

受付 ID	16a32
分野	素粒子分野

## 格子 QCD を用いた軽い原子核の研究

### Study of light nuclei from lattice QCD

山崎 剛

筑波大学数理物質系

#### 1. 研究目的

本研究は、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質量数の小さな原子核を、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大きな目的とする。強い相互作用には、クォーク→陽子・中性子→原子核といった異なるエネルギースケールの階層構造がある。それを素粒子標準模型の一部である QCD の第一原理計算から統一的に理解する事を目指す。

格子 QCD を用いた軽原子核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性質の定量的理解である。束縛エネルギー等の基本的な物理量を再現できる事を確認できれば、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の研究の基礎となるため、原子核を直接計算する研究にとって非常に重要である。

これまでの基礎研究では、クォーク真空偏極効果を無視するクエンチ近似を用いた、非常に重いクォーク質量(パイ中間子質量が約 800 MeV)での計算と、パイ中間子質量が 500, 300MeV での 2+1 フレーバー格子 QCD の計算を行った。しかし、計算に用いた大きいパイ中間子質量起因の系統誤差が評価できなかつたため、これらの研究で得られた束縛エネルギーは実験値と直接比較できるものではなかつた。実験との比較を行うためには、この系統誤差を取り除いた計算が極めて重要であり、この計算は本研究の大きな課題の一つである。

それ以外の系統誤差として、励起状態の寄与が考えられる。そのため、この系統誤差が束縛エネルギーに与える影響についても調査を行った。

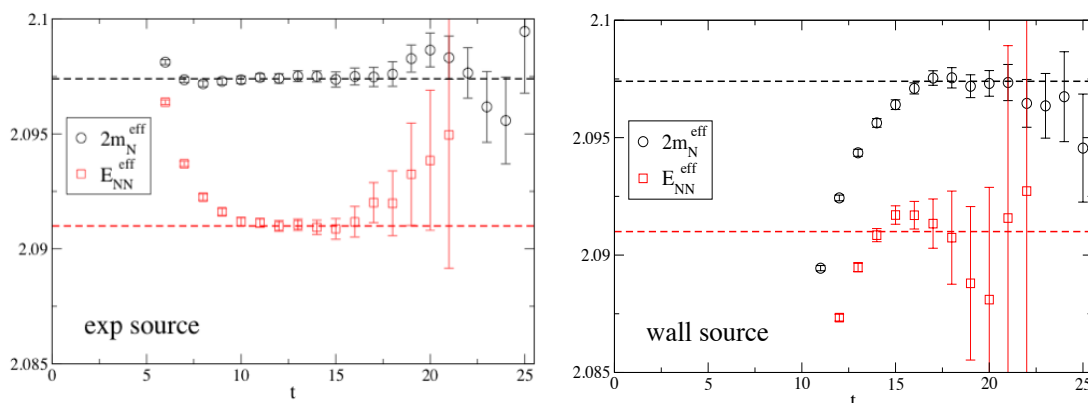
#### 2. 研究成果の内容

本申請期間では、これまでの計算に含まれていた大きなクォーク質量から来る系統誤差を取り除くため、現実世界のパイ中間子質量 135MeV に近い、145MeV のパイ中間子質量を用いた計算を行った。有限体積効果起因の系統誤差を抑えるため、一辺が 8.1fm に対応する、 $96^4$  の格子サイズのゲージ配位を用いた。この計算は平成 26 年度からの継続計算である。

格子 QCD を用いて軽原子核束縛エネルギーの測定を行うには、典型的な格子 QCD 計算よりも約 100 倍の計算量が要求される。また、大きな格子サイズ、小さなパイ中間子質量では、一般的に 1 回の測定にかかる計算時間は長くなる。さらに、パイ中間子質量が小さいと、モンテカルロシミュレーションの統計揺らぎが大きくなり、統計誤差を抑えるために、多くの測定を行う必要がある。つまり、本研究で行った、格子サイズ  $96^4$  を用いた現実

的なクォーク質量での軽原子核束縛エネルギー計算には、非常に多くの計算機資源が必要である。平成28年度は、平成27年度末までに計算した3万8千測定から、約2倍の6万4千測定まで、軽原子核束縛エネルギー計算の統計を増やした。しかし、上記理由により、これまでの計算からは統計的に有意な結果は得られなかった。特に、現在計算を行っている一番大きな原子核である、ヘリウム4原子核は統計誤差を抑えることが非常に難しいため、今後は重水素原子核(二核子系スピン三重項)に集中して計算を行っていく予定である。

励起状態の寄与については、異なる二つの演算子を用いた計算を行い、それらから得られた二核子エネルギーと2倍の核子質量について比較を行った。高精度の比較を行う為、以前の試験的計算で用いた、非常に大きなパイ中間子質量(800MeV)での計算を行った。下図に示したのは、指数型演算子(exp)とウォール型演算子(wall)での有効二核子エネルギー( $E_{NN}^{\text{eff}}$ )と2倍の有効核子質量( $2m_N^{\text{eff}}$ )である。束縛エネルギーはこの二つ値の差から得られる。異なる演算子の結果は、虚時間が小さい領域では異なる値を取るが、それぞれの結果が虚時間に依らなくなる領域では、一致することが見える。この結果から、異なる演算子から求められた結果は一致すること、つまり励起状態の寄与は、有効エネルギーと有効質量が虚時間に依らなくなる領域まで精度良く計算できれば十分抑えられていることを示した。これまでの計算は、左図に対応する演算子を用いていたので、相対的に小さな虚時間領域から励起状態の系統誤差が抑えられた結果が得られていたと考えられる。



図：異なる演算子(exp, wall型クォーク演算子)を用いた有効二核子エネルギーと有効核子質量の2倍。破線は、exp型演算子から得られた値を示す。

### 3. 今後の展望

ヘリウム4原子核束縛エネルギーについて、統計的に有意な結果を得ることは非常に難しいと考えられる。そのため、今後は二核子系原子核に注目し、原子核測定計算を継続する予定である。直近の目標は、測定数を現状の約2倍、10万測定にし、二核子系原子核について統計的に有意な結果を求めることである。また、励起状態からの寄与による系統誤差の調査についても、さらに理解を深めるため詳細な調査を行っていく予定である。

### 4. 成果発表

#### (1) 学術論文

Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa for

PACS Collaboration, “Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass”, Proceedings of Science(LATTICE2016), 108.

(2) 学会発表

1. 招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Light nuclei and nucleon form factors from  $N_f=2+1$  lattice QCD”, CCS-LBNL Collaborative Workshop 2016 (筑波大学), 2016年5月12日～13日
2. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass”, Lattice 2016 (University of Southampton, イギリス), 2016年7月24日～30日
3. 山崎剛 for PACS Collaboration, “重いクォークを用いた軽原子核直接計算の系統的研究”, 日本物理学会 2016年秋季大会(宮崎大学), 2016年9月21日～24日
4. 招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Direct calculation of light nucleus from lattice QCD”, Phase structure of lattice field theories -- Japanese-German Seminar 2016 -(ときめいと, 新潟), 2016年9月26日～28日
5. 招待講演: 山崎剛, “格子 QCD を用いた原子核直接計算”, 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(筑波大学), 2016年10月17日～18日
6. 招待講演: Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Direct calculation of light nucleus from lattice QCD”, First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics(理研/筑波大学), 2016年12月14日～16日
7. 山崎剛 for PACS Collaboration, “大きなクォーク質量での軽原子核直接計算の演算子依存性の研究”, 日本物理学会第72回年次大会(大阪大学), 2017年3月17日～20日

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
HA-PACS	○	11000
HA-PACS/TCA	○	3000
COMA	○	6480
※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。		