

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)、土居孝寛(1)、権業慎也(1)、杉浦拓也(2)、初田哲男(2,1)、赤星友太郎(1)、青木慎也(1)、青山龍美(1)、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最重要課題の一つが、物質を構成する主要要素である粒子「ハドロン」の間に働く力・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、安定ハドロンの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、主に散乱実験による現象論的解析が用いられたり、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。また、そもそも散乱実験が困難な系やモデルの信頼性が不明の系では、ハドロン間力は大きな不定性を持つ状況にあった。

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一般利用により、既に様々なハドロ

ン間力の研究を進めてきており、中でも一時代を画した研究が、世界初となる物理点バリオン間力の決定である。これまで $\Omega\Omega$ ダイバリオン、 $N\Omega$ ダイバリオンといった(準)束縛する新粒子を予言するなど、大きな成果を挙げてきた。本年度は現在非常に注目を集めている ΞN 間相互作用について最終結果を発表すると共に、その結果に基づいた Ξ ハイパー原子核の予言や、重イオン衝突時バリオン間相関の予言を行った。また、物理点では統計誤差の大きい ΛN , ΣN , NN 間相互作用の高精度決定に向けて、物理点よりやや重いクォーク質量でのバリオン間力計算も行った。これらの結果は、J-PARC 実験におけるハイパー核実験、理研-BNL RHIC や CERN LHC など重イオン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)、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いる。

このようなバリオン間力に関する実績に基づき、本年度に特に注力したのが、より一般のハドロン間力に拡張した計算であり、特にハドロン共鳴状態の全貌解明に向けた研究である。

実際、数百種類も知られているハドロンのうち、崩壊せず安定して存在するハドロンはごく少数であり、その以外のほとんどは共鳴状態として存在している。先に述べたように前者については QCD からの直接理解が進んでいるものの、後者については未開の領域である。これら共鳴状態の研究において肝となるのが、対応するハドロン間力の情報であり、本研究ではその格子 QCD 計算による研究を行った。

本年度計算の一つの柱が、all-to-all 法を用いたメソン間力の研究であり、特に $I=1 \pi \pi$ (P 波)メソン間力の計算と、対応する ρ メソン共鳴状態の研究を行った。この計算における挑戦的課題は、従来扱いが難しかった

クォーク対生成・消滅ダイアグラムの計算であり、本年度の研究により新たな計算手法の開発と共に、その大規模数値計算を行った。

もう一つの柱が、(Δ 粒子などの)十重項バリオンを含むバリオン間力の計算である。これは、実験で観測されているダイバリオン共鳴状態とも関わる計算であり、また十重項バリオンに関する大きな(Lorentz)自由度の扱いが理論的課題であった。本年度は主に $\Delta\Delta$ バリオン間力を対象として、理論定式化・数値計算を行った。

これらの研究で得られた新たな手法は汎用的なものであり、近年、世界各地の大型加速器実験において報告されている(通常メソン・バリオンに分類できない)エキゾチック粒子/共鳴状態の解明に向けた重要なステップともなるものである。

2. 具体的な利用内容、計算方法

3. 結果

本年度の当初計画では、[all-to-all法を用いたメソン間力の研究]と、[十重項バリオンを含むバリオン間力の研究]を予定しており、特に前者について大きな計算資源を用いる予定であった。しかし、年度途中でメソン間力の新しい計算手法の開発に成功し、統計誤差を約1/10に減少させることができた。(実質的に計算コストが1/100になったことに対応する。)これにより、演算子の最適化などについても系統的研究を実行することができ、メソン間力計算は大きな進展を達成した。

また十重項バリオン間力計算についても、新たな解析手法の定式化に成功すると共に、上記で節約できた計算資源を利用することで、当初予定ではクォーク質量1点での計算のところ、実際には計3点で計算し、クォーク質量依存性をも明らかにすることができた。さらに、当初計画にはなかった、[パイオン質量270MeVでの(主に八重項の)バリオン間力精密計算]をも実行することができた。

これらの新しい計算に加え、過去の理研スパコン利用で生成したデータについて解析作業を進め、[物理点バリオン間力]について新しい結果を発表すると共に、それを用いた原子核やバリオン相関計算を行った。

以下では説明の流れの都合上、「2. 具体的な利用内容、計算手法」、「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。

[all-to-all法を用いたメソン間力の研究]

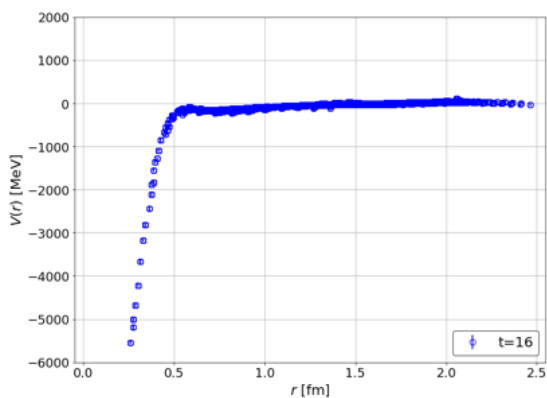
ハドロン共鳴状態の統一的理解は、原子核・ハドロン物理における長年の課題である。特に、近年は様々なエキゾチックハドロン(共鳴)状態の発見が報告されているが、これら状態の背後の物理を解明するには、対応するハドロン間力を決定する必要がある。

共鳴状態が存在するチャンネルのハドロン間力の格子QCD計算では、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、従来の我々の手法ではその取扱いが技術的に難しかった。そこで本研究では $I=1 \pi\pi$ (P波)メソン間力を対象として、その計算手法の確立を図ると共に、 ρ メソン共鳴状態の研究を行った。

ゲージ配位としては、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た。格子サイズは $32^3 \times 64$ で格子間隔は $a = 0.0907\text{fm}$ 、パイオン質量が410MeVであり、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。

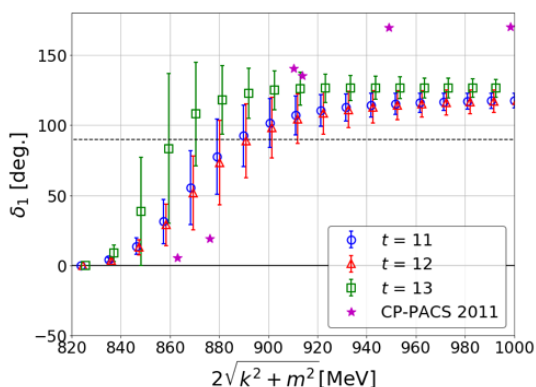
本研究では、対生成消滅ダイアグラムの計算手法として、all-to-all法とHAL QCD法を組み合わせた手法を研究した。以前の我々の研究により、この手法で $I=2 \pi\pi$ メソン間力が正しく計算できることが解っていたが、本年度 $I=1$ チャンネルを計算するにあたり、計算手法を劇的に改善させることに成功した。具体的には、“one-end trick”, “sequential法”, “all-mode average(AMA)法”と組み合わせて“all-to-all法”の計算を行うことで、(また後で述べるような演算子改良とも組み合わせることで)、統計誤差を1/10にできることを見出した。モンテカルロ計算のため、これは実質的に計算コストを1/100へと削減させたことに対応する。

この手法を用い、相関関数の計算において最適な演算子について系統的研究を行った。まず、ソース演算子として ρ タイプのものを用い、シンク演算子の最適化について調べた。我々のこれまでの研究で、シンク演算子はポテンシャルの非局所性についての微分展開と密接に関係しており、演算子の局所性を良くするほど微分展開の収束性が良くなることが解っている。しかし本研究で、対生成消滅ダイアグラムのある計算では、完全に局所的な演算子を用いると統計誤差が増大してしまうため、小さな非局所性をシンク演算子に導入することが良いと判明した。これにより得られた相互作用ポテンシャル(微分展開は第0次項近似)が下図となる。



I=1 $\pi\pi$ メソン間力

ポテンシャルの結果を用いて対応する散乱位相差を計算すると以下のような結果となった。



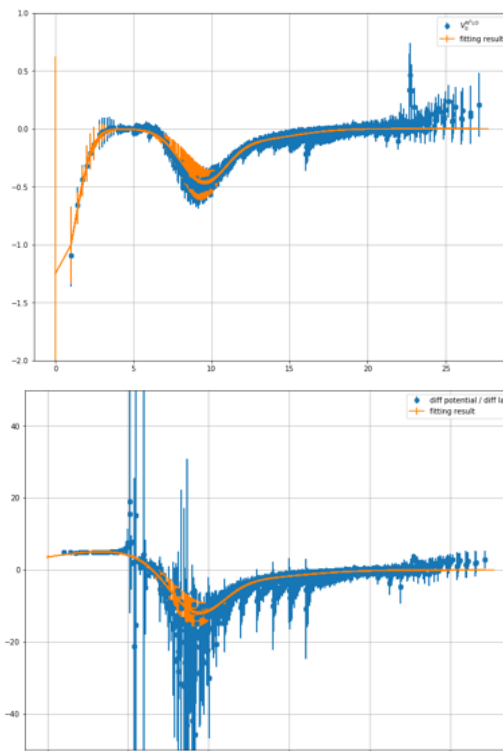
I=1 $\pi\pi$ 散乱位相差

位相差は、質量 890MeV 近傍で 90 度を切る結果となっている。これはまさに共鳴状態としての ρ メソンの振舞いが得られていることを意味しており、all-to-all 法+HAL QCD 法がうまく機能していることが解る。

一方で、別手法(有限体積法)を用いた先行研究の結果(CP-PACS 2011・中心値のみ表示)と比べると、定量的には少し違いが見られる。詳細にはそれぞれの手法の誤差を吟味する必要があるが、もっとも可能性が高いのは、ポテンシャルの微分展開の高次項の影響である。実際、この計算ではシンク演算子に非局所性を導入しているため、そのような効果があることは自然である。

そこで我々は新たに、ポテンシャルの微分展開高次項の決定に向けた予備的研究を行った。そのためには、ソース演算子として、 ρ タイプのものに加えて $\pi\pi$ タイプのものを用い、これら2つの情報から、ポテンシャルの第0次項、第2次項の2つを決定すればよい。(第1次項はこのケースでは存在しない。) 現在はまだ低統計の計算データであるが、実際に高次項も含めたポテンシャル決定ができることを確

認したのが下図となる。



I=1 $\pi\pi$ メソン間力

上は微分展開第0次項、下は第2次項

この結果を基に、散乱位相差を計算したところ、現在はまだ統計誤差がかなり大きいものの、位相差の振舞いが改善する傾向が得られている。

今後は、来年度の計算で統計数を上げポテンシャルの第2次項まで精度よく決定し、微分展開の収束性をコントロールすることで、散乱位相差の定量的決定を行う予定である。

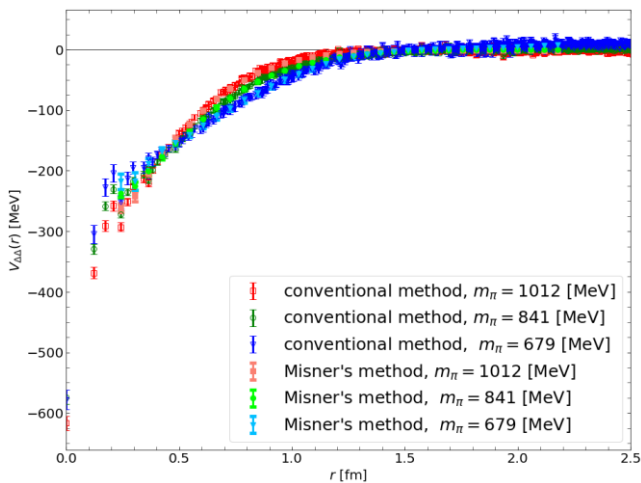
[十重項バリオンを含むバリオン間力の研究]

十重項バリオンを含むバリオン間力のうち、合成スピン $J=3$ 、アイソスピン $I=0$ の $\Delta\Delta$ 間相互作用を計算した。このチャンネルでは、実験で $d^*(2380)$ のダイバリオン共鳴状態が見つかっているが、QCD に直接基づく理論研究はこれが初めてのものである。

本研究では、QCD に基づいてこのダイバリオンの定性的な形成機構を知るために、SU(3) 対称性が厳密で、 Δ バリオンが安定な粒子となる重いパイ中間子のセットアップで格子QCDのシミュレーションを行なった。年度当初はパイ中間子質量 1 点のみでの計算予定だったが、研究の進展により、計 3 点での計算を行うことができた。実際に用いたゲージ配位はかつて我々のグループによって生成された 3 種類の配位である。それらは、格子サイズは

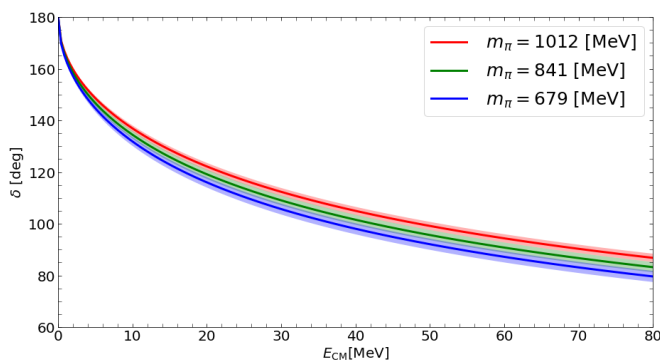
32³×32, 格子間隔は a=0.1214fm, π中間子の質量はそれぞれ m_π=1012 MeV, 841MeV, 679MeV で与えられる。

まず本研究では、Δ Δ (J=3, I=0)間相互作用を計算した。その結果、どの配位でも、下図に示すように、短距離領域で斥力がなく、強い引力領域のみが存在する結果が得られた。また、Δ Δの間には長距離では1π中間子交換が起こると考えられるが、実際、π中間子の質量が小さいシミュレーションほど、長距離の引力が強くなっている事がわかる。なお、下図で conventional methodとは格子 QCD でよく使われている正六面体群の A₁ 表現への射影をしてポテンシャルを抜き出す方法で、軌道角運動量 L=0 のみならず、わずかに L=4, 6, …の寄与が混じっている。一方、Misner's method は、昨年度より我々がハドロン間力計算に初めて適用を始めた新たな部分波展開法である。ここでは球殻の中の正六面体群の変換で結びつかない格子点を用いて、L=0 のみを抜き出している。



Δ Δ (J=3, I=0)間相互作用

さらに、このポテンシャルを用いてシュレディンガー方程式を解き、散乱位相差を計算したところ、下図のようにどの配位も束縛を示す結果となった。



Δ Δ (J=3, I=0)の散乱位相差

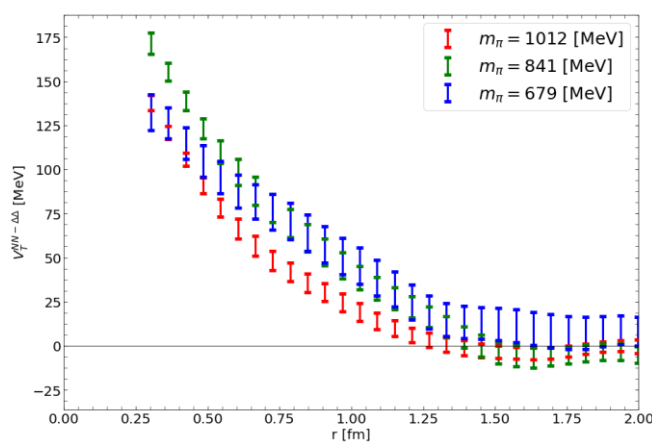
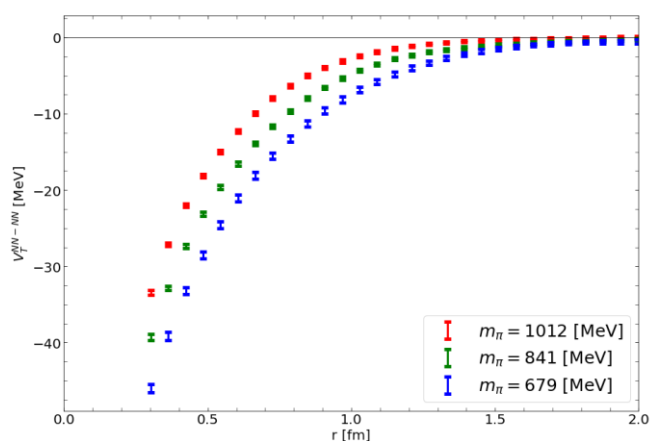
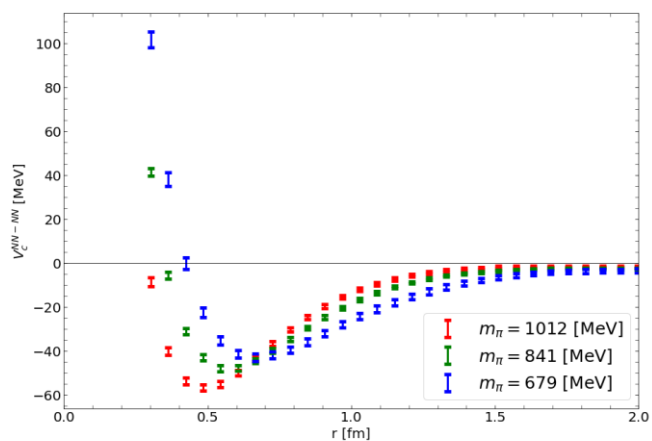
一方、D 波 (以上) の2バリオン系を考慮すると、Δ Δ (J=3, I=0)の閾値の下に2核子 (NN) の系 (内部スピン S=1 で D 波もしくは G 波で合計スピン3となる組み合わせ) が存在する。

そこで、Δ Δ系から NN 系への遷移ポテンシャルを計算し、崩壊率を見積もった。そのためにまず、Δ バリオンが関与する系における結合チャンネルポテンシャルの解析方法について、新たな定式化を行った。具体的には、通常の NN 系のみで構成される Okubo-Marshak 展開を拡張し、Pauli 行列 σ だけでなく、Δ バリオンから核子への遷移行列 (spin-3/2から spin-1/2への遷移行列) Σも含めて、出現しうるポテンシャルの形を明らかにした。その展開では最低次で、通常の NN 系の中心力、テンソル力に加え、Δ Δ系から NN 系への遷移を表す2種類のポテンシャル (Σ・Σ 中心力と Σを用いて作られるテンソル力) の4つが存在することがわかった。したがって、原理的には (S=1, S, D 波, J=1) と (S=1, D, G 波, J=3) の4種類の NN シンク-Δ Δソースのデータから計算することができる。Misner's method を用いながら実際に4つのポテンシャルを導出したところ、ノイズは大きいですが、遷移ポテンシャルのうちの Σ・Σ 中心力は無視できるほど小さい結果が得られた。

そこで次に、最初から Σ・Σ 中心力を無視するとして、データのシグナルが良い (S=1, S, D 波, J=1) と (S=1, D 波, J=3) の3種類のデータのみを用いて、3つのポテンシャル (NN の中心力・テンソル力ならびに Δ Δから NN への遷移テンソル力) を計算した。その結果が下図となる。

2核子の中心力とテンソル力については、(S=1, S 波, D 波, J=1) の NN シンク-NN ソースのデータから得られた (我々のグループの) 先行研究が存在し、この結果と比較したところ、誤差の範囲で一致している結果となった。さらに、Δ Δから NN への遷移テンソル力を用いて、崩壊率を計算したところ、数 MeV 程度と小さいことがわかった。

現在、これらの結果についての論文執筆中である。また、来年度は本研究により確立されたこの方法に基づいて、N Δ系のシミュレーションを行いたいと考えている。



上から2核子系の中心力、テンソル力、 $\Delta\Delta$ からNNへの遷移テンソル力

[物理点バリオン間力]

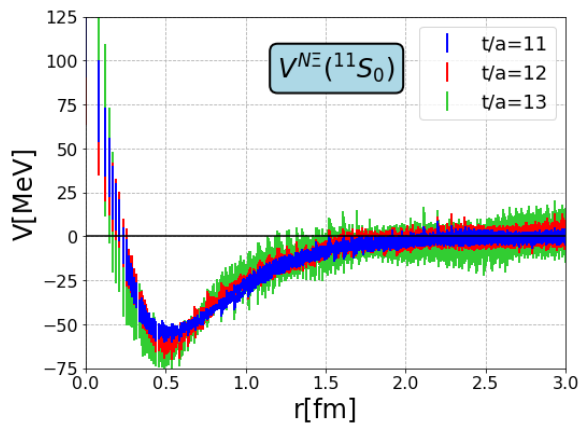
物理的クォーク質量近傍(パイオン質量 146MeV)で、格子体積(8.1fm)⁴という世界最大級のサイズを持つ配位を用い、物理点バリオン間力の決定を行った。計算対象としては二体バリオン間力についてストレンジネス|S|=0(核力)~6($\Omega\Omega$ 力)まですべての核力・ハイペロン力を包括的に扱い、その偶パリティチャンネルにおける中心力・テンソル力を計算した。測定計算にあたっては、統一縮約法という我々が開発したアルゴリズムを用いることにより、計算を(系に応じて)数

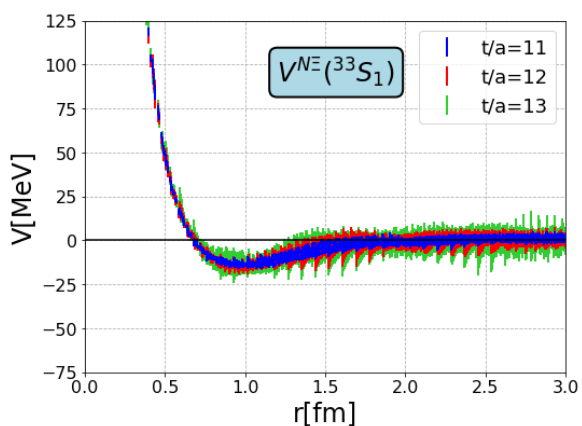
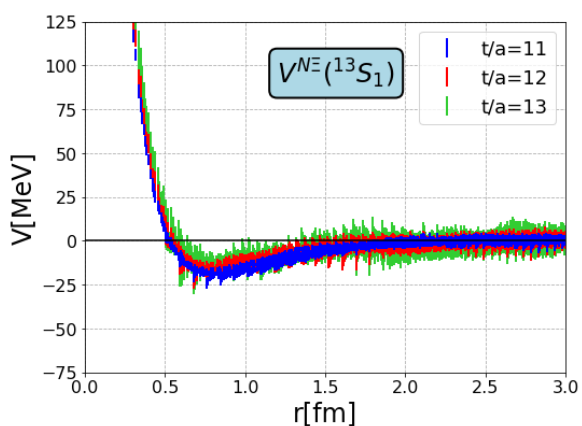
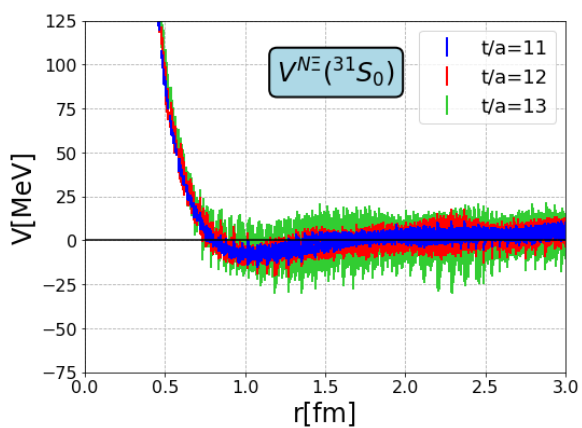
倍から数万倍以上高速化している。モンテカルロ計算部分は以前の理研スパコン一般利用で完了しており、現在は得られたデータを基にして順次物理量(束縛エネルギーや位相差)の予言や、原子核多体計算への応用、またその加速器実験との比較などを進めている。ここでは本年度に発表した重要な成果について報告する。

• ΞN 間相互作用の予言

現在、バリオン間力について非常にホットピックとなっているのが ΞN (Ξ 粒子-核子)間相互作用である。 Ξ 粒子を含むハイパー原子核はどのようなものが存在するのか、また(ΞN と結合する)H ダイバリオンは存在するのか、これらは原子核物理における長年の謎であった。近年、 Ξ ハイパー核の存在が初めて実験的に報告され、 ΞN 相互作用の解明はますます注目を集めている。さらに、高密度核物質においては Ξ 粒子が出現して状態方程式に影響を及ぼす可能性があり、 ΞN 相互作用の決定は、中性子星の構造や超新星爆発の解明にも重要となっている。しかし、 ΞN 散乱実験は非常に難しく、ハイパー核も現時点で上記の一例が報告されたのみであり、格子 QCD 第一原理計算による理論的予言が待ち望まれていた。

本研究では、 ΞN 相互作用について、そのスピン(S)・アイソスピン(I)依存性も含めて系統的に決定することに成功した。下図に示すのが、各チャンネル $^{2I+1, 2S+1}L_J$ におけるポテンシャルの結果である。(なお、 $^{11}S_0$ チャンネルについては、 Λ - Λ - ΞN 結合チャンネルを解いて得られた ΞN - ΞN ポテンシャルを示している。)

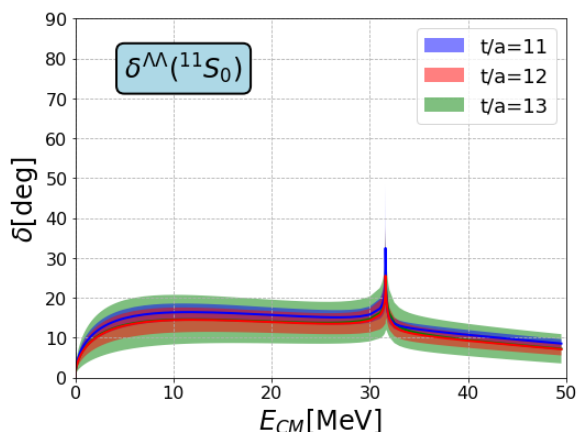
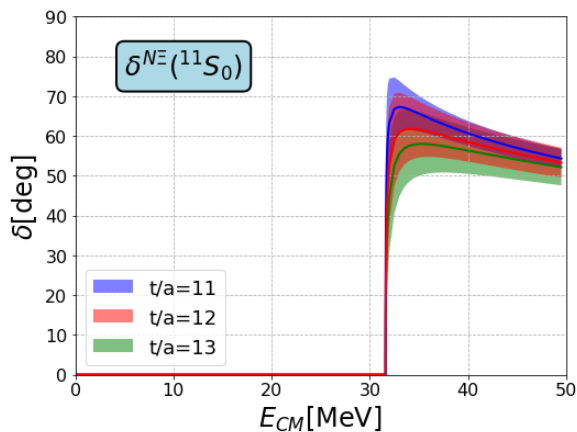




ΞN 相互作用(上から $^{11}S_0$, $^{31}S_0$, $^{13}S_1$, $^{33}S_1$ チャンネル)

この結果から、 $^{11}S_0$ チャンネルでは強い引力が存在する一方、 $^{31}S_0$ チャンネルは斥力になっているなど、複雑なスピン・アイソスピン依存性があることが解る。このような結果は、従来現象論的に構築されてきたポテンシャル、例えば Nijmegen ポテンシャル (ESC08c) などとはかなり異なっており、格子計算による決定のインパクトは非常に大きい。

このポテンシャルを基に散乱位相差を計算すると、例えば $^{11}S_0$ チャンネルにおける ΞN 位相差(およびそれと結合する $\Lambda \Lambda$ 位相差)は下のようになる。



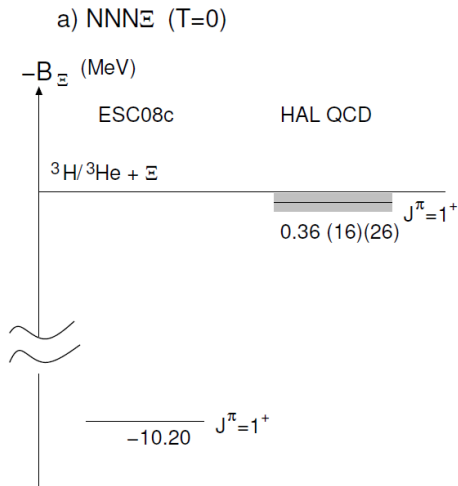
散乱位相差($^{11}S_0$) 上図: ΞN 、下図: $\Lambda \Lambda$

この結果は、 ΞN ($^{11}S_0$)の強い引力と対応する特徴的振る舞いとなっている。また、($\Lambda \Lambda$ 閾値以下の)束縛 H ダイバリオンが存在しないことも解る。一方、(非束縛だが)H ダイバリオンの物理に由来する、pole 構造は散乱行列に現れており、その最終的な解析を進めている。

•新たなハイパー核「グザイ・テトラバリオン」の予言

ΞN 相互作用がいったん決定されると、どのような Ξ ハイパー核が存在するのか、原子核多体計算により予言することができる。特に、軽い Ξ ハイパー核は実験との関係でも重要であり、我々は量子少数多体系の専門家と共同研究を行い、その予言を行った。

少数多体系の解法として、ガウス展開法を用い、 Ξ 粒子 1 個に加えて、核子 (N) について 1 個、2 個、... と増やしながらか計算したところ、核子数が 3 個の場合に Ξ ハイパー核 (アイソスピン 0, $J^P=1^+$) が存在することが明らかになった(「グザイ・テトラバリオン」)。これは、先に示したような、 ΞN 相互作用の引力と斥力が絶妙にバランスすることで起きる現象と解った。今後、重イオン衝突を用いた Ξ ハイパー核生成など、実験的検証が期待される。

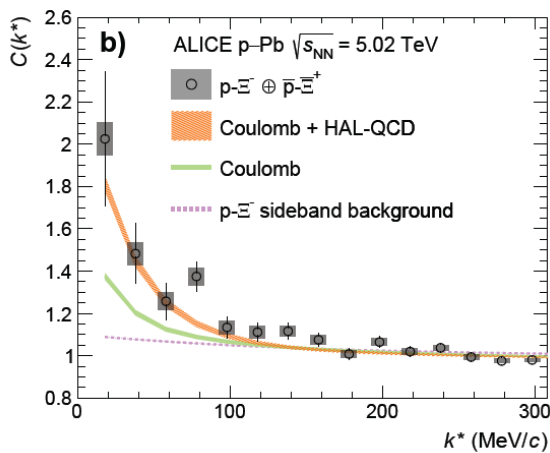


格子 ΞN 力に基づく Ξ ハイパー核のスペクトラム(右)
(左は現象論 ΞN 力(ESC08c)を用いた場合の結果)

・重イオン衝突・バリオン間相関実験との定量的比較

バリオン間相互作用の新たな実験的検証手法として、重イオン衝突実験におけるバリオン間相関観測が近年注目されている。我々は格子 QCD で決定された ΞN 相互作用を基に、重イオン衝突の理論計算専門家や実験グループと連携して、理論と実験の比較を行った。

下記に示すのがスイス CERN の LHC 加速器で行われた重イオン衝突実験(ALICE Coll.)の結果と、我々 HAL QCD Coll.が計算した格子 ΞN 相互作用に基づく予言との比較である。この結果から、実験における観測値(黒シンボル)と、格子 QCD 計算に基づく理論値(オレンジの線)が良く一致していることが解る。



重イオン衝突における ΞN 相関
(ALICE Coll., PRL123(2019)112002)

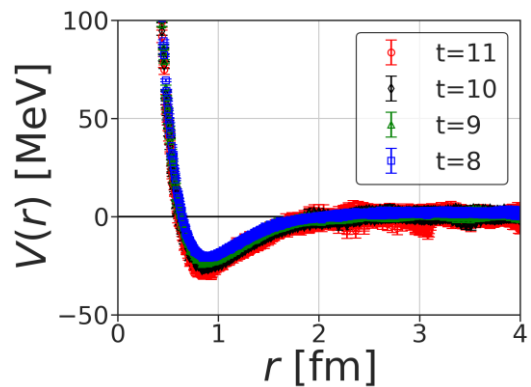
実験側は今後検出器のアップグレードなどで統計データが約二桁増大すると見込まれており、理論・実験の連携に

よる研究がさらに進展していく見込みである。

[パイオン質量 270MeV でのバリオン間力精密計算]

格子 QCD におけるバリオン間力においては、ストレンジネス|S|が大きいチャンネルについては精度良く決定できるが、|S|が小さいチャンネル、特に|S|=1 の ΛN , ΣN 間相互作用や|S|=0 の核子間相互作用(核力)については統計誤差が大きくなることが知られている。この傾向はクォーク質量が軽くなるほど強くなり、物理的クォーク質量においては、先に示したように|S|=2 の ΞN 間相互作用までは統計精度が良好な結果が得られているが、|S|=0,1 はかなり統計誤差が大きい。そこで本研究では、物理点よりややクォーク質量が大きい、パイオン質量 270MeV において大統計計算を行い、バリオン間力の高精度決定を行った。なお、バリオン間力のクォーク質量依存性は、我々の宇宙におけるクォーク質量が少し異なっていたらどのような原子核が存在しうるのかという謎とも対応し、いわゆる人間原理との関連でも興味深い問題である。

下に示すのが 1S_0 チャンネルにおける ΛN 間相互作用(|S|=1)の計算結果である。相関関数の時間tが比較的大きい領域でも統計揺らぎが抑えられた結果となっている。



ΛN 間相互作用 (1S_0)

なお、これは ΣN 間相互作用の効果も繰り込まれた、有効 ΛN 間相互作用の結果であるが、今後 ΛN - ΣN 結合チャンネル解析を進めていく。これらの結果は、J-PARC におけるハイペロン核子散乱実験や、中性子星の構造の理解にインパクトを与えるものである。

4. まとめ

本年度の研究では、主にハドロン共鳴状態・対応するハドロン間力について、格子 QCD による第一原理計算を行った。なかでも、I=1 $\pi\pi$ メソン間力の計算においては、従

来扱いが困難であったクォーク対生成・消滅ダイアグラムを現実的に計算する手法を開発し、年度当初予定より統計精度を一桁改善する(=計算コストは二桁改善)という、非常に大きな成果を達成した。得られた結果を基に計算した散乱位相差は、 ρ メソン共鳴状態に対応する特徴的振る舞いを示しており、我々の手法が有効であることを示している。

また、ダイバリオン共鳴状態に関連する研究として、十重項バリオンを含むバリオン間力の研究をおこなった。ここでは、十重項バリオンに起因する大きな(Lorentz)自由度の取り扱いと、八重項バリオンとの結合による高次部分波の寄与の計算が挑戦的課題であったが、新たな理論定式化・計算手法の開発により問題を克服し、 $\Delta\Delta$ 間相互作用について決定することに成功した。

これらと並行して、過去の理研スパコン利用で得られた物理点バリオン間力のデータ解析を進め、 ΞN 間相互作用について最終結果を創出すると共に、得られた相互作用を基にした原子核計算・重イオン衝突バリオン間相関への応用研究を行った。前者については新たなハイパー原子核「グザイ・テトラバリオン」を予言し、後者については我々の予言が実験によって裏付けられる状況にまで至っている。また、物理点では統計誤差の大きい $\Lambda N, \Sigma N, NN$ 間相互作用について、クォーク質量がやや重い領域で大統計計算を行うことで、高精度での決定を行うことができた。

5. 今後の計画・展望

本年度の研究成果は、格子 QCD 第一原理計算によりハドロン共鳴状態の全貌を解明するという、原子核・ハドロン物理における長年の夢の実現に向けて、重要な基盤を与えるものである。

短期的には、本年度で計算した $I=1 \pi\pi$ (P 波)メソン間力について、来年度はポテンシャルの(微分展開における)高次項まで計算し、散乱位相差・ ρ メソン共鳴状態についてより精密な決定を行う予定である。さらにこの手法を $I=1/2 \pi K$ (S 波)メソン間力の計算へ適応し、これまで謎が多かった κ メソン共鳴の解明に向けた研究を開始する。

より長期的には、メソン間力のみならず、メソン・バリオン間力も含めた計算により、様々なハドロン共鳴状態の研究を目指している。特に、近年は(通常メソン・バリオンに分類できない)エキゾチックハドロン(共鳴)の実験・理論的研究が非常に盛んになっており、その格子 QCD による解明を進めていく予定である。

十重項バリオンを含むバリオン間力についても、本年度の $\Delta\Delta$ 間相互作用の計算成功を受けて、来年度は $N\Delta$ 間相互作用の計算と、対応する束縛/共鳴状態の探索を予定している。

これらの結果は、八重項バリオンのバリオン間力の結果と相まって、素粒子物理と原子核物理を繋ぐ重要な架け橋となるだけでなく、中性子星の構造やその連星合体现象、超新星爆発の解明といった宇宙天文物理における重要課題へも繋がるものである。本年度行った、格子 QCD の結果を基にした原子核・バリオン間相関の計算結果は、J-PARC でのハイパー核実験や LHC での重イオン衝突実験など、世界各地の大規模実験の方向性にも大きなインパクトを与えており、今後も高密度核物質系の状態方程式・中性子星の構造の計算など、格子ハドロン間力に基づく様々な応用研究を進めていく予定である。

2019年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

“ $\Lambda\Lambda$ 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)

arXiv:1912.08630 [hep-lat] (2019),

submitted to Nucl. Phys. A.

(2)

“ $N\Omega$ dibaryon from lattice QCD near the physical point”

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

Phys. Lett. B 792, 284–289 (2019), arXiv:1810.03416 [hep-lat].

(preprint 版は報告済み).

以下の論文は、直接 HOKUSAI を用いた結果ではないが、HOKUSAI を用いて得られた結果を用いることが本質的に重要な役割を果たしており、実質的に HOKUSAI が産み出した成果である。

(3)

“Possible lightest Ξ Hypernucleus with Modern ΞN Interactions”

E. Hiyama, K. Sasaki, T. Miyamoto, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Yamamoto and Th. A. Rijken

to appear in Phys. Rev. Lett., arXiv:1910.02864 [nucl-th]

(4)

“Probing $\Omega\Omega$ and $p\Omega$ dibaryons with femtosopic correlations in relativistic heavy-ion collisions”

K. Morita, S. Gongyo, T. Hatsuda, T. Hyodo, Y. Kamiya and A. Ohnishi

Phys. Rev. C 101, 015201 (2020), arXiv: 1908.05414 [nucl-th]

(5)

“Baryon-baryon interactions at short distances -- constituent quark model meets lattice QCD”

A. Park, S.-H. Lee, T. Inoue, T. Hatsuda,

arXiv: 1907.06351 [hep-ph].

【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

arXiv:1911.12539 [hep-lat].

Submitted to Proc. of Lattice2019.

(2)

2019 年度 利用報告書

“Hyperon Forces from QCD and Their Applications”

T. Inoue for HAL QCD Collaboration

JPS Conf.Proc. 26 (2019) 023018.

【口頭発表】

(1)

“Recent progress on Lattice QCD calculation of Baryon Forces”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at Mini Workshop on “Few-body and cluster problems in nuclear systems”, Kyoto University, Kyoto, Japan, 28 Oct. 2019.

(2)

“Recent progress on Lattice QCD of Two- and Three-Baryon Forces”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at Bethe Forum “Multihadron Dynamics in a Box”, Bethe Center for Theoretical Physics, Bonn, Germany, 9–13 Sep. 2019.

(3)

“Baryon interactions from Lattice QCD at $m_\pi = 0.27$ GeV”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at “The 37th International Symposium on Lattice Field Theory(Lattice 2019)”, Wuhan, China, 16–22 Jun. 2019.

(4)

“Consistency between Lüscher’s method and HAL method for two-baryon systems on the lattice”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at International Molecule-type Workshop “Frontiers in Lattice QCD and related topics” (FLQCD2019), YITP, Kyoto, Japan, 15–26 Apr. 2019.

(5)

“Baryon Interactions from Lattice QCD near the physical point”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “MOST-RIKEN workshop on ab initio theory in nuclear physics”, Peking University, Peking, China, 6–8 Apr. 2019.

(6)

“Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2019)”, Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), Kyoto, Japan, 16–19 Dec. 2019.

(7)

“The relation between the two-particle spectrum in a finite volume and the (non-) analytic properties of the scattering

2019年度 利用報告書

matrix”

T. Doi, S. Aoki and T. Iritani for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Kyushu University, Fukuoka, Japan, 14–17 Mar. 2019.

(8)

“Nuclear Physics from Lattice QCD : Current status and Future prospects”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at RIBF “Hodan-kai” meeting by Young Researchers on “Future of Exotic nuclear physics”, RIKEN iTHEMS, Kobe, Japan, 18–20 Feb. 2019.

(9)

“Theoretical and practical issue in the HAL QCD and direct methods”

S. Aoki, for HAL QCD Collaboration

“Lattice QCD”, Santa Fe, New Mexico, USA, August 26 – 30, 2019

(10)

“Study of Ξ -nucleus and Ξ -atom based on the ΞN interaction from QCD on lattice”

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

INPC2019, Glasgow, UK, 2019/07/28–8/2

(11)

“Nuclear Forces from Lattice QCD”

T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration

INPC2019, Glasgow, UK, 2019/07/28–8/2

(12)

“Baryon–Baryon interaction from lattice QCD”

S. Gongyo for HAL QCD Collaboration

Lattice 2019 (Plenary talk), Wuhan, China, Jun. 2019

(13)

“Partial wave decomposition in lattice QCD”

S. Gongyo for HAL QCD Collaboration

International Molecule-type Workshop Frontiers in Lattice QCD and related topics, Kyoto, Japan, Apr. 2019

(14)

“Recent lattice QCD results on hyperon–nucleon & hyperon–hyperon interactions from HAL QCD”

T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration

Strangeness in Quark Matter 2019 (SQM2019), Bari, Italy, 2019/06/10–15

(15)

“物理点格子 QCD による Ξ 原子と Ξ 原子核の研究”

2019 年度 利用報告書

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(九州大学伊都キャンパス、2019年3月14日-17日)

(16)

“物理点格子 QCD による核子・オメガ粒子系の解析”

T. Iritani, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(九州大学伊都キャンパス、2019年3月14日-17日)

【その他(著書、プレスリリースなど)】

(1)

“大規模な格子 QCD 計算が予言する複合粒子「ダイオメガ」”

権業慎也、佐々木健志

(物理学会誌 2019 年 12 月号)