

研究責任者名 Name	初田 哲男 HATSUDA Tetsuo	所属機関 Affiliation	理化学研究所仁科加速器研究センター
受理番号 Proposal No.	大型-12-11	研究課題名 Program title	格子 QCD シミュレーションによるバリオン間力の研究

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要 Abstract

(和文) 格子 QCD を用いた核力・バリオン間力の研究を行った。本研究において用いる HAL QCD method では、Nambu-Bethe-Salpeter 波動関数を格子 QCD で計算し、それをインプットとして Schrödinger 方程式を逆解きすることで、散乱位相差に忠実なポテンシャルを、格子上で直接決定する。また、この手法の最近の拡張として、時間依存型の Schrödinger 方程式を用いてエネルギー非依存（非局所）ポテンシャルを扱うことにより、波動関数について基底状態への飽和を必要としないという、非常に大きな利点を得ることに成功した。本研究では、この時間依存型 HAL QCD method を用い、特に三核子力・ハイペロン力についての研究を行った。三体力については、従来波動関数の contraction 計算コストが非常に大きな問題であったが、本研究において、color/spinor contraction と Wick contraction を統一的に考えることで、計算コストを激減させる新しいアルゴリズムの開発に成功した。この手法により、広い時間領域で三体波動関数を計算することが可能となり、時間依存型 HAL QCD method による信頼性のある三体力の計算を行った。ハイペロン力については、結合チャンネル型 HAL QCD method を使い、 $S=-1, -3, -4$ のハイペロン力について系統的な計算を行った。

(英文) We study nuclear and baryon forces from lattice QCD simulations. In our HAL QCD method, we utilize Nambu-Bethe-Salpeter wave functions and determine potentials through Schrödinger equations, so that potentials are faithful to scattering phase shifts by construction. We recently extend the method where energy-independent (non-local) potentials can be extracted from time-dependent Schrödinger equation without ground state saturation, which is a significant advantage over the traditional methods. In this work, we study three-nucleon forces (3NF) and hyperon forces in the time-dependent HAL QCD method. For 3NF study, one of the largest challenges is the computational cost of the contraction. We develop a new algorithm which drastically reduces the cost, by considering color/spinor contractions and Wick contraction in a unified manner. This enables us to calculate 3N wave functions for wider time range, and obtain reliable 3NF results. For hyperon forces, we perform systematic studies for the systems with $S=-1, -3$ and -4 by utilizing the extended HAL QCD method to the coupled channel formalism.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読付きの学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	42	4	0	0

口頭研究発表

1. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD”
Invited Talk given at International Symposium on “New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions”, BNL, Upton, USA, 14-16 May 2012.
2. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“Nuclear Physics from Lattice Simulations”
Invited Plenary Talk given at “The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012)”, Cairns, Australia, 24-29 Jun. 2012.
3. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“Three-Nucleon Forces Explored from Lattice QCD”
Invited Talk given at fourth International Workshop on “Lattice Hadron Physics” (LHP IV), Adelaide, Australia, 2-4 Jul. 2012.
4. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“Three-Nucleon Forces Explored on the Lattice”
Invited Talk given at International Workshop on “Crossover 2012”, Nagoya, Japan, 12-13 Jul. 2012.
5. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“Few-baryon Interactions from Lattice QCD”
Invited Plenary Talk given at International conference on “The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20)”, Fukuoka, Japan, 20-25 Aug. 2012.
6. T. Doi for HAL QCD Collaboration
“京コンピュータによるバリオン間相互作用の解明”
Invited Talk given at JPS meeting (企画講演), Kyoto Sangyo University, Kyoto, Japan, 11-14 Sep. 2012.
7. Sinya Aoki, invited, "Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature", Workshop 'New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions', May 14-16, BNL, Upton, USA.
8. Sinya Aoki, "Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature", The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, Cairns Center, Cairns, Australia, June 24-29, 2012.
9. Sinya Aoki, invited, "Hadron interactions in lattice QCD", Lattice Hadron Physics IV, July 2-4, CSSM, University of Adelaide, Adelaide, Australia.
10. Sinya Aoki, invited, "Hadron interactions from lattice QCD", INT Program 'Lattice QCD studies of excited resonances and multi-hadron systems', July 30 - Aug. 31, 2012, INT, Seattle, USA.
11. Sinya Aoki, invited, "Chiral symmetry restoration, eigenvalue density of Dirac operator and axial U(1) anomaly at finite temperature", Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory', Aug. 27 - Sept. 28, 2012, GGI, Florence, Italy
12. Sinya Aoki, invited, "Hadron interactions from lattice QCD", Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory', Aug. 27 - Sept. 28, 2012, GGI, Florence, Italy
13. Sinya Aoki, invited, "Computing Nuclear Force in Lattice Gauge Theory", QCD Structure I, October 7-20, 2012, Central China Normal University, Wuhan, China
14. N.Ishii for HAL QCD Collaboration, "2+1 flavor QCD results of nuclear forces", Lattice 2012, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, Cairns Convention Center, Cairns, Australia, June 24-29, 2012.
15. N.Ishii for HAL QCD Collaboration (plenary talk), "Baryon-baryon interactions from lattice QCD", The 7th International Workshop on Chiral Dynamics, Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA, Aug. 6-10, 2012.
16. N.Ishii for HAL QCD Collaboration, "2+1 flavor QCD results of nuclear forces", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, August 20-25, 2012.
17. 石井理修 for HAL QCD Collaboration, "PACS-CS ゲージ配位を用いた 2+1 flavor QCD による核力ポテンシャル"、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 1 日から 14 日。

18. Y. Ikeda for HAL QCD Collaboration, "Quark mass dependence of s-wave meson-baryon interactions in strangeness sector", Lattice 2012, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, Cairns Convention Center, Cairns, Australia, June 24-29, 2012.
19. Y. Ikeda for HAL QCD Collaboration, "Lattice QCD simulations of s-wave meson-baryon interaction with strangeness", The XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2012), Barcelona, Spain, Oct. 1-5, 2012.
20. 根村英克 for HAL QCD Collaboration, 「格子 QCD によるストレンジネス(-1)のハイペロン核子相互作用の研究」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日～27 日
21. 根村英克 for HAL QCD Collaboration, 「格子 QCD によるバリオン間相互作用と中性子星」, 日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日～27 日 (シンポジウム講演)
22. H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, "Lambda-N and Sigma-N interactions from lattice QCD", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, August 20-25, 2012.
23. H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, "Lattice calculation of baryon-baryon interaction and few-body systems", The 2nd Korea-Japan Workshop on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC, Pusan National University, Pusan, Korea, September 24-25, 2012.
24. K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, " Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD", Lattice 2012, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, Cairns Convention Center, Cairns, Australia, June 24-29, 2012.
25. 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration, "Coupled Channel Approach to Baryon-Baryon Interactions in Lattice QCD", 「素核宇宙融合」×「新ハドロン」crossover workshop, 名古屋大学, 2012 年 7 月 12 日～13 日.
26. K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, " Coupled channel approach to S-wave hyperonic interactions from lattice QCD", The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, August 20-25, 2012.
27. K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, "Strangeness S=-2 baryon-baryon systems from Lattice QCD", Tours2012, VIII Tours symposium on Nuclear physics and Astrophysics on Black Forest, Lenzkirch-Saig, Germany, September 2-7, 2012.
28. 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration, "格子 QCD によるハイペロン間相互作用のクォーク質量依存性の研究", 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 11 日～14 日.
29. Tetsuo Hatsuda, invited, "Lattice QCD in Nuclear Physics", School of Collective Dynamics in Heavy Ion collisions, May 15-19, 2012, Berkely, USA
30. Tetsuo Hatsuda, invited, "Strangeness Nuclear Physics from Lattice QCD", HYP2012-XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, Oct.1-5, 2012.
31. B. Charron for HAL QCD Collaboration "Pion-pion interaction in the I=1 channel"
Poster presentation given at the International Symposium on Lattice Field Theory, Cairns, Australia, 24-29 June 2012.
32. B. Charron for HAL QCD Collaboration "I=1 pion-pion interaction from lattice QCD" Invited talk given at the Crossover Workshop on Hadron Physics, Nagoya University, Japan, 12-13 July 2012.
33. T. Inoue for HAL QCD Collaboration, "H-dibaryon from Full QCD Lattice Simulations",
Invited talk at RIKEN RBRC workshop on "Hyperon-Hyperon Interactions and Search for Exotic Di-Hyperon in Nuclear Collisions", Feb 29 - Mar 2, 2012, Brookhaven, NY, USA
34. 井上貴史 「格子 QCD を用いた H ダイバリオン質量の研究」
日本物理学会第 67 回年次大会, 2012 年 3 月 24 日～27 日, 関西学院大学
35. T.Inoue for HAL QCD Collaboration, "Study of H-dibaryon mass in Lattice QCD",
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory, June 24-29, 2012, Cairns, Australia,
36. T. Inoue for HAL QCD Collaboration, "Nucleon matter and hyperon in medium from Lattice QCD"
Invited talk at International Workshop on "Crossover 2012", Nagoya, Japan, 12-13 Jul. 2012.

37. T.Inoue for HAL QCD Collaboration, “Lattice calculation for H-particle”
Invited talk at International Workshop on “Strangeness Nuclear Physics”, Aug 20-25, 2012, Osaka
38. 井上貴史 「格子 QCD を用いた核物質の研究」
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 9 月 11 日～14 日, 京都産業大学
39. 井上貴史 for BBILQCD project 「QCD によるバリオン間相互作用の研究」
「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム, 10 月 25 日, 筑波大学
40. 村野 啓子 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD によるテンソル力と短距離斥力”,
日本物理学会第 67 回年次大会, 関西学院大学, 2012 年 3 月 24 日～27 日
41. Keiko Murano for HAL Collaboration, “Nuclear forces in the odd parity sector and the LS forces from Lattice QCD”, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Fukuoka, Japan, August 20-25, 2012.
42. 村野 啓子 for HAL QCD Collaboration, “格子 QCD から求めるスピン軌道力”, 日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学、2012 年 9 月 11～14 日.

査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載)

1	著者名	T.Doi and Michael G. Endres
	タイトル	Unified contraction algorithm for multi-baryon correlators on the lattice
	雑誌名等	Comput. Phys. Commun. 184, 117-123 (2013)
	URL	http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2012.09.004
2	著者名	S.Aoki, T.Doi, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, N.Ishii, K.Murano, H.Nemura and K.Sasaki (HAL QCD Collaboration)
	タイトル	Lattice QCD approach to Nuclear Physics
	雑誌名等	Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 01A105 (2012)
	URL	http://dx.doi.org/10.1093/ptep/pts010
3	著者名	N.Ishii, S.Aoki, T.Doi, T.Hatsuda, Y.Ikeda, T.Inoue, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki (HAL QCD Collaboration)
	タイトル	Hadron-hadron interactions from imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter wave function on the lattice
	雑誌名等	Phys. Lett. B712,437(2012)
	URL	http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.04.076
4	著者名	T.Inoue, S.Aoki, T.Doi, T.Hatsuda, Y.Ikeda, N.Ishii, K.Murano, H.Nemura and K.Sasaki (HAL QCD Collaboration)
	タイトル	Two-baryon Potentials and H-Dibaryon from 3flavor Lattice QCD Simulations
	雑誌名等	Nucl. Phys. A881, 2012, 28-43
	URL	http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2012.02.008

プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載)

1.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
2.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3.	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	

その他(学位論文、紀要、投稿中の論文を含む) (URL を記載)

- 1.
- 2.

特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）

1. 日本物理学会第17回論文賞 青木慎也・初田哲男・石井理修
“Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its Applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD Simulations”, Prog. Theor. Phys. Vol. 123, No.1, 89-128, (2010)
2. 第23回つくば賞 青木慎也・石井理修・初田哲男
「格子量子色力学に基づく核力の研究」
3. 2012年度仁科記念賞 初田哲男・青木慎也・石井理修
「格子量子色力学に基づく核力の導出」