

プロジェクト名(タイトル):

## 格子量子色力学を用いたハドロン間力の決定

利用者氏名:

○土井琢身(1,2)、初田哲男(2)、Yan LYU(1)、杉浦拓也(2)、Hui TONG(1)、赤星友太郎(1)、青木慎也(1)、青山龍美(1)、土居孝寛(2)、権業慎也(2)、池田陽一(1)、井上貴史(1)、石井理修(1)、村上耕太郎(1)、佐々木健志(1)  
理研における所属研究室名:

(1)仁科加速器科学研究センター 量子ハドロン物理学研究室

(2)数理創造プログラム

### 1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

この世にはどのような物質が存在しているのか。物質は宇宙の歴史の中でどのように進化してきたのか。これら物理学の根本的謎を解明する上での最重要課題の一つが、物質を構成する主要要素であるハドロンの中に働く力・ハドロン間力の決定である。

ハドロンは、クォークと呼ばれる素粒子(およびその相互作用を媒介する素粒子であるグルーオン)からなる複合粒子であり、3つのクォークから構成されるバリオン、クォーク・反クォークの2つから構成されるメソンがある。クォーク・グルーオンの力学は、素粒子の基本理論である量子色力学(QCD)によって支配されており、ハドロン単体の性質については QCD からの直接理解が進んでいる。しかしハドロン間力に関しては、散乱実験による解析は進められてきたものの、QCD からの理論的導出はなされておらず、また実験が困難なハドロン間力については大きな不定性がある状況にあった。

これに対して我々は、HAL QCD 法という独自の理論定式化を産み出し、QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションにより様々なハドロン間力を QCD から直接決定するという、新たな研究分野そのものを創造した。得られたハドロン間力は、素粒子物理と原子核・ハドロン物理の間のミッシングリンクを繋ぐものであり、その学術的価値は極めて高い。しかも、これまで未知であったハドロン間力は、中性子星の内部や連星中性子星合体・重元素合成など、宇宙における超高密度核物質の性質(状態方程式)の解明にも必要不可欠であり、その決定は宇宙天文物理学へのミッシングリンクを繋ぐものともなる。

我々は理研スパコンの利用により、様々なハドロン間力の研究を進めてきており、中でも重要な成果が、世界初となる物理点近傍におけるバリオン間力の決定である。これにより、 $\Omega\Omega$ 、 $\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$ 、 $N\Omega$ などのダイバリオン状態の存在

の予言、 $\Xi$ ハイパー原子核( $\Xi$ テトラバリオン)の予言、さらに原子核衝突時バリオン間相関の予言などを行った。これらの結果は、J-PARC におけるハイパー核実験、理研-BNL RHIC や CERN LHC など原子核衝突実験におけるバリオン間相関の観測、連星中性子星合体に伴う重力波観測(LIGO/Virgo/KAGRA 等)、宇宙ステーション上の X 線望遠鏡による中性子星観測(NICER)、理研 RIBF 実験における元素起源の研究など、国内外の大規模実験・観測にも大きなインパクトを与えており、中でも  $N\Xi$  バリオン相関については我々の予言の正しさが LHC ALICE Collaboration によって実験的に確認された。

次なる重要課題は、ハドロン間力計算の決定精度の向上である。実際、今後世界各地の大規模実験・観測において精度が大幅に向上することが見込まれており、対応する理論計算の精度向上は必須である。そこで本年度は、ハドロン間力のうち、特に誤差のコントロールが困難であることが知られているバリオン間力の計算精密化に向けた研究開発を行った。これまでのバリオン間力計算においては、非弾性散乱状態に起因する系統誤差がその主要な誤差となっていたが、本年度は新たな all-to-all 法を用いることでこの系統誤差を削減する研究を行った。

### 2. 具体的な利用内容、計算方法

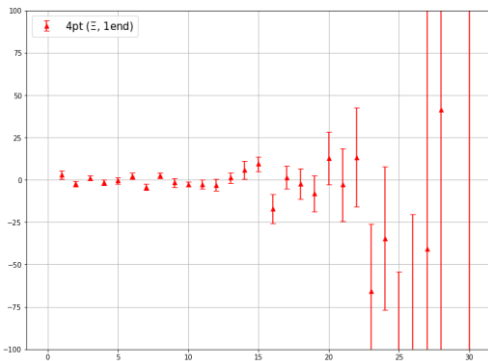
本研究では、HAL QCD 法において、one-end trick を用いた all-to-all 法により、バリオン間力の格子 QCD 計算を行った。従来のバリオン間力計算においては、wall source と呼ばれるセットアップが用いられている。この場合系統誤差の要因となる非弾性散乱状態の混合が大きくなる可能性があることが知られている。しかし、all-to-all 法を用いれば、計算に用いるバリオン演算子について、非弾性散乱状態の寄与が小さくなるようなセットアップで計算することが可能となる。一方、all-to-all 法の問題は、計算コストが非常に大きくなることである。これについて、我々は昨年度まで

の研究で、one-end trick を用いた手法を開発しており、メソン間力の計算 ( $I=1 \pi\pi, \rho$  メソン) において計算コストを削減しながら精密な計算を行うことに成功している。そこで本研究では、one-end trick をバリオン間力へと拡張した計算を行った。具体的には、Z(3)-noise を使うことで、one-end trick を用いた all-to-all 法計算を可能にした。

実際の計算のセットアップとしては、2+1 ダイナミカルフレーバーのクローバーフェルミオンを用い、パイオン質量  $0.51\text{GeV}$  において、 $\Xi\Xi$  間相互作用の格子 QCD 計算を行った。ゲージ配位としては、Yamazaki et al. によって生成された格子サイズ  $64^4$ 、格子間隔  $a = 0.09\text{fm}$  のものを用いた。このセットアップにおいては、従来の wall source によってポテンシャルの微分展開の第二次項まで計算されており、精密な比較が可能となる。

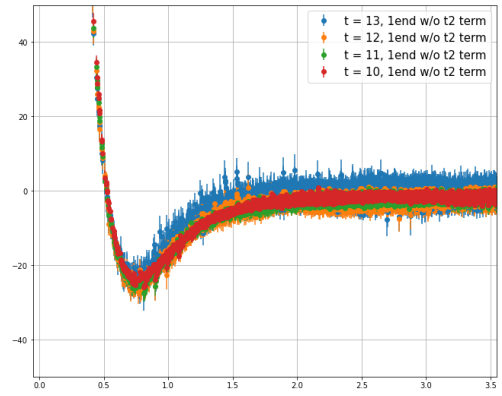
### 3. 結果

$\Xi\Xi(^1S_0)$ 系の相互作用によるエネルギーシフトの図を以下に示す。ユークリッド時間  $t$  が小さいところから安定した値 (plateau) となっている。 $\Xi$  単体のエネルギーについても同様に  $t$  が小さいところから plateau になっており、期待通り非弾性散乱状態の混合が小さい計算になっていることを示している。



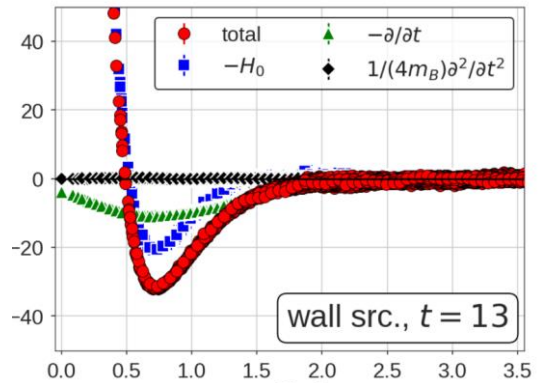
$\Xi\Xi(^1S_0)$ 系の有効エネルギーシフト

下図に示すのが、計算で得られた  $\Xi\Xi(^1S_0)$ 間相互作用ポテンシャルの結果である。このチャンネルは二核子系の dineutron チャンネルと同じフレーバー表現に属するチャンネルであり、核力でみられるような斥力芯および引力 tail という構造が得られている。



$\Xi\Xi(^1S_0)$ 間の相互作用ポテンシャル (all-to-all 法)

一方で、我々の以前の計算で得られた wall source の場合のポテンシャルは以下である (赤線)。

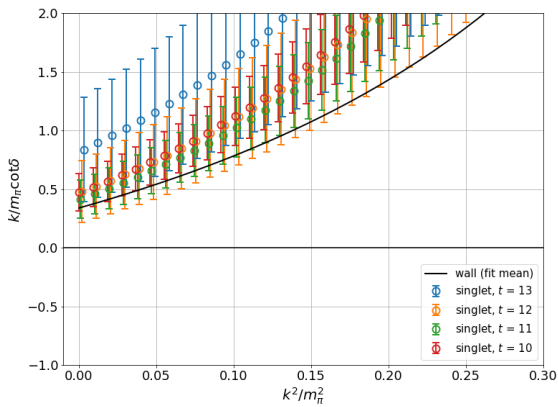


$\Xi\Xi(^1S_0)$ 間の相互作用ポテンシャル (wall source)

基本的にほぼ同じようなポテンシャルとなっているが、引力ポケットの構造は、all-to-all 法のほうがやや浅くなっていることが解る。

しかし、ポテンシャルそのものは観測可能な物理量ではなく、真に意味があるのはポテンシャルから得られる散乱位相差であり、計算セットアップの違いも位相差を通して比較することが必要である。

All-to-all 法で得られたポテンシャルから散乱位相差  $k\cot \delta$  を計算した結果が以下である (色付き点+誤差棒)。



$\Xi \Xi$  ( $^1S_0$ )系の散乱位相差  $k \cot \delta$

束縛状態のない強い引力に対応する特徴的な振る舞いとなっていることが解る。さらにこの図において wall source の結果(中心値のみ)を黒で同時プロットして比較すると、誤差の範囲内で無矛盾であることが解る。このことは、非弾性散乱状態の寄与がありうる wall source 計算においても、二体系・一体系のキャンセレーションにより最終的な結果においては非弾性散乱状態に起因する系統誤差は抑制されていることを示している。

#### 4. まとめ

本研究では、格子QCDを用いたバリオン間力の計算、特に非弾性散乱状態の混合に起因する系統誤差の研究を行った。one-end trick by Z(3)-noise と組み合わせた all-to-all 法を初めて二体バリオン系に適応し、HAL QCD 法によりバリオン間力の計算を行った。

一体・二体バリオン系のエネルギー計算により、本手法は非弾性散乱状態を明示的に抑制するのに有効であることが示された。得られたポテンシャルは、従来の wall source 計算によって得られたポテンシャルと比べ僅かな構造の違いがみられたが、観測可能な物理量としての散乱位相差としては、all-to-all 法の結果と wall source の結果は誤差の範囲内で無矛盾であることが解った。

#### 5. 今後の計画・展望

本研究の結果は、wall source の計算結果においても系統誤差がコントロールされていることを示唆しており、その計算コストの小ささから、(wall source を用いることのできる) S 波・D 波のポテンシャル計算においては wall source セットアップが今後も良い選択肢となると解った。一方で、wall source においてなぜ系統誤差が良くキャンセルしているのかは未解明な点があり、今後の研究が必要である。

さらに、今後のバリオン間力計算においてはP波の計算も重要であり、これは wall source セットアップでは計算不可能である。このような場合は、本研究で新たに開発した one-end trick + all-to-all 法による計算が威力を発揮すると考えられる。all-to-all 法を用いた P 波バリオン間力計算としては、one-end trick 以外にも LapH 法も有力な手法であり、本年度はそのコード開発・パイロット計算なども理研スパコンで行った。来年度以降、複数の手法を比較しながら、P 波バリオン間力計算、さらにメソン間力、メソンバリオン間力も含めた一般的なハドロン間力計算を進めていく予定である。

2021 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

“Emergence of the  $\rho$  resonance from the HAL QCD potential in lattice QCD”

Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi

Phys. Rev. D 104, 054510 (2021), arXiv:2106.08175 [hep-lat].

(2)

“Dibaryon with highest charm number near unitarity from lattice QCD”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

Phys. Rev. Lett. 127, 072003 (2021), arXiv:2102.00181 [hep-lat].

(3)

“Optimized Two-Baryon Operators in Lattice QCD”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

arXiv: 2201.02782 [hep-lat].

submitted to Phys. Rev. D.

【会議の予稿集】

(1)

“Finite volume analysis on systematics of the derivative expansion in HAL QCD method”

T. Doi, Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

arXiv:2112.04997 [hep-lat].

submitted to PoS Lattice.

(2)

“Most charming dibaryon near unitarity”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

arXiv:2112.01682 [hep-lat].

submitted to PoS Lattice.

(3)

“Emergence of the rho resonance from the HAL QCD potential”

Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi

arXiv:2111.15138 [hep-lat].

submitted to PoS Lattice.

(4)

“Nuclear force with LapH smearing”

T. Sugiura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, T. M. Doi and T. Doi

arXiv:2202.12532

submitted to PoS Lattice.

(5)

“Investigations of decuplet baryons from meson-baryon interactions in the HAL QCD method”

K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki and K. Sasaki

arXiv:2111.15563 [hep-lat]

submitted to PoS Lattice.

(6)

“HAL QCD potentials with non-zero total momentum and an application to the  $I=2$   $\pi\pi$  scattering”

S. Aoki and Y. Akahoshi

arXiv:2112.00929 [hep-lat]

submitted to PoS Lattice.

### 【口頭発表】

(1)

“Status and Prospects of Baryon Interactions from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Second International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (2nd J-PARC HEF-ex WS)”,

online, Feb. 16–18, 2022.

(2)

“YN and YY interactions from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “The 4th International workshop on strangeness nuclear physics (SNP2021)”,

online, Dec. 18–19, 2021.

(3)

“Three-Nucleon Forces from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “The 10th International Workshop on Chiral Dynamics (CD2021)”,

online, Institute of High Energy Physics (IHEP), Beijing, China, on-line, Nov. 15–19, 2021.

(4)

“Finite volume analysis on systematics of the derivative expansion in HAL QCD method”

T. Doi, Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,

online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(5)

“Investigations of decuplet baryons from meson-baryon interactions in the HAL QCD method”

K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki and K. Sasaki

2021 年度 利用報告書

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(6)

“Lambda–Nucleon and Sigma–Nucleon potentials from space–time correlation function on the lattice”

H. Nemura

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(7)

“Application of the Misner’s method to the coupled–channel  $N\Lambda$ – $N\Sigma$  potential in lattice QCD”

T. M. Doi, T. Doi, N. Ishii, T. Iritani and T. Miyamoto

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(8)

“Nuclear force with LapH smearing”

T. Sugiura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, T. M. Doi, T. Doi

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(9)

“Emergence of the rho resonance from the HAL QCD potential”

Y. Akahoshi, S. Aoki and T. Doi

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(10)

“HAL QCD potentials with non–zero total momentum and an application to the  $I=2$   $\pi\pi$  scattering”

S. Aoki and Y. Akahoshi

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(11)

“Most charming dibaryon near unitarity”

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

Talk given at “The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021)”,  
online, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Boston, USA, Jul. 26–31, 2021.

(12) “Probing hadron–hadron interactions from lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at JPS meeting (Symposium session),

## 2021 年度 利用報告書

online, Japan, Sep 14, 2021.

### (13) “Hyperon forces from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at Workshop on J-PARC Hadron Hall Extension HIHR/K1.1,

online, Japan, May 23, 2021.

### 【その他(著書、プレスリリースなど)】

(1)

著書

「数理は世界を創造できるか 宇宙・生命・情報の謎にせまる」

著: 横倉 祐貴、ジェフリ フォーセット、土井 琢身、瀧 雅人

編: 初田 哲男、坪井 俊

東京大学出版会 (2021/5/28), 296 頁 , ISBN978-4-13-063374-1.

(2)

プレスリリース

「スパコンで予言する魅惑の新粒子「チャームダイオメガ」 - クォーク 6 個状態の謎の解明に新たな 1 ページが加わる - 」

(2021/08/30)

Y. Lyu, H. Tong, T. Sugiura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, J. Meng and T. Miyamoto

Phys. Rev. Lett. 127, 072003 (2021).