

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24740146

研究課題名(和文) 格子QCDによる三体力の研究

研究課題名(英文) Three-Nucleon Forces from Lattice QCD

研究代表者

土井 琢身(Doi, Takumi)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・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) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：三核子の間に働く力、三体力の決定は、現代の原子核物理学における最重要課題の一つである。本研究では、素粒子標準理論に直接基づいた決定を行うため、格子量子色力学の手法により三体力の大規模第一原理計算を行った。

主な成果としては、(1) 計算における新アルゴリズム・Unified Contraction Algorithm (統一縮約法)の開発により、192倍の計算高速化に成功(2) 南部-ベーテ-サルピーター波動関数の漸近形を調べることにより、三体力の定義を場の理論から確立(3) 様々なクォーク質量・格子間隔で計算を行った結果、近距離領域で三体斥力が存在することを見出した、などが挙げられる。

研究成果の概要(英文)：The determination of three-nucleon forces, non-trivial interactions among three nucleons, is one of the most important subject in modern nuclear physics. In this study, we calculate three-nucleon forces directly based on QCD, the Standard Model of particle physics, by means of first-principles lattice QCD simulations.

Some of the major achievements are (1) development of a novel computational algorithm (Unified Contraction Algorithm) which speeds up the computation by a factor of 192 (2) establishing the theoretical definition of three-nucleon forces in field theory based on the asymptotic behavior of Nambu-Bethe-Salpeter wave functions for multi-particles (3) observation of the repulsive three-nucleon forces at short distance by lattice QCD simulations at various quark masses and lattice spacings.

研究分野：ハドロン物理

キーワード：三体力 核力 格子QCD

1. 研究開始当初の背景

物理学の基本的な目標の一つは、様々な現象を微視的な原理から統一的に理解することである。この点において、従来の原子核物理学は、実験データから現象論的に決められた核力を基礎としており、真の基礎理論たる量子色力学 (QCD) との関係が明らかでないといううらみがあった。一方で、素粒子分野においては、非摂動的手法として格子 QCD を用いた第一原理計算が発展してきたが、主にハドロン単体の性質が対象であり、ハドロン多体系・原子核系までをスコープに入れた研究は僅少であった。

しかし、近年行われた格子 QCD による核力ポテンシャルの直接計算 (HAL QCD 法) は、この状況にブレークスルーをもたらした。私も含めた HAL QCD Collaboration においては、HAL QCD 法のハイペロン力への適用など、様々な拡張においても成果を挙げつつあった。本研究開始時点では、これらはまだ重いクォーク質量領域の計算に限られていたが、将来的に物理的クォーク質量での計算を行うことで、QCD から直接、原子核物理学を基礎付けることが可能となり、今後の大きな発展が見込まれた。

このような状況において、今後重要かつ格子 QCD の意義が真に発揮されるのは、実験では決定困難な相互作用についての予言である。なかでも重要なテーマとして私が注目したのが、三体力の決定である。

三体力は、少数核子系における引力効果、対称核物質系における斥力効果など、多彩な性質を持つと考えられており、その理解は現代の原子核物理において最も重要な課題の一つとなっている。特に最近、高密度核物質の状態方程式を通して、超新星爆発や中性子星の性質に及ぼす影響が注目されるなど、宇宙・天体物理においても重要な量となっている。さらに、中性子過剰核でのドリプライン/魔法数、ひいては宇宙の元素合成を理解する上でも、三体力の重要性が指摘されている。すなわち、三体力の理解は、「物質の存在限界はどこにあるのか」、「物質の存在起源は何に由来するのか」という根源的問いに答える上で、要となる役割を担っているといえる。このような重要性とは裏腹に、実験的に三体の散乱完全実験を行うのは不可能に近く、理論的にもモデル描像や有効理論等に基づいた研究に限られており、三体力の定量的な理解は全く不十分な状況であった。

そこで本研究では、三体力に対する全く新しいアプローチとして、格子 QCD 第一原理計算により、三体力の直接決定を行うことを目的とした。

2. 研究の目的

本研究では、格子 QCD を用いた三体力の第一原理計算、特に三重陽子チャンネルにおけ

る三核子力の決定を目的とする。従来の計算はクォーク質量一点、格子間隔一点だけの計算であったが、質量を変えて三体力のクォーク質量依存性を明らかにするとともに、格子間隔を変えることで離散化による系統誤差の評価も行う。

また、当初の目的は主に実際の数値計算に主眼を置いていたが、本研究の進展につれ、計算のためのアルゴリズムそのものの開発、さらに理論定式化など、数値計算の基盤となる様々な研究をも目的に加え、想定以上の大きな成果を挙げることができた。

3. 研究の方法

本研究では、近年、二核子間力の計算で成功を収めている、南部-ベータ-サルペーター (NBS) 波動関数を利用する方法 (HAL QCD 法) を用いる。この手法において、具体的に計算するのは三核子系の六点相関関数である。相関関数から NBS 波動関数を得たのちには、シュレーディンガー方程式を介して三核子間の相互作用を決定する。ただし、三体力は、二体力の寄与を取り除いたものとして定義されるため、別途同じ格子 QCD セットアップで二体力も計算しておき、その効果を差し引くことで三体力を決定する。

4. 研究成果

本研究の成果は、(1) 数値計算上の新アルゴリズムの開発 (2) 多体力計算の場の理論に基づく定式化 (3) 上記 (1) (2) に基づく大規模数値シミュレーションによる三体力の決定に大別される。

(1) 数値計算上の新アルゴリズムの開発

三体力、あるいは一般に多体力の計算のためには、対応する相関関数の計算が必要である。例えば、三核子力の計算においては、扱うクォークの数が 9 個と多くなるため、特に縮約計算と呼ばれる部分の計算量について、二体力計算と比べ約 1000 倍という、極めて莫大な計算コストが必要であった。三体力については核子の空間配位の自由度も増えることも併せると、単純なアプローチによる典型的三体力計算は、二体力比で 1 億倍もの計算コストがかかることになり、非常に大きな問題であった。この問題について、本研究代表者は、自動縮約計算プログラムの開発、また効率的な三体力計算のための理論フレームワークの構築により、本研究以前に既に大幅な計算の高速化を達成していた。しかし、それでも三体力計算は二体力比で、典型的に 1 万倍ものコストがかかっており、研究の進展において大きなボトルネックとなっていた。

そこで本研究では計算アルゴリズムそのものを根本的に見直し、その結果、全く新しいアルゴリズムの開発・劇的な速度向上に成

功した。すなわち、縮約計算に出てくるウィック縮約とカラー・スピノル縮約を統一的に扱うことで、計算の重複を系統的に削減する手法を開発した。Unified Contraction Algorithm (統一縮約法)と名付けられたこのアルゴリズムの効果は劇的であり、三体力の計算では192倍の計算高速化が達成された。なお、四体系の計算では約2万倍、八体系の計算では10の11乗倍もの計算高速化となる。この手法は一般的なものであり、今後格子QCDが原子核物理へと適応を拡げていく際に、業界標準となるアルゴリズムであると考えている。

(2) 多体力計算の場の理論に基づく定式化

核子間相互作用・ポテンシャルは、観測量そのものではないため、どのように定義するかが問題となるが、本研究で用いるHAL QCD法のアプローチでは、観測量である散乱位相差を正しく再現することを理論的に保証する枠組みを構成することで、その定義を与えている。ここで重要なのが、NBS波動関数というものであり、その(相互作用が切れるような)漸近領域の振る舞いが散乱位相差の情報を正しく含んでいることがポイントである。しかし、本研究開始時点では、NBS波動関数の漸近形は、二体系の場合でしか知られておらず、一般の多体系での振る舞いは明らかでなかった。

そこで本研究では、三体系、あるいは一般の多体系において、まずT行列が散乱位相差の関数としてどのように記述できるかをしらべ、さらにNBS波動関数の漸近形について、上述の散乱位相差の情報を正しく持っていることを場の理論から直接証明した。これにより、格子QCDにおける三体力、あるいは多体力の計算について、明確な理論的基礎付けを与えることに成功した。ただし、現時点では、非相対論的極限という制限があるため、相対論的効果を入れた場合の理論定式化は今後の重要な課題である。

(3) 大規模数値シミュレーションによる三体力の決定

上記(1)(2)の成果を基に、三体力の大規模数値計算を行った。量子数としては、三重陽子チャネルを扱った。まず、三体力の決定手法について、従来のHAL QCD法においては、相関関数 NBS 波動関数 相互作用の決定という手順を踏む必要があったが、この場合、相関関数が基底状態へ飽和することを保証する必要があった。基底状態への飽和の実現は、核子数が増大するにつれ指数関数的に難しくなる問題であったが、HAL QCD ColI.により新しく開発された、時間依存型HAL QCD法の採用により、基底状態への飽和を必要とすることなく、相関関数 相互作用の決定が可能となった。この手法を用いるには多くの時間点での相関関数を計算する必要があり、計算コストは増大するが、上記(1)の成果

により、そのような大規模な計算が初めて可能となった。

三体力の従来の研究は、我々が行った、パイオン質量 1.1GeV 1点での計算のみであったが、本研究においてパイオン質量 0.93, 0.76 GeV での計算を行った。その結果、いずれの質量においても近距離三体斥力効果が存在することを見出し、クォーク質量依存性は(このクォーク質量領域においては)小さいことが解った。これは、高密度系で現象論的に必要とされてきた力と定性的に対応するものである。なお、先に述べたように、従来の結果と比べ、本研究では基底状態への飽和を必要としない新しい定式化での計算となっており、系統誤差が大幅に抑えられた、質的に一線を画す研究成果である点も強調しておきたい。

また、従来は格子間隔 $a=0.16\text{fm}$ のみの計算であったが、 $a=0.11\text{fm}$ の計算を行うことで、超近距離領域において離散化誤差の影響が大きいことが解った。一方で、これまで得られてきた近距離領域での三体斥力効果は、離散化による系統誤差と比較して、十分有意な結果であることが確認できた。

また、本研究の拡張として、二体力については $a=0.22\text{fm}$ の計算も行い、やはり超近距離領域において離散化誤差の影響が大きいことが解ったが、散乱長などの物理量に対しては、超近距離領域の効果は位相空間因子により抑制されるため、離散化誤差の影響は小さくなることも解った。

さらに、上述した成果の発展として、二体力の新たな計算についても研究を進めた。特に、現在、京コンピュータを用いた物理点での二体力決定という研究課題を、HPCI 戦略プログラムとして遂行中であるが、京の能力を最大限活用するためにはソフトウェアの開発が鍵となる。そこで本研究代表者は、コード開発の全体指揮を執り、三体力研究の過程で開発した Unified Contraction Algorithm の二体力計算部分への適用や、その他の工夫も併せることで、物理点大体積二体力計算についても数十倍の高速化に成功した。このコードを用いた計算は京コンピュータ上で現在進行中であるが、近日中に成果を発表できるものと見込んでいる。

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 19 件)

“Medium-Heavy Nuclei from Nucleon-Nucleon Interactions in Lattice QCD”

T. Inoue, S. Aoki, B. Charron, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H.

Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Phys. Rev. C 91, 011001(R) (2015)
DOI: 10.1103/PhysRevC.91.011001
査読有

“ Asymptotic behavior of Nambu-Bethe-Salpeter wave functions for multi-particles in quantum field theories”
S. Aoki, N. Ishii, T. Doi, Y. Ikeda and T. Inoue
Phys. Rev. D 88, 014036 (2013)
DOI: 10.1103/PhysRevD.88.014036
査読有

“ Unified contraction algorithm for multi-baryon correlators on the lattice”
T. Doi and M. G. Endres
Comput. Phys. Commun. 184, 117 (2013)
DOI: 10.1016/j.cpc.2012.09.004
査読有

“ Lattice quantum chromodynamical approach to nuclear physics”
S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 01A105 (2012),
DOI: 10.1093/ptep/pts010
査読有

“ Exploring Three-Nucleon Forces in Lattice QCD”
T. Doi, S. Aoki, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration)
Prog. Theor. Phys. 127, 723-738 (2012)
DOI: 10.1143/PTP.127.723
査読有

〔学会発表〕(計 26 件)

“ HAL QCD method for hadron interactions on the lattice ”
T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at “ Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD (MNME 2015) ”, BNL, Upton, USA, 5-6 Feb. 2015.

“ Recent development in Lattice QCD studies for Three-Nucleon Forces ”
T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at “ Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2014) ”, Hawaii, USA, 7-11 Oct. 2014.

“ Lattice in Nuclear Physics: Overview

& Outlook ”
T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at 10th European Research Conference on “ Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei (EINN2013) ” EINN2013”, Paphos, Cyprus, 28 Oct. - 02 Nov. 2013.

“ Few-baryon Interactions from Lattice QCD ”
T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at International conference on “ The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (FB20) ”, Fukuoka, Japan, 20-25 Aug. 2012.

“ Nuclear Physics from Lattice Simulations ”
T. Doi, for HAL QCD Collaboration
Invited Talk given at “ The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) ”, Cairns, Australia, 24-29 Jun. 2012.

〔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〕
計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) のウェブページ「高性能計算の扉」
<http://www.jicfus.jp/field5/jp/promotion/hpcdoor/>
にて、スパコン利用上の有用な情報を公開

6. 研究組織

(1)研究代表者
土井 琢身 (DOI, Takumi)
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員
研究者番号： 70622554

(2)研究分担者
無し ()

研究者番号：

(3)連携研究者
無し ()

研究者番号：