高エネルギー加速器研究機構大型シミュレーション研究成果報告書（平成 25-26 年度）

(Brief report of the program)　　　　　　　　2014 年　12　月　1　日

研究責任者名 Name	初田 哲男 Hatsuda Tetsuo	所属機関 Affiliation	理化学研究所仁科加速器研究センター
受理番号 Proposal No.	大型 13/14-22	研究課題名 Program title	格子 QCD シミュレーションによるバリオン間力の研究

研究を終了しましたので、下記の通り報告します。

成果の概要

Abstract

（和文）格子 QCD 第一原理計算により、バリオン間相互作用（核力・ハイペロン力）の研究を行った。正パリティセクタについては、パイオン質量 510MeV の点において、L=2.9-5.8fm の大体積計算を行い、二核子間力の格子体積依存性を調べた。また、wall source, smeared source の計算を行うことで、結果の source 依存性についても検証した。ハイペロン力についても同様の研究を行い、特に H-dibaryon 状態の研究を行った。負パリティセクタについては、特に反対称 LS（ALS）力の研究を行った。従来、SU(3)極限での格子計算では、ΛN 間の対称 LS 力と反対称 LS 力の相殺メカニズムが見えないという結果が得られていたが、Σ粒子の自由度を積分することで相殺メカニズムが現れる可能性を発見した。これはΛN－ΣN 結合の重要性を強く示唆するものである。三体力についてもパイオン質量 510MeV における計算を行い、より重い質量領域と同様の近距離三体斥力を見出した。

（英文）We study baryon-baryon interactions (nuclear forces and hyperon forces) from first-principles lattice QCD calculations. In the case of positive parity channel, we perform simulations at m(pi) = 510MeV with L=2.9-5.8 fm lattice volumes and study the volume dependence of nuclear forces. We also carry out calculations using wall source and smeared source and examine the source-dependence in the obtained interactions. Similar study is performed in hyperon forces and the fate of the H-dibaryon state is investigated. In the negative parity channel, we particularly focus on anti-symmetric LS (ALS) forces. We find that, although cancellation between symmetric LS forces and ALS forces in ΛN interaction does not take place in the SU(3) limit, such cancellation mechanism could be realized by integrating out the Σ degrees of freedom. This strongly suggests the importance of ΛN-ΣN coupling. We also perform the calculations of three-nucleon forces at m(pi)=510MeV, and find the short-range repulsive three-nucleon forces which are similar to those obtained at heavier quark masses.

研究成果を公開しているホームページアドレス

研究成果の 公表	口頭研究発表 件数	査読つきの 学術論文数	プロシーディング 論文数	その他 (投稿中を含む)
	34	0	6	1

成果の公表リスト（それぞれの枠に番号をつけて記入願います。）

口頭研究発表　Presentations at scientific meetings concerning the program

1. N.Ishii, “Lattice QCD approach to Nuclear Physics”, Invited talk given at 13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon(MENU2013), Rome, Italy, September 30—October 4, 2013.
2. N.Ishii, “Baryon-baryon interaction from Lattice QCD”, Invited talk given at Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminor 2013, Regensburg, Germany, November 6—8, 2013.
3. 石井理修、村野啓子、根村英克、佐々木健志、井上貴史 for HAL QCD Coll., “格子 QCD による反対称 LS 力(II)”, 日本物理学会第６９回年次大会、東海大学、2014 年 3 月 27 日.
4. 石井理修、”格子 QCD による LS 力・反対称 LS 力”、HPCI 戦略プログラム分野５シンポジウム、富士ソフトアキバプラザ、秋葉原、2014 年 3 月 3 日−4 日。
5. N.Ishii, “Hadron Physics and related topics at HPCI”, Invited talk given at Hadron Physics Symposium, Nagoya University, April 17—19, 2014.
6. N.Ishii, “Baryon-baryon interaction from lattice QCD”, Invited talk given at The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, Tsukuba, Ibaraki, Japan, July 12—15, 2014.
7. 石井理修、村野啓子、根村英克、佐々木健志、井上貴史 for HAL QCD Coll., “格子 QCD による反対称 LS 力”、研究会「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」、熱川、2014 年 9 月 25 日−27 日。
8. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Quark mass dependence of three-nucleon forces in lattice QCD” Talk given at “The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)”, New York, USA, 23-28 Jun. 2014.
9. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Baryon interactions from lattice QCD”, Invited Talk given at “KEK theory center workshop on J-PARC hadron physics in 2014”, J-PARC, Tokai, Japan, 10-12 Feb. 2014.
10. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Hadron interactions from Lattice QCD”, Invited Talk given at “The International workshop on strangeness nuclear physics (SNP2013)”, Xiamen, China, 13-15 Dec. 2013.
11. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Lattice in Nuclear Physics: Overview & Outlook”, Invited Talk given at 10th European Research Conference on ”Electromagnetic Interactions with Nucleons and Nuclei (EINN2013)”, Paphos, Cyprus, 28 Oct.- 02 Nov. 2013.
12. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Quark mass dependence of Three-nucleon forces in Lattice QCD”, Talk given at JPS meeting, Tokai University, Hiratsuka, Kanagawa, Japan, 27-30 Mar. 2014
13. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Nuclear Physics from Lattice QCD”, Invited Talk given at Workshop on “K and post-K computer and fundamental physics”, RIKEN, Wako, Saitama, Japan, 07 Jan. 2014.
14. T. Doi, for HAL QCD Collaboration, “Nuclear Physics from Lattice QCD - Current status and prospects of lattice nuclear forces -”, Invited Talk given at Workshop on the review and prospects of Innovative Areas “Fusion of Particle, Nuclear, Astrophysics”, Naruko Onsen, Miyagi, Japan, 20-21 Dec. 2013.
15.M. Yamada, for HAL QCD Collaboration, “Omega-Omega interaction from 2+1 flavor QCD” Talk given at “The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014)”, New York, USA, 23-28 Jun. 2014.
16. T. Hatsuda, “Dense QCD and Compact Stars”, Invited Lecture given at “Matter at Extreme Conditions”, Kolkata, India, 15 Jan. 2014.
17. T. Hatsuda, “Physics with Hadrons at J-PARC”, From QCD to Compact Stars”, Invited Talk given at “J-PARC Symposium 2014”, Tsukuba, 14 July, 2014
18. T. Hatsuda, “From QCD to Compact Stars”, Invited Talk given at “Advances and Perspectives in Computational Nuclear Physics”, Hawaii, 6 Oct. 2014
19. T. Hatsuda, “Zc and Tccfrom Lattice QCD with HAL QCD method”, Invited Talk given at “KEK Flavor Factory Workshop / Belle II Theory Interface Platform Meeting”, KEK, 31 Oct. 2014
20. S. Aoki, “Nuclear Force from Quarks and Gluons”, ASIAA/CCMS/IAMS/NTU-Physics Joint Colloquia, June 4, 2013, Taipei, Taiwan.
21. S. Aoki, "Hadron Interactions from lattice QCD", invited talk at Mini-workshop on Lattice QCD and Hadron Physics, June 5-7, 2013, CCMS/Physics Building, Taipei, Taiwan.

22. S. Aoki, "Nuclear Force from Quarks and Gluons", YITP Colloquium, August 29, 2013, YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan.

23. S. Aoki, "Nuclear Potentials in QCD and their Extensions", invited talk at Miniworkshop on Lattice QCD, October 18-19,2013, National Taiwan University, Taipei, Taiwan.

24. S. Aoki, "Lattice Studies for Hadron Spectroscopy and Interactions", plenary talk at XV International Conference on Hadron Spectroscopy "HADRON 2013 in Nara", November 4-8, 2013, Nara Prefectural New Public Hall, Nara, Japan.

25. 青木慎也, "Hadron interactions from lattice QCD", 招待講演、基研研究会「素粒子物理学の進展２０１３」2013 年 8 月 5-8 月 9 日、京都大学　基礎物理学研究所

26. 青木 慎也「クォーク、グルーオンから核力へ」第４１回京都大学渕研究所・センター品川セミナー、２０１３年１０月４日、京都大学東京オフィス、品川、東京

27. T. Inoue, “Nuclear matter and hyperon in matter from QCD”, iTHES & HPCI 滞在型研究会：Nuclear equation of state with strangeness,　Nov. 11, 2013, Riken, Japan

28. T. Inoue, “格子 QCD を用いた核物質研究の現状と展望”，九大分野横断型研究会 -クォーク・原子核・中性子星を俯瞰する-, ２０１４年３月５日、九州大学

29. T. Inoue, “Nuclear Equation of State from lattice QCD simulations”, 日本物理学会第６９回年次大会, ２０１４年３月２７日、東海大学

30. T. Inoue, “Medium-heavy nuclei from lattice quantum chromodynamics”, 20th Particles & Nuclei International Conference (PANIC 2014), University Hamburg, Aug 25-29, 2014

31. K. Sasaki, “Strangeness S=-2 baryon-baryon interactions on the lattice”, ECT* workshop on “Strangeness in the Universe? Theoretical and experimental progress and challenges”, ECT* Italy, Oct. 21–25, 2014.

32. K. Sasaki, “N-Xi and Xi-Xi interactions from lattice QCD”, Sixth Asia-Pacific Conference on Few-Body Problem in Physics (APFB2014), Hahndorf, Australia, Apr, 7-11, 2014.

33. K. Sasaki, “Lattice QCD study of strangeness S=-2 two-baryon stytem”, The XI th Quark Confinementand the Hadron Spectrum, Saint-Petersburg State University, Russia, Sep. 8-12, 2014.

34. K. Sasaki, “格子 QCD から導くハイペロン間相互作用の研究”、研究会「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」,熱川, 2014 年 9 月 25 日−27 日.

査読つきの学術論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載)（＊）不足する場合には追加願います。

Refereed Journal Articles (name of journal, volume, page, year)

1	著者名 Author	
	タイトル title	
	雑誌名 name of journal	
	URL	
2	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	
3	著者名	
	タイトル	
	雑誌名等	
	URL	

プロシーディング論文(雑誌名等には 巻、頁、発表年を記載)（＊）不足する場合には追加願います。
International Conference Proceedings (name of journal, volume, page, year)

1.	著者名 Author	K.Murano for HAL QCD Collaboration
	タイトル title	Quark mass dependence of Spin-Orbit force in parity-odd NN system from 2+1 flavor QCD
	雑誌名等 name of journal	PoS(LATTICE2013) (2013) ref.235, pp.1-7.
	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/235/LATTICE%202013_235.pdf
2.	著者名	N.Ishii, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki for HAL QCD Collaboration
	タイトル	The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from Lattice QCD

	雑誌名等	PoS(LATTICE 2013) (2013) ref.234,1-7.
	URL	https://inspirehep.net/record/1297697/files/LATTICE%202013_234.pdf
3.	著者名	N.Ishii for HAL QCD Collaboration
	タイトル	Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD
	雑誌名等	PoS(CD12) (2013) ref.025, pp.1-12.
	URL	https://inspirehep.net/record/1249698/files/CD12_025.pdf
4.	著者名	T. Doi for HAL QCD Collaboration
	タイトル	Cutoff effects on lattice nuclear forces
	雑誌名等	PoS LAT2013, 226 (2013)
	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/226/LATTICE%202013_226.pdf
5.	著者名	M. Yamada for HAL QCD Collaboration
	タイトル	Omega-Omega interaction on the Lattice
	雑誌名等	PoS (Lattice 2013) 232.
	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/232/LATTICE%202013_232.pdf
6.	著者名	K. Sasaki for HAL QCD Collaboration
	タイトル	Lattice QCD studies of multi-strange baryon-baryon interactions
	雑誌名等	PoS (Lattice 2013) 233.
	URL	http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/233/LATTICE%202013_233.pdf

その他（学位論文、紀要、投稿中の論文を含む）（著者、タイトル、論文種別、URL を記載） Others (thesis for a degree, bulletin, papers to be published, etc.)
1. B. Charron, “Two-Particle Channels in Lattice QCD”, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo. 2.
特記（本研究に関係した、新聞記事・著作、受賞など）（過去に遡っても構いません。） Special Notes (newspaper article, literary works, awards, etc.)
1.初田哲男、青木慎也、石井理修、文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門受賞「量子色力学の第一原理計算に基づく核力の研究」、2014 年 4 月 15 日。 2.

高エネルギー加速器研究機構
大型シミュレーション研究実施報告書
(2013/10 - 2014/09)

1 研究組織

- 研究責任者: 初田哲男 (はつだ・てつお)
- 所属機関： 理化学研究所仁科加速器研究センター・主任研究員
- 研究課題名： 格子 QCD シミュレーションによるバリオン間力の研究
- 課題グループ名： SCNFQCD
- 共同研究者

  青木慎也 (あおき・しんや) : 京都大学基礎物理学研究所・教授

  石井理修 (いしい・のりよし)： 大阪大学核物理研究センター・准教授

  根村英克 (ねむら・ひでかつ)： 筑波大学計算科学研究センター・准教授

  村野啓子 (むらの・けいこ) : 大阪大学核物理研究センター・研究員

  井上貴史 (いのうえ・たかし) : 日本大学生物資源科学部・准教授

  土井琢身 (どい・たくみ) : 理化学研究所仁科加速器研究センター・専任研究員

  佐々木健志 (ささき・けんじ) : 筑波大学計算科学研究センター・研究員

  池田陽一 (いけだ・よういち) : 理化学研究所仁科加速器研究センター・研究員

  KREJCIRIK, Vojtech(クレイチェリーク・ヴォイテーフ) : 理化学研究所仁科加速器研究センター・FPR 研究員

  CHARRON, Bruno(シャロン・ブルーノ) : 東京大学理学系研究科・博士課程修了 (理学博士)

  山田真徳 (やまだ・まさのり) : 筑波大学数理物質科学研究科・D3

  宮本貴也 (みやもと・たかや) : 筑波大学数理物質科学研究科・M2

  Etminan, Faisal (エトミナン・ファイサル)： Univ. of Birjand・D5

2　研究成果

本研究の長期的目標は、格子 QCD 第一原理計算により、核力・ハイペロン力など、バリオン間相互作用を決定することである。2013-2014 年度においては、クォーク質量が物理的質量よりも重い領域において、主として (1) 正パリティチャネルにおける核力・ハイペロン力の研究 (2) 負パリティチャネルにおける核力・ハイペロン力、特に反対称 LS(ALS) 力の研究 (3) 三核子力の研究を行った。以下、それぞれのテーマ毎に成果を報告する。

2.1　正パリティチャネルにおける核力・ハイペロン力の研究

本テーマでは、八重項バリオンに対する、一般二体バリオン間力 (NN/YN/YY 力) の研究を行った。PACS-CS Collaboration により生成された $m_\pi \simeq 510$MeV における $N_f = 2+1$ ゲージ配位 $V = 32^3 \times 48$ ($L = 2.9$fm), $40^3 \times 48$ ($L = 3.6$fm), $48^3 \times 48$ ($L = 4.4$fm), $64^3 \times 64$ ($L = 5.8$fm) を用いることで、これまでの計算よりも比較的軽いクォーク質量領域におけるバリオン間力を明らかにすると共に、格子体積依存性の研究を行った。また、特に二核子力セクターについては、当該ゲージ配位を用いたルッシャー有限体積法の研究が PACS-CS Collaboration により行われ、二核子系は ${}^1S_0$, ${}^3S_1$-${}^3D_1$ どちらのチャネルにおいても束縛するという報告がなされているため、HAL QCD 法とルッシャー有限体積法の比較も重要なテーマである。背景としては、従来、様々な格子セットアップにおける研究において、(wall source を用いた) HAL QCD 法による相互作用ポテンシャルによる解析では二核子系が非束縛という結果が報告されている一方、(smeared source を用いた) ルッシャー有限体積法による解析では、二核子系は束縛するという結果が報告されてきており、手法により束縛・非束縛の結論が異なってしまっているのではないかという問題が浮かび上がりつつあるという点が挙げられる。そこで本研究では、同一ゲージ配位により両手法を包括的に研究することで、本当に手法による結論の違いがあるのか、あるいは wall/smeared source による違いがあるのか等を探ることができる。

本研究期間では、主に $L = 2.9$-4.4 fm の wall source ゲージ配位について大規模計算を行った。なお、$L = 5.8$ fm については、Sec. 2.3 で後述する理由により、計算された統計数は少ない。また、結果の source 依存性を調べるため、$L = 2.9$ fm において exponential-smeared source の計算も行った。

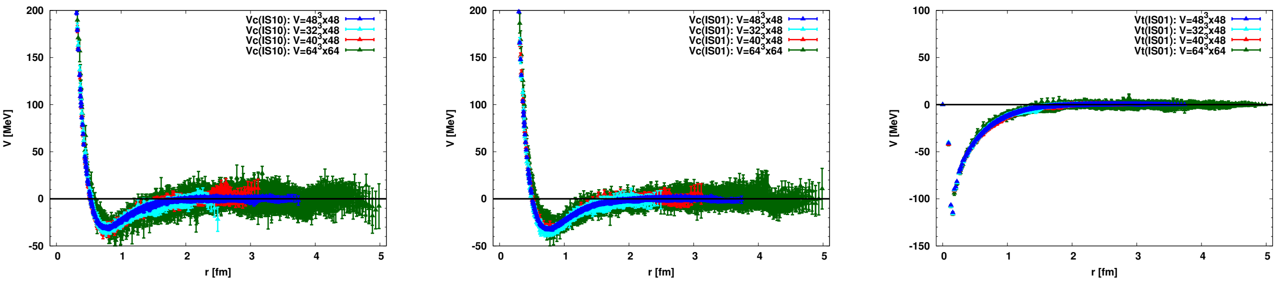

Figure 1: 二核子間ポテンシャルとその体積依存性。左から、${}^1S_0$ チャネル中心力、${}^3S_1$-${}^3D_1$ チャネル中心力、${}^3S_1$-${}^3D_1$ チャネルテンソル力。

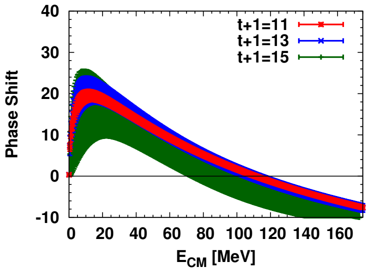

Figure 2: ${}^1S_0$ チャネルにおける二核子散乱位相差と、その sink time 依存性。

2.1.1　二核子間相互作用

図 1 は、wall source を用いて計算された、二核子間ポテンシャルの各格子体積での結果である。ここで、相関関数としては $t - t_0 = 10$ でのデータを用いた。この結果から、ポテンシャルの体積依存性は少なく、格子体積は (特に $L \gtrsim 3.6$ fm では) 相互作用をカバーするのに十分な大きさであることが解る。

このポテンシャルを二核子間距離の適当な関数によりフィットし、無限体積においてシュレーディンガー方程式を解くことで、二核子系の束縛・非束縛、また散乱位相差を決めることが出来る。現段階で、最も統計精度が良く、かつ有限格子体積効果も小さいと期待できる、$V = 48^3 \times 48$ のデータを用い、${}^1S_0$ チャネルに対して解析した結果が図 2 である。現段階ではまだ preliminary な解析ではあるが、二核子系は ${}^1S_0$ threshold 付近のエネルギーにおいて、強い引力であるが非束縛であることが示唆されている。図 2 においては、相関関数の sink time について $t - t_0 = 10, 12, 14$ の三点で解析しているが、sink time 依存性は統計誤差の範囲内であることも解る。

従来、HAL QCD 法においては、主に wall source を用いた研究がなされてきた。これは、二核子系は、(非常に深く束縛しない限り) 波動関数は空間的に大きく広がっていると考えられ、wall source がより適切な格子セットアップとなるためである。しかし、ルッシャー有限体積法の研究においては通常 smeared source が用いられるため、手法間の系統的な比較のためには wall source と smeared source の結果を比較することが必要である。

そのため、本研究期間では、$V = 32^3 \times 48$ 格子において、smeared source 計算も行い、結果

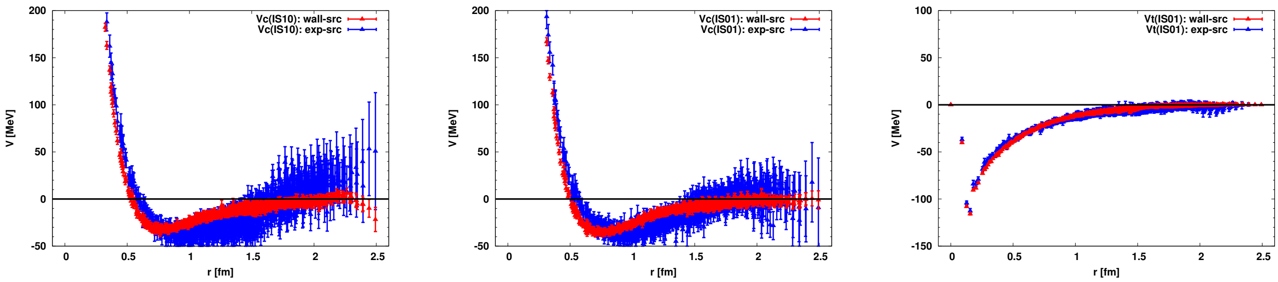

Figure 3: 二核子間ポテンシャルとその source 依存性。赤が wall source、青が smeared source。左から、${}^1S_0$ チャネル中心力、${}^3S_1$-${}^3D_1$ チャネル中心力、${}^3S_1$-${}^3D_1$ チャネルテンソル力。

の比較を行った。ここで、smearing function としては、PACS-CS Collaboration によって用いられたものと全く同じパラメータによる、exponential-smeared source を用いた。図 3 は、wall source と smeared source の結果を比較したものである。smeared source の結果はデータ量が巨大なため、現在はまだ得られた統計数の一部のデータの解析であるが、統計誤差の範囲内で、consistent な結果が得られている。今後は、全統計データの解析を進めると共に、大体積格子においても smeared source の計算を行っていき、HAL QCD 法、ルッシャー有限体積法の包括的研究を進めていく予定である。

2.1.2 ハイペロン力、特に H-dibaryon 状態

HAL QCD 法をストレンジネスを含むバリオン系に拡張することで、一般化されたバリオン間相互作用を引き出す事ができる。特に、実験的に直接散乱実験が難しい系に関しても相互作用の導出が可能であり、J-PARC などの大規模実験施設で行われるバリオン散乱実験と相補的に研究を進展させることができる。

これまでの研究開発により、核力計算と同時に、ハイペロン力も含めた一般バリオン力についても高速に計算できるようになっている。以下では、大統計データが得られた $V = 32^3 \times 48$ ($L = 2.9$fm), $40^3 \times 48$ ($L = 3.6$fm), 48^3 ($L = 4.4$fm) における wall source セットアップにおいて、$t - t_0 = 11$ での波動関数を用いて計算された結合チャンネルポテンシャルの結果を示し議論を行う。図 4 は H-dibaryon チャンネルにおけるポテンシャルデータを 4-range の Gauss 関数でフィットしたものと、それを用いて計算された $\Lambda\Lambda$, $N\Xi$, $\Sigma\Sigma$ の散乱位相差を示している。

フィットされたポテンシャルを比較すると、定性的な違いは無い事が確認できた。定量的に見ると、$L = 4.4$fm での結果が他の 2 つの体積での結果と遠方 ($r > 0.7$fm) でわずかにズレが見られた。このわずかな違いが散乱位相差に大きな影響を与える事がわかる。右図を見ると、小さな体積での結果は $\Lambda\Lambda$ の散乱位相差に明らかな共鳴状態が確認できる一方で、最も大きな体積での結果はこのような共鳴は見られずに束縛状態が存在する事がわかった。

今回の報告は依然として仮の結果ではあるが、ポテンシャルの体積依存性は小さい一方でポテンシャルの遠方での僅かな差が H-dibaryon の状態に大きな影響を与える可能性がある事が分かった。

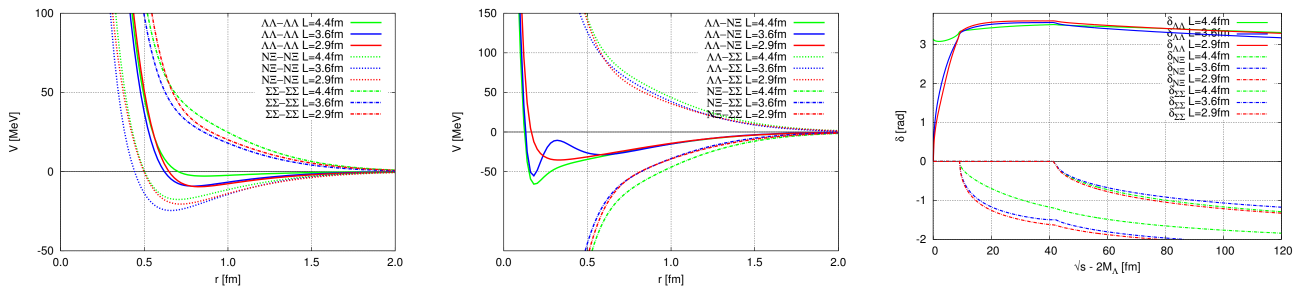

Figure 4: H-dibaryon チャンネル ($S = -2, {}^1S_0, I = 0$) におけるバリオン間ポテンシャルと $\Lambda\Lambda$, $N\Xi$, $\Sigma\Sigma$ の散乱位相差

2.2 負パリティチャネルにおける核力・ハイペロン力、特に反対称 LS(ALS) 力の研究

我々はこれまで、様々なハイペロン間相互作用を計算してきた。しかしながら、これらは正パリティの中心力とテンソル力に限られていた。こうなった理由は、これまで我々が使ってきた two-baryon source は、一種類の cubic group 不変な source function を使った計算に限られていたため、中間状態に $J^P = 0^+$ と 1^+ の状態しか励起する事ができなかったためである。最近、NN セクタで、この制限を打ち破り、P-wave やもっと複雑な角運動量を持った状態も励起できるような two-baryon source を開発し、実際にそれを用いて、負パリティーセクタの核力や LS 力の計算に成功した。(文献 [1] 参照) 次に、この方法をハイペロンセクタに応用して、負パリティーセクタのハイペロン力、特に対称および反対称 LS 力を求めた。一度に計算が複雑化する事を避ける事と、ハイペロン力全体の大局的振舞を概観する事を目的として、flavor SU(3) limit の計算から始めた [2]。用いるゲージ配位は、CP-PACS/JLQCD collaboration により $16^3 \times 32$ の格子上で生成された 2+1 flavor QCD ゲージ配位である [3]。このゲージ配位は、RG improved Iwasaki gauge action ($\beta = 1.83$) と、$O(a)$ improved Wilson quark action ($C_{\rm SW} = 1.761$) を用い、$\kappa_{uds} = 0.1371$ を採用して生成された物であり、lattice spacing は、$a = 0.121(2)$ fm($a^{-1} = 1630.58$ MeV)、lattice extension $L \equiv 16a \simeq 1.9$ fm, Pseudo-scalar meson 質量 $m_{\rm PS} = 1013(1)$ MeV、バリオン質量 $m_{\rm B} = 2051(3)$ MeV となる。相対論的 dispersion relation の破れに対応した "時間依存法" を用いる事で ([2, 1])、既約表現毎に逆構成した負パリティセクタのポテンシャルは、Fig. 5 のようになる。

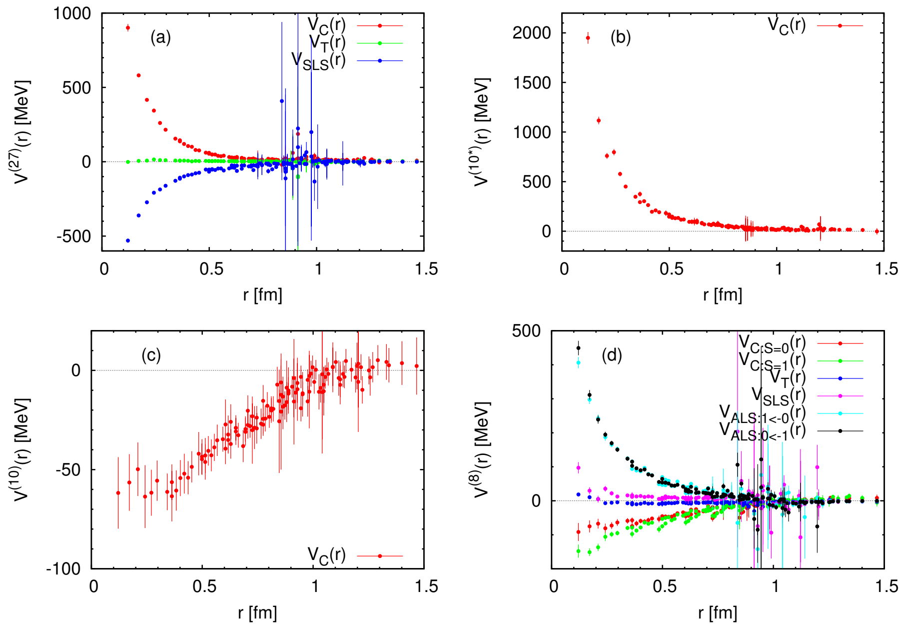

Figure 5: 各 flavor 既約表現での負パリティー hyperon potential。 (a) 27, (b) 10*, (c) 10 and (d) 8.

これらのポテンシャルで次のような線形結合を取る事によって、$\Lambda N - \Sigma N$ 結合チャンネルポテンシャルが得られる。

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} V_{\Lambda N,\Lambda N} & V_{\Lambda N,\Sigma N} \\ V_{\Sigma N,\Lambda N} & V_{\Sigma N,\Sigma N} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} V_{\mathrm{C}}^{(10^*)}(r)\mathbb{P}^{(S=0)} + \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -1/2 & 1/2 \end{bmatrix} V_{\mathrm{C}}^{(8_\mathrm{A})}(r)\mathbb{P}^{(S=0)} \\
&+ \begin{bmatrix} 1/10 & 3/10 \\ 3/10 & 9/10 \end{bmatrix} \left(V_{\mathrm{C}}^{(8_\mathrm{S})}(r)\mathbb{P}^{(S=1)} + V_{\mathrm{T}}^{(8_\mathrm{S})}(r)S_{12}(\hat{r}) + V_{\mathrm{LS}}^{(8_\mathrm{S})}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_+ \right) \\
&+ \begin{bmatrix} 9/10 & -3/10 \\ -3/10 & 1/10 \end{bmatrix} \left(V_{\mathrm{C}}^{(27)}(r)\mathbb{P}^{(S=1)} + V_{\mathrm{T}}^{(27)}(r)S_{12}(\hat{r}) + V_{\mathrm{LS}}^{(27)}(r)\vec{L}\cdot\vec{S}_+ \right) \\
&+ \frac{1}{2\sqrt{5}} \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ -1 & -3 \end{bmatrix} V_{\mathrm{ALS}}(r)\mathbb{P}^{(S=0)}\vec{L}\cdot S_-\mathbb{P}^{(S=1)} + \frac{1}{2\sqrt{5}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 3 & -3 \end{bmatrix} V_{\mathrm{ALS}}(r)\mathbb{P}^{(S=1)}\vec{L}\cdot S_-\mathbb{P}^{(S=0)}
\end{aligned}
\tag{1}
$$

ここで、$\mathbb{P}^{(S=0)}$ と $\mathbb{P}^{(S=1)}$ は、spin singlet と spin triplet projection operator であり、$S_{12}(\hat{r}) \equiv 3(\vec{\sigma}_1\cdot\hat{r})(\vec{\sigma}_2\cdot\hat{r}) - \vec{\sigma}_1\cdot\vec{\sigma}_2$ は tensor operator、$V_{\mathrm{C}}^{(R)}(r)$, $V_{\mathrm{T}}^{(R)}(r)$, $V_{\mathrm{LS}}^{(R)}(r)$ は、それぞれ、flavor 既約表現 R での中心力、テンソル力、（対称）LS 力を表し、 $V_{\mathrm{ALS}}(r)$ は、反対称 LS 力を表す。こうして得られるポテンシャルを Fig. 6 に示す。

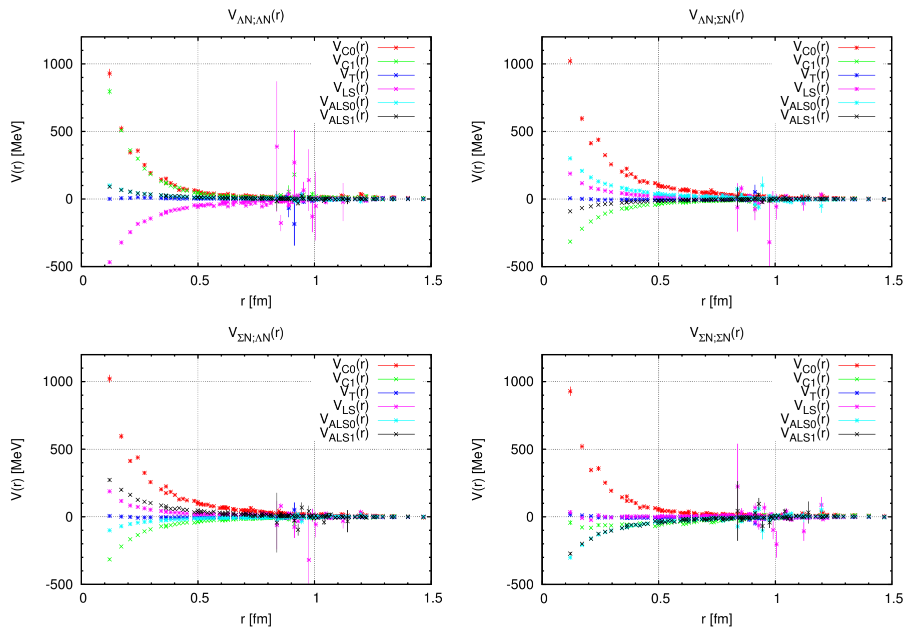

Figure 6: 負パリティセクタの ΛN-ΣN 結合チャンネルポテンシャル。V_{C0}, V_{C1}, V_{T}, V_{LS}, V_{ALS0}, V_{ALS1} は、それぞれ、spin singlet 中心力、spin triplet 中心力、テンソル力、（対称）LS 力、(spin triplet から spin singlet への) 反対称 LS 力、(spin singlet から spin triplet への）反対称 LS 力。

ここで、左上の $V_{\Lambda N,\Lambda N}(r)$ に注目する。Λ ハイパー核の励起スペクトル実験から、ハイパー核の hyper fine splitting は非常に小さい事が知られている [4]。この事実を説明するため、ΛN ポテンシャルの（対称）LS 力と反対称 LS 力がほぼ相殺するという仮説がたてられており、有効理論を用いて様々に議論されている [5, 6]。我々の結果では、ΛN-ΣN 結合チャンネルポテンシャルの $V_{\Lambda N,\Lambda N}(r)$ において、この相殺は起こっていないことが見て取れる。Eq. (2) に返ってみると、対称 LS 力は、その 90%が 27 表現 (NN) に起因するため強いのが当然であるのに対し

て、反対称 LS 力は、もともと強かった 8 表現のものに CG 係数 $1/(2\sqrt{5})$ がかかる事によって、非常に弱いものになってしまっている。

昨年度までに明らかになったこの問題に対して、今年度、以下のような進展を達成した。すなわち、再度 Eq. (2) に戻ると、反対称 LS 力は ΣN チャンネルとの結合の方に strength が逃げてしまっている事が解る。実際、Λ ハイパー核での対称・反対称 LS 力の相殺の議論においては、ΣN チャンネルへの結合を繰り込んだ有効 ΛN ポテンシャルを使って議論される事が多いため、我々も ΣN チャンネルを integrate out して有効 ΛN ポテンシャルで何が起こるか考えてみる。このために、ポテンシャルのクォーク質量による変化は比較的小さいものとして、次のような flavor SU(3) を破った結合チャンネル Schrodinger 方程式を ΛN の弾性散乱領域で解き、

$$\begin{aligned}\left(E + \nabla^2/(2\mu_{\Lambda N})\right)\psi_{\Lambda N}(\vec{r}) &= V_{\Lambda N,\Lambda N}(r)\psi_{\Lambda N}(\vec{r}) + V_{\Lambda N,\Sigma N}(r)\psi_{\Sigma N}(\vec{r}) \qquad (2)\\ \left(E - m_\Sigma + m_\Lambda + \nabla^2/(2\mu_{\Lambda N})\right)\psi_{\Sigma N}(\vec{r}) &= V_{\Sigma N,\Lambda N}(r)\psi_{\Lambda N}(\vec{r}) + V_{\Sigma N,\Sigma N}(r)\psi_{\Sigma N}(\vec{r})\end{aligned}$$

この ΛN 成分を再現するような有効 ΛN(single channel) ポテンシャルを HAL QCD の方法で作る。こうする事によって得られたポテンシャルを Fig. 7 に示す。反対称 LS 力が（対称 LS 力と

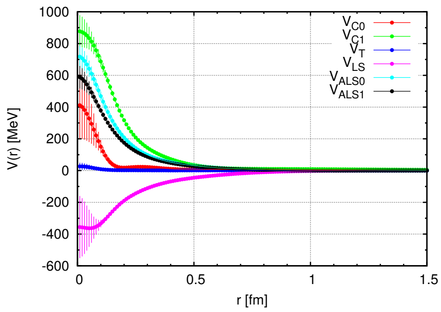

Figure 7: 有効 ΛN ポテンシャル。（ΣN チャンネルを integrate out して得られたもの）

同程度にまで）強くなっている事が分かる。ここから得られた教訓は、対称・反対称 LS 力の相殺を議論する際には、ΣN チャンネルへの結合からくる寄与は非常に大きく、決して無視してはならないという事である。

References

[1] K. Murano *et al.* [HAL QCD Collaboration], Phys. Lett. B **735**, 19 (2014) [arXiv:1305.2293 [hep-lat]].

[2] N. Ishii *et al.* [HAL QCD Collaboration], Phys. Lett. B **712** (2012) 437.

[3] T. Ishikawa *et al.* [JLQCD Collaboration], Phys. Rev. D **78** (2008) 011502. ¡

[4] H. Akikawa, S. Ajimura, R. E. Chrien, P. M. Eugenio, G. B. Franklin, J. Franz, L. Gang and K. Imai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 082501.

[5] S. Takeuchi, O. Morimatsu, Y. Tani and M. Oka, Prog. Theor. Phys. Suppl. **137** (2000) 83.

[6] T. A. Rijken, V. G. J. Stoks and Y. Yamamoto, Phys. Rev. C **59** (1999) 21.

2.3 三核子力の研究

現代の原子核物理において、三体力の理解は最重要課題の一つである。近年は高密度系の状態方程式における三体力の効果が特に注目され、超新星爆発や中性子星のコア構造など、宇宙天文物理における諸現象を理解する上でも重要テーマともなっている。本研究では三核子系 ($I = 1/2$, $J^P = 1/2^+$, 三重陽子チャネル) について三体力の格子 QCD 計算を行った。

これまでの研究では $m_\pi = 0.70 - 1.1$ GeV 領域において三体力計算を行い、近距離三体斥力効果が得られている。一方で、この領域では、三体力のクォーク質量依存性は小さいことが解った。また、超近距離領域では、格子の離散化誤差の影響が大きいことも解った。そこで、本年度は、クォーク質量をさらに軽くし、$m_\pi = 0.57$ GeV での計算を行った。データは解析中であるが、その過程で、一部のデータについては JLDG (Japan Lattice Data Grid) におけるデータ不具合の影響を受けていることが判明した。(用いたゲージ配位のデータそのものが JLDG のディスク上で壊れていたことが判明した。) これについては、影響するデータを既に確定させており、また、データが壊れる以前のゲージ配位のデータも入手できたので、近日中に再計算することで最終的なデータ解析に移る予定である。

さらに、$m_\pi = 0.51$ GeV における計算も行った。当初予定では、$V = 32^3 \times 48$, $64^3 \times 64$ の 2 体積において計算する計画であり、このうち、$V = 32^3 \times 48$ についてはほぼ予定通り計算を実行したが、$64^3 \times 64$ 格子については、Sec. 2.1 における正パリティ二体力計算の途中結果を検討した結果、二体力計算の統計数を増やすために資源を優先配分することとし、三体力の計算はごく一部に留めた。(なお、$64^3 \times 64$ 格子における正パリティ二体力計算は、計算プログラムが不定期にハングアップするというアクシデントに見舞われ、本年度研究期間では統計数を十分に上げることが出来なかった。これについては、本年度における様々な試行錯誤の結果、IBM システムライブラリのバグフィックス、およびハードウェアの故障のフィックスにより、実質的に解決することに成功した。)

図 8 は、$m_\pi = 0.51$ GeV、$V = 32^3 \times 48$ において、三重陽子チャネル・等距離直線配位における三体力の結果である。$r_2 \sim 0.2 - 0.5$ fm 付近において、近距離三体斥力効果が見えている。この結果はより重いクォーク質量における結果と類似するものであり、近距離三体斥力に関しては、依然としてクォーク質量依存性が小さい領域にいるものと考えられる。

一方で、超近距離領域 $r_2 \lesssim 0.2$ fm においてはあたかも三体引力効果のようなものも見えている。これは物理的結果である可能性もあるが、以前の格子間隔依存性の研究結果から、むしろ格子の離散化誤差の影響が現れている可能性が高いと考えており、今後より詳しい解析を進めていく予定である。

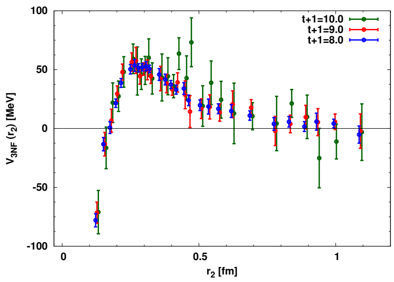

Figure 8: 三重陽子チャネル・等距離直線配位における三体力と、その sink time 依存性。