

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*、土居孝寛*、権業慎也*、初田哲男*、青木慎也*、青山龍美*、池田陽一*、井上貴史*、石井理修*、川井大輔**、宮本貴也*、佐々木健志*

理研での所属研究室名 : *仁科加速器研究センター・初田量子ハドロン物理学研究室、**理研 BNL 研究センター計算物理研究グループ

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

宇宙における物質・元素の創世史の解明は、物理学における最重要課題の一つである。この解明を達成する上で必要不可欠となるのが、物質を構成する主要要素である「ハドロン」の性質、特にハドロン間に働く相互作用 (ハドロン間力) の決定である。ハドロンはクォーク・グルーオンといった素粒子からなる複合粒子であり、その性質は素粒子の理論である量子色力学 (QCD) によって支配される。しかし、特に重要であるバリオン (3つのクォークから構成されるハドロン) 間の相互作用に関しては、従来の研究は散乱実験データに基づく現象論的解析が主となっており、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) が関わる相互作用については、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。本研究では、世界で初めて物理的クォーク質量におけるバリオン間力の格子 QCD 第一原理計算を行った。この計算は 2015 年度より継続して行ってきたが、本年度では最大統計計算の完遂を最大目標とした。さらに、得られたバリオン間力、特にハイペロン力を用い、新物質 (エキゾチック粒子) の存在可能性に関する定量的予言を行うと共に、高密度物質の性質の解明を目指した。

また、研究の第二の柱として、LapH (Laplacian Heaviside) 法を新たに採用することにより、クォーク対生成・消滅ダイアグラムを含むメソン (2つのクォークから構成されるハドロン) 間の相互作用へと研究を拡張した。本年度は ρ メソン ($I=1$ $\pi\pi$ 相互作用) を対象とした研究を行ったが、将来的にはエキゾチック粒子を含む様々なハド

ロン共鳴状態の解明や、バリオン間力計算における誤差軽減への応用をも目指した研究である。

格子 QCD 計算によりハドロン間力を第一原理的に決定するという本研究は、我々 HAL QCD 共同研究グループが切り開いてきた独創的テーマであり、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。従来の格子計算においては、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における計算に限られているという問題があったが、本研究では、理研スパコンならではの超大規模計算を行うことで、世界で初めてとなる物理点クォーク質量近傍 (パイオン質量 146MeV) におけるバリオン間力計算を行った。物理点クォーク質量近傍での格子 QCD 計算は、統計揺らぎが大きいいため、本課題によりモンテカルロ統計数を最大数まで増大させ、精度を向上させることを目的とした。

物理的クォーク質量で得られた格子 QCD バリオン間力は、素粒子・原子核・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。特に、従来現象論的バリオン間力に立脚してきた原子核物理に対しては、素粒子 (QCD) のレベルから第一原理的な基礎付けを与えることになる。格子 QCD により初めて決定可能となるハイペロン力は、ハイパー核物理におけるエキゾチックな状態に関する定量的予言を与えると共に、核物質系の状態方程式の決定に大きなインパクトを与える。状態方程式の情報は、中性子星内部の超高密度状態や、連星中性子星合体とそれに伴う重元素合成・超新星爆発など、宇宙における爆発的現象の理解に必須の要素である。

これら諸現象の理解は、国内外の大規模実験・観測でも主要な目標となっている。中でも 2017

年に連星中性子星の合体・重元素合成現象が重力波・電磁波で同時観測されるにおよび、現象の背後の物理を理解する上で、格子 QCD によるバリオン間力決定はより一層喫緊の課題となっている。また、地上における実験としては、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る。このように、物理的クォーク質量で得られた格子 QCD バリオン間力は、計算科学によって理論・実験・観測の間を結ぶ架け橋でもある。

さらに本年度における新たな研究の方向性として、クォーク対生成・消滅ダイアグラムを含む相互作用の計算を開始した。対生成・消滅ダイアグラムを含む相互作用は、様々なハドロン共鳴状態の研究において重要な役割を果たしている。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（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相互作用の決定は、大きな理論的・実験的インパクトを持つ。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なかったが、新たに LapH 法を HAL QCD 法と組み合わせることで初めて計算を可能とした。本年度はアイソスピン $I=1$ チャネルにおける $\pi\pi$ 相互作用を計算することで、最も基本的な共鳴状態である ρ メソンの計算を行った。

なお、年度当初計画では、計算のセットアップは物理点と同じウォールクォークソースを用いつつも、クォーク質量を変更させたバリオン間力計算を行うことを予定していたが、本年度の途中時点で LapH 法の計算について想定以上の進展が見られたため、LapH 法計算の大規模化を優先させることとした。この判断においては、クォーク質量を変えたバリオン間力については、次年度以降 LapH 法の知見をバリオン間力計算に応用することでウォールクォークソースの場合よりも非弾性散乱状態に起因する系統誤差を軽減する道筋が見えてきているという点も考慮している。実際、2018 年度以降、LapH 法を組み合わせたバリ

オン間力計算をスタートさせる予定である。

2. 具体的な利用内容、計算方法

バリオン間力については、現実的クォーク質量、大体積格子を用いた現実的相互作用の計算を行った。本課題は 2015 年度からの継続課題であり、モンテカルロ統計数を増大させて結果の精度を向上させることを目的とした。計算対象としては、物理的に最も重要な、核力、ハイペロン力の中心力、テンソル力(偶パリティチャンネル)を扱った。ハイペロン力は、実験的にも未解明な部分が多いことから、格子計算の重要なターゲットである。特に、本年度より新たに $N\Omega$ 相互作用の計算・解析もスタートさせ、重イオン衝突実験との協調も開始している。

メソン間力については、LapH 法と HAL QCD 法を融合させる研究開発を行った。その上で、パイオン質量 410MeV において、共鳴状態として最も基本的な ρ メソンを対象とし、 $I=1$ $\pi\pi$ 相互作用の計算を行った。HAL QCD 法におけるスキーム (sink operator) 非依存性を数値的に確かめるため、LapH で扱う固有モード数 (Nlevel) を変えた計算を行った。

[理論定式化]

格子 QCD を用いたハドロン間力の決定手法としては、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 法を用いる。これは、南部 - ベーテ - 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、HAL QCD 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という点がある。これは従来格子 QCD で用いられてきた原子核直接計算法 (ルッシャー有限体積法) 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。実際、我々の最近の仕事により、従来直接計算法では固有状態の分離が不完全であるため誤った結論に導かれることが示され、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おり、格子 QCD

業界に大きな衝撃を与えている。(T. Iritani et al. (HAL Coll.) JHEP1610(2016)101; *ibid.* Phys. Rev. D96(2017)034521; T. Iritani, arXiv: 1710.06147.)

[格子 QCD 計算セットアップ]

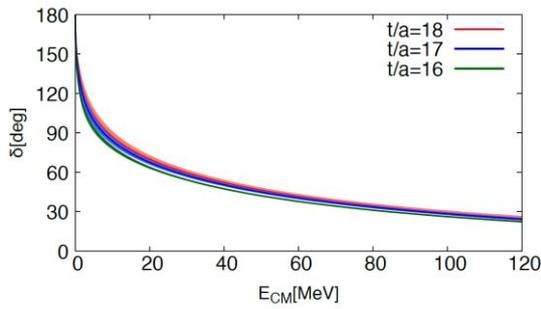
物理点バリオン間力計算に関しては、戦略分野 5 で生成された格子 QCD ゲージ配位を用いた計算を行った。これは、(2+1)-flavor clover fermion + Iwasaki gauge, 6-APE stout smearing という作用が用いられ、格子サイズは 96^4 、格子間隔は $a=0.085\text{fm}$ である。配位は 5 trajectory 毎に約 2000 trajectories が生成されており、物理的クォーク質量近傍 (パイオン質量 146MeV) で、格子体積 $(8.1\text{fm})^4$ という世界最大級のサイズを持つ配位である。バ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。モンテカルロ統計数を増やすため、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て測定数を増やした。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。本年度をもって、414 ゲージ配位×4 回転×96 測定という、ウォールクォークソースを用いた場合の最大統計計算を完遂させた。なお、次項で示す物理解析の結果については、解析のタイミングにより様々な統計数が使われているが、おおむね前年度の解析の 2 倍の統計数を達成している。

メソン間力については、 $I=1 \pi\pi$ 相互作用の計算を、PACS-CS Coll. によって生成されたゲージ配位 (パイオン質量 410MeV) を用いて行った。より具体的には、(2+1)-flavor clover fermion + Iwasaki gauge という作用が用いられ、格子サイズは $32^4 \times 64$ 、格子間隔は $a=0.0907\text{fm}$ である。LapH 法における空間和による実質的な統計数の増大の効果があるため、配位数は 10 配位で十分意味のある結果を得ることができた。

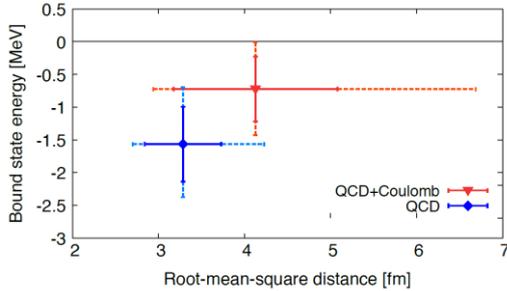
本報告書では、物理点バリオン間力については、代表的な成果例として、 $\Omega\Omega$ バリオン系 ($|S|=6$)、 $N\Omega$ バリオン系 ($|S|=3$)、 $\Xi\Xi$ バリオン系 ($|S|=4$)、 $\Lambda\Lambda-N\Sigma-\Sigma\Sigma$ バリオン系 ($|S|=2$)、そして二核子系 ($|S|=0$) についてその相互作用の研究結果を報告し、さらに得られたバリオン間力を基にした高密度核物質系の研究について報告する。その次に、 $I=1 \pi\pi$ 相互作用と ρ メソン共鳴状態の計算について結果を報告する。

[$\Omega\Omega$ バリオン系] ($|S|=6$)

$\Omega\Omega$ バリオン系は、ダイバリオンの中で最も多くのストレンジネスを含む系であり、特に S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャンネルは束縛ダイバリオン状態の候補として興味を持たれてきた。本年度の計算により、昨年度の 2 倍の統計数を達成したが、ここでは 2017 年度に投稿論文としてまとめた、414 ゲージ配位×4 回転×48 測定についての詳細解析の結果を示す。図に示すのは、格子 QCD 計算で得られたバリオン間力から得られた $\Omega\Omega$ (1S_0) 散乱位相差であり、状態が束縛していることを示している。その次の図で示されているのは対応する束縛エネルギーであり、QCD の効果として、 $B=1.6(6)(+0.7/-0.6)$ MeV という結果が得られた。さらに、クーロン斥力の効果も取り入れると、 $B=0.7(5)(5)$ MeV となった。このことから、 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系には強い引力が働いており、あたかも重陽子のような非常に浅い束縛状態として存在する可能性が強いことが明らかになった。ただし、クーロン斥力の効果および誤差の大きさを考慮すると、非束縛の可能性もあるが、束縛・非束縛に関わらず、ユニタリー極限と呼ばれる特異的状态に対応することが本研究により初めて確定した。このような特異的状态は、重イオン衝突実験における $\Omega\Omega$ 相関について特徴的振る舞いを示すことが知られている。次世代高ルミノシティ重イオン衝突実験では、実際に観測できる可能性があり、実験の将来計画に強いインパクトを与えている。



$\Omega\Omega$ (1S_0) 散乱位相差

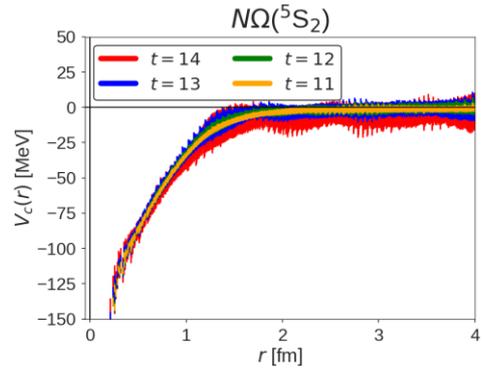


$\Omega\Omega$ (1S_0) 束縛状態エネルギー

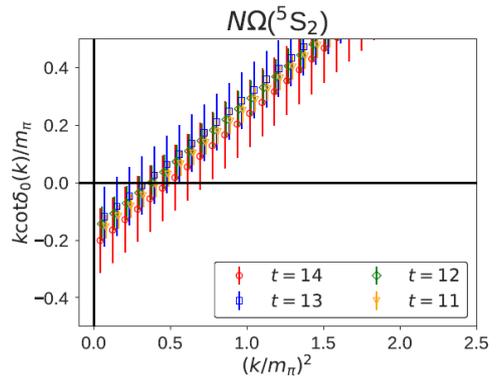
[$N\Omega$ バリオン系] ($|S|=3$)

$N\Omega$ のスピンの2系(5S_2)は、trivial にクォークパウリ斥力効果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。我々は重イオン衝突実験でこの相互作用の情報を取り出せる可能性に着目し、格子QCD側としても本年度より新たに計算・解析をスタートさせ、実験との協調を目指していくこととした。

下図に示すのは、 $N\Omega$ (5S_2)系の格子QCD計算で決定された相互作用と、それに基づいて得られた散乱位相差 ($k \cot \delta$) である。統計数は200ゲージ配位×4回転×48測定に対応している。得られた相互作用は、強い引力コアがあることを示している。また、散乱位相差は、Effective range expansion の2次の形式でよくあらわされており、得られた散乱長の符合から、(統計誤差がまだ大きいものの) $N\Omega$ (5S_2)系が束縛状態になっている可能性を示している。実験側でも重イオン衝突データの解析が進行しており、今後格子QCDとの間で結果の検証が進展していく見込みである。



$N\Omega$ (5S_2) 相互作用

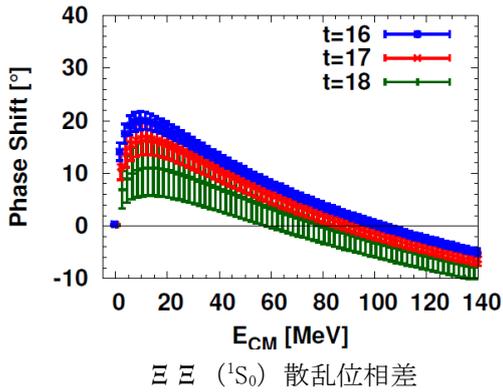


$N\Omega$ (5S_2) 散乱位相差

[$\Xi\Xi$ バリオン系] ($|S|=4$)

$\Xi\Xi$ バリオン系は、8重項バリオン2体系として最も多くのストレンジネスを含む系であるが、特にS波・スピン1重項 (1S_0) チャネルは、束縛ダイバリオン状態の候補として、長年強い興味を持たれてきた。これは、 $\Xi\Xi$ (1S_0) は、2中性子系 (非常に強い引力を持つが、ぎりぎり束縛しない) と同種の性質 (SU(3)フレーバー表現) を持つチャネルであるためだが、模型計算では不定性が大きく、第一原理計算による決定が待たれていた。昨年度までの計算により興味深い結果が得られていたが、最終結論を得るには虚時間依存性に関する系統誤差を詳細に検証する必要がある。本年度の計算による統計数増大により、下図の散乱位相差の結果に示すように、虚時間 $t=18$ においても十分精度の良い結果を得ることができた。(図は414ゲージ配位×4回転×72測定に対応。) この結果から、 $\Xi\Xi$ (1S_0) バリオン系は、強い引力はあるものの束縛ダイバリオン状態は存在しないことを明らかにした。虚時間 t を大きく取って、非弾性散乱状態に起因する系統誤差を抑制したうえでの結論になっていることが本年

度の成果における重要な点である。

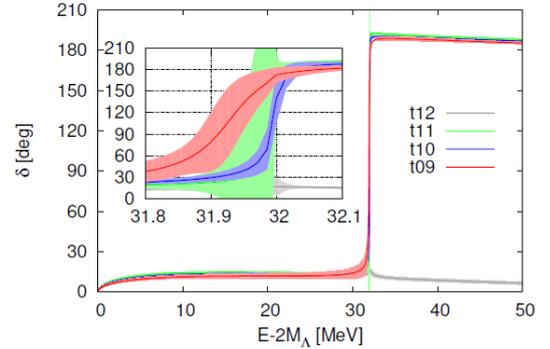


[$\Lambda \Lambda$ - $N \Xi$ - $\Sigma \Sigma$ バリオン系] ($|S|=2$)

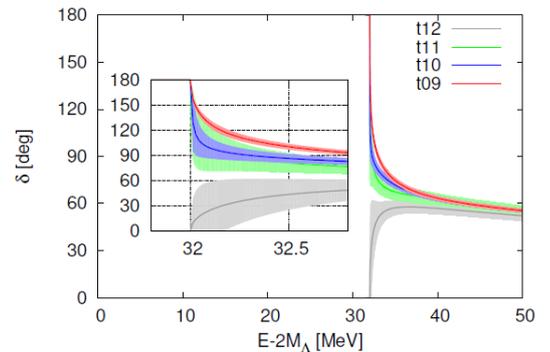
原子核物理において、エキゾチックダイバリオン状態の候補の筆頭にあげられるのが、uuddss クォークから成る S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャネルにおける H ダイバリオン状態である。我々は、仮想的に重いクォーク質量 (SU(3) 極限) では束縛 H ダイバリオンが存在することを発見しており、本研究による現実的クォーク質量での計算は実験分野からも待ち望まれていた。

本チャネルは、 $\Lambda \Lambda$ - $N \Xi$ - $\Sigma \Sigma$ の結合チャネル系であり、HAL QCD 法により結合チャネルバリオン間力を決定した。昨年までの研究により、強い引力が $N \Xi$ 間に存在しており、散乱振幅の極が $N \Xi$ 閾値のすぐ下に見つかったが、統計誤差が大きいことから、虚時間依存性の検証が不十分であった。本年度の計算により、フル統計の 414 ゲージ配位 \times 4 回転 \times 96 測定のデータが利用可能となり、これまで不可能だった $t=12$ での解析も可能になった。下図に示すのが、 $\Lambda \Lambda$ - $N \Xi$ の 2 チャネル解析における、散乱位相差と inelasticity である。この結果、散乱振幅の極は、系統誤差の範囲で $N \Xi$ 閾値の上に動く可能性もあることが解った。また、いずれの場合でも、H ダイバリオンと対応をなす散乱振幅の極は、最も低くても $N \Xi$ 閾値のごく下の領域にしか現れず、束縛状態として存在する可能性は小さいことが明らかになった。我々の理論計算の結果を受けて、J-PARC での H ダイバリオン探索実験の準備が着々と進行中であり、密接な連携を行っている。さらに、 $N \Xi$ 間バリオン力の結果は、(ここでは省略した) 他のスピン・アイソスピンにおける格

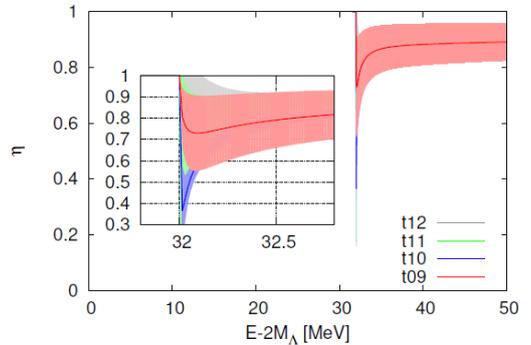
子 QCD 計算結果と併せて、重イオン衝突実験における $N \Xi$ 相関観測や、 Ξ ハイパー核の物理にも大きなインパクトが期待される。



(a) $\Lambda \Lambda$ phase shift



(b) $N \Xi$ phase shift.



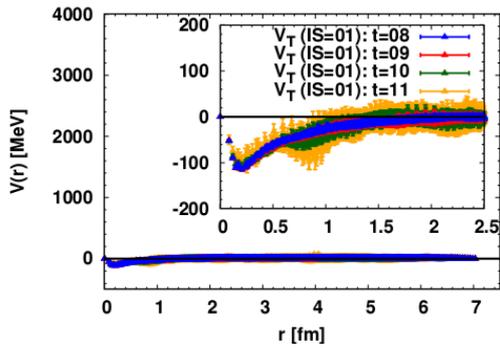
(c) Inelasticity.

[二核子系] ($|S|=0$)

二核子間に働く力、核力は、通常原子核の理解において最も基礎となる量である。特にテンソル力は、重陽子を束縛させる最重要要素であると共に、近年は中重原子核においてもその重要性が再認識されつつある。

下図に示すのは、二核子系のスピン 3 重項 (3S_1 - 3D_1) チャネルについて、S 波-D 波結合チャネル計算を行うことで導出した、二核子間テンソル力の結果である。統計数としては 414 ゲージ配位 \times 4 回転 \times 72 測定を用いた。昨年度よりも統計数

が増大したことより、より大きな虚時間方向のデータも解析可能となった。**強いテンソル力の存在が格子 QCD から導出されており、重要な成果である。**一方、より定量的には非弾性励起状態の寄与をさらに抑制する必要がある。これには統計数増大とは別の手法が必要であり、来年度以降の研究の大きなテーマとなる見通しである。



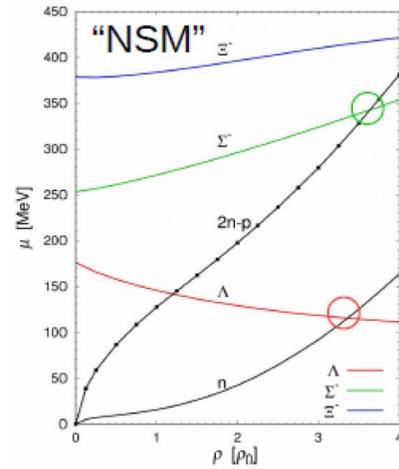
二核子間テンソル力

[格子バリオン間力に基づく高密度核物質系]

2017 年の連星中性子星合体現象の重力波・電磁波による同時観測は、中性子星の構造を支配する高密度核物質の状態方程式の決定に向けた新たな競争の始まりを意味する。理論的には、バリオン間力に基づき高密度核物質系の性質を決定することが最も望ましいが、これまでは主にハイペロン力や三体力の不定性に由来して大きな困難があった。

我々の研究の大きな特徴は、ハイペロン力を QCD から直接決定できることであり、この点を活かして、格子 QCD によって決定されたハイペロン力をインプットとして対称核物質系・中性子核物質系でのハイペロン 1 体ポテンシャルの計算を行った。核力については、格子 QCD 計算の結果はまだ誤差が大きいため、現象的核力 (AV18) を用いた。これらのバリオン間力に基づき、Brueckner-Hartree-Fock (BHF) 理論に基づく多体計算を行った。その上で、”NSM (Neutron Star Matter)”としてベータ平衡を課した核物質を考え、どの密度になると核物質の中にハイペロンが出現するかを計算した。下図に示す結果では、 Λ 粒子が、 $3\rho_0$ あたりで出現し、さらに高密度になると Σ 粒子が出現するという結果になった。これらの結果は、ハイペロン力の SU(3)の破れの

取り扱いを簡略化していたり、P 波相互作用、スピン軌道相互作用、三体力など、様々な相互作用を無視した近似計算であることに注意が必要であるが、QCD から高密度系、そして宇宙天文物理までをどのように繋いでいくことができるかという道筋が示された研究である。

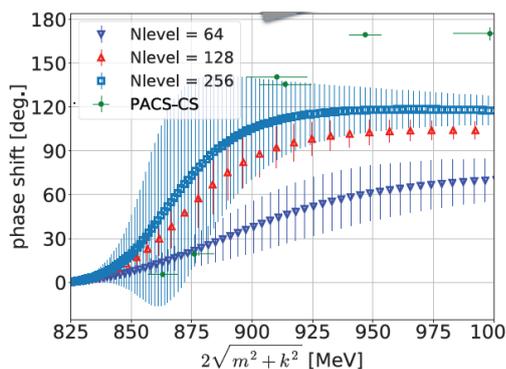


中性子星物質における各粒子の化学ポテンシャルの密度依存性

[I=1 $\pi\pi$ 相互作用の計算と ρ 共鳴状態]

本研究では、初めて HALQCD 法と LapH 法を融合させ、クォーク対生成・消滅ダイアグラムを含むメソン間相互作用の計算を行った。パイオン質量 410MeV、格子サイズ $(2.9\text{fm})^3 \times (5.8\text{fm})$ において、I=1 $\pi\pi$ 相互作用の計算を行った。ポテンシャルとしては、微分展開の最低次近似を用いた。LapH smearing の効果を見るために、LapH 固有モードの数に対応する Nlevel について、64-256 の値を取った。Nlevel が大きいほど、smearing の幅が小さくなり、通常の HAL 法での計算で用いられている point-type operator に近づいていく。得られたポテンシャルを用いて計算した散乱位相差が下の図に対応する。結果は Nlevel に依存しているが、これは smearing の違いにより NBS 波動関数の定義 (HAL 法における scheme) が異なるため、ポテンシャルの定義が異なり、微分展開の収束性が変わったためだと解釈できる。実際、I=2 $\pi\pi$ における同様の計算では、Nlevel が大きい (sink operator の locality が大きい) 方

が微分展開の収束性が良くなるという傾向が得られている。その知見に基づいて Nlevel が大きい 128, 256 の結果を見ると、どちらも散乱位相差が 90 度を切っており、共鳴状態の存在を意味する振る舞いとなっている。これは、HAL QCD 法においてクォークの生成消滅ダイアグラムを直接取り扱うことで ρ メソンに対応する共鳴状態が得られたということを意味している。この結果は、HAL QCD 法が様々な共鳴状態の計算に適用可能であることを強く示唆しており、非常に大きな意義を持っている。一方で、定量的には通常のルッシャー法を用いた結果 (PACS-CS) とは違いが観測されている。これは、LapH における sink smearing が大きな広がりを持っていることが一因と考えられ、さらなる研究が進展中である。



I=1 $\pi\pi$ 散乱位相差

4. まとめ

本研究の第一テーマとして、物理点近傍のクォーク質量 (パイオン質量 146MeV) における現実的バリオン間力について、格子 QCD 第一原理計算による決定を世界で初めて行った。特に本年度の計算により、生成配位から可能な最大限のモンテカルロ統計数を達成することができ、統計誤差・系統誤差をより良くコントロールすることが可能になった。

核力からハイペロン力まで系統的に計算し、特に実験的に未知であったハイペロン力について定量的な予言を与え重要な成果を得た。 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系は強い引力によりユニタリー極限とほぼ対応する非常にエキゾチックな系となっていることが明らかになった。 $N\Omega$ (5S_2) 系についても強い引力が働いており、束縛状態が存在する可能性が

初めて示された。 $\Xi\Xi$ (1S_0) バリオン系については、強い引力はあるものの束縛ダイバリオン状態は存在しないことが明らかになった。 $\Lambda\Lambda$ - $N\Xi$ - $\Sigma\Sigma$ (1S_0) バリオン系においては、Hダイバリオン状態と対応する散乱振幅の極の位置について明らかにした。また得られた格子 QCD ハイペロン力に基づき、核物質系の性質、具体的にはハイペロン 1 体ポテンシャルの計算を行うと共に、高密度核物質中でハイペロンがどのように出現するかという計算を行い、QCD から核物質系、宇宙天文学物理までを繋ぐ道筋を示した。

これらの結果は大規模実験の方向性に既に大きなインパクトをもたらしており、重イオン衝突実験での $\Lambda\Lambda$ 、 $N\Xi$ 、 $\Xi\Xi$ 、 $N\Omega$ 、 $\Omega\Omega$ 関連の観測が、今後進展していく見込みである。また、格子 QCD 計算の結果に触発されて Hダイバリオン探索実験が間もなく J-PARC でスタートする。格子 QCD ハイペロン力の研究は、J-PARC における Λ ハイパー核、 Ξ ハイパー核の実験研究とも表裏一体の関係にあり、理論・実験が一体となった研究の進展が期待される。

本研究の第二テーマとしては、LapH 法を組み合わせることで初めてクォークの対生成・消滅ダイアグラムを直接取り扱った計算を行った。I=1 $\pi\pi$ 相互作用を計算することで、実際に ρ メソンに対応する共鳴状態のシグナルが得られた。今後は、実験で報告されている様々なエキゾチックハドロン共鳴状態への応用が期待される。

5. 今後の計画・展望

本年度をもって、物理的クォーク質量を用いた格子 QCD によるバリオン間力の第一原理計算という世界初の挑戦的計算は、一つの到達点に達した。特に、ストレンジネス |S| が大きいチャンネルについては既に定量的予言を与え、実験・観測へも大きなインパクトを与えている。今後の課題は、ストレンジネス |S| が小さいチャンネルにおける、より精度の良い計算の実現である。また長期的には、本研究では計算資源の制約から扱うことのできなかつた、奇パリティチャンネルにおけるバリオン間力、スピン軌道力、三体力の計算が重要な課題となる。これらの計算を実現するには、単に計

平成 29 年度 利用報告書

算能力の増大・統計数の増大に頼らない、新たな計算手法の開発が重要である。この観点から重要なのが、本年度で研究を行った、HAL 法と LapH 法の融合である。本年度はメソン系を対象に計算を行ったが、そのテクニックをバリオン系に適用することで、統計誤差・系統誤差を低減できる可能性がある。来年度は、2 体バリオン系を対象に、実際にそのような計算を行い、新たな計算手法の確立を目指していきたいと考えている。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

(1)
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)
“Most Strange Dibaryon from Lattice QCD”
arXiv:1709.00654 [hep-lat] (2017),
submitted to Phys. Rev. Lett.

(2)
T. Doi and T. Inoue
“Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD: The Bridge from Quarks to Nuclei and Cosmos”
Nucl. Phys. News 27, 13 (2017).

【国際会議などの予稿集、proceeding】

(1)
T. Doi, T. Iritani, S. Aoki, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, T. Miyamoto, H. Nemura and K. Sasaki
“Baryon interactions from lattice QCD with physical quark masses – Nuclear forces and $\Xi\Xi$ forces –”
arXiv:1711.01952 [hep-lat].
submitted to Proc. of Lattice2017.

(2)
N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, T. Miyamoto, H. Nemura, and K. Sasaki
Baryon interactions from lattice QCD with physical masses --S=-3 sector: $\Xi\Sigma$ & $\Xi\Lambda$ - $\Xi\Sigma$ –
submitted to Proc. of Lattice2017.

(3)
K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii and T. Miyamoto
“Lattice QCD studies on baryon interactions in the strangeness -2 sector”
submitted to Proc. of Lattice2017.

(4)
H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, S. Gongyo, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto and K. Sasaki
“Baryon interactions from lattice QCD with physical masses – strangeness S = -1 sector –”

arXiv:1711.07003 [hep-lat].

submitted to Proc. of Lattice2017.

【国際会議、学会などでの口頭発表】

(1) “Hadron Interactions in HAL QCD method and Applications to Nuclear and Astro Physics”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at INT workshop on “Multi-Hadron Systems from Lattice QCD”, Institute for Nuclear Theory, Seattle, USA, 2-5 Feb. 2018.

(2) “Hadron Interactions from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “ハドロン・原子核物理の理論研究最前線 2017”, KEK, 20-22 Nov. 2017.

(3) “Nuclear Physics from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at “Workshop of Recent Developments in QCD and Quantum Field Theories”, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 9-12 Nov. 2017.

(4) “Resonances and Exotics from Hadron Interactions in Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at ECT * workshop on “The Charm and Beauty of Strong Interactions”, ECT * , Trento, Italy, 17-28 Jul. 2017.

(5) “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses – Nuclear forces and $\Xi\Xi$ forces –”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at “The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”, Granada, Spain, UK, 18-24 Jun. 2017.

(6) “Baryon forces from physical point lattice QCD [5] – Nuclear forces and $\Xi\Xi$ forces –”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan, 12-15 Sep. 2017.

(7) “Baryon Forces from Lattice QCD”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at Workshop on “Advances of nuclear structure and reaction physics based on the realistic nuclear forces”, Yukawa Institute of Theoretical Physics (YITP), Kyoto, Japan, 27-29 Mar. 2017.

(8) “Baryon forces from physical point lattice QCD [4] – General overview and S=0, -4 sectors –”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Osaka University, Osaka, Japan, 17-20 Mar. 2017.

(9) “Interactions between clusters on a lattice”

T. Doi, for HAL QCD Collaboration

Invited Talk given at Workshop on “Clusters connecting quarks,

(10) 佐々木健志 for HAL QCD collaboration

“Lattice QCD study on YN / YY interactions”

Talk given at “2017 年度 KEK 理論センター J-PARC 分室活動 総括研究会 ”, いばらき量子ビーム研究センター, 1-2 Feb. 2018.

(11) K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

“Dibaryons from Lattice QCD”,

Talk given at Exotic hadron spectroscopy 2017, Higgs Centre for Theoretical Physics, Edinburgh, Scotland, 11-13 Dec. 2017.

(12) K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

“Dibaryon candidates from Lattice QCD”,

Invited talk given at the 2nd EMMI Workshop: Anti-matter, hyper-matter and exotica production at the LHC, Turin, Italy, 6 -10 Nov. 2017.

(13) 佐々木健志 for HAL QCD collaboration

“ 物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用 [5]-S=-2 セクター ”

Talk given at “ 日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学) ”, 12 - 15 Sep. 2017.

(14) K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration,

“Lattice QCD studies on baryon interactions in the strangeness -2 sector”,

Talk given at “The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”, Granada, Spain, 18 - 24 June, 2017.

(15) “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses --S=-3 sector: XiSigma & XiLambda-XiSigma --”

N. Ishii, for HAL QCD Collaboration

Talk given at “The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”, Granada, Spain, UK, 18-24 Jun. 2017.

(16) “Baryon interactions from lattice QCD with physical masses --- strangeness S=-1 sector ---”

H. Nemura, for HAL QCD Collaboration

Talk given at “The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”, Granada, Spain, UK, 18-24 Jun. 2017.

(17) “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[5] ---S=-3 セクタ---”

N. Ishii, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan, 12-15 Sep. 2017.

(18) “HAL 法を用いた物理点格子 QCD 計算による ΛN および ΣN 相互作用と軽いハイパー核の研究”

H. Nemura, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan, 12-15 Sep. 2017.

(19) “物理点格子 QCD によるハイペロン混合物質”

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Utsunomiya University, Utsunomiya, Japan, 12-15 Sep. 2017.

(20) “物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[4] --- S=-3 セクタ ---“

N. Ishii, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Osaka University, Osaka, Japan, 17-20 Mar. 2017.

(21) “HAL QCD 法で探る $\Lambda N, \Sigma N$ 相互作用の性質と軽いハイパー核への展開”

H. Nemura, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Osaka University, Osaka, Japan, 17-20 Mar. 2017.

(22) “物理点格子 QCD によるハイペロン化学ポテンシャル”

T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

Talk given at JPS meeting, Osaka University, Osaka, Japan, 17-20 Mar. 2017.

(23) “ $I = 1$ $\pi\pi$ scattering in HAL QCD method with LapH smearing”

D. Kawai, for HAL QCD Collaboration

Talk given at INT workshop on “Multi-Hadron Systems from Lattice QCD”, Institute for Nuclear Theory, Seattle, USA, 2-5 Feb. 2018.

(24) “最先端物理における湯川（2）、湯川の核力を導く”

N. Ishii, for HAL QCD Collaboration

第 3 3 回湯川記念講演会 大阪大学豊中キャンパス 南部陽一郎ホール、2018 年 1 月 21 日