

課題名 (タイトル) :

## 格子 QCD を用いた軽い原子核の直接計算

利用者氏名 :

○山崎 剛\*

蔵増 嘉伸\*

所属 :

\*計算科学研究機構 研究部門 連続系場の理論研究チーム

## 1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

本課題研究は、課題共同研究者に加え、計算科学研究機構 連続系場の理論研究チーム 石川 健一客員研究員、同機構 宇川 彰副機構長と数年前から継続して行っている研究の一部である。

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質量数の小さな原子核の性質を、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD (格子量子色力学) を用いて、定量的に理解することを本研究の大きな目的とする。この研究はクォーク・グルーオン→陽子・中性子→原子核と言った異なるエネルギースケールの物理を、素粒子標準模型の強い相互作用の第一原理である QCD から理解する事を目指さず、非常に挑戦的な研究である。

しかし、この研究はまだ初期段階であり、現段階での目標は既知の軽い原子核の束縛エネルギーの再現及び、魔法数等の原子核の基本的な性質の定量的理解である。格子 QCD 計算により、束縛エネルギー等の基本的な物理量を再現できれば、格子 QCD を用いた原子核計算の信頼性が確かめられるはずである。この初期段階の目標の達成は、その後に計画している中性子過剰核等の未だに性質の良く理解されていない原子核を研究するための基礎となるため、原子核を QCD から直接計算する研究を進展させていくために、非常に重要である。

上で述べたように格子 QCD を用いた原子核直接計算はまだ新しい分野であり、2009 年以前は最も簡単な原子核である重水素の計算ですら報告されていなかった。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、2009 年から軽い原子

核に注目した研究を開始した。最初の計算は試験的なものであり、現実世界(パイ中間子質量 135MeV)よりもクォーク質量がかなり重いパラメータ(パイ中間子質量が 800MeV)で計算を行った。その結果、この重いクォークの世界では、ヘリウム 4、ヘリウム 3、重水素が形成される事を示した[1, 2]。それらの束縛エネルギーの結果は、実験値と同じオーダーであり、試験的計算としては良好の結果を得た。また、クォーク質量が重い世界では、実験では観測されていない二中性子原子核が形成されることも示唆した[2]。その後、現実のパイ中間子よりは重い、この試験的計算よりも現実に近いパラメータでの計算を行い、上記と同様の結果が得られることを確認した[3, 4]。これらの結果は、異なるパイ中間子質量で計算を行ったアメリカの 2 グループ[5, 6]により、定性的に正しいことが確認されている。

しかし、定量的には実験値よりも大きな束縛エネルギーが得られており、その原因は未だ不明である。また、現状では計算に用いたパイ中間子質量が現実世界と比べ大きい事による系統誤差が評価できていないため、我々のこれまでの研究で得られた束縛エネルギーと実験値との直接比較はできていない。実験との比較を行うためには、現実世界に非常に近いパイ中間子質量での計算が極めて重要である。この目的のため、本申請では、京コンピュータで生成されたゲージ配位[7]である、一辺が 8.1fm という大体積(格子サイズ  $96^4$ )、かつ現実に極めて近い 145MeV パイ中間子質量での質量数 4 以下の軽原子核束縛エネルギー計算を行うことを目標にした。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

本申請を行う以前から、様々な研究所(筑波大学計算科学研究センター、東京大学情報基盤センター、理研

計算科学研究機構など)の大型計算機を用いて、本申請の目的である格子サイズ  $96^4$ 、145MeV パイ中間子質量での軽原子核計算を続けてきた。しかし、この計算は格子 QCD を用いた原子核計算の中で、最も現実に近いパラメータを採用しているため、統計誤差を抑えることが非常に難しく、満足のできる統計精度の結果を得ることができていなかった。

そこで本申請では、さらに統計をあげるために、現実に近いパイ中間子質量での原子核束縛エネルギー測定計算を継続する予定であったが、本年度の計算機利用はなかった。

### 3. 結果

計算機利用がなかったため省略。

### 4. まとめ

計算機利用がなかったため省略。

### 5. 今後の計画・展望

直近の目標は、測定数をこれまでの約 2 倍にすることであるが、この目標を達成するためには多くの計算機資源が必要なため、全国の共同利用施設の大型計算機を利用して、この目標達成を目指す。二核子系はヘリウム原子核に比べると統計精度が良いので、二核子系の計算から十分な精度で結果が得られた場合、その時点で二核子系の成果を論文としてまとめ、科学雑誌へ投稿する予定である。ヘリウム原子核については、その後も継続計算を行い、意味のある結果が得られれば、成果をまとめる方針である。

### 6. 利用がなかった場合の理由

許可された計算機資源では期待する成果を得ることが難しく、他の共同利用施設の大型計算機を利用したため。

### 参考論文

1. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa (PACS-CS Collaboration), Physical Review D81, 111504(R) (2010)
2. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa (PACS-CS Collaboration), Physical Review D84, 054506 (2011)
3. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Physical Review D86, 074514 (2012)
4. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Physical Review D92, 014501 (2015)
5. S. Beane et al. (NPLQCD Collaboration), Physical Review D87, 3, 034506 (2013)
6. E. Berkowitz et al. (CalLat Collaboration), arXiv:1508.00886
7. K.-I. Ishikawa et al. (PACS Collaboration), PoS LATTICE2015 (2015) 075

平成 28 年度 利用研究成果リスト

**【国際会議、学会などでの口頭発表】**

- 1) RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016,  
March 9-11, 2016, Brookhaven National Laboratory, New York, USA,  
Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,  
“Nucleon form factors and light nuclei in  $N_f=2+1$  lattice QCD”
  
- 2) CCS LBNL Collaborative Workshop 2016,  
May 12-13, 2016, Center for Computational Sciences at University of Tsukuba, Tsukuba, Japan,  
Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,  
“Light nuclei and nucleon form factors from  $N_f=2+1$  lattice QCD”
  
- 3) Phase structure of lattice field theories -Japanese-German Seminar 2016-,  
September 26-28, 2016, Tokimate, Nigata, Japan,  
Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,  
“Direct calculation of light nucleus from lattice QCD”
  
- 4) 第 8 回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,  
2016 年 10 月 17-18 日, 筑波大学大学会館 国際会議室, つくば,  
山崎 剛,  
“格子 QCD を用いた原子核直接計算 --素粒子物理と数値計算--”
  
- 5) First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop,  
December 12-16, 2016,  
RIKEN, Wako, and Center for Computational Sciences at University of Tsukuba, Tsukuba, Japan,  
Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration,  
“Direct calculation of light nucleus from lattice QCD”