

令和元年5月27日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K17667

研究課題名(和文) 格子量子色力学を用いた三体力の研究

研究課題名(英文) The study of Three-Baryon Forces from Lattice QCD

研究代表者

土井 琢身 (Doi, Takumi)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員

研究者番号：70622554

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：三体力やハイペロン力の量子色力学(QCD)からの決定は、素粒子・原子核・宇宙天文物理にまたがる最重要課題の一つであり、本研究では格子QCD第一原理計算を行った。主な成果として、(1) HAL QCD法、ルッシャー法という計算手法について、その信頼性を明らかにすると共に、手法間の不一致問題を解決した(2) 世界初の物理点クォーク質量計算において、 Σ 、 N 状態がユニタリー極限近傍の(準)束縛状態を作ること明らかにした(3) 三体力をクォーク質量がより軽い領域まで進め、クォーク質量が軽くなると短距離斥力効果が大きくなる傾向を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の原子核物理は、実験データに基づく核力を基盤として構築されてきた。本研究では、素粒子であるクォーク・グルーオンの基礎理論である量子色力学(QCD)に基づいて、核力のみならず、三体力やハイペロン力といったバリオン間力の決定を行った。これは、原子核物理に素粒子論からの基礎付けを与えるという大きな意義を持つと共に、中性子星の構造、連星中性子星合体現象とそこからの重力波・電磁波放出、宇宙の進化における元素合成、超新星爆発など、宇宙天文物理における現象の解明にもインパクトを与えるものである。

研究成果の概要(英文)：The computation of three-baryon forces and hyperon forces is one of the most important challenges which has a great impact on particle-, nuclear- and astro- physics. In this study, we perform the first-principles computation by lattice QCD. The major achievements are: (1) We reveal the reliability of HAL QCD method and Luscher's method and resolve the long-standing issue on the consistency between the methods (2) We perform the first study of baryon interactions with nearly physical quark masses and find that Σ 、 N systems form (quasi) bound states located near the unitary regime (3) We calculate three-nucleon forces at lighter quark mass region and find the short-range repulsive interaction which tends to be enhanced at lighter quark masses.

研究分野：原子核・ハドロン理論

キーワード：三体力 ハイペロン力 バリオン間力 核力 格子QCD

1. 研究開始当初の背景

核力やハイペロン力などバリオン間相互作用の決定は、現代の原子核物理学における最重要課題の一つである。従来は、現象論的モデルあるいはカイラル有効理論などを用い、散乱実験データをインプットとして核力を決定するというアプローチが行われてきたが、クォーク・グルーオンの基礎理論である量子色力学 (QCD)からの直接決定はなされていなかった。従って、QCD に直接基づく計算を行うことは、原子核物理に対し素粒子のレベルからの基礎付けを与えるという大きな意義を持つ。さらに、QCD からの直接決定は、実験データを得ることが困難なハイペロン力や三体力の決定において特に重要である。ハイペロン力や三体力は、高密度核物質の状態方程式の決定に必要な不可欠な情報であり、ひいては中性子星の構造、中性子星連星合体現象、超新星爆発など、宇宙天文物理における諸現象の解明に大きなインパクトをもたらす。

バリオン間力計算の QCD からの決定に関しては、近年、格子 QCD 第一原理計算による研究が大きな発展を遂げてきた。特に、研究代表者を含む HAL QCD Collaboration で開発・発展を行ってきた HAL QCD 法においては、散乱位相差に忠実なバリオン間力を直接計算することが可能であり、結合チャネルハイペロン力や三体力など、様々な拡張で成果が挙げられている状況であった。本研究開始以前におけるそれらの計算は、主に重いクォーク質量領域に限られていたが、本研究ではクォーク質量がより軽い領域での計算を目指した。

一方、格子 QCD を用いたバリオン間力計算については、(ルッシャーの有限体積公式に基づく) 直接法計算が伝統的に行われてきており、特に近年はクォーク質量が重い領域で計算結果が活発に報告されるようになっていた。しかし、HAL QCD 法と直接法では、類似の格子 QCD セットアップにおいてもその結果が互いに大きく矛盾していることが明らかとなってきた。この問題は、格子 QCD におけるバリオン間力計算の信頼性を確立する上での最重要課題として急浮上してきており、その解決が喫緊の課題となっている状況であった。

2. 研究の目的

本研究では、格子 QCD による三体力の計算が大きな目標であった。特に、以前の計算はパイオン質量が非常に重い領域での計算に限られていたため、よりクォーク質量が軽い領域での計算を行い、クォーク質量依存性を研究することとした。三体力計算では HAL QCD 法を用いる予定であったが、手法について、格子 QCD におけるバリオン間力計算の信頼性問題の解決が非常に重要になってきた。信頼性問題はこれまで二体力を対象として、HAL QCD 法、直接法の結果の矛盾という形で報告されてきたが、この問題の解決は、適切な三体力の計算手法の選択にも直接関わる問題である。この状況に鑑み、二体力の超高精度計算を、HAL QCD 法、直接法両方で行い、系統誤差の包括的研究を新たに重要課題と設定した。

研究期間中には、宇宙天文物理における大ニュースとして、中性子星連星合体からの重力波・電磁波の同時観測が初めて報告された。これにより、関連する状態方程式を決定する上で、ハイペロン力計算の重要性がさらに高まった。さらに、これまで実験的アプローチが難しかったハイペロン力について、新たに重イオン衝突実験からの研究が進展してきた。そこで、格子 QCD 側でも対応する計算をさらに進展させるため、我々が行っていた世界初の物理点計算において、8 重項バリオン間のハイペロン力でさらに精度を向上させた計算を行うことに加え、新たに 10 重項バリオンもターゲットに加えた計算を行うこととした。

3. 研究の方法

本研究では、我々が開発した(時間依存型) HAL QCD 法を用いた格子 QCD 第一原理計算を行うことで、バリオン間相互作用の決定を行った。この手法では、南部 ベーテ サルペータ (NBS) 波動関数が相対距離の遠方領域で散乱位相差の情報を持っていることを利用し、シュレーディンガー方程式を介して散乱位相差に忠実な相互作用ポテンシャルを計算する。特に、時間依存型 HAL QCD 法においては、NBS 相関関数において基底状態への飽和を必要とすることなく、相関関数から直接ポテンシャルを導出できるフレームワークになっていることが特徴である。

また、HAL QCD 法と直接法との信頼性検証研究では、同一セットアップで従来の直接法に対応した計算も行い、ソース・シンク演算子依存性なども併せて研究を行った。

4. 研究成果

本研究の主な成果として、(1) 直接法と HAL QCD 法の系統的研究による、格子 QCD によるバリオン間力計算の信頼性問題の解決(2) 物理点格子 QCD 計算におけるハイペロン力決定(3) 軽いクォーク質量領域での三体力計算について述べる。

(1) 直接法 vs. HAL QCD 法：格子 QCD によるバリオン間力計算の信頼性問題の解決

格子 QCD によるバリオン間力計算の手法としては、直接法と HAL QCD 法という二手法が知ら

れている。理論的には、散乱位相差や束縛エネルギーなど物理量に関しては、どちらの手法を用いても結果が一致するはずであるが、クォーク質量が重い領域での結果は、例えば二核子系が束縛（直接法）非束縛（HAL QCD 法）という結果が報告されるなど、互いに矛盾する結果が得られていた。本研究では、同一格子 QCD セットアップを用いて、二手法の系統誤差を包括的に研究した。

まず直接法については、基底状態への飽和を判定するプラトー同定について、ソース・シンク演算子を変えることでプラトーの位置が変化することから、プラトー同定法は信頼できないことを明らかにした。さらに、直接法の結果を検証する手段として、散乱理論およびルッシャー有限体積公式を用いた信頼性検証手段(normality check)を新たに提唱した。過去の直接法計算の結果に適用したところ、全ての結果が信頼性検証に失格することが判明し、それらの直接法計算は信頼できないことを明らかにした。一方、HAL QCD 法については、ポテンシャルの微分展開の近似誤差や、非弾性励起状態の混合といった系統誤差について、これらの影響は低エネルギー散乱について十分小さく、その計算結果が信頼できることを示した。同時に、ポテンシャルの微分展開の高次項の計算手法を確立した。

さらにこれらの結果の総まとめとして、なぜ直接法の結果に問題が起きているのかを HAL QCD ポテンシャルから調べる新たな解析手法を開発した。その結果、従来の直接法計算においては、励起弾性散乱状態の混合に起因する系統誤差が大きく、基底状態に対応する真のプラトーではなく、擬プラトーが現れることを明らかにした。その上で、HAL QCD ポテンシャルの情報を基にした改良演算子を新たに提案し、それを使った真のプラトー計算の結果は、HAL QCD 法の計算結果と正しく一致することを見出した。これにより、手法間の不一致問題に最終的解決を与えると共に、信頼性あるバリオン間力計算を行うためには、HAL QCD 法が必須であることを明らかにした。

(2) 物理点格子 QCD 計算におけるハイペロン力決定

世界初となる物理点におけるバリオン間力計算を行い、正パリティチャンネルの二体力について、ストレンジネス $|S|=0-6$ まで系統的な計算を行った。特に、重イオン衝突実験との比較の重要性がクローズアップされたことから、8 重項バリオンだけでなく、10 重項バリオンも計算対象とした。(1)の成果により、手法としては HAL QCD 法を信頼ある手法として確立することに成功したことから、そのフレームワークによる計算を行った。計算したセットアップは、パイオン質量 146MeV であり、体積は $(8.1\text{fm})^4$ という、二体バリオン系を十分空間内に含むことのできるような世界最大級のものとなっている。

特に興味深い結果として、 $(^1S_0)$ 系と $N(^5S_2)$ 系に強い引力があることが明らかになった。前者については、短距離における弱い斥力芯と中間～遠距離における引力があり、後者については全相対距離において引力となることが解った。これらの引力の結果、 $(^1S_0)$ 系はユニタリー極限に近い振る舞いを示すことを明らかにした。特に、非常に浅い束縛状態を作る可能性が高いことを予言した。一方、 $N(^5S_2)$ 系についてもユニタリー極限に近い状態であることが解った。ただし、下に 閾値が開いているので、対応する状態は準束縛状態となる。これら二つの系を二核子系と比べると、(有効距離/散乱長)というパラメータで見るとほぼ重陽子と同様のユニタリー極限領域に位置することが解った。これらの状態は重イオン衝突における 2 体バリオン相関を介して検出できる可能性があり、実験グループとの共同研究へと繋がっている。

(3) 軽いクォーク質量領域での三体力計算

我々は世界初となる三体力計算を行い、短距離領域で三体斥力があることを見出していたが、計算コストの高さからパイオン質量は 1.1GeV など、非常に重いクォーク質量での計算であった。そこで本研究では、我々が開発した高速アルゴリズムである統一縮約法を用い、クォーク質量がより軽い領域での研究を行った。計算コストをコントロールするため、京コンピュータでコードの高度な最適化を行うことで、特にカーネル部分について約 50%という非常に高い実行効率を持つコードの作成に成功した。これにより、パイオン質量 0.5GeV まで軽くした計算が可能となり、三体力のクォーク質量依存性を調べた。パイオン質量 1.1~0.8GeV までは、短距離三体斥力は統計誤差の範囲内でほぼ同じであり、クォーク質量依存性は弱いという結果が得られていたが、パイオン質量 0.5GeV においては、短距離三体斥力の大きさはそれほど変わらないものの、斥力のレンジがやや大きくなる結果が得られ、クォーク質量を軽くすると、斥力効果は大きくなる傾向が得られた。さらにクォーク質量を軽くした研究を進めるため、パイオン質量 0.27GeV における大統計配位の生成をも行った。配位生成は終了し、第一段階として二体力の計算が進展中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 30 件)

(1)“Consistency between Lüscher’s finite volume method and HAL QCD method for two-baryon

systems in lattice QCD”

T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
JHEP 03, 007 (2019),
doi:10.1007/JHEP03(2019)007
arXiv:1812.08539 [hep-lat]. (査読有)

(2) “Systematics of the HAL QCD Potential at Low Energies in Lattice QCD”

T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Phys. Rev. D 99, 014514 (2019),
doi:10.1103/PhysRevD.99.014514
arXiv:1805.02365 [hep-lat]. (査読有)

(3) “Most Strange Dibaryon from Lattice QCD”

S. Gongyo, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto and H. Nemura (HAL QCD Collaboration)
Phys. Rev. Lett. 120, 212001 (2018),
doi:10.1103/PhysRevLett.120.212001
arXiv:1709.00654 [hep-lat]. (査読有)

(4) “Are two nucleons bound in lattice QCD for heavy quark masses? - Consistency check with Lüscher’s finite volume formula -”

T. Iritani, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Phys. Rev. D 96, 034521 (2017),
doi:10.1103/PhysRevD.96.034521
arXiv:1703.07210 [hep-lat]. (査読有)

(5) “Fate of the Tetraquark Candidate $Z_c(3900)$ in Lattice QCD”

Y. Ikeda, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, K. Murano, and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Phys. Rev. Lett. 117, 242001 (2016),
doi:10.1103/PhysRevLett.117.242001
arXiv:1602.03465 [hep-lat]. (査読有)

(6) “Mirage in Temporal Correlation functions for Baryon-Baryon Interactions in Lattice QCD”

T. Iritani, T. Doi, S. Aoki, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
JHEP 1610, 101 (2016),
doi:10.1007/JHEP10(2016)101
arXiv:1607.06371 [hep-lat]. (査読有)

[学会発表](計 47 件)

(1) “Recent progress on Lattice QCD calculation of Nuclear Forces”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at “Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018)”, Hawaii, USA, 23-27 Oct. 2018.

(2) “Hadron Interactions in HAL QCD method and Applications to Nuclear and Astro Physics”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Talk given at INT Program “Multi-Hadron Systems from Lattice QCD”, Institute for Nuclear Theory (INT), Seattle, USA, 5-9 Feb. 2018.

(3) “Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at “Workshop of Recent Developments in QCD and Quantum Field Theories”, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 9-12 Nov. 2017.

(4) “Two- and Three-Baryon Forces from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop on “Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers (NPCSM) 2016”, YITP, Kyoto, Japan, 17 Oct. - 18 Nov. 2016.

(5) “Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)’”, Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan, 4-8 Nov. 2015.

〔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〕

(1) プレスリリース「新粒子「ダイオメガ」-スパコン「京」と数理で予言するクォーク 6 個の新世界-」2018/05/24

(2) プレスリリース「新粒子候補テトラクォーク $Z_c(3900)$ の正体 大規模数値シミュレーションで解明 」2016/12/14

6 . 研究組織

(1)研究分担者

無し

(2)研究協力者

無し

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、研究者個人に帰属されます。