

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007 年度～2009 年度
 課題番号：19540261
 研究課題名（和文）格子 QCD による核力の研究

研究課題名（英文）Nuclear Force from Lattice QCD

研究代表者

石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)

東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員

研究者番号：40360490

研究成果の概要（和文）：格子 QCD による核力・ハイペロン力の研究を進めた。

研究成果の概要（英文）：Nuclear force and hyperon force are studied by using lattice QCD.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	900,000	270,000	1,170,000
2008 年度	600,000	180,000	780,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：核力、格子 QCD、ハイペロン相互作用

1. 研究開始当初の背景

核力は原子核を理解する上での出発点となる重要な概念である。核力はまた、高密度性や超新星爆発の物理と密接に関連している。特に中性子星の上限質量は、斥力芯の構造の解明によって多大の影響を受ける。75 年前湯川秀樹は核力の到達距離が有限であることを説明するため、有限質量の新粒子 π を導入し、核力は π の交換により生じるという提案をした。それ以来核力は多大の進化を重ね、最近では 4000 個以上の NN 散乱実験データを数十個のフィットパラメータを用い $\chi^2/\text{dof} \sim 1$ で再現する現実的核力がいくつかのグループにより提出されるまでに至っている。理論的には、核力は空間的三つの領域に分割されて理解される。(i)2fm 以上の長

距離は、最も軽い粒子である π 交換で理解される。(ii) 1fm～2fm の中間距離の領域では、重たい中間子 (ω , ρ , σ) 交換や複数個の π 交換が効き始める。ここまでは中間子論の立場から理解可能なのだが、(iii)1 fm 以下の近距離の領域の理解は難しくあまり進んでいない。様々な有効理論に基づく研究がなされているが、この領域に存在し現象論的に重要な役割を果たす斥力芯の物理的起源に関しても未だ決着がついてない状況である。これは核子同士が重なり合うような非常に近い距離となるため、斥力芯の構造は quark や gluon の言葉による核子の構造と密接な関連を持つと考えられており、この意味で QCD に基づく核力の研究は長い間切望されてきた。事実、過去に何度か格子 QCD を用いて、

核力を記述しようという試みがなされた事がある。いずれもスタティック・クォーク・ポテンシャルを計算する方法を拡張した方法が用いられていたが、残念ながらおおよばな形すら再現できていない状況であった。

我々は全く新しい方法により、格子 QCD で核力を計算することに成功した。この方法は CP-PACS Coll. が $\pi\pi$ の散乱位相差の研究のために提案した Bethe-Salpeter (BS) 波動関数を利用する方法を拡張したものである。格子 QCD で生成した BS 波動関数を再現するように Schrodinger 方程式を逆解きして核力を求める方法である。結果として得られたポテンシャルは、近距離の斥力芯と中間距離の引力を同時に備えており、非常に有望な方法であることが分かる。この科学研究費補助金を通る直前に submit し、2007 年に出版された論文 N.Ishii et al., Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 022001. は、英国科学誌 Nature において 2007 年のハイライト研究の一つに選ばれた。格子 QCD によって核力を研究することへの期待と重要性を示す証拠である。

核力にもまして重要なのが、ハイペロン間の力であるハイペロン力(YN & YY)である。ハイペロン力はハイパー核構造の理論的研究の出発点となるほか、中性子星中でのハイペロン物質生成の議論に必須である。しかしながら、寿命の短さのため、ハイペロンビームを直接生成する加速器施設が存在せず、ハイペロン散乱に関する実験事実は非常に限られたものしか存在していない。結果としてハイペロン力には非常に多くの不定性が残されていた。この状況を打開すべく、2008 年に稼働する大強度陽子加速器 J-PARC においてハイペロン力構築は、原子核物理の最重要テーマと位置づけられていた。

2. 研究の目的

このような背景を踏まえ、本研究課題の目的を次のようにする。格子 QCD によって核力を計算する我々が提案した方法を本格的に定式化する。クォーク質量依存性を探り斥力芯の起源に関し理解を深める。ハイペロン力(YN & YY)を理論的に格子 QCD を用いて生成する。中心力の計算を拡張して、テンソル力や L S 力を求める方法を確立する。フル QCD の適用を視野に入れ、より軽いクォーク質量領域の計算に拡張する。

3. 研究の方法

格子 QCD を用いて、two baryon の BS 波動関数を求め、それが Schrodinger 方程式を満たすことを要請して、baryon 間ポテンシャルを求める。BS 波動関数を生成する際に用いるゲージ配位は、それまで採用していたクエンチ近似を採用したものに加えて、International Lattice Data Grid (ILDG) 等を通して手に入れられるフル QCD ゲージ配位も視野に入れる。BS 波動関数を生成している

アルゴリズムを FFT を使って効率化する。FFT を使うことによって、それまでは空間体積 V の二乗に比例する量の計算を行う必要があったが、FFT を用いることにより、これを $V \log(V)$ の計算量に還元できる。これを利用することにより、大きな空間体積でも空間全点で BS 波動関数を効率よく生成することができる。この効率化されたコードを用い、核力・ハイペロン力を格子 QCD で研究していく。

4. 研究成果

我々の方法を格子 QCD によって NN 散乱実験に忠実な現実的核力を理論的に構成する方法として定式化した。これは次のようにして可能になる。BS 波動関数を考える。

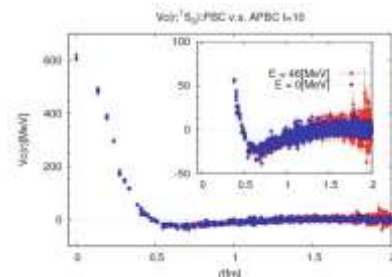
$$\psi_{NN}(\vec{x}) \equiv \langle 0 | N(\vec{x})N(0) | N(\vec{k})N(-\vec{k}), in \rangle$$

この物理量は reduction formula を通して、NN \rightarrow NN の T 行列と関係しているため、長距離極限が次のようにかけることが証明できる。

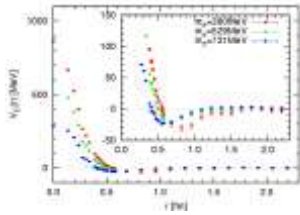
$$\psi_{NN}(\vec{x}) \sim A \sin(kr + \delta(k^2)) / (kr) + \dots$$

ここで $\delta(k^2)$ は散乱位相差であり、Luscher の方法では有限体積上で離散化されたエネルギースペクトルの情報から間接的に計算される。この行列要素は QCD の BS 波動関数なのであるが、非相対論的量子力学の散乱状態と全く同じ形をしている。この事実は QCD が予言する散乱位相差に忠実なポテンシャルを理論的に構成することを可能にする。それには、すべてのエネルギーで QCD により生成された BS 波動関数を、Schrodinger 方程式が同時に生成することを要求してポテンシャルを逆構成するのである。このようにして得られたポテンシャルは、すべてのエネルギーで同時に散乱位相差 $\delta(k^2)$ を再現する現実的核力であることが容易に理解される。我々はこのように定式化した。

このようなポテンシャルは一般に非局所的になる。また無限個の BS 波動関数を必要とし、格子 QCD Monte Carlo 計算での直接実行は困難である。これを打開するため、非局所ポテンシャルに微分展開を採用する。微分展開により有限個の BS 波動関数から、核力を微分展開の各次数において逐次的に構成することが可能になる。この場合、微分展開の収束性を確かめることが重要になる。微分展開の収束性は、違ったエネルギーで核力ポテンシャルを生成して、その違いを比べることによって調べられる。やってみた結果、目立った違いが存在せず、実際に微分展開が機能していることが明らかとなった。(下図)

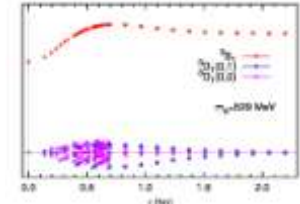


斥力芯の存在起源解明のためクォーク質量を変えてポテンシャルを生成した。(下図)

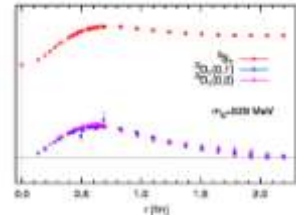


クォーク質量を軽くするにつれ、斥力芯の強さは増大する。constituent quark 模型では斥力芯の存在理由は、パウリ排他律と color magnetic interaction で理解されている。 α α 散乱を例にとって考えると、 α 粒子では一番下の s 軌道に核子が完全に詰まっているため、二つの α を非常に近づけた時、パウリ排他律のため核子が同じ軌道に在ることができず、結果として斥力の芯が生じている。quark model での NN 系の場合は、 α の場合に比べて、color の自由度が増えているため、パウリ排他律だけで斥力芯を説明することはできない。パウリ排他律の効果に加えてさらに color magnetic interaction の効果が重要であるとされる。この color magnetic interaction は分母が(constituent) quark 質量の 2 次に比例するため、クォーク質量を軽くすると斥力芯は強くなることが考えられるが、我々の格子 QCD の結果はこれと現在のところ consistent といえる。斥力芯については、クォーク質量依存性のほかに、flavor SU(3) sector でのフレーバー構造依存性も重要な情報を与える。その情報も加味して、総合的に考える必要があるが、これは時間の関係で今後の課題として残す。

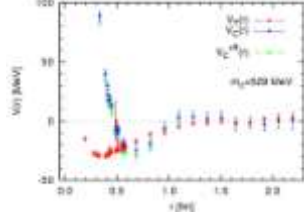
テンソル力への拡張を行った。これは、格子 QCD により $J^P=1^+$ の BS 波動関数を生成し、そこから空間上の各点各点で中心力とテンソル力について逆解きして求める。実際に d 波成分が正しく再現できているかというのが問題になる。格子 QCD の BS 波動関数から d 波成分を取り出すと次のようになる。



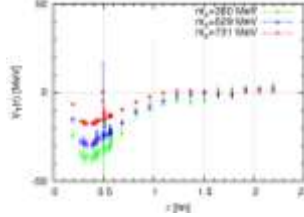
赤いデータは s 波成分であり、きれいに一価の関数になっている。これに対し、青と紫は d 波成分であり多価関数となっている、この多価性は d 波成分の角度依存性からくるものであり、理論的に予想される角度依存性は spinor harmonics により与えられる。この予想される角度依存性の部分を取り除いて、d 波成分をプロットしてみると下のようきれいに一価関数となる。



この事実は回転対称性の代わりに cubic group の対称性を持つ格子 QCD でも d 波成分が正しく再現されていることをしめす。さて実際に格子 QCD によってテンソル力を計算した結果は次のようになる。



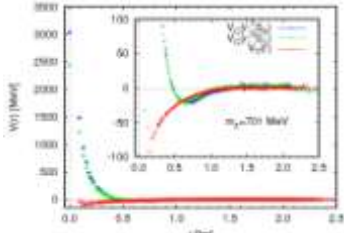
赤いデータがテンソル力で、中間子交換模型で ρ 中間子と π 中間子が相殺して出てくる形と酷似している。さてこの結果は現象論的に期待されている強さと比べると非常に弱い。原因はこの計算で採用したクォーク質量が現実世界よりもかなり重たいことによるものと考えられる。実際クォーク質量を 3 通りに変えて計算してみた結果、クォーク質量を軽くしていくにつれて下図のようにテンソル力は強さを増していく傾向がみられる。



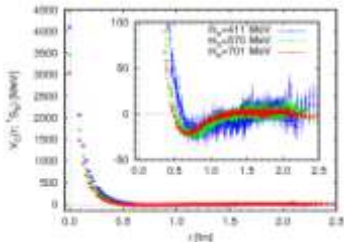
テンソル力の近距離成分は、米国 Brook haven National Lab. (BNL) や Jefferson Lab. (JLab) での実験で最近注目を集めている short range correlated (SRC) nucleon pair に関連して興味もたれているのだが、現象論的な決定には、中心力の斥力芯や centrifugal barrier の影響を受け、多大の不定性を伴う。我々の格子 QCD の方法は、このような不定性を排除した形で直接テンソル力を計算できるので、今後 SRC nucleon pair の研究において、BNL や JLab 等の実験グループと連携した研究を進めて行くことを視野に入りたい。

PACS-CS Coll. が生成する 2+1 flavor QCD のゲージ配位を使って、フル QCD による核力を計算した。これには空間全点で核力を計算可能にするため FFT を駆使したアルゴリズムを使った。結果の定性的な性質はクエンチ QCD のものと変わらない。近距離の斥力芯を中間距離に引力が取り巻いている中心力ポテンシャルと π 中間子と ρ 中間子の寄与が相殺して出てくる形とよく似たテンソル力

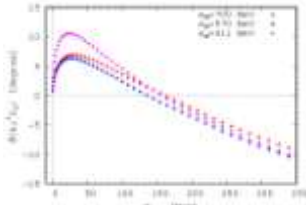
ポテンシャルが得られている。



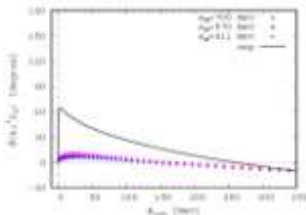
しかしながら、定量的には斥力芯やテンソル力の強さが非常に強いものに変化している。原因については、もちろん full QCD の効果ということが考えられるのだが、時空を離散化した時の離散化誤差の影響である可能性も否定できない。この点については今後の研究で明らかにしていく。これらの中心力やテンソル力のクォーク質量依存性も定性的にはクエンチ QCD と変わらない。しかしながら、FFT を使って空間全点でポテンシャルの詳細な情報が得られたため、単に強さが強くなったというよりはむしろ、相互作用の range が伸びたと表現するほうが正しい説明のように思えてくる。(下図参照)



このポテンシャルに対応する散乱位相差は次のようになる。



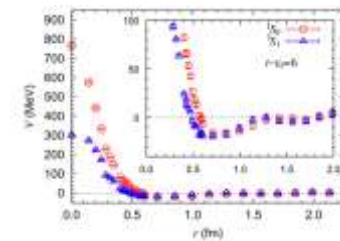
定性的な振る舞いは合理的である。中間距離の引力に対応して小さいエネルギーで持ち上がり、斥力芯のため高エネルギーで右下がりになる。m_pi = 700 MeV の時と 570 MeV の時で順序が入れ替わっているが、これは引力が増える速度よりも、斥力芯が強くなる速度が速かったことによる結果と解釈される。このように定性的には合理的な結果を得ているが、実験値と比べると下図のように強さが全然足りないということが分かる。



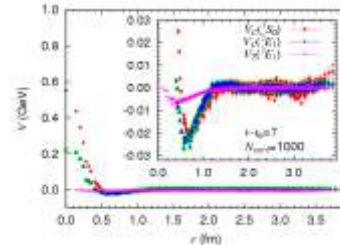
これは一つには、クォーク質量が現実のものよりもはるかに重いことによる影響が考えられる。もうひとつは、ポテンシャルの長距離部分の収束性が非常に緩慢で、現在のものからまだ数 MeV 程度成長する事が考えられている。長距離部分では、ポテンシャル変化の絶対値は小さくても、空間体積を伴って寄与が生まれるため、定量的な議論のためにはこの部分まで含めて、収束を徹底させなければいけない。これは今後の課題である。

ハイペロンポテンシャル (NΞ (I=1) と NΛ) を格子 QCD で生成した。これは、現在の定式化が、inelastic threshold よりも下の部分でしか正当化されていないためである。

(inelastic threshold を超えた部分への拡張は、次の課題として残す) 下に計算された NΞ ポテンシャルをしめす。



NN と同じく近距離の斥力芯を中間距離の引力が取り囲んでいる。しかし NN と違って、spin singlet と triplet で斥力芯の強さの違いが大きい。クォーク質量が減少するにつれて斥力芯は増大するが、中間距離の引力に関しては目立った変化は見られなかった。次に NΛ ポテンシャルを示す。



NN と同じように近距離の斥力芯を中間距離の引力が取り囲んでいるが、違う点は斥力芯のクォーク質量依存性が大きいことである。N と Λ の間では π 交換が不可能なため、テンソル力が極めて弱い。ハイペロン力は J-PARC に関連して S=-2 までのポテンシャルを早急に研究する必要がある。また状態方程式のためにはこれら以外にも様々なポテンシャルが必要となる。また、今の計算のような single channel のポテンシャルよりも、拡張を施した結合チャンネルのポテンシャルの方が利用価値が高い。これらは非常に興味深い課題であり、今後の課題である。

計画していた研究のすべてを実行することはできなかったが、今回の研究によって散乱実験に忠実な現実的核力やハイペロン力を定量的に生成する際、気をつける点が明ら

かになった。今後、次世代スパコンをはじめとしてスーパーコンピュータの高性能化が進み、 $L \sim 6$ fm を超える空間体積での 2+1flavor QCD で物理クォーク質量を直接採用した計算が次第に可能になる。結果、格子 QCD の原子核物理への応用もどんどん進むことが予想される。今後とも格子 QCD を積極的に活用した原子核物理の研究方法を開拓していきたい。

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 15 件)

(査読誌)

- ① S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations, Progress of Theoretical Physics **123**, 2010, 89.
- ② H. Nemura, N. Ishii, Sinya Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon force from lattice QCD, Physics Letters **B673**, 2009, 136-141.
- ③ S. AOKI, T. HATSUDA, N. ISHII, Nuclear Force from Monte Carlo simulations of Lattice Quantum Chromodynamics, Computational Science & Discovery, **1**, 2008, 015009(11pp).
- (研究集会プロシーディングス)
- ④ 石井理修, 格子 QCD による核力ポテンシャル, 原子核研究 Vol. **54**, 2010, 47-51.
- ⑤ K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials in lattice QCD, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2009), 2009, 126(8pp).
- ⑥ N. Ishii for PACS-CS and HAL-QCD Collaborations, Lattice study of nuclear forces, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2009), 2009, 019(15pp).
- ⑦ H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-Nucleon Forces Calculated From Lattice QCD, International Journal of Modern Physics **A24**, 2009, 2110-2117.
- ⑧ S. Aoki, J. Balog, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, P. Weisz, Energy dependence of nucleon-nucleon potentials, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2008), 2009, 152(7pp).
- ⑨ H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lambda-nucleon force from lattice QCD, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2008), 2009, 156(7pp).
- ⑩ N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Nuclear

forces from 2+1 flavor lattice QCD using the PACS-CS gauge configurations, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2008), 2009, 155(7pp).

- ⑪ T. Hatsuda, S. Aoki, N. Ishii, H. Nemura, THE NUCLEAR FORCE FROM LATTICE QCD, Modern Physics Letters **A23**, 2008, 2265-2272.
- ⑫ H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential, Modern Physics Letters **A23**, 2008, 2285-2281.
- ⑬ N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, H. Nemura, Lattice QCD calculation of nuclear forces, Modern Physics Letters **A23**, 2008, 2281-2284.
- ⑭ H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Hyperon-nucleon potentials from lattice QCD, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2007), 2007, 156(7pp).
- ⑮ N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD approach to nuclear force, PROCEEDINGS of SCIENCE (LATTICE2007), 2007, 146(7pp).

[学会発表] (計 2 3 件)

(国際学会)

- ① N. Ishii for HAL-QCD Coll., Lattice approach to nuclear forces, Strong Interactions In The 21st Century, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai, India, 2010 年 2 月 (invited talk)
- ② N. Ishii for HAL-QCD Coll., Lambda-Nucleon and Nucleon-Nucleon interactions on the Lattice, International Workshop on Relativistic Description of Two- and Three-Body Systems in Nuclear Physics, ECT*, Trento, Italy, 2009 年 10 月 (invited talk)
- ③ N. Ishii for PACS-CS and HAL-QCD Coll., Lattice study of nuclear forces, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2009), Beijing, China, 2009 年 7 月 (plenary talk)
- ④ N. Ishii, H. Nemura, K. Murano, S. Aoki, T. Hatsuda, Lattice QCD calculation of the nuclear force, The 3rd LACM-EFES-JUSTIPEN Workshop, Joint Institute for Heavy Ion Research Oak Ridge National Lab., 2009 年 2 月
- ⑤ N. Ishii, H. Nemura, K. Murano, S. Aoki, T. Hatsuda, Nuclear forces from lattice QCD, Korean Physical Society Meeting, Guangju, South Korea, 2008

- 年 10 月(Keynote talk)
- ⑥ N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Nuclear forces from quenched and $NF=2+1$ full lattice QCDE using the PACS-CS gauge configurations, The XXVI International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2008), Williamsburg, USA, 2008 年 7 月
- ⑦ Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Lattice QCD approach to NN potentials, QCD Downunder II, Auckland, New Zealand, 2008 年 1 月 (invited talk)
- ⑧ Noriyoshi Ishii, Sinya Aoki, Tetsuo Hatsuda, Hidekatsu Nemura, Lattice QCD calculation of Nuclear Forces, CHIRAL07, RCNP, Osaka, Japan, 2007 年 11 月(invited talk)
- ⑨ N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, H.Nemura, (The) Nuclear Force from Lattice QCD, Workshop on “Hadron Physics on the Lattice”, Milos, Greece, 2007 年 9 月 (invited talk)
- ⑩ N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Lattice QCD approach to nuclear force, The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2007), Regensburg, Germany, 2007 年 7-8 月
- ⑪ N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Lattice QCD studies to nuclear force, International Nuclear Physics Conference (INPC2007), Tokyo, Japan, 2007 年 6 月
- ⑫ N.Ishii, S.Aoki, T.Hatsuda, Lattice QCD approach to baryon-baryon potentials, Nuclear Physics at J-PARC, ---Pre-symposium of INPC2007---, RICOTTI in Tokai village, Japan, 2007 年 6 月
(国内学会)
- ⑬ 石井理修 for HAL-QCD、格子 QCD による核力と Luescher の散乱長、日本物理学会、岡山大学、2010 年 3 月
- ⑭ N.Ishii for HAL-QCD Collaboration, Short-range nuclear force in lattice QCD, KEK theory center workshop on Short-range correlations and tensor structure at J-PARC, KEK, 2009 年 9 月 (招待講演)
- ⑮ N.Ishii, H.Nemura, K.Murano, S.Aoki, T.Hatsuda for PACS-CS Collaboration, Tensor force from lattice QCD, YITP International Workshop on “Development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force”, 京大基研、2009 年 5 月 (招待講演)
- ⑯ 石井理修、青木慎也、初田哲男、根村英克、村野啓子 for PACS-CS Coll.、格子 QCD による核力(III)ークエンチ QCD によるテンソル力と PACS-CS ゲージ配位を使ったフル QCD による核力、日本物理学会、山形大学、2008 年 9 月
- ⑰ 石井理修、格子 QCD と J-PARCー核力プロジェクトの近未来の拡張の形 (私見)、RIKEN 研究会”J-PARC でのハドロン物理を考える研究会”、理化学研究所、和光市、2008 年 9 月 (パネラー)
- ⑱ 石井理修、格子 QCD から見た J-PARC、KEK 研究会 “J-PARC の物理：ハドロン・原子核研究の新しい局面”、KEK, つくば市、2008 年 8 月 (招待講演)
- ⑲ 石井理修、Multi-Quarks and Nuclear Force in Lattice QCD, RCNP workshop “Challenge to New Exotic Hadrons”, 阪大 RCNP、2008 年 7 月 (招待講演)
- ⑳ 石井理修、青木慎也、初田哲男、村野啓子、根村英克、格子 QCD による核力、基研研究会「原子核の分子的構造と低エネルギー核反応ー束縛系から散乱系へ閾値を超えてー」、京都大学基礎物理学研究所、2008 年 7 月 (招待講演)
- 21 石井理修、青木慎也、初田哲男、根村英克、核力の第一原理計算、日本物理学会、近畿大学、2008 年 7 月 (シンポジウム講演)
- 22 石井理修、NN potentials from lattice QCD, KEK 主催「原子核・ハドロン物理横断研究会」、KEK、2007 年 11 月 (招待講演)
- 23 石井理修、青木慎也、初田哲男、根村英克、格子 QCD による核力の研究、日本物理学会、北海道大学、2007 年 9 月
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]
- 出願状況 (計 0 件)
該当なし
- 取得状況 (計 0 件)
該当なし
- [その他]
- ホームページ等
なし
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
石井 理修 (ISHII NORIYOSHI)
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号：40360490
- (2) 研究分担者
該当なし
- (3) 連携研究者
該当なし