

令和元年6月13日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06002

研究課題名(和文)量子色力学を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究

研究課題名(英文) Fundamental study towards understanding of nucleus structure from Quantum Chromodynamics

研究代表者

山崎 剛 (Yamazaki, Takeshi)

筑波大学・数理解物質系・准教授

研究者番号：00511437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,200,000円

研究成果の概要(和文)：強い力の特徴であるクォーク・グルーオン 核子 原子核という階層構造を統一的に扱い、第一原理計算が可能な格子QCD計算から、原子核の性質を定量的に理解することが本研究の最終目標である。格子QCDを使った原子核研究は、まだ初期段階であるため、本研究では最も小さな原子核である重陽子の束縛エネルギー計算を実施した。得られた結果は、まだ大きな誤差が付いているが実験値から予測される値と良く一致した。また、原子核内部構造の基礎研究のために行った、パイ中間子及び核子形状因子計算からは実験値を再現する結果が得られた。その他にも、格子QCDを用いた散乱振幅の新しい計算方法の開発も実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

原子核は核子間の強い力により核子多体系束縛状態として存在している。このことは実験的に良く知られているが、強い力の第一原理であるQCDを用いて理解する事は非常に難しい。そのため、クォークが素粒子の地位を確立した現在でも、原子核の理論研究には核子を有効自由度とした模型計算が多く用いられている。本研究成果は、この状況を打破し、有効模型計算を用いずに、強い力の第一原理計算から原子核の性質を理解するための基礎を構築する上で非常に重要なものである。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this project is to quantitatively understand the properties of nuclei, such as their mass and structure, from the first principle calculation of Quantum Chromodynamics (QCD), i.e., lattice QCD, which can directly calculate the characteristic structure of QCD, such as quark and gluon nucleon nucleus. We calculated the binding energy of the deuteron, which has the smallest mass number, because the nucleus study from lattice QCD is at an initial stage. The result is in good agreement with the expected value from the experiment, although the error is still large. It is an encouraging result to lay the foundation of the nucleus study from lattice QCD. Furthermore, we carried out calculations for the pion and nucleon form factors, which can be regarded as a pilot study for nucleus structure calculation. The results from those calculations agree with the experiments. Moreover, we proposed a new method to calculate scattering amplitudes using lattice QCD.

研究分野：素粒子理論

キーワード：格子QCD

1. 研究開始当初の背景

原子数の小さな原子核は核子間の強い相互作用により核子多体系束縛状態として存在している。このことは実験的に良く知られているが、強い相互作用の第一原理である、クォークとグルーオンにより記述されている量子色力学(QCD)を用いて理解する事は非常に難しい。そのため、クォークが素粒子の地位を確立した現在でも、原子核の理論研究には核子を有効自由度としたモデル計算が多く用いられている。本研究の最終目標はそのような有効モデル計算を用いずに、クォーク・グルーオンを自由度とした強い相互作用の第一原理計算から未知の原子核の性質や構造を定量的に理解する事である。

強い相互作用の第一原理計算が可能な格子 QCD を用いた原子核計算は 2010 年に我々により開始された(引用文献)。しかし、研究開始当初までの研究(引用文献)では計算に用いたパイ中間子質量が現実よりも数倍大きいなど、いくつかの系統誤差が含まれた計算であったため、軽原子核の束縛エネルギーでさえも実験値を再現できていなかった。束縛エネルギーは最も基本的な物理量であるので、既知の実験値を再現できないことは、未知の原子核研究を行う上で大きな障害となっていた。

また、束縛エネルギーの次に研究目標となるのが、原子核内部構造に関する物理量である形状因子である。この計算は束縛エネルギー計算よりも複雑である。さらに、軽原子核計算の基礎となる核子形状因子でさえ、多くの格子 QCD 計算では実験値との不一致が見られていた(引用文献)。その状況で、我々が行っていた現実的パイ中間子質量近傍かつ大体積を用いた核子形状因子計算では、大きな誤差についてはいたが、実験値と一致する結果が見られていた。

2. 研究の目的

(1) 格子 QCD 計算から得られる軽原子核束縛エネルギーと実験値の不一致は、計算に含まれる系統誤差が原因である。この系統誤差の調査から、実験値との不一致の原因を明らかにし、系統誤差を取り除いた計算から実験値を再現できるかを検証した。

(2) 軽原子核形状因子計算の基礎を固めるため、核子形状因子および中間子形状因子の計算により、形状因子計算の知識と経験を蓄積する。同時に、各々の形状因子で主要な系統誤差を取り除いた計算を行い、実験値との精密な比較を行った。

(3) 格子 QCD 計算から原子核研究を行うには、束縛状態だけでなく核子多体系散乱状態も重要であり、それらを総合して理解する必要がある。また、近年の格子 QCD 計算の傾向である、現実的パイ中間子質量かつ大体積での計算に対応するため、ハドロン散乱の新しい計算方法の開発を行った。

3. 研究の方法

強い相互作用の第一原理計算が可能である格子 QCD を用いて研究を行った。格子 QCD は大型並列計算機を用いたモンテカルロシミュレーションにより、結合定数の大きさに依らない QCD の非摂動的計算を行うことができる。格子 QCD を用いた各課題の具体的な方法は以下にまとめる。

(1) これまでの軽原子核束縛エネルギー計算の主要な系統誤差は、現実よりも大きなパイ中間子質量であると考えられる。その影響を調べるため、現実のパイ中間子質量 135 MeV に極めて近い質量での計算を行い、実験値を再現できるかを検証した。この計算には、HPCI 戦略プロジェクト分野 5 課題 1 の元で、パイ中間子質量 146 MeV かつ体積(8.1 fm)³のパラメータで、京コンピュータを用いて生成されたゲージ配位(以下 HPCI 配位)(引用文献)を利用した。

その他の系統誤差として励起状態の寄与が考えられる。励起状態の寄与を取り除くための信頼性の高い計算を行うには、これまでの計算よりも多くの計算コストがかかる(引用文献)。そのため、現実的パイ中間子質量での励起状態起因の系統誤差調査は不可能であったため、現実よりも大きなパイ中間子質量を用いた超高精度計算により、この系統誤差の調査を行った。

(2) パイ中間子形状因子計算の主な系統誤差は、軽原子核計算と同じく大きなパイ中間子質量である。パイ中間子形状因子から得られる荷電半径は、パイ中間子質量に強く依存するため、

これまでの計算では大きなパイ中間子質量での格子 QCD 計算からの外挿により、実験値との比較を行っていた。この外挿が系統誤差を生む可能性は排除できない。厳密な実験値との比較には、現実的パイ中間子質量近傍での計算が不可欠であり、この計算を実施した。

核子形状因子計算でも同じく、現実より大きなパイ中間子質量が主要な系統誤差となるが、それ以外に励起状態からの系統誤差についても調査が必要である。核子形状因子計算では、これら二つの系統誤差を取り除くことを目標とした計算を行った。

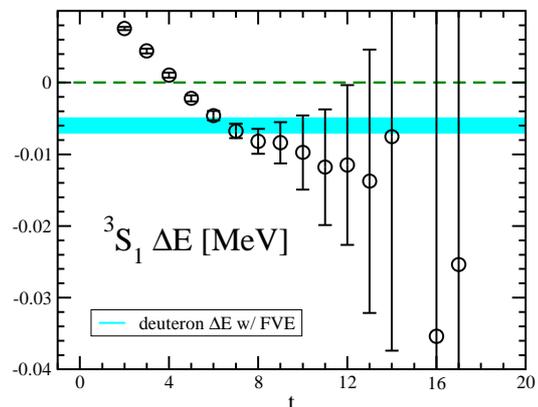
中間子及び核子形状因子計算では、上記(1)と同じく HPCI 配位を用いた。さらに、課題代表と協力研究者①～⑦が所属する格子 QCD 研究グループ PACS Collaboration で生成した現実的パイ中間子質量かつ HPCI 配位より大きな体積(10.1 fm)³ で生成された配位(以下 PACS10 配位) (引用文献)も用いて計算を実施した。

(3) 格子 QCD 計算からハドロン散乱物理量を求める方法として有限体積法がある。この方法は、有限体積上の二体系エネルギーから散乱位相差を求める方法であり、多くの格子 QCD 計算で利用されている。この方法で用いられる公式の導出には量子力学(引用文献)が用いられ、その後、場の量子論を用いた同様の議論から同じ公式が導出されることが示された(引用文献)。この議論を進展させ、新しい散乱物理量の計算方法の開発を行った。

さらに、我々の提案した方法を実際のハドロン散乱系に応用し、有限体積法と一致する結果が得られるかを検証した。この計算は、初めての試みであるため、計算が容易な大きなパイ中間子質量を用いて実施した。

4. 研究成果

(1) HPCI 配位を用いた軽原子核束縛エネルギー計算は、核子 4 体までの原子核、ヘリウム 4、ヘリウム 3、重陽子について計算を行った。この計算は、パイ中間子質量が小さいため、統計誤差を抑えることが非常に難しい。現在までに約 10 万測定を実行したが、ヘリウム 4 とヘリウム 3 原子核については、統計的に有意な結果を得ることができていない。一方、重陽子については、実験値を再現する結果が得られ始めている。右図に示したのは、有効束縛エネルギーであり、データが横軸の虚時間 t に依存しなくなる領域、つまり励起状態の寄与が十分抑制された領域から束縛エネルギーが得られる。統計誤差はまだ大きい、 $t=8$ 以降は t 依存性が小さくなる傾向が見え始めている。その値は、重水素束縛エネルギーの実験値をインプットとして、有限体積効果を考慮した値とよく一致している。この結果は、これまでの結果で見えていた実験値との不一致は、現実よりも大きなパイ中間子質量による系統誤差であった可能性が高いことを示唆している。これは、現実的パイ中間子質量近傍の計算として、初めて実験値から予測される結果を再現するものであるが、明確な結論を得るためにはまだ統計誤差が大きい。今後も統計誤差を小さくした結果から検証を行うため、この研究を継続する予定である。



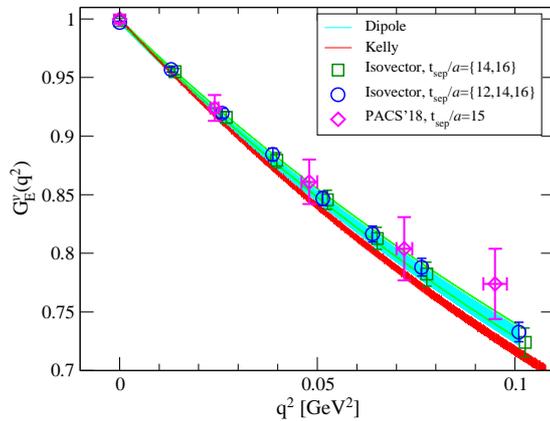
励起状態の系統誤差については、現実より約 6 倍大きな質量である 800 MeV パイ中間子を用いた高精度計算により調査を行った。励起状態は、計算に用いる演算子によって系統誤差の大きさが異なるので、二つの演算子を用いた計算の比較を行った。その結果、異なる演算子から得られた重陽子の有効束縛エネルギーは、励起状態の寄与が残る、小さな t の領域では異なる値を取るが、 t に依らない領域では一致する結果が得られた(雑誌論文)。今後、二つの結果が一致する t の領域が体積にどのように依存するかを調査していく予定である。

(2) HPCI 配位を用いたパイ中間子形状因子計算では、パイ中間子質量が小さいに起因する系統誤差が見られたが、それを取り除く解析を行い、実験値をよく再現する荷電半径が得られた(雑誌論文)。現在は PACS10 配位を用いた計算と、類似の計算により得られる K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子の計算を進めている。

核子形状因子については、大きな誤差で実験値を再現する結果が得られていた、HPCI 配位を

用いた研究成果を論文(雑誌論文)としてまとめた。この研究成果により「平成28年度実施課題におけるHPCI利用研究課題優秀成果賞」を受賞した。

その後、この結果よりも高い統計精度の結果を得るために計算方法の改良を行い、かつ励起状態の系統誤差の調査も行う、PACS10配位を用いた計算を行った(雑誌論文)。その成果の一部である電氣的形状因子の結果を右図に示す。横軸は運動量移行の二乗である。二つの異なるデータ(緑四角と青丸)を用いた解析から一致した結果が得られた。これは、励起状態の寄与が十分抑えられていることを示している。また、それらは上述のHPCI配位を用いた結果(ピンク菱形)よりも小さな統計精度で得られた。この高精度で系統誤差を抑えた計算から得られた結果は、実験値から予測される振る舞い(赤曲線)とよく一致した。この形状因子は、電子散乱と μ 粒子陽子実験で陽子荷電半径が異なる陽子サイズパズルと関連しているが、今回の計算精度では二つの実験のどちらに近い結果かを結論することはできなかった。今後、さらに統計精度をあげた計算から陽子サイズパズルの解明に挑戦していく計画である。



(3) 新しい散乱物理量計算方法は、場の量子論での有限体積法導出を参考に議論を進めた。この導出では、二体粒子波動関数を考え、二体相互作用領域の外側の振る舞いを議論していた。この議論の中に、相互作用領域の内側の二体粒子波動関数に関するものがあり、それを参考に二体粒子波動関数と散乱振幅の一般的な関係式を提案した(雑誌論文)。

この関係式から正しい散乱振幅が得られるかを検証するために、最も単純なハドロン散乱であるアイソスピン2の二体パイ中間子散乱系で、有限体積法から得られる結果との比較を行った(雑誌論文)。この計算は試験的計算であったため、パイ中間子質量は520~860 MeVを用いた。その結果、二つの方法から得られた質量殻上散乱振幅に対応する散乱位相差が一致することがわかった。また、我々の提案した方法では質量殻上だけでなく、半質量殻外の散乱振幅も計算可能であるため、その計算も初めて実行し、良い統計精度で計算が可能であることを示した。この計算は始まったばかりなので、半質量殻外散乱振幅の物理的意味などの理解は進んでいない。今後、半質量殻外散乱振幅から散乱の情報が得られるかについて、検討を進めていく。

<引用文献>

- T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Physical Review D(Rapid Communication), 81, 111504, 2010
 T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Physical Review D, 84, 054506, 2011; T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Physical Review D, 86, 074514, 2012; T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa, Physical Review D, 92, 1, 014501, 2015
 T. Yamazaki et al. for RBC-UKQCD Collaboration, Physical Review D, 79, 114505, 2009
 K.-I. Ishikawa et al. for PACS Collaboration, Proceedings of Science, LATTICE2015, 075, 2016
 M. Luscher and U. Wolff, Nuclear Physics B, 339, 222, 1990
 K.-I. Ishikawa et al. for PACS Collaboration, Physical Review D, 99, 1, 014504, 2019
 M. Luscher, Nuclear Physics B, 354, 531, 1991
 S. Aoki et al for CP-PACS Collaboration, Physical Review D, 71, 094504, 2005

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

- E. Shintani, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, T. Yamazaki for PACS Collaboration, “Nucleon form factors and root-mean-square radii on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point”, Physical Review D, 99, 1, 014510, 1-23, 2019, 査読有
 DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.99.014510>
 Y. Namekawa, T. Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function

inside the interaction range”, Physical Review D(Rapid Communication), 98, 1, 011501, 1~5, 2018, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.98.011501

K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, N. Tsukamoto, A. Ukawa and T. Yamazaki for PACS Collaboration, “Nucleon form factors on a large volume lattice near the physical point in 2+1 flavor QCD”, Physical Review D, 98, 7, 074510, 1~23, 2018, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.98.074510

T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi for PACS Collaboration, “Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass”, EPJ Web Conference, 175, 05019, 1~8, 2018, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/201817505019

T. Yamazaki, Y. Kuramashi, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, Physical Review D, 96, 11, 114511, 1~6, 2017, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.96.114511

J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Electromagnetic pion form factor near physical point in Nf=2+1 lattice QCD”, Proceedings of Science(LATTICE2016), 160, 1~7, 2017, 査読有

DOI:http://dx.doi.org/10.22323/1.256.0160

[学会発表](計 46 件)

山崎剛, “Lattice QCD studies on nucleon form factors”, KEK 研究会:「QCD と核子構造の進展 2019」, 2019, 招待講演

T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range”, XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics, 2018, 招待講演

山崎剛, “格子 QCD における Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱位相差の新しい計算方法”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018, 企画講演

T. Yamazaki, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, Multi-Hadron Systems from Lattice QCD, 2018, 招待講演

T. Yamazaki, “Binding energy of light nucleus from lattice QCD”, QCD Downunder 2017, 2017, 招待講演

[その他]

受賞

平成 28 年度実施課題における HPCI 利用研究課題優秀成果賞
利用研究課題名「格子 QCD を用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究」
課題代表者 山崎 剛

6. 研究組織

(1) 研究協力者

研究協力者氏名: 滑川 裕介

ローマ字氏名: (NAMEKAWA, Yusuke)

研究協力者氏名: 藏増 嘉伸

ローマ字氏名: (KURAMASHI, Yoshinobu)

研究協力者氏名: 佐々木 勝一

ローマ字氏名: (SASAKI, Shoichi)

研究協力者氏名: 石川 健一

ローマ字氏名: (ISHIKAWA, Ken-ichi)

研究協力者氏名: 新谷 栄悟

ローマ字氏名: (SHINTANI, Eigo)

研究協力者氏名: 賀数 淳平

ローマ字氏名: (KAKAZU, Junpei)

研究協力者氏名: 塚本 夏基

ローマ字氏名: (TSUKAMOTO, Natsuki)

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。