

受付 ID	15a-31
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

本研究では、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。この研究はクォーク→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 のみを用いて理解する事を目指す。

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見捨て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る。

2. 研究成果の内容

本申請期間では、上記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。有限体積効果起因の系統誤差を抑えるため、典型的な格子 QCD 計算よりも大きな体積である、一辺が 8.1fm に対応する、 96^4 の格子サイズで計算を行った。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。

上記理由により、昨年度末まででは統計的に有意な結果は得られなかつたが、これまでの計算で得られた約 4 万測定で解析した、現時点での暫定的な結果を下図に示す。図 1 はヘリ

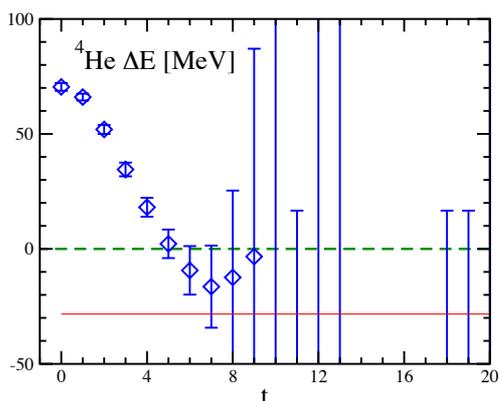


図 2 ヘリウム 4 原子核の有効エネルギー差。横軸は虚時間。赤線は実験値を表す。

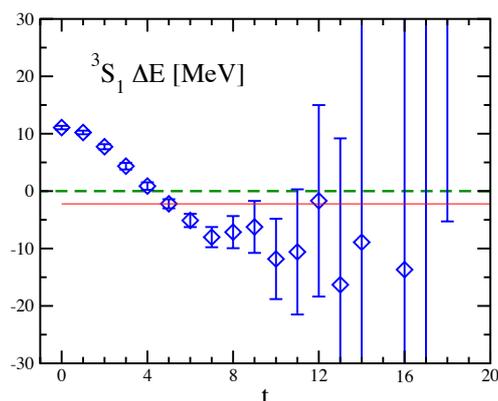


図 1 重水素の有効エネルギー差。横軸、赤線は図 1 と同じ。

ウム 4 原子核の有効エネルギー差の結果である。横軸は虚時間で、虚時間依存性がなくなる領域の有効エネルギー差が束縛エネルギーに対応する。現状では、統計誤差がまだ大きく、統計的に有意なヘリウム 4 原子核の束縛エネルギーを得られていない。

一方、図 2 に示す、重水素原子核(二核子系スピン三重項)の有効エネルギー差の結果は、ある程度大きな虚時間の領域でも、ヘリウム 4 原子核よりも統計誤差が小さな結果が得られている。しかし、実験値を表す実線とは矛盾しているように見える。この原因の一つは、重水素の束縛エネルギーは約 2MeV と非常に小さく、本計算で用いた一辺が 8.1fm という大きな体積を用いても、束縛エネルギーに対する有限体積効果が大きいためであると考えられる。重水素束縛エネルギーの有限体積効果の大きさは解析的に見積もることができるので、有限体積効果を取り除き、無限体積での束縛エネルギーを見積もる解析を今後行っていく予定である。

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ためには、原子核測定計算を継続する必要があると、今年度も継続計算を行う予定である。直近の目標は、測定数を現状の 2 倍、約 8 万測定にし、統計的に有意なエネルギー差を求めることである。また、本研究で注目した大きいパイ中間子質量以外にも、有限格子間隔や、励起状態からの寄与などによる系統誤差も調査する必要がある。今後は、現実的パイ中間子質量での計算と並行して、これらの系統誤差の調査も行っていく予定である。

4. 成果発表

(1) 学術論文

1. Takeshi Yamazaki, “Hadronic Interactions”, Proceedings of Science(LATTICE2014), 009, 2015, 査読なし
2. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, “Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD”, Physical Review D, 92, no. 1, 014501, 2015, 査読あり

3. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”, Proceedings of Science(LATTICE2015), 081, arXiv:1511.09179, 査読なし

(2) 学会発表

1. 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(イタリア、トレント), 2015年7月6日～10日
2. Takeshi Yamazaki, “Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”, Lattice2015, Kobe International Conference Center, 2015年7月14日～18日
3. 招待講演: Takeshi Yamazaki, “Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”, 5th International Workshop on Lattice Hadron Physics, Conference Centre of the Cairns Colonial Club Resort(オーストラリア、ケアンズ), 2015年7月20日～24日
4. 招待講演: Takeshi Yamazaki, “Light nuclei and nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD”, Computational Advances in Nuclear and Hadron Physics, 京都大学基礎物理学研究所, 2015年9月21日～10月30日
5. Takeshi Yamazaki, “Light nuclei and nucleon form factors from lattice QCD”, Symposium on Quarks to Universe in Computational Science, Nara Kasugano International Forum IRAKA, 2015年11月4日～8日
6. 招待講演: Takeshi Yamazaki, “Nucleon form factors and light nuclei”, RBRC Workshop on Lattice Gauge Theories 2016, Brookhaven National Laboratory(アメリカ、ニューヨーク), 2016年3月9日～11日
7. 山崎 剛, “ $N_f = 2+1$ 格子 QCD による軽原子核束縛エネルギーの計算”, 日本物理学会年次大会, 東北学院大学, 2016年3月19日～22日

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*
HA-PACS	○	8000
HA-PACS/TCA	○	2250
COMA	○	7400
※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。		