

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800138

研究課題名(和文)量子色力学を基にしたクォーク多体系としての原子核の研究

研究課題名(英文)Study of nucleus as multi body system of quarks based on quantum chromodynamics

研究代表者

山崎 剛 (Yamazaki, Takeshi)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：00511437

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：強い相互作用の第一原理計算(格子量子色力学計算)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。

これまでの計算では、既知の軽原子核束縛エネルギーを再現できていなかった。その原因は、現実よりも重いクォークを用いたためであると考えられる。この予想を確かめるため、これまでの計算よりもさらに軽いクォークを用いて計算を行ったが、実験値を再現する傾向は見られなかった。このことから、原子核計算には現実的なクォーク質量での計算が極めて重要であることが予想される。この結果を踏まえ、今後の展望として、現実のクォーク質量に非常に近いパラメータでの軽原子核計算を行う必要がある。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this project is to understand properties of nucleus quantitatively from the first principle calculation of the strong interaction, which is lattice QCD numerical calculation.

In previous calculations, the binding energy for the known light nuclei have not been reproduced from lattice QCD calculation. A reason of this problem is considered to be heavier quark used in the calculations than the physical one. In order to check this expectation, a calculation with lighter quark than the previous calculations is carried out. However, a tendency of the binding energy approaching to the experimental result has not been observed in the calculation. This means that a calculation at the physical quark mass is expected to be important to reproduce the experimental binding energy. Thus, for a future work, it is necessary to calculate light nucleus binding energy at near the physical quark mass.

研究分野：素粒子論

キーワード：素粒子論 数値計算 格子QCD

1. 研究開始当初の背景

原子数の小さな原子核は少数の核子により構成されている。これらは核子間の強い相互作用により核子少数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れとは異なり、大型計算機を用い、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である、格子QCD計算から原子核の性質を定量的に理解する事である。

しかし、格子QCD分野では原子核、または多体核子束縛状態の研究はあまり進んでおらず、2009年以前は、原子核(核子束縛状態)についての研究は報告されていなかった。この理由の一つに、膨大な計算コストがある。原子核直接計算では、クォーク場で構成された原子核演算子の相関関数から束縛エネルギーを計算する。この相関関数計算を行うには、すべての可能なクォーク場の縮約が必要があり、その数は原子核に含まれるクォーク数の階乗で多くなっていく。この数は、例えばヘリウム4原子核の場合でさえ、約50万という膨大な数であり、効率的なクォーク縮約計算の方法がなかったため2009年以前には、軽原子核の計算は行われなかった。

この状況を打破し、強い相互作用の第一原理計算から定量的に原子核を理解するための第一歩として、効率的なクォーク縮約計算を提案することで計算コストの問題を解決し、ヘリウム4、ヘリウム3原子核について計算を行い、世界で初めて、それらの原子核が形成されることを示唆する結果を得た[参考文献]。それに続き、二体核子系原子核についても同様の計算を行い、核子2個の原子核も形成されるという結論を得た[参考文献]。また、これらの研究では、各軽原子核の束縛エネルギーも計算し、実験値と同じオーダーの結果を得た。これらの結果は、現実よりも非常に重いクォーク(現実世界はパイ中間子質量140MeVに対し、この計算ではパイ中間子質量800MeV)を用いた計算から得られたものであったが、試験的な計算としては、良好な結果であった。

その後、この試験的計算よりも、現実世界に近いクォーク質量に対応するパイ中間子が500MeVで、かつ、アップ・ダウン・ストレンジクォークの真空編極効果を取り入れた2+1フレーバーQCDで軽原子核計算を行い、このクォーク質量でも、ヘリウム4原子核、ヘリウム3原子核、重水素が形成される事を示し[参考文献]、上記試験的計算と同様の結果を得た。

以上が、これまでの研究での好ましい結果である。しかし、一方で、これらの計算では、

自然界には存在しない二中性子原子核が形成される結果が得られており、その原因は明確になっていなかった。

2. 研究の目的

(1) 上述のように、本研究開始当初までの研究では、現実世界と同じ軽原子核が形成され、実験で精密に測定されている束縛エネルギーと同じオーダーの結果が得られていた。しかし、二中性子原子核が形成されるという、現実世界と大きく異なる結果も得られており、その原因の特定は、格子QCDを用いた原子核直接計算を発展させる上で、極めて重要な課題であった。

この問題の原因は、計算に含まれる系統誤差である。この系統誤差としては、例えば、現実よりも重いクォーク、有限格子間隔、励起状態の寄与、などに起因するものがある。この中で、最も大きな不定性を与えるのは、重いクォークと考えられるため、これまでよりも軽いクォークを用いた計算を行い、二中性子原子核が消失するかどうかを調べることが目的とした研究を行った。同時に、これまでの計算との比較から、クォーク質量を変化させたときに、束縛エネルギーがどのように変化するかにも注目した。

(2) 上記課題以外の格子QCD原子核直接計算の課題として、これまでよりも大きな原子数の原子核計算があげられる。我々が提案した効率的なクォーク縮約の計算方法[参考文献]は、各フレーバーのクォーク数が最大6個という条件が付いていた。そのため、計算可能な原子核に制限があり、ヘリウム4原子核がこの方法で計算できる最大の原子核であった。この制限を取り除き、これまでの方法よりも大きな原子数の原子核を扱える、一般的な原子核計算方法の開発を目指した。

(3) 今後の研究の進展により、最も基本的な物理量である束縛エネルギーが実験値を再現し、格子QCDを用いた原子核直接計算の信頼性が確かめられた場合、次に行う研究は、原子核の空間的広がり、つまりその内部構造を調べることである。この目的のため、ハドロン内部構造と密接に関係している形状因子に注目した。

原子核形状因子の研究は、原子核束縛エネルギー計算よりも難しいため、現状ではいきなり実行することはできない。そこで、その基礎研究として、原子核ではなく、その構成要素である核子、またはパイ中間子に対する形状因子の計算を行い、形状因子計算の方法の理解と、経験を蓄積することを目的とした研究を行った。

3. 研究の方法

(1) これまでの計算よりも軽いクォークを

用いた計算のために、本計算専用パイ中間子質量 300MeV での 2+1 フレーブ QCD ゲージ配位生成を行った。有限体積上の束縛状態識別のため、複数の体積で束縛エネルギー計算が必要である。そのため、一辺が 4.3fm と 5.8fm に対応する 2 つの体積のゲージ配位を用意した。その配位を用いて、ヘリウム 4 原子核、ヘリウム 3 原子核、重水素および中性子原子核の計算を行った。これらの計算はこれまでのものと同じなので、計算コードは既存のものを利用した。

さらに軽いクォークでの計算のため、パイ中間子質量 145MeV に対応する、ほぼ現実のクォーク質量での原子核計算にも挑戦した。このパラメータでのゲージ配位生成には、極めて大きな計算機資源が必要であるため、HPCI 戦略プロジェクト分野 5 課題 1 の元で、京コンピュータを用いて生成されたゲージ配位を利用し、計算を行った。

(2) 原子核相関関数の効率的な計算方法を初めて提案したのは我々の論文[参考文献]であるが、その後、それを発展させ、より効率の良い計算方法が提案された[参考文献]。それらの方法を参考に、ヘリウム 4 原子核よりも大きな原子核を計算可能な方法の開発を目指した。

(3) 核子形状因子とパイ中間子形状因子の計算はどちらも、筑波大学のグループでは近年行われていなかったため、計算コードの作成から始めた。これらのコードを用いた計算結果が正しいかの検証は、これまでの計算の結果との比較により行った。この検証の後、上で述べた現実のクォーク質量に極めて近いパラメータでの核子形状因子計算およびパイ中間子形状因子計算を開始した。

4. 研究成果

(1) 格子 QCD 計算では、クォーク質量が小さくなるほどモンテカルロシミュレーションの統計的揺らぎが大きくなり、かつクォーク伝搬関数の計算に多くの時間がかかるため、以前のパイ中間子 500MeV の計算よりも、300MeV での計算には多くの計算時間がかかった。同じ体積で比較すると、測定数だけで 5~12 倍の計算量が必要であり、さらにゲージ配位生成とクォーク伝搬関数の計算時間を含めると、非常に多くの計算時間が必要になった。

有限体積上での束縛状態識別のため、束縛エネルギーの体積依存性を調べた。無限体積の極限で束縛エネルギーが有限の値を取れば、その状態は束縛状態、つまり原子核であると言える。典型的な束縛エネルギーの体積依存性である重水素の結果を図 1 に示す。これまでの計算を含め、すべての原子核で、束縛エネルギーの有限体積効果は小さく、無限体積極限では有限の束縛エネルギーが

得られた。これにより、計算で得られた状態は、束縛状態であることが示され、このパイ中間子質量でも原子核が形成されたと結論付けた。

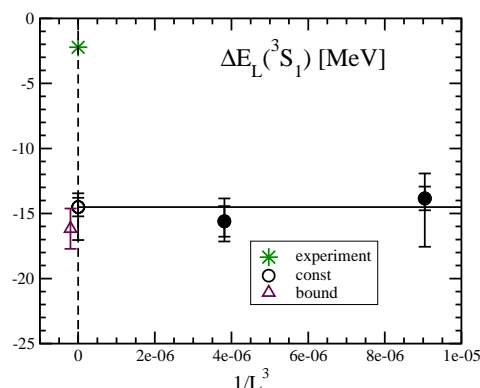


図 1. 重水素の束縛エネルギーの体積依存性。横軸は体積の逆数。実線は定数フィットによる無限体積への外挿。星印は実験値。

図 2 には、これまでの他グループの結果も含め、重水素の束縛エネルギーをパイ中間子質量の二乗の関数としてまとめた。この図が示すように、パイ中間子質量が一番小さな本計算結果からは、実験値へ近づく傾向は得られず、これまでのパイ中間子質量 500MeV の計算と同様の結果が得られた。この傾向は、ヘリウム 4 原子核、ヘリウム 3 原子核でも同じである。また、これまでと同じく、中性子原子核についても形成される結果が得られた。これらの研究成果は、下にまとめた 5. [雑誌論文] に掲載された。

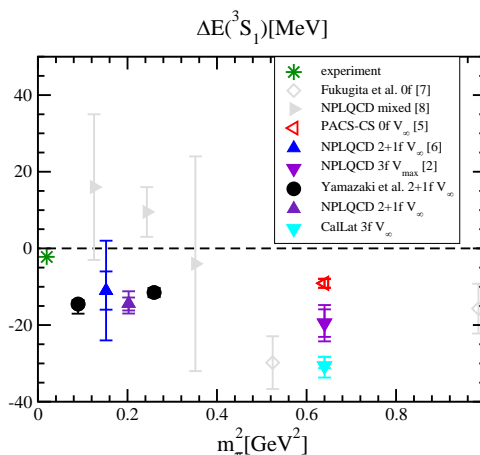


図 2. 重水素束縛エネルギーのパイ中間子質量二乗依存性。灰色は束縛状態未識別のデータ。左の黒印が本計算結果。星印は実験値。

まとめると、本研究で行ったパイ中間子質量 300MeV での軽原子核計算からは、実験値を再現する傾向は得られなかった。つまり、実験値を再現するためには、より現実に近いパイ中間子質量での計算が極めて重要であ

ると考えられる。

この予想が正しいかを確かめるために、現実的なパイ中間子質量に非常に近いパラメータでの計算を開始した。この計算の統計揺らぎは非常に大きく、統計的に有意な結果はまだ得られていないが、今後もこの計算を継続していく予定である。

(2) これまでに提案された計算方法を参考に、我々の方法を再検討したところ、パウリの排他律を考慮することで、さらに計算コストを抑えることができることがわかった。この方針で、これまでよりも大きな原子数の原子核を計算する方法が開発できるはずである。しかし、上記の計算結果と実験結果との違いが解決しなければ、いくら大きな原子核を計算しても、その計算結果の信頼性があるとは言い難い。そのため、この計算方法の開発を一旦中断し、上記の研究結果(1)の計算を優先的に進めることにした。

(3) 形状因子計算は原子核構造へ向けた研究の基礎研究であるが、それ自体で十分意味のある研究である。そのため、原子核束縛エネルギー計算とは独立に研究を進めた。

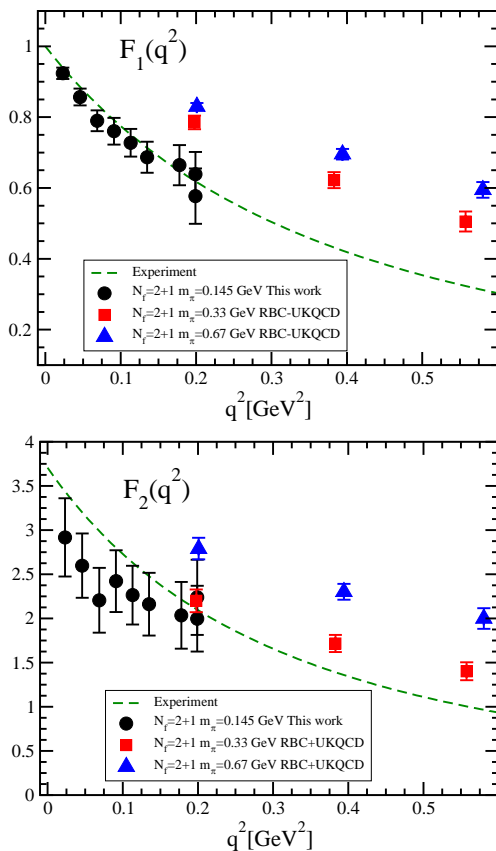


図 3. ベクトル流形状因子 F_1 と F_2 。黒丸は本研究での結果。赤四角と青三角は、[参考文献]の結果。破線は実験から予測される結果。

これまでの核子形状因子計算では、実験値

を完全に再現する結果は得られていない。その主要な原因は、現実よりも重いクォーク質量による系統誤差であると考えられている。この系統誤差を十分抑えるため、現実のクォーク質量に非常に近い、パイ中間子質量 145MeV での核子形状因子の計算を行った。この計算から得られたベクトル流形状因子、ディラック形状因子(F_1)とパウリ形状因子(F_2)の中間結果を図 3 に示す。比較のため、これまでの格子 QCD 計算の結果の例として、パイ中間子質量が 0.67、0.33GeV での結果[参考文献]も載せた。これまでの重いクォーク質量での結果は、実験値よりも大きな値を取る傾向がある。一方、本計算結果はそれよりも小さな値が得られた。また、特にディラック形状因子では、破線で示す実験値とは大きな誤差の範囲で一致する、非常に好ましい結果が得られた。実験値を再現できるかの検証のためには、統計誤差を小さくした時に、実験値と一致する結果が得られるかが重要であり、今後も統計誤差を小さくするために計算を継続していく予定である。

パイ中間子形状因子計算についても、パイ中間子質量 145MeV での計算を開始しているが、まだ統計的に有意な結果は得られていない。今後計算を継続し、結果が一通りそろった段階で、論文として成果をまとめ、学術雑誌へ投稿する予定である。

<参考文献>

T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa (PACS-CS Collaboration), "Helium nuclei in quenched lattice QCD", Physical Review D, 81, 111504(R), 1~4, 2010.

T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa (PACS-CS Collaboration), "Two-nucleon bound states in quenched lattice QCD", Physical Review D, 84, 054506, 1~14, 2011.

T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa, "Helium nuclei, deuteron and dineutron in 2+1 flavor lattice QCD", Physical Review D, 86, 074514, 1~9, 2012.

例えば, Jana Günther, Balint C. Toth, Lukas Varnhorst, Physical Review D, 87, 9, 094513, 1~13, (2013).

T. Yamazaki et al. (RBC-UKQCD Collaboration), Physical Review D 79, 114505, 1~20, (2009).

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 6 件)

T. Yamazaki for PACS Collaboration,
“Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”,
Proceedings of Science, LATTICE2015, 081, 1~7, 査読有, 掲載決定,
<https://arxiv.org/pdf/1511.09179v2.pdf>

T. Yamazaki,
“Hadronic Interactions”,
Proceedings of Science, LATTICE2014, 009, 1~20, 2015, 査読有,
http://pos.sissa.it/archive/conferences/214/009/LATTICE2014_009.pdf

T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa,
“Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD”,
Physical Review D, 92, 1, 014501, 1~12, 2015, 査読有,
DOI:<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.92.014501>

T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, A. Ukawa,
“Multi-nucleon bound states in $N_f=2+1$ lattice QCD”,
Proceedings of Science, LATTICE2013, 230, 1~7, 2014, 査読有,
http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/230/LATTICE%202013_230.pdf

[学会発表](計 30 件)

招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,
“Nucleon form factors and light nuclei in $N_f=2+1$ lattice QCD”,
RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016, Brookhaven National Laboratory, ニューヨーク(アメリカ), 2016年3月9日.

招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,
“Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”,
5th International Workshop on Lattice Hadron Physics, the Conference Centre of the Cairns Colonial Club Resort, ケアンズ(オーストラリア), 2015年7月23日.

招待講演: Takeshi Yamazaki,
“Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD”,
Lattice Nuclei Nuclear physics and QCD -Bridging the gap-, European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, トレント(イタリア), 2015年7月6日.

招待講演: Takeshi Yamazaki,
“Light nuclei from lattice QCD”,
Multi-Hadron and Nonlocal Matrix elements in Lattice QCD, Brookhaven National Laboratory, ニューヨーク(アメリカ), 2015年2月6日.

招待講演: 山崎 剛,
“格子 QCD を用いた原子核直接計算”,
RCNP workshop “QCD を基礎とする核子多体系物理の理解”, 大阪大学, 大阪府大阪市, 2014年12月20日.

招待講演: Takeshi Yamazaki,
“Light nuclei from lattice QCD”,
Advances and perspectives in computational nuclear physics, Hilton Waikoloa Village, ハワイ(アメリカ), 2014年10月6日.

招待講演: 山崎 剛,
“hadronic interaction and beyond standard model from lattice gauge theory”,
素粒子物理学の進展2014, 京都大学基礎物理学研究所, 京都府京都市, 2014年7月31日.

基調講演: Takeshi Yamazaki,
“Hadronic interactions”,
The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory(lattice 2014), Columbia University, ニューヨーク(アメリカ), 2014年6月24日.

[その他]

ホームページ等
計算化学連携拠点「月刊 JICFuS」
<http://www.jicfus.jp/jp/promotion/pr/mj/2014-1/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 剛 (YAMAZAKI, Takeshi)
筑波大学・数理物質系・准教授
研究者番号: 00511437