

課題名(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)、宮本貴也(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. 本課題の研究の背景、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？そして物質はどのように素粒子から構成されているのか？これら物理学における根源的問いに答える上で要となる役割を担うのが、物質を構成する要素であるハドロンの中に働く力、ハドロン間力の解明である。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、ハドロン単体の性質を超えて、ハドロン複合体としてどのような原子核やエキゾチック粒子が存在しているのか、また宇宙の歴史の中で原子核・元素がどのように創成されてきたのか、これらの謎に答えるにはハドロン間力の決定が必要不可欠である。

本研究は、ハドロン間力を QCD に基づいて直接決定し、素粒子・原子核・宇宙天文物理という異なる物質階層間のミッシングリンクを繋ぐことを最終的な目標としている。従来のハドロン間力研究では、実験データを用いた現象論的解析や、モデル計算に基づく理論研究などが行われてきたが、真の基礎理論である QCD との間には大きなギャップがあった。これに対して我々は、HAL QCD 法という理論定式化を独自に開発し、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。HAL QCD 法によるハドロン間力計算は既に様々な系で大きな成果を挙げており、J-PARC 実験でのハイパー核物理、CERN LHC 原子核衝突実験でのバリオン間相関の観測など、国内外の大規模実験・観測において不可欠な理論予

言を与えると共に、連星中性子星合体に伴う重力波観測(LIGO/Virgo/KAGRA)、理研 RIBF 実験における元素起源の研究などでも大きなインパクトが期待される。

このような状況の基で、本年度は all-to-all 法を用いたメソン間力の研究と、 Δ 粒子など十重項バリオンを含むバリオン間力の計算を目標とした。これらは昨今世界各地の大型加速器実験において発見が相次いでいる、(通常のバリオン・メソンには分類できない)エキゾチック粒子・ハドロン共鳴状態の解明と密接に関わる。さらに、当初の目標を超えて、all-to-all 法を用いたメソン・バリオン間力の研究、および LapH 法を用いた核力の研究においても重要な成果を挙げることができた。以下では説明の流れの都合上、「2. 具体的な利用内容、計算方法」、「3. 結果」についてそれぞれのテーマごとにまとめて記述する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3. 結果

[all-to-all 法を用いたメソン間力]

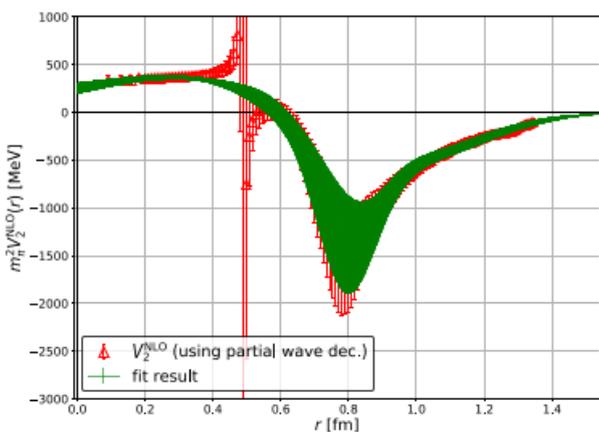
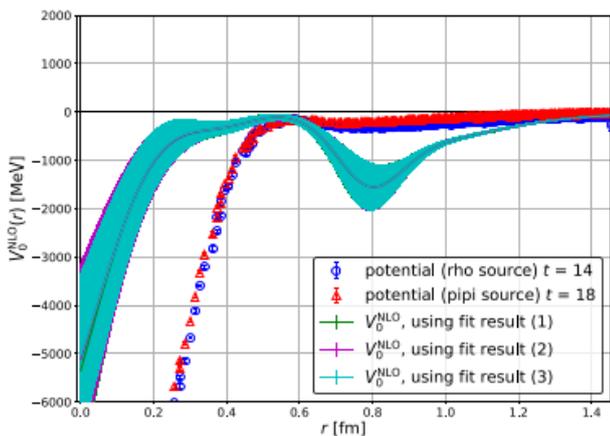
ハドロン共鳴状態の統一的理解は、原子核・ハドロン物理における長年の課題である。特に、近年は様々なエキゾチックハドロン(共鳴)状態の発見が報告されており、その解明のためにハドロン間力の第一原理計算が喫緊の課題となっている。共鳴状態が存在するチャンネルのハドロン間力では、クォーク対生成・消滅ダイアグラムの計算が重要なことが多いが、それには非常に大きな計算コストが必要になるという困難があった。そこで本研究では昨年度に引き続き、 $I=1$ $\pi\pi$ (P 波)メソン間力を対象としてこの問題を解決する手法を研究すると共に、このチャンネルに存在する ρ メソン共鳴状態の研究を行った。

本研究では、ゲージ配位として PACS-CS Coll.によって生成された 2+1 フレーバーゲージ配位を用い、格子サイズ

32³ x 64 で格子間隔は a = 0.0907fm、パイオン質量が 410MeV における計算を行った。別手法を用いた先行研究より、 ρ メソンは“質量”890MeV の共鳴状態である。

対生成消滅ダイアグラムの計算手法として、all-to-all 法と HAL QCD 法を組み合わせた手法、具体的には、“one-end trick”, “sequential 法”, “all-mode average(AMA)法”を組み合わせ、またシンク演算子について小さな広がりを導入した計算を行った。これは昨年度までの我々の研究で開発した手法であり、統計誤差を 1/10(すなわち、モンテカルロ計算のコストを実質的に 1/100)に抑制できるという著しい特徴を持つ。

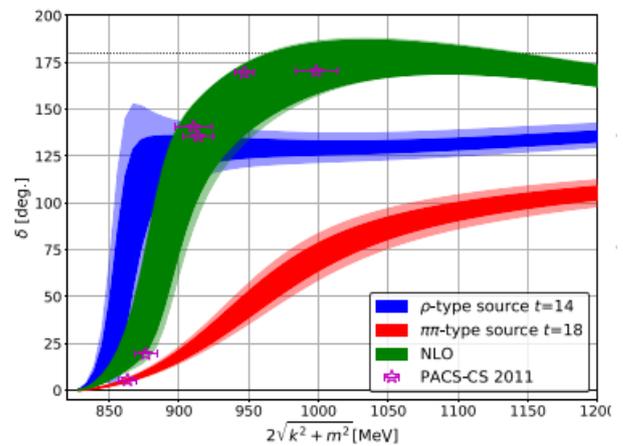
本年度は、ポテンシャルの微分展開に由来する系統誤差をコントロールするため、重心系において、 $\pi\pi$ タイプと ρ タイプという 2 種類のソース演算子を用いた計算を行い、ポテンシャルの微分展開における第 0 次項に加え第 2 次項をも決定することに成功した。(第 1 次項は存在しない。)(下図)



I=1 $\pi\pi$ (P 波) メソン間力
 (上図(シアン):微分展開第 0 次項)
 (下図(緑):微分展開第 2 次項)

得られたポテンシャルを基に散乱位相差を計算したもの

が下図である。



I=1 $\pi\pi$ (P 波) 散乱位相差

図の緑色のバンドが微分展開第 2 次項まで入れた結果であるが、赤色や青色で示されたバンドで示された微分展開第 0 次項で近似した場合の結果と比べると、微分展開の高次項を入れることの重要性が示されている。また、微分展開第 2 次項まで入れた場合の結果では、質量 890MeV 付近に ρ メソン共鳴状態があることが解る。これは、紫の点で示された別手法による先行研究の結果とよく一致している。今後は崩壊幅の精密計算に向けて、moving frame を用いた計算を進める予定である。

この結果は、I=0 $\pi\pi$ (S 波) 散乱と σ メソン共鳴状態の研究、さらにより一般のハドロン共鳴状態の研究へと繋がるものである。

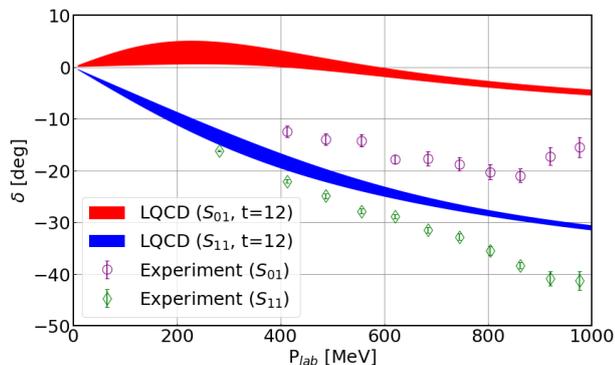
[all-to-all 法を用いたメソン-バリオン間力]

バリオン共鳴状態を調べるには対応するメソン-バリオン間相互作用を第一原理計算することが望ましいが、そのような研究はまだほとんどなされていない。そこで本研究では、メソン共鳴状態の解析で有効性が示された、HAL QCD 法に one-end trick および all-mode averaging を用いた all-to-all 伝搬関数の計算を組み合わせる方法をメソン-バリオン系へと応用した。本年度はまずバリオン共鳴を持たない S 波の K 中間子(K)-核子(N) 2体系において適用し、本研究で用いる解析手法のメソン-バリオン系に対しての有効性を検証すると共に、P 波のパイ中間子(π)-核子(N)相互作用および反 K 中間子(Kbar)- Ξ バリオン相互作用の研究へと拡張して、束縛状態としてのバリオンがメソン-バリオン間相互作用から導出できるかを研究した。

・S波のK中間子-核子相互作用の解析

本研究では、PACS-CS Collaboration によって生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位を用いて解析を行った。格子サイズは $32^3 \times 64$ 、格子間隔は $a = 0.0907$ fm、パイ中間子の質量が 570 MeV である。

本研究により得られた K 中間子-核子相互作用ポテンシャルから計算された散乱位相差は下図の通りである。



K 中間子-核子間の散乱位相差

得られた散乱位相差の結果(上図の青帯、赤帯)は、実験値(上図の緑点、紫点)の振る舞いを定性的に再現している。また、本研究の結果は我々が以前に通常の HAL QCD 法で計算した場合の結果と無矛盾な振る舞いをしていことも確認できている。以上より、one-end trick と HAL QCD 法を組み合わせる方法により、メソン-バリオン系に対しても精度よく解析が可能なが確かめられた。今後は本研究での解析手法を共鳴状態が存在するメソン-バリオン系へ応用し、バリオン共鳴状態を調べたいと考えている。

・P波のパイ中間子-核子相互作用および反 K 中間子-Ξバリオン相互作用の解析

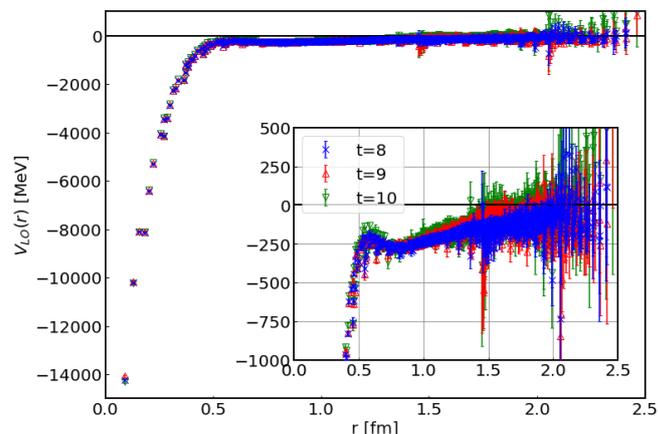
P波のアイソスピン $I=3/2$ のパイ中間子-核子相互作用および $I=0$ の反 K 中間子-Ξバリオン相互作用について、クォーク質量が重い場合にそれぞれ束縛状態として現れる Δ 粒子、Ω 粒子を研究した。これらの粒子はどちらも十重項バリオンに属するが、クォーク質量が軽い現実世界では Δ 粒子は共鳴状態である一方、Ω 粒子は安定粒子として存在する。本研究ではこれらの系についてポテンシャルを通じた解析を行った。

本研究ではソース演算子として、Δ 粒子および Ω 粒子に対応する 3クォーク型のものを用い、従来のノイズ法と all-mode averaging を用いた all-to-all 伝搬関数の計算を行った。また、本研究ではシンク演算子に対して空間方向に広がった非局所的なものを用いることで、クォーク・反クォーク

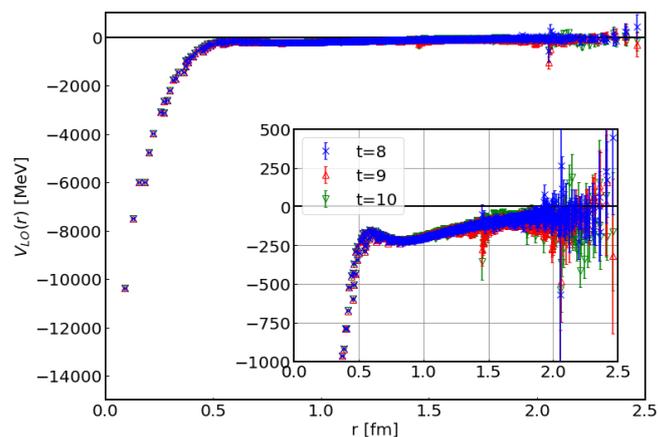
ク対が存在するときに起こる発散の問題を回避した。

本研究では、PACS-CS Collaboration によって生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位を用いて解析を行った。格子サイズは $32^3 \times 64$ 、格子間隔は $a = 0.0907$ fm、パイ中間子の質量が 410 MeV である。この配位での 2点関数を用いたハドロン質量の評価により、Δ 粒子は 100 MeV 程度、Ω 粒子は 300 MeV 程度の束縛状態として現れることがわかる。

本研究により得られたパイ中間子-核子および反 K 中間子-Ξバリオン相互作用ポテンシャルは下図の通りである。



パイ中間子-核子間のポテンシャル



反 K 中間子-Ξバリオン間のポテンシャル

これらの結果により、どちらのポテンシャルも束縛状態が存在するような強い引力となっており、このセットアップでは 2つの系の相互作用は非常に似た振る舞いをしていことがわかる。また、得られたポテンシャルには遠方で非常に大きな統計誤差が見られる。これは部分波展開における離散化誤差に起因するものだと考えられる。

今後はこれらのポテンシャルから束縛状態の存在を確認

し、またその束縛エネルギーから Δ 粒子および Ω 粒子の質量の定量的評価を行う予定である。また、“Misner’s method”と呼ばれる、正六面体群の変換では結びつかない格子点を用いた角運動量の射影を行う方法を用いて、ポテンシャルの部分波展開における離散化誤差を抑制した解析を行う予定である。

[LapH 法を用いた核力の研究]

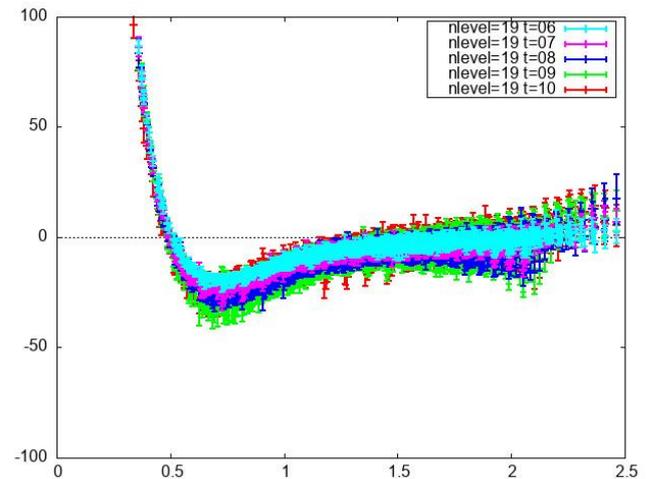
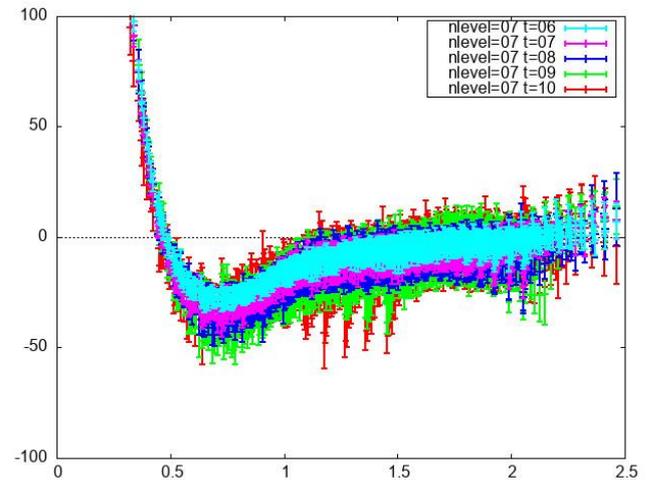
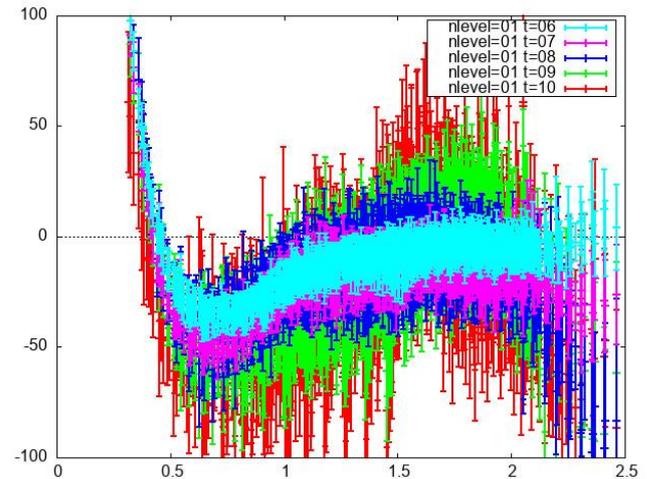
我々の身の回りの物質は全て核子(陽子と中性子)からなっており、核子間の相互作用である核力の理論的理解は非常に重要である。しかし一方で、核力は格子 QCD によるハドロン間力計算の中でも最も難しいターゲットである。その理由は核子が軽いクォークのみからできているため、線形ソルバーの収束に時間がかかる上、統計精度も他のハドロン間力より悪くなる。将来的に物理点クォーク質量で精度の良い結果を得るためには、ナイーブに測定数を増やすだけではなく、根本的な手法の改善が不可欠である。

そこで本研究では、新たな手法として LapH 法を用いることで、核力の精密決定を目指す。LapH 法は格子上のラプラス演算子の固有モードを使ってクォーク自由度を展開し、その低エネルギーモードにおける打ち切りを行う手法である。切り捨てた高エネルギーモードは計算の対象である低エネルギー領域の核力には効かないと考えられるので、その分の不要な計算コストを節約しつつ必要な部分の計算を高精度化することが可能である。従来の LapH 法を用いた研究ではゲージ共変なラプラス演算子を用いた展開を考へることが多いが、我々は HAL QCD 法への適用にあたり、空間自由度だけを持つ自由場のラプラス演算子を使うことで結果の精度は保ったまま計算コストを大きく減らせる($\sim O(1/100)$)ことを突き止めた。さらに、各固有モードの重みを調整することで、同じ計算コストでより精度の良い結果を得ることができることも明らかにした。

(結果)

ゲージ配位として、PACS-CS Coll.によって生成された 2+1 フレーバー配位を用いた。格子サイズは $32^3 \times 64$ で格子間隔は $a=0.0907$ fm、パイオン質量は 700 MeV である。統計数は 100 である。ラプラス演算子のモード数としては 1, 7, 19 を用いた。これはそれぞれクォークの運動量 p として $|p|^2=(0 \text{ MeV})^2$, $|p|^2 \leq (427 \text{ MeV})^2$, $|p|^2 \leq (604 \text{ MeV})^2$ を考へることに相当する。モード数 1 は従来の核力計算で用いられてきたウォールソースと等価である。下図

に、スピン 1 重項状態の S 波核力ポテンシャルの結果を示す。



核子間ポテンシャル(スピン1重項)

(モード数=1(上), 7(中), 19(下))

モード数 1(ウォールソース)で見られる非常に大きな誤差が、モード数を 7, 19 と増やすことで急激に改善されていることがわかる。また、各図は時刻 $t=6$ から $t=10$ までの結果を示している。一般に時刻 t が大きくなると誤差は指数関数的

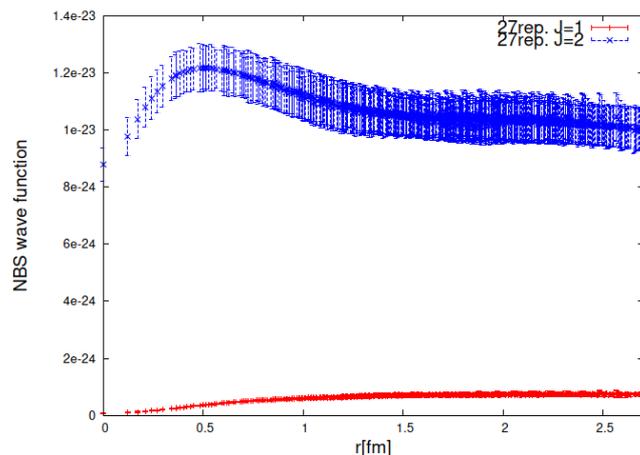
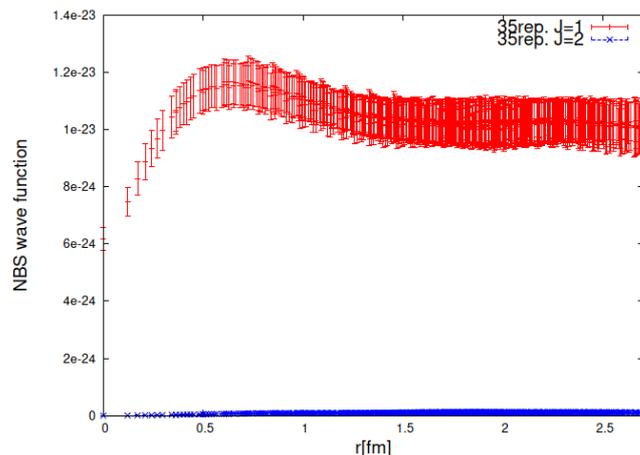
に増加するが、HAL QCD 法の適用には t を十分大きくしてポテンシャルが t に依存しなくなった場所を見る必要がある。モード数 1 では $t=6$ から $t=10$ にかけてポテンシャルの中心値がマイナスの方向へシフトしている。よって物理量の計算には $t=9$ や $t=10$ でのポテンシャルを使う必要がある。一方、モード数 7 や 19 の場合では $t=6$ から $t=10$ まで大きな t 依存性は見られない。これは LapH 法により、核子の弾性 2 体状態により強く結合する望ましいソース演算子を構成できていることを示唆しており、従来よりも小さな時刻でのポテンシャルを使って物理量を計算することで、誤差の指数関数的改善が実現できると考えられる。

今後の重要な展望として P 波核力の計算を考えている。P 波核力に含まれる LS 力は原子核のスペクトルや魔法数、中性子星の内部構造などを理解するのに不可欠であり、それを格子 QCD によって解析する意義は大きい。格子 QCD での P 波核力の計算には 2 核子のソース演算子に有限の相対運動量を入れることが必要となる。そのため S 波核力よりもさらに難しく、これまではクォーク質量が非常に大きいところでの計算しかできていなかった。来年度、HAL+LapH 法によって P 波核力を計算し、素粒子と原子核のミッシングリンクを繋ぐことを目指す。

[十重項バリオンを含むバリオン間力の研究]

Δ 粒子に代表される十重項バリオンの相互作用の研究は、原子核構造研究において、仮想 Δ 粒子を介して 3 つの核子を巻き込んだ 3 核子効果 (Fujita-Miyazawa 型 3 体力) として重要な寄与を与える点で非常に重要である。実験的に NN 散乱で $N\Delta$ の閾値エネルギー近傍に幾つかの共鳴状態が存在することが示唆されており、このような状態を $N\Delta$ の相互作用から研究する事は非常に重要である。

本研究では、以前我々のグループで生成した 32^4 の大きさで、 $a \approx 0.12$ fm の SU(3) のゲージ配位 ($L=4$ fm) を使い、フレーバー SU(3) 対称性が厳密なセットアップのもとで $m(\text{PS})=840\text{MeV}$ での計算を行った。今回の計算資源を使用して、NN- $N\Delta$ - $\Delta\Delta$ 結合チャンネル計算に必要な NBS 波動関数を計算した。SU(3) 対称性に基づいて既約表現に分類すると $10 \otimes 8 = 35 \oplus 27 \oplus 10 \oplus 8$ となり、 $N\Delta$ は 35 と 27 表現だけに属している。これらの表現についての波動関数は、対応するスピン状態も考慮して図のように求めることができた。



$N\Delta$ の NBS 波動関数

(SU(3) フレーバー表現: 35 表現(上)、27 表現(下))

これらの波動関数の振舞いから、 $N\Delta$ 間相互作用については $(J, I) = (2, 1)$ と $(J, I) = (1, 2)$ どちらのチャンネルも短距離領域で斥力、長距離で引力となると考えられる。これらの結果から、強い束縛状態は存在せず、弱い束縛状態を形成する可能性は残されていると考えられる。また、 $\Delta\Delta$ をソースとする $N\Delta$ NBS 波動関数を計算した結果、明確なシグナルは得られなかった事から、 $N\Delta$ と $\Delta\Delta$ 間の結合の効果は小さいと考えられる。今後は、これらの結果を使って結合チャンネル計算を行い、 $N\Delta$ の相互作用を導出する予定である。

4. まとめ

本年度は、格子 QCD を用いたハドロン間力計算として、all-to-all 法を用いたメソン間力およびメソン・バリオン間力、LapH 法を用いた核力、十重項バリオンを含むバリオン間力など、様々な系・手法での計算を行った。

メソン間力については、HAL QCD 法と all-to-all 法を組み合わせることで、 $I=1$ $\pi\pi$ (P 波) 系の計算を行った。ポテンシャルの微分展開の高次項も含めた計算を行い、 ρ メ

ソン共鳴状態の導出に成功した。これにより、従来は困難であったクォーク対生成消滅ダイアグラムの計算方法を確立させることができた。

この手法をさらにメソン・バリオン間力に適用し、K中間子-核子系について精度の良い結果を得た。我々が別手法で行った結果とも無矛盾であり、HAL QCD法+all-to-all法がメソン・バリオン系でも有効であることが確かめられた。さらにこの手法を πN 相互作用(Δ バリオン)、 $K\bar{K}\Xi$ 相互作用(Ω バリオン)の計算にも適用し、引力ポテンシャルの結果を得た。

核力については、LapH法を基にした研究を行った。LapH法に独自の改良を加えることで、従来のLapH計算手法と比べ、計算コストを二桁ほど小さくすることに成功し、さらに我々がこれまで用いてきた手法と比べても、統計誤差の抑制、および非弾性散乱状態に起因する系統誤差の抑制に有効なことを明らかにした。

十重項バリオンを含むバリオン間力については、特に $N\Delta$ 間相互作用についての計算を行い、フレーバーSU(3)の35表現、27表現いずれの場合でも、短距離斥力、長距離引力という結果が得られた。

5. 今後の計画・展望

本年度の成果は、QCDに直接基づきハドロン共鳴状態を統一的に解明する上で重要な基盤となるものである。特に、HAL QCD法+all-to-all法の計算手法の確立により、クォーク対生成消滅ダイアグラムを含む系の計算が可能となり、格子QCDハドロン間力計算の適用範囲が大きく広がった。本年度のall-to-all計算では重心系での $I=1\ \pi\pi$ (P波)メソン間力、 KN (S波)メソン・バリオン間力を主な計算対象としたが、来年度以降、moving frameでの計算を行うことでさらなる高精度化を達成すると共に、 $I=0\ \pi\pi$ (S波)メソン間力(σ メソン共鳴)への拡張や、 πN (P波)メソン・バリオン間力(Δ バリオン)、 $K\bar{K}\Xi$ (P波)メソン・バリオン間力(Ω バリオン)計算の高統計化、より将来的には $K\bar{K}N$ (S波)メソン・バリオン間力($\Lambda(1405)$ バリオン)やエキゾチックハドロン系への適用など、様々なハドロン共鳴状態の研究を進めていく予定である。また、これまでの計算はクォーク質量が重い領域で行ってきたため、状態によっては共鳴状態ではなく束縛状態となる系もあったが、今後より軽いクォーク質量・大体積での計算を進め、実際の共鳴状態としての性質を調べることも重要な課題である。また、二体バリオンからなるバリオン共鳴状態については、十重項バリオンを含む

系について、現在の $N\Delta$ 計算から、 $NN-N\Delta-\Delta\Delta$ 結合チャネル計算への拡張を進めていく予定である。

二体バリオン間力における未解決の重要テーマは、P波バリオン間力への拡張である。これまでの手法では統計・系統誤差が大きく計算が困難であったが、本年度に開発したHAL QCD法+LapH法によりP波バリオン間力の計算が可能になりつつある。来年度以降の大規模計算により、まずはP波核力の導出を目指す予定である。また、HAL QCD法+LapH法はS波においても統計・系統誤差の改善に有用であり、特に物理点でのバリオン間力精密計算に向けた研究を進めていく予定である。このテーマにおいては、メソン間力、メソン・バリオン間力計算で開発したall-to-all法の拡張も有用となる可能性があり、様々な手法を複合的に組み合わせながら物理点での高精度計算を目指していく予定である。

2020年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

“ $d^*(2380)$ dibaryon from lattice QCD”

S. Gongyo, K. Sasaki, T. Miyamoto, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue and N. Ishii (HAL QCD Collaboration)
Phys. Lett. B 811, 135935 (2020), arXiv:2006.00856 [hep-lat].

(2)

“Lattice QCD and baryon-baryon interactions: HAL QCD method”

S. Aoki and T. Doi

Front. Phys. 8, 307 (2020), arXiv:2003.10730 [hep-lat].

(3)

“S-wave kaon-nucleon potentials with all-to-all propagators in the HAL QCD method”

K. Murakami, Y. Akahoshi and S. Aoki (HAL QCD Collaboration),

Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 093B03 (2020), arXiv:2006.01383 [hep-lat].

(4)

“The HAL QCD potential in $I = 1$ $\pi\pi$ system with the ρ meson bound state”

Y. Akahoshi, S. Aoki, T. Aoyama, T. Doi, T. Miyamoto and K. Sasaki

Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 073B07 (2020), arXiv:2004.01356 [hep-lat].

(5)

“ $\Lambda\Lambda$ and $N\Xi$ interactions from Lattice QCD near the physical point”

K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, K. Murano and T. Miyamoto (HAL QCD Collaboration)

Nucl. Phys. A 998, 121737 (2020), arXiv:1912.08630 [hep-lat].

(preprint 版は報告済み)

【会議の予稿集】

(1)

“Study of the pion-pion scatterings with a combination of all-to-all propagators and the HAL QCD method”

Y. Akahoshi, S. Aoki, T. Aoyama, T. Miyamoto and K. Sasaki for HAL QCD Collaboration

PoS LATTICE2019 (2019) 058, arXiv:1911.12539 [hep-lat].

(preprint 版は報告済み)

【口頭発表】

(1)

“Nuclear force from lattice QCD with LapH smearing”,

Takuya Sugiura, Tatsumi Aoyama, Takumi Doi,

Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020), August 2020.

2020年度 利用報告書

- (2)
“格子 QCD による奇パリティ核力の計算”,
杉浦拓也, 青山龍美, 土井琢身, 赤星友太郎, 土居孝寛,
日本物理学会 第 76 回年次大会, March 2021.
- (3)
“HAL QCD + LapH 法を用いた奇パリティ核力”
杉浦拓也 (for HAL QCD collaboration),
「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム, January 2021.
- (4)
“Study of the rho resonance using the HAL QCD method”
Y. Akahoshi, S. Aoki (HAL QCD Coll.)
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020), August 2020.
- (5)
“Studies on meson-baryon interactions in the HAL QCD method with all-to-all propagators”
K. Murakami, Y. Akahoshi, S. Aoki (HAL QCD Coll.)
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020), August 2020.
- (6)
“HAL QCD 法を用いたロー中間子共鳴状態の解析”
赤星友太郎, 青木慎也 for HAL QCD Coll.
日本物理学会, 2020/09/14-17
- (7)
“All-to-all propagator を用いた HAL QCD 法のメソン-バリオン系への応用”
村上耕太郎, 青木慎也 for HAL QCD Coll.
日本物理学会, 2020/09/14-17
- (8)
“Recent progress on Hadron Interactions from Lattice QCD”
T. Doi for HAL QCD Coll.
ELPH 研究会 C029, 2020/11/4-5
- 【その他(著書、プレスリリースなど)】**
- (1)
プレスリリース
「新たなハイパー原子核「グザイ・テトラバリオン」 - グザイ粒子の振る舞いを精密計算で解き明かす - 」(2020/03/05)
E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto and Th. A. Rijken
Phys. Rev. Lett. 124, 092501 (2020).