

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)、初田哲男(2,1)、青木慎也(1)、青山龍美(1)、赤星友太郎(1)、池田陽一(1)、井上貴史(1)、石井理修(1)、宮本貴也(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

現代の原子核物理における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」の間に働く相互作用、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、例えば質量などは、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うるのか、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、どのような物質進化をしてきたのか、これら物理学における根源的な問題を解明する上では、ハドロン間力の決定が必要不可欠である。

様々なハドロン間力のうち、核子と呼ばれるバリオン(=陽子・中性子)の間に働く力、核力については、散乱実験による研究が行われてきたが、これらは主に現象論的解析に基づいており、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、バリオンのうちハイペロン(ストレンジクォークを含むバリオン)に関わる相互作用(ハイペロン力)については、中性子星の深部構造や、連星中性子星の合体・重元素合成など、宇宙における超高密度環境における性質(状態方程式)を決定する上で重要な役割を果たすことが知られているが、散乱実験が困難なことから、その決定は極めて困難であった。さらに近年の加速器実験の進展により、多様な新ハドロン粒子(エキゾチックハドロン)の候補が見つかったが、これらを理解する上では、対応する系で働くハドロン間力の情報がキーとなる。しかし、必要なハドロン間力は、ハイペロン力を含むバリオン間力、さらにメソン・メソン間力、メソン・バリオン間力など多岐にわたっており、その多くは未知な状況にある。

このような状況に鑑み、我々は QCD の第一原理計算である格子 QCD を用いることで、様々なハドロン間力を QCD から直接決定するというプロジェクトを推進している。これは、我々 HAL QCD 共同研究グループが、分野そのものを創り出したといっても過言ではない独創的研究テーマであり、理論定式化・大規模数値計算の両面から世界をリードしてきている。

理論定式化として用いるのは、我々 HAL QCD グループで開発・発展させてきた、(時間依存型)HAL QCD 法である。これは、南部-ベレーサルペータ(NBS)相関関数を計算し、シュレーディンガー型の方程式を通してハドロン間力を導出するもので、散乱位相差に忠実なハドロン間力が得られることが理論的に保証されている。またこの手法の重要な利点として、格子上で基底状態と散乱励起状態を分離することなくハドロン間力を導出可能である。これは従来格子 QCD で用いられてきたプラトー同定に基づく原子核直接計算法では各固有状態の分離が必要であることと比べ、大きな優位性を持つ。実は直接計算法と HAL QCD 法の間では計算結果に食い違いがあることが知られており、格子 QCD 分野における重大未解決問題として激しい論争が行われてきたが、我々の最近の仕事により、従来の直接計算法の結果は“物理的に正常でない”ことが示され、定量的な予言をするには HAL QCD 法の採用が必須であることが明らかとなっている (T. Iritani et al. (HAL Coll.) JHEP 1610 (2016) 101; *ibid.* Phys. Rev. D96 (2017) 034521)。理研スパコンを用いた数値計算ではないため本報告書の直接の対象とはしないが、密接に関連する理論解析として本年度に出版・投稿した論文では、直接計算法の問題点が固有状態の分離の不完全性に由来すること、HAL QCD 法ではその問題が解決されていることを明示的に示すと共に、(直接計算法を)正しく用いれば2手法の結果が一致することも明らかにしており、当該分野における金字塔を打ち立てた (T. Iritani et al. (HAL Coll.) Phys. Rev. D99 (2019) 014514; *ibid.* arXiv:1812.08539)。

本年度の数値計算研究では、(1)物理点バリオン間力の決定・物理量の予言、および、クォークの低エネルギーモードを利用した研究として、(2)LapH 法を用いたバリオン間力計算の研究、さらにその発展として(3)all-to-all 法を用いたメソン間力の研究を行った。

先に述べたように、核力やハイペロン力といったバリオン間力は、素粒子物理から原子核物理、宇宙天文物理にまたがる多彩な現象を統一的に解明する上で、分野間の階層を繋ぐ架け橋としての役割を持つ。これまでの格子 QCD 計算は、計算資源の制約から現実より重いクォークを用いた仮想世界での計算に限られていたが、理研スパコンならではの超大規模計算により、世界初となる物理点クォーク質量近傍での計算を行うことができた。モンテカルロデータの計算自体は昨年度までの利用で行っており、本年度はそのデータを基に、位相差や束縛状態の予言、原子核多体系への応用計算などを行った。得られた結果は国内外の大規模実験・観測へも大きなインパクトをもたらすものである。特に、連星中性子星の合体・重元素合成現象とそこからの重力波・電磁波観測 (LIGO/Virgo/KAGRA 等)、理研 RIBF 実験における元素起源の研究、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、J-PARC 実験におけるハイパー核物理の研究などと密接な関係があり、我々が計算した物理点バリオン間力は、理論・実験・観測の間を繋ぐ架け橋でもある。

我々の物理点バリオン間力計算の成功は、より多様なバリオン間力への計算対象拡張、また精密化に向けた将来的課題をも明らかにするものであった。特に、現在の計算手法では、ストレンジネス $|S|$ が小さいチャンネルでは統計誤差が大きく、その改善に必要なのが、非弾性散乱状態の混合に起因する系統誤差の抑制である。これは、これまで物理点では計算不可能であった重要なバリオン間力、例えば奇パリティチャンネルバリオン間力、スピン軌道力、三体力などの計算を実現する上でも重要な課題である。さらに、近年の加速器実験の進展により、バリオン間力にとどまらず、メソンも含めた一般のハドロン間力の重要性も高まっている。特に近年、LHCb, Belle, BESIII などの大型加速器実験においてエキゾチック粒子/共鳴状態(の候補)が続々報告されていることから、その状態を解明する上での基礎をなすハドロン間力の決定は、大きな理論的・実験的インパクトを持つ。この際重要なのが、クォーク対生成・消滅ダイアグラムを含むチャンネルのハドロン間力計算であるが、これまでの HAL QCD グループにおける研究では、技術的理由から対

生成・消滅ダイアグラムを直接扱うことができておらず、この点の研究開発も重要な課題となっていた。そこで本研究では、非弾性散乱状態の混合の抑制、および対生成・消滅ダイアグラムを扱う手法として、クォークの低エネルギーモードを利用する手法の研究開発を行った。

本研究では、クォークの低エネルギーモードを利用する手法として、まず LapH (Laplacian Heaviside) 法を用いた。この手法は、実質的に smearing と呼ばれる効果をもたらすので、相関関数のソース側に適用することで非弾性散乱状態の抑制が期待できる。また、対生成・消滅ダイアグラムの計算にも直接適用可能である。前年度までにメソン間力について研究を進めてあったので、本年度はさらに挑戦的課題としてバリオン間力へ適用した研究を行った。

さらに、当初計画にはなかった新たな研究として、all-to-all 法によりクォークの低エネルギーモードを利用した場合の研究開発を行った。all-to-all 法は、LapH 法よりも汎用的にクォークの各エネルギーモードを取るものであり(低エネルギーモードに重点を置きつつも、理論的には全モードの情報を用いる)、計算結果は一般に改善すると期待される。後で呼べるように、LapH 法のバリオン間力計算ではモードが期待するほど取れていないことが解ったため、研究を all-to-all 法にも拡張することは将来のバリオン間力計算にも効果が期待できる。ただし、all-to-all 法の計算コストはさらに高くなるため、本年度は最も簡単なハドロン間力である、 $\pi\pi$ メソン間力を対象に計算を行った。

以下では、「2. 具体的な利用内容、計算手法」、「3. 結果」について述べるが、説明の流れの都合上、上記(1)、(2)、(3)それぞれについてその成果をまとめて記述する。

2. 具体的な利用内容、計算方法
3. 結果

#### [物理点バリオン間力]

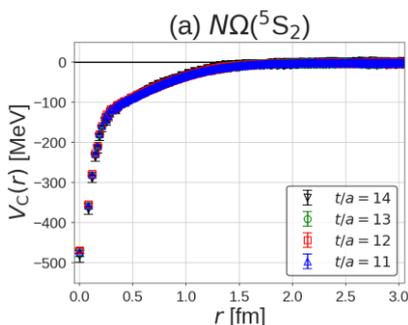
物理的クォーク質量近傍(パイオン質量 146MeV)で、格子体積  $(8.1\text{fm})^4$  という世界最大級のサイズを持つ配位を用い、世界初となる物理点バリオン間力の決定を行った。計算対象としては二体バリオン間力についてストレンジネス $|S|=0$  (核力)  $\sim 6$  ( $\Omega\Omega$ 力) まですべての核力・ハイペロン力を包括的に扱い、その偶パリティチャンネルにおける中心力・テンソル力を計算した。用いた作用は、 $(2+1)$ -flavor clover fermion + Iwasaki gauge, 6-APE stout smearing、格子サイズは  $96^4$ 、格

子間隔は  $a=0.085\text{fm}$  である。配位は 5 trajectory 毎に約 2000 trajectories が生成されており、バリオン間力の計算においては、ウォールクォークソースをクーロンゲージ固定の下で用い、NBS 相関関数を計算した。ゲージ配位は 5 trajectory 毎に保存された全てを使うと共に、4 方向にも回転して用い、さらにウォールソースを時間方向にシフトさせ、統計数を最大限まで増大させた。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基本的に昨年度までのスパコン利用で完了しており、本年度は得られたデータを基にした物理量（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、データ解析研究を行った。計算したチャンネルは 50 以上と膨大な数があるため、ここではその中からハイライトを選んで結果を報告する。

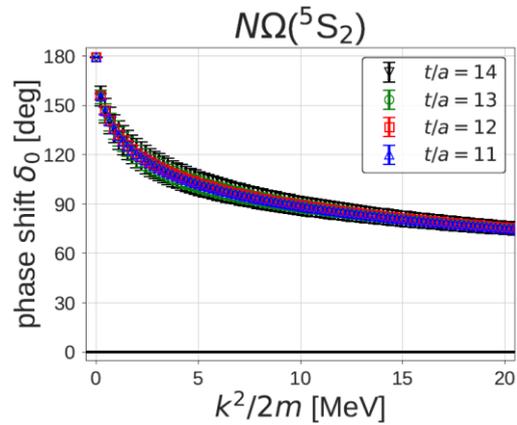
・新たなダイバリオンの予言

バリオン 2 個から構成される粒子、ダイバリオンは、1930 年代に発見された重陽子（陽子 1 個と中性子 1 個）を除き、一つも見つかっていない。しかし、ハイペロンが関わる粒子を考えると、それ以外にも様々なダイバリオンが存在する可能性があり、長年の研究対象となってきた。従来の実験的研究では、ハイペロン系、特にストレンジネス  $|S|$  が大きい系の研究は困難であったが、格子 QCD では精度の良い予言が可能である。

本年度は、特に  $N\Omega$  のスピン 2 系 ( ${}^5S_2$ ) について解析を進展させた。この系は、クォークパウリ斥力が効かない系であり、また 8 重項バリオン 2 体系への崩壊は D 波となり運動学的に抑制されることから、( $N\Omega$  閾値からみて) 束縛ダイバリオン状態の候補であった。昨年度までの途中解析では、まだ統計誤差が大きかったが、本年度の解析では最終的に得られた統計全てを用いることで精度の良い決定が可能となった。

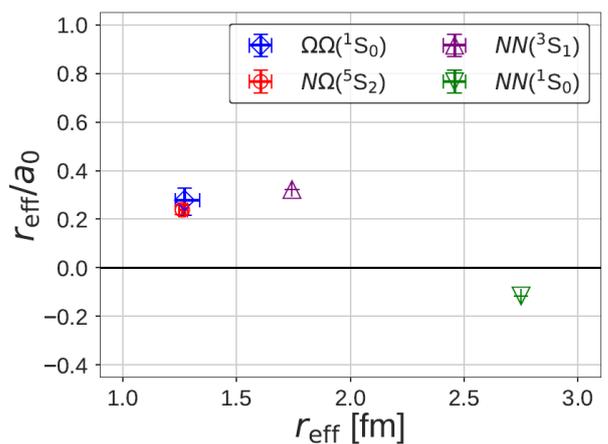


$N\Omega$  ( ${}^5S_2$ ) 間相互作用



$N\Omega$  ( ${}^5S_2$ ) 散乱位相差

左下図に示すのは、格子 QCD で計算された、 $N\Omega$  ( ${}^5S_2$ ) 間相互作用である。核子系に存在するような斥力芯はなく、むしろ強い引力コアがあることが解る。また、ユークリッド時間  $t$  の変化に対して安定であり、計算に信頼性があることが解る。上図で示すのは、ポテンシャルから計算された散乱位相差である。閾値で 180 度から落ちていく振る舞いを示しており、これは  $N\Omega$  ( ${}^5S_2$ ) 系が（準）束縛状態になっていることに対応している。この結果を、散乱長、有効距離といった散乱パラメータに変換し、それを既に知られているダイバリオンである重陽子  $NN$  ( ${}^3S_1$ ) と比較したのが下図である。



横軸：散乱長、縦軸：有効距離/散乱長

系の束縛の度合いを表す、「有効距離/散乱長」の値は非常に小さく、ほぼ重陽子と同程度であることが解る。このことから、 $N\Omega$  ( ${}^5S_2$ ) 系は、重陽子と同様、ユニタリー極限と呼ばれる特異的状态近傍の（準）束縛状態であることが解った。なお、上図に同時にプロットしているのは、 $\Omega\Omega$  ( ${}^1S_0$ ) 系の格子 QCD 計算の結果であり、この系もユニタリー極限近傍の束縛状態である

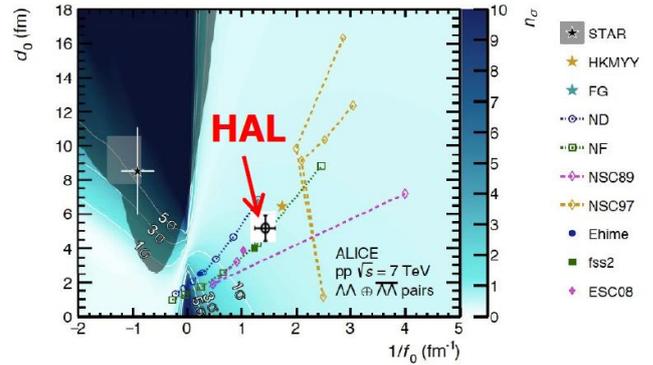
ことが解る。Ω Ω (<sup>1</sup>S<sub>0</sub>) 系の計算も理研スパコンによる成果であり、その主要結果は昨年度既に報告済みであるが、本年度に系統誤差の追加解析などを行い、最終的に論文として出版し、プレスリリース発表を行った。これら新たなダイバリオン状態の予言は、国内外の大規模実験へのインパクトも大きく、特に LHC、RHIC など重イオン衝突実験との間で共同研究がスタートするに至っている。

• Λ Λ 間相互作用の予言

ダイバリオン状態の候補として重要視されてきたもう一つの候補が、uuddss クォークから成る S 波・スピン 1 重項 (<sup>1</sup>S<sub>0</sub>) チャネルにおける H ダイバリオン状態である。我々は H ダイバリオン状態についての解析も進めており、間もなく最終結果が出る予定であるが、その途中結果は昨年度に報告したので、ここでは H ダイバリオンチャネルと結合する、Λ Λ 間相互作用そのものの結果について報告する。この相互作用は、近年重イオン衝突実験における二体バリオン間相関の測定データから情報が得られつつあり、格子 QCD による理論計算の結果に対する需要は非常に強い状況にあった。またその結果は、J-PARC 実験におけるハイパー核物理とも密接に関係しており、広範囲にわたってインパクトを与えるものである。

右上図に示すのが、Λ Λ 間相互作用を特徴づける散乱パラメータ(散乱長、有効距離)をプロットしたものである。色付けされているのが、LHC ALICE 実験で得られた結果 (arXiv:1805.12455)であり、色が薄い部分が許される領域であるが、実験的には非常に緩い制限しかついていないことが解る。また、図上の各種の線は、様々な理論モデル計算であるが、線が広範囲に伸びていることから、これも制限があまりついておらず、またモデル計算であることからモデルそのものの信頼性検証が難しい。一方、我々の計算は QCD の第一原理計算であり、かつ赤矢印で示されているように精度良い予言が可能になっていることが解る。将来的には、実験側でも精度の向上が計画されており、今後理論・実験が両輪となった研究の進展が期待される。

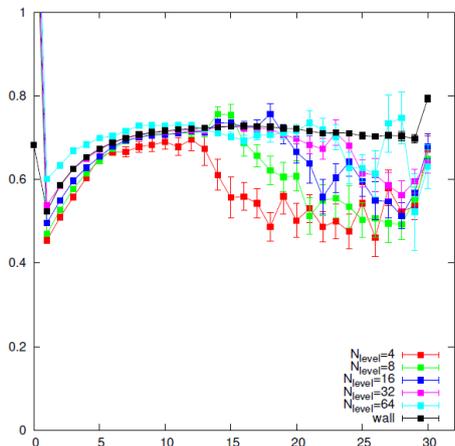
Λ Λ 間相互作用以外にも、N Ξ 間相互作用など、チャネル結合する他の相互作用の決定も進んでいる。現在はこれら得られた相互作用を基に、少数多体系の専門家と共同研究することで、ハイパー核の理論計算も進展している。



Λ Λ 散乱パラメータ(縦軸:有効距離、横軸:1/散乱長)

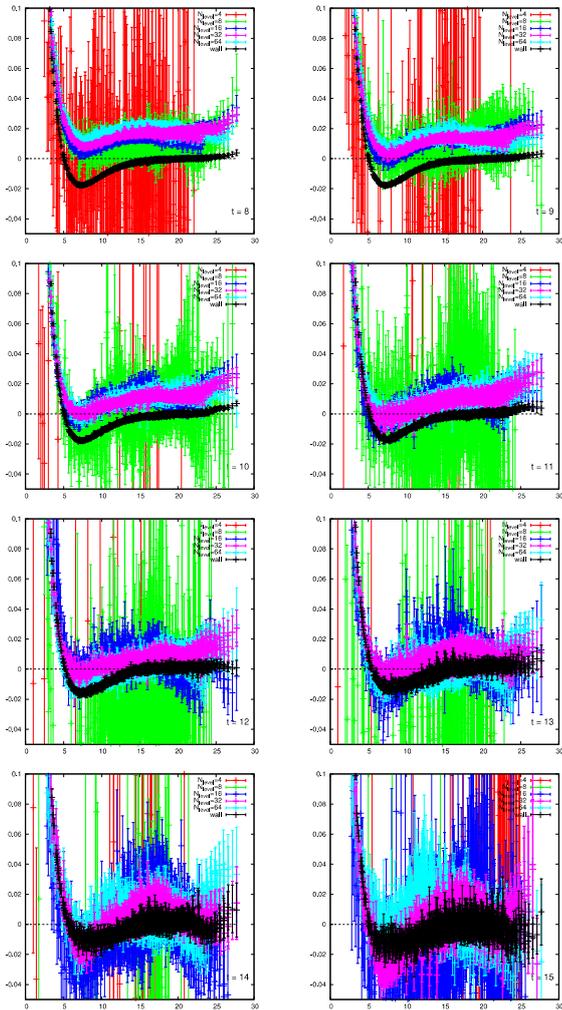
[LapH 法を用いたバリオン間力計算の研究]

LapH 法を HAL QCD 法と組み合わせ、バリオン間力計算への適用を試みた。LapH(Laplacian Heaviside)法は、ゲージ共変な空間的なラプラス演算子の低エネルギー固有モードを用いた演算子改良の手法である。上記で述べた物理点バリオン間力の計算などでは、wall source を用いていたが、本研究では、LapH 法による smearing を source 演算子に導入することで精度が改善できるかを調べた。カットオフ σ までの固有モードの個数 Nlevel を大きくとるといわゆる point source に近づくが、空間の自由度について和を取ることができ、統計精度の点から有用と考えられる。中心的な計算はバリオン 4 点関数の評価であり、この計算量は Nlevel の 4 乗に比例するため、Nlevel を大きくとるとは挑戦的研究となる。そこで本研究では、プログラムコードのさらなる改良を行い計算効率を向上させることで、様々な Nlevel で核子間ポテンシャルの評価を可能にした。用いたゲージ配位は PACS-CS コラボレーションによる格子サイズ 32<sup>3</sup> x 64, m(π)=703MeV の配位の一部を用い(100 配位)、Nlevel を 4~64 に取った。



核子の有効質量

まず、核子一体系の二点相関関数から求めた核子有効質量を従来の wall source による結果と比較する(前図)。Nlevel が小さい場合は wall source に相当すると考えられるが、シグナルは安定せず、少なくとも Nlevel=64 以上の固有モードを取る必要があると考えられる。次に 4 点関数からポテンシャルを微分展開の最低次近似の範囲で評価した(下図)。十分大きな t では従来の wall source を用いた計算と比較して Nlevel=64 でも妥当な計算量の範囲で良好なシグナルは得られていない。そこで本年度は LapH 法ではこれ以上の大規模計算は行わず、定式化の改善を優先させることにした。



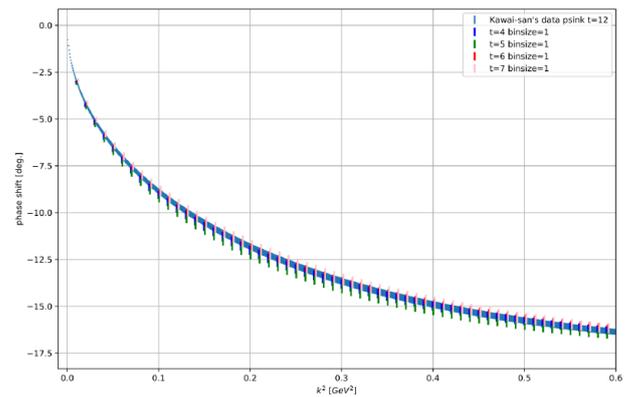
LapH 法を用いた場合の HAL QCD 法による核子間ポテンシャル。 t=8~15

具体的には、今回の定式化では  $\sigma$  以下の全ての固有モードを用いたが、ランダムノイズを導入した確率的な手法を組み合わせることで、より高い固有モードを効率的に取り込む手法を検討している。もう一つの方向性が all-to-all 法の採用であり、本年度で計算した結果を次に述べる。

[all-to-all 法を用いたメソン間力の研究]

all-to-all 法も LapH 法と同様にクォークの低エネルギーモードを効率的に利用する手法として知られているが、高エネルギーモードについてもノイズベクトルを用いた統計的計算を通してその効果を取り入れており、数学的には全モードの情報を取り込んだ計算となる。smearing も任意に調整できるなど、LapH 法と比べ汎用性があり、より優れた計算手法となる可能性がある。また LapH 法と同様、クォーク対生成・消滅ダイアグラムの計算にも適用可能である。ただし、計算コストが非常に高く、またこの手法を HAL QCD 法と組み合わせた計算は世界でも初めての非常に挑戦的研究である。そこで本研究では最も基本的なメソン間力 ( $\pi\pi$  間相互作用) を対象に、理研以外のスパコンも同時に活用しながらコード開発・数値計算を行った。

まず最初に研究対象としたのが、I=2 の  $\pi\pi$  間相互作用である。用いたゲージ配位は、JLQCD/CP-PACS Coll. によって生成された 2 + 1 フレーバーゲージ配位であり、格子サイズは  $16^3 \times 32$ 、格子間隔は  $a=0.1214\text{fm}$ 、 $m(\pi)=870\text{MeV}$  のものを用いた。いくつかの試行錯誤をした結果、時間および空間方向、カラー・スピノル方向に dilution をするのが最も効率的と明らかとなった。固有モードとして 100 モードを取った場合の結果 (散乱位相差) が下図である。



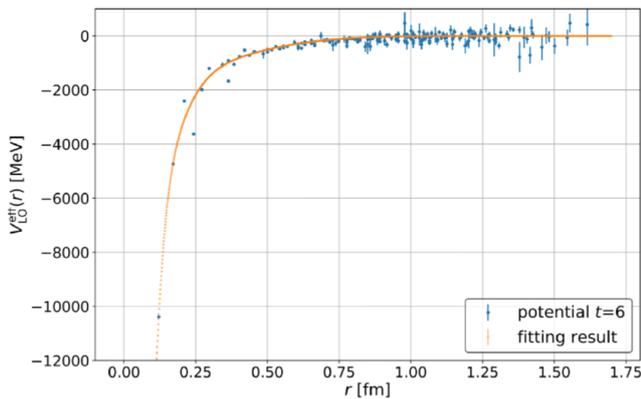
I=2  $\pi\pi$  散乱位相差

この結果は、従来の手法を用いた結果とよく一致しており、all-to-all 法と HAL QCD 法の組み合わせで信頼ある計算が可能であることを意味している。

all-to-all 法の優位性が真に発揮されるのは、クォーク対生成・消滅ダイアグラムが必要な系での相互作用計算である。そこで、そのような系として、I=1  $\pi\pi$  間相互作用を次なる計算対象とした。計算に用いた

ゲージ配位は、 $I=2$   $\pi\pi$  計算と同じものであり、この場合  $\pi\pi$  と結合する  $\rho$  メソンは深い束縛状態にある。

この計算は  $I=2$   $\pi\pi$  計算よりもさらに挑戦的研究であり、例えばクォーク対生成・消滅ダイアグラム部分に起因するノイズを抑えるために、オペレータの置き方を工夫する必要などがあった。これらの工夫の結果、物理的に意味のある相互作用を初めて計算することが可能となり、その結果が下図である。



$I=1$   $\pi\pi$  間相互作用

今後重要なのは、 $I=1$   $\pi\pi$  間相互作用から、 $\pi\pi$  と結合する  $\rho$  メソン共鳴状態を正しく記述できるかを調べることである。そのためには、そもそも  $\rho$  メソンが共鳴状態となっているような、軽クォーク質量および大体積での計算が必要であり、これは来年度における主要計算テーマと考えている。

#### 4. まとめ

物理点バリオン間力については、 $\Omega\Omega$  や  $N\Omega$  といった新たなダイバリオン状態の予言、 $\Lambda\Lambda$  間相互作用を始めとする散乱パラメータの予言などを行った。また得られた結果を基にした重イオン衝突実験との共同研究も進展している。ここでは紹介しなかったが、それ以外のチャンネルのバリオン間力の解析も進展しており、特にハイペロン力の結果は非常に大きな注目を集めている。

一方で、今後の長期的方向性を見据えた新たな計算手法として、クォークの低エネルギーモードを利用する研究を行った。当初に計画していた、LapH 法をバリオン間力に適応した計算では、取るべきモードについて知見が得られた一方、定量的には誤差が大きいことが判明した。計算パワーに任せて統計誤差を抑える可能性もあり得るが、スパコン資源の有効利用という観点からその選択肢は選ばず、より汎用性の高い手法として、all-to-all 法を用いた研究を新

利用報告書にスタートさせた。これは非常に挑戦的研究であり、コード開発、dilution の取り方、オペレータの置き方など、かなりの試行錯誤が必要であったが、これらノウハウを蓄積することで  $I=2$   $\pi\pi$  メソン間力について十分信頼性のある結果が得られた。また、 $I=1$   $\pi\pi$  メソン間力についても物理的に意味のある結果が得られており、今後の大規模計算に向けた道筋をつけることができた。

#### 5. 今後の計画・展望

物理点バリオン間力については、得られたデータの解析が順調に進んでおり、本報告書で記述した以外のチャンネルのバリオン間力の解析も終了しつつある。重イオン衝突実験、ハイパー核実験等にも既に大きなインパクトを与えており、現在は成果の収穫期といえる。さらに、格子バリオン間力を基にした原子核構造計算、核物質系の状態方程式の計算なども推し進めており、その計算結果には国内外から強い期待が寄せられている。また、バリオン間力計算については今後計算対象を拡大することでさらに面白い物理にアクセスすることが可能であり、その第一弾として、 $\Delta$  などの十重項バリオンが関わるバリオン間力計算を来年度に予定している。

クォークの低エネルギーモードを利用した研究については、当初計画していた LapH 法のバリオン間力計算は、現状では誤差が想定より悪いため、ランダムノイズを取り入れた手法など、定式化改良の研究開発を計画している。一方、新たに研究をスタートさせた all-to-all 法においては、既に有望な結果が得られている。今後重要なのは、 $I=1$   $\pi\pi$  メソン間力の計算から  $\rho$  メソン共鳴状態が出せるかであり、これは来年度の主要テーマと考えている。本年度は、LapH 法から all-to-all 法への切り替えの際、コード開発などに時間がかかったため、資源の利用が申請と比べ少なくなりましたが、来年度は開発したコードを用いて all-to-all 法の大規模計算を行いたいと考えている。

平成 30 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

(1)

“ $N\Omega$  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)

arXiv:1810.03416 [hep-lat] (2018),

submitted to Phys. Lett. B.

(2)

“Most Strange Dibaryon from Lattice QCD”

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

Phys. Rev. Lett. 120, 212001 (2018).

(プレスリリース「新粒子「ダイオメガ」ースパコン「京」と数理で予言するクォーク 6 個の新世界ー」2018/05/24)

(preprint 版は報告済み)

【会議の予稿集】

(1)

“HAL QCD method and Nucleon–Omega interaction with physical quark masses”

T. Iritani

arXiv:1811.06232 [hep-lat] (2018),

submitted to Proc. of Lattice2018.

(2)

“Hyperon–Nucleon Interaction from Lattice QCD at  $(m\pi, mK)\approx(146, 525)$  MeV”

H. Nemura

arXiv:1810.04046 [hep-lat] (2018),

submitted to Proc. of HYP2018.

(3)

“Strange Nuclear Physics from QCD on Lattice”

T. Inoue

arXiv:1809.08932 [hep-lat] (2018),

submitted to Proc. of HYP2018.

【口頭発表】

(1)

“From Quarks to Nuclei and Cosmos”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics 2019

(MPPQCP2019)”, RIKEN

R-CCS, Kobe, Japan, 15–17 Jan. 2019.

(2)

“Recent progress on Lattice QCD calculation of Nuclear Forces”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018)”, Hawaii, USA, 23–27 Oct. 2018.

(3)

“Lattice QCD study for the YN and YY interactions”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018)”, Hawaii, USA, 23–27 Oct. 2018.

(4)

“Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at workshop on “High Performance Computing in High Energy Physics (HPCHEP)”, Wuhan, China, 19–21 Sep. 2018.

(5)

“Baryon interactions at physical quark masses in Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at “The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018)”, East Lansing, USA, 22–28 Jul. 2018.

(6)

“Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at workshop on “Recent Developments in Nuclear and Hadron Physics (RDNHP 2018)”, Hefei, China, 26–29 May 2018.

(7)

“Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at workshop on “EFTs and ab initio methods”, Chengdu, China, 17–21 Apr. 2018.

(8)

“Baryon Interactions from Lattice QCD: The Bridge from Quarks to Cosmos”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Particle Astrophysics and Cosmology Including Fundamental Interactions (PACIFIC 2018)”, Kiroro, Hokkaido, Japan, 13–19 Feb. 2018.

- (9)  
“Lattice QCD and Baryon Interactions”  
T. Doi, for HAL QCD Collaboration  
Invited Talk given at iTHEMS-Kyushu Workshop - from particles and nuclei to cosmos -, RIKEN iTHEMS, Kobe, Japan, 21-22 Nov. 2018.
- (10)  
“Hadron Interactions from Lattice QCD”  
T. Doi, for HAL QCD Collaboration  
Invited Talk given at Kickoff Symposium on “Clustering as a window on the hierarchical structure of quantum systems”, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 19-20 Nov. 2018.
- (11)  
“Two-baryon systems from Lattice QCD: Do Plateaux Dream of the Ground State ?”  
T. Doi, for HAL QCD Collaboration  
Talk given at JPS meeting, Tokyo University of Science, Noda, Japan, 22-25 Mar. 2018.
- (12)  
“ポスト「京」で極限状態の物質の性質を探る”  
H. Nemura, for HAL QCD Collaboration  
R-CCS 一般公開・ミニ講演 (理研 R-CCS@神戸, Nov. 23, 2018)
- (13)  
“Hyperon forces from QCD and their applications”  
T. Inoue, for HAL QCD Collaboration  
The 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (Tsukuba, Nov. 13-17, 2018)
- (14)  
“Baryon Interactions from Lattice QCD”  
T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration  
The 8th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (Tsukuba, Nov. 13-17, 2018)
- (15)  
“The Most Strange Dibaryon”  
T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration  
Hadron structure and interaction in dense matter (KEK Tokai Campus, Nov. 11-12, 2018)
- (16)  
“Search for H-dibaryon from lattice QCD”  
K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration  
Hadron structure and interaction in dense matter (KEK Tokai Campus, Nov. 11-12, 2018)

(17)

“Lattice QCD study on the strangeness  $-2$  baryonic states”

K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

Fifth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the APS and JPS (Hawaii 2018) (2018/10/23–27)

(18)

“HAL QCD method and Nucleon–Omega Interaction with Physical Quark Masses”

T. Iritani, for HAL QCD Collaboration

Lattice2018 (2018/7/22–28, East Lansing, Michigan, US)

(19)

“Hyperon forces from QCD on lattice and their applications”

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

HYP2018 (2018/06/25–29, Portsmouth–Norfolk)

(20)

“Hyperon–nucleon interaction from lattice QCD at  $(m_\pi, m_K) \sim (146, 525)$  MeV

H. Nemura, for HAL QCD Collaboration

HYP2018 (2018/06/25–29, Portsmouth–Norfolk)

(21)

“Calculations on  $\Xi$  NN and  $\Xi$  NNN systems”

E. Hiyama (in collaboration with Sasaki, Miyamoto, Hatsuda)

HYP2018 (2018/06/25–29, Portsmouth–Norfolk)

(22)

“Structure of light p-shell  $\Xi$  hypernuclei”

E. Hiyama (in collaboration with Sasaki, Miyamoto, Hatsuda)

HYP2018 (2018/06/25–29, Portsmouth–Norfolk)

(23)

“Baryon interactions from Lattice QCD”

T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration

NFQCD2018 (2018/06/14–08, YITP)

(24)

“Hadron Interactions from Lattice QCD and Applications to Exotic Hadrons”

Y. Ikeda, for HAL QCD Collaboration

NFQCD2018 (2018/06/14–08, YITP)

(25)

“Baryon interactions from Lattice QCD”

K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

New Ideas in Constraining Nuclear Forces (2018/06/04-08, ECT\*)

(26)

“物理点格子 QCD による近似核力とその応用”

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(27)

“格子 QCD による2バリオン系研究における直接法の問題点と HAL QCD 法による解析”

T. Iritani, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(28)

“HAL QCD 法の理論的基礎”

T. Hatsuda, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(29)

“格子 QCD における 2 体バリオン系の扱いの困難について”

S. Aoki, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(30)

“波動関数等価ポテンシャルの微分展開---時間依存型 HAL QCD 法---“

N.Ishii (in collaboration with 星善次郎、杉浦拓也、根村英克)

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(31)

“物理点格子 QCD によるストレンジネス  $S=-2$  のバリオン間相互作用”

K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

日本物理学会(東京理科大学野田キャンパス、2018年3月22日-25日)

(32)

“Lattice QCD studies on H-dibaryon state with physical quark masses”

K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

研究会「ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロンの構造」(2018/03/05-07, KEK Tokai Campus)