表現 27, 10*, 8 のポテンシャルの線形結合を取って、 $\Lambda N-\Sigma N$ の結合チャンネルポテンシャルを生成する。さらに、この結合チャンネルポテンシャルから、量子力学レベルで HAL QCD 法を使って、 ΣN チャンネルを消去する事によって、有効 ΛN ポテンシャルを生成し、対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺について議論する。

4. 研究成果

ILDG/JLDG を通して公開されている CP-PACS/JLQCD 生成の 163x32 格子上的フレーバー SU(3) 極限のゲージ配位を用いて、バリオン (核子、ハイペロン) の 4 点関数をスーパーコンピュータ上で作る。フレーバー既約表現 27, 10, 10*, 8 への分離と、点群の既約表現論を用いて、 $J^P=0^-, 1^-, 2^-$ の分離を行い、時間依存型 HAL QCD 法を用いて、負パリティ・セクタのハイペロン力ポテンシャルをフレーバー既約表現ごとに作った。

① フレーバー 27 表現のポテンシャル



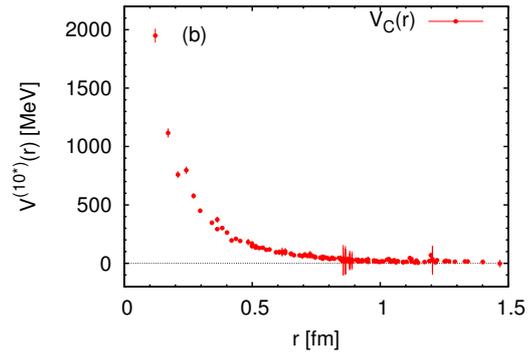
$$V^{(27)}$$

$$= V_C^{(27)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)} + V_T^{(27)}(r)S_{12} + V_{SLS}^{(27)}(r)\vec{L} \cdot \vec{S}_+$$

フレーバー 27 表現の負パリティセクタは、スピン三重項のみからなる。微分展開の NLO まででポテンシャルは、中心力、テンソル力、(対称)LS 力からなる。

このチャンネルは、NN と同じチャンネルである。従って、中心力は近距離に斥力芯を持ち、テンソル力は正で弱く、LS 力は負で強いという結果が得られた。

② フレーバー 10* 表現のポテンシャル

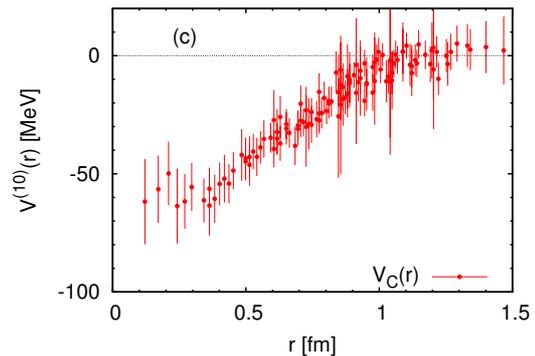


フレーバー 10* 表現は負パリティでスピン一重項のみからなる。微分展開の NLO までのポテンシャルは、中心力だけを含む。

$$V^{(10^*)} = V_C^{(10^*)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)}$$

このチャンネルも基本的に NN と同じチャンネルであり、近距離に斥力芯が見られている。

③ フレーバー 10 表現のポテンシャル

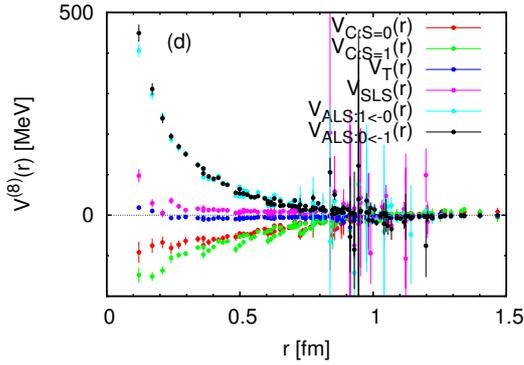


フレーバー 10 表現も負パリティセクタはスピン一重項のみからなる。微分展開の NLO までのポテンシャルは、中心力だけを含む。

$$V^{(10)} = V_C^{(10)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)}$$

このチャンネルは NN と全く関係ない。N Σ (I=3/2) のチャンネルである。クォーク模型の結果と同じく近距離に斥力芯はない。

④フレーバー 8 表現のポテンシャル



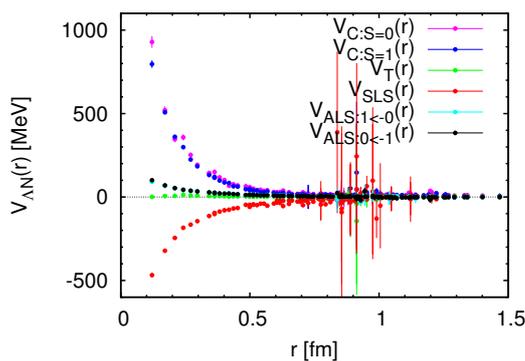
フレーバー8 表現の負パリティセクタは、スピン三重項と三重項の結合チャンネルであり、これらは反対称 LS 力によって結ばれている。微分展開の NLO は、2つの中心力、テンソル力、対称 LS 力 ($V_{LS}^{(8)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_+$)、反対称 LS 力 ($V_{ALS}^{(8)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_-$) からなる。

$$V^{(8)} = V_{C,S=0}^{(8)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)} + V_{C,S=1}^{(8)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)} + V_T^{(8)}(r)S_{12} + V_{LS}^{(8)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_+ + V_{ALS}^{(8)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_-$$

2つの中心力は、どちらも近距離で斥力芯を持っていない。これはクォーク模型による議論と一致する。テンソル力と対称 LS 力は弱い。反対称 LS 力は正で強い。

⑤負パリティセクタの ΛN ポテンシャル

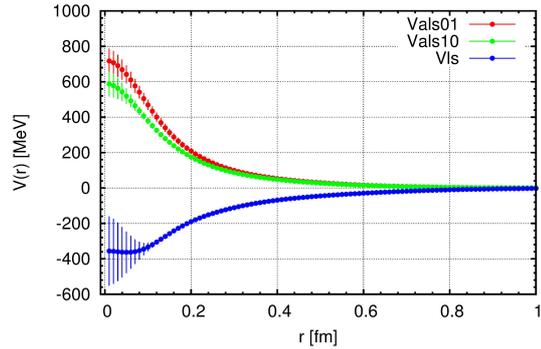
フレーバーSU(3)極限で ΛN - ΣN ($I=1/2$) の結合チャンネルポテンシャルは、フレーバー表現の 27, 10^* , 8 のポテンシャルの線形結合になる。 ΛN - ΛN 成分だけ図示すると次のようになる。



対称 LS 力はその 90% がフレーバー 27 表現からくるため、NN とほぼ同じく非常に強いのは自然である。これに対して、反対称 LS 力はフレーバー 8 表現の物にクレブシュゴルドン因子 $1/(2\sqrt{5})$ がかかるため、非常に弱くなる。このため、 ΛN - ΣN 結合チャンネルポテンシャルの段階では、対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺は起こっていない。

次に ΛN - ΣN の結合チャンネルのシュレディンガー方程式から、 ΣN チャンネルを消去

して出来る有効 ΛN ポテンシャルを作る。これには、量子力学レベルでの HAL QCD 法を用いる。結果として、反対称 LS 力が強くなる。



これから、対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺には、 ΣN チャンネルの結合が重要な役割を果たしている事が分かる。

この他に学生との共同研究として、ほとんど解析的に扱える非相対論的な結合チャンネル模型 (Birse 模型) を用いて、HAL QCD の方法の定式化に関するいくつかの研究を行った。(i) 微分展開の収束性の実証: (ii) HAL QCD 法で求まる有効ポテンシャルで定義される量子力学系で保存カレントの行列要素を計算する方法を外場の方法を用いて定式化した。(iii) オリジナルの HAL QCD 法と時間依存型 HAL QCD 法の双方で決定したポテンシャルが等価である事を議論した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ① K.Watanabe, N.Ishii, “Current matrix element in HAL QCD’s wavefunction-equivalent potential method”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 査読有、PTEP2018, 043D01, (2018). DOI:10.1093/ptep/pty027
- ② T.Sugiura, N.Ishii, M.Oka, “Derivative Expansion of Wave Function Equivalent Potentials”, 査読有, Physical Review D95 (2017) 074514. DOI: 10.1103/PhysRevD.95.074514.
- ③ K.Murano, N.Ishii, S.Aoki, T.Doi, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, H.Nemura, K.Sasaki (HAL QCD Collaboration), “Spin-orbit force from lattice QCD”, 査読有, Physics Letters B735 (2014) 85.: DOI: 10.1016/j.physletb.2014.05.061.
- ④ T.Sugiura, Y.Ikeda, N.Ishii, “Charonium-nucleon interactions from the time-dependent HAL QCD method”, 査読有, EPJ Web Conf.

- 175(2018) 05011, DOI: 10.1051/epjconf/201817505011.
- ⑤ K.Watanabe, N.Ishii, “The current matrix elements from HAL QCD method”, 査読有, EPJ Web Conf. 175(2018)06008, DOI: 10.1051/epjconf/201817506008.
- ⑥ N.Ishii, S.Aoki, T.Doi, S.Gongyo, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, T.Iritani, T.Miyamoto, H.Nemura, K.Sasaki, “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses---S=-3 sector: $\Xi \Sigma$ and $\Xi \Lambda - \Xi \Sigma$ ---“, 査読有, EPJ Web Conf. 175(2018)05013, DOI: 10.1051/epjconf/201817505013.
- ⑦ T.Sugiura, K.Murano, N.Ishii, M.Oka, “Properties of non-local wave function equivalent potential with generalized derivative expansion”, 査読有, PoS LATTICE2016(2016)122, DOI: 10.22323/1.256.0122
- ⑧ N.Ishii, S.Aoki, T.Doi, S.Gongyo, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, T.Iritani, T.Miyamoto, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki, “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses ---S=-3 sector: $\Xi \Sigma$ and $\Xi \Lambda - \Xi \Sigma$ ---“, 査読有, PoS LATTICE2016 (2017)127, DOI: 10.22323/1.256.0127.
- ⑨ N.Ishii, S.Aoki, T.Doi, S.Gongyo, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, T.Iritani, T.Miyamoto, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki, “First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (2) ---S=-3 and S=-4 sectors: ($\Xi \Xi$, $\Xi \Sigma$, $\Xi \Lambda - \Xi \Sigma$ channels)---“, 査読有, PoS LATTICE 2015 (2016) 087, DOI: 10.22323/1.251.0087.
- ⑩ N.Ishii, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, “The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from lattice QCD”, 査読有, PoS LATTICE 2013 (2014) 234, DOI: 10.22323/1.187.0234.
- ⑪ K.Murano for HAL QCD Collaboration, “Quark mass dependence of Spin-Orbit force in parity odd NN system from 2+1 flavor QCD”, 査読有, PoS LATTICE 2013 (2014) 235. DOI: 10.22323/1.187.0235
- field theory (Lattice 2017), June 18-24, 2017, Granada, Spain
- ② T.Sugiura, Y.Ikeda, N.Ishii, “Charmonium-nucleon interactions from the time-dependent HAL QCD method”, 35th International symposium on lattice field theory (Lattice 2017), June 18-24, 2017, Granada, Spain
- ③ K.Watanabe, N.Ishii, “Current matrix element in HAL QCD method”, 35th International symposium on lattice field theory (Lattice 2017), June 18-24, 2017, Granada, Spain
- ④ N.Ishii and K.Watanabe and HAL QCD Collaboration, “Current matrix elements in HAL QCD method of lattice hadron potentials”, 2016 JAEA/ASRC Reimei Workshop: New exotic hadron matter at J-PARC, October 24-26, 2016, Inha University, Korea
- ⑤ N.Ishii for HAL QCD Collaboration, “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses---S=-3 sector: $\Xi \Sigma$ & $\Xi \Lambda - \Xi \Sigma$ ---“, 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016), July 24-30, 2016, University of Southampton, UK.
- ⑥ T.Sugiura, N.Ishii, M.Oka, “Properties of non-local wave function equivalent potential with generalized derivative expansion”, 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016), July 24-30, 2016, University of Southampton, UK.
- ⑦ N.Ishii, “QCD to Nuclear Physics via Nambu-Bethe-Salpeter amplitudes”, Osaka CTSR-Kavli IPMU-RIKEN iTHES International workshop, Nambu and Science Frontier, November 17, 2015, Osaka university, Japan
- ⑧ N.Ishii for HAL QCD Collaboration, “Lattice QCD studies of baryon-baryon interactions: the potential method and the direct method”, Symposium on {Quarks to Universe in Computational Science (QUCS2015)”, November 4-8, 2015, Nara Kasugano International Forum, Nara, Japan
- ⑨ N.Ishii for HAL QCD Collaboration, “Lattice determination of baryon-baryon potentials”, The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), September 7-12, 2015, Tohoku University, Japan.
- ⑩ N.Ishii for HAL QCD Collaboration,

[学会発表] (計 27 件)

- ① N.Ishii for HAL QCD Collaboration, “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses---S=-3 sector: $\Xi \Sigma$ & $\Xi \Lambda - \Xi \Sigma$ ---“, 35th International symposium on lattice

- “First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (2) $S=3$ and $S=4$ sectors ($\Xi\Xi$, $\Xi\Sigma$, $\Xi\Lambda - \Xi\Sigma$ channels)”, July 14-18, 2015, Kobe, Japan
- ⑪ N. Ishii, “Baron-baryon interactions from lattice QCD”, Hirscheegg 2015---Nuclear Structure and Reactions: Weak, Strange and Exotic, January 11-17, 2015, Hirscheegg, Austria.
- ⑫ N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki, T. Inoue for HAL QC Collaboration, “Symmetric and anti-symmetric LS hyperon potentials from lattice QCD”, 4th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and Physical Society of Japan, October 7-12, 2014, Waikoloa, Hawaii, USA
- ⑬ N. Ishii, “Baryon-baryon interaction from lattice QCD”, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, July 13-15, 2014, Tsukuba, Japan.
- ⑭ N. Ishii, “Hadron Physics and related topics at HPCI”, Hadron Physics symposium, April 17-19, 2014, Nagoya University, Japan
- ⑮ N. Ishii, “Baryon-baryon interaction from Lattice QCD”, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, November 6-8, 2013, Regensburg, Germany
- ⑯ N. Ishii, “Lattice QCD approach to Nuclear Physics”, 13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2013), September 30-October 4, 2013, Rome, Italy
- ⑰ N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, “The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from Lattice QCD”, 31st International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2013), July 29-August 3, 2013, Mainz, Germany
- ⑱ 石井理修 for HAL QCD Collaboration, “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [5]--- $S=3$ セクタ---”, 日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年 9 月 12 日、宇都宮大学
- ⑲ 石井理修 for HAL QCD Collaboration, “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [4]--- $S=3$ セクタ---”, 日本物理学会第 7 2 回年次大会、2017 年 3 月 18 日、大阪大学
- ⑳ 石井理修 for HAL QCD Collaboration,

- “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [3]--- $S=3$ セクタ---”, 日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 22 日、宮崎大学
- 21 石井理修 for HAL QCD Collaboration, “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [2]--- $S=4$ セクタと $S=3$ セクタ---”, 日本物理学会第 7 1 回年次大会、2016 年 3 月 19 日、東北学院大学
- 22 石井理修 for HAL QCD Collaboration, “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用--- $S=3$ セクタと $S=4$ セクタ---”, 日本物理学会 2015 年秋季大会、2015 年 9 月 25 日、関西大学
- 23 石井理修、村野啓子、根村英克、佐々木健志、井上貴史 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による反対称 LS 力”, 「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会 2014 年 9 月 26 日、熱川ハイツ
- 24 石井理修、村野啓子、根村英克、佐々木健志、井上貴史 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による反対称 LS 力(II)”, 日本物理学会第 6 9 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学
- 25 平沼孝一朗、石井理修、岡真、”波動関数等価ポテンシャルの微分展開”、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 21 日、高知大学
- 26 石井理修、”時間相関と空間相関”、日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 21 日、高知大学
- 27 石井理修、村野啓子、根村英克、佐々木健志 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD による反対称 LS 力”, 日本物理学会 2013 年秋季大会、2013 年 9 月 21 日、高知大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 理修 (ISHII, Noriyoshi)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：40360490

(2) 研究分担者

村野 啓子 (MURANO, Keiko)

大阪大学・核物理研究センター・協同研究

員

研究者番号：10610412

(3) 連携研究者

()

研究者番号：