

課題名 (タイトル) :

格子量子色力学を用いたバリオン間力の決定

利用者氏名 : ○土井琢身、初田哲男、青木慎也、権業慎也、池田陽一、井上貴史、石井理修、宮本貴也、佐々木健志

所属 : 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

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

宇宙の進化の歴史の中で、物質はどのように創成され、どのような性質を持ち、そしてどこに行き着くのか？これは物理学における最も根源的な問題の一つである。その解明には、物質を構成する主要要素である「バリオン」の性質、特にバリオン間に働く相互作用（バリオン間力）の決定が必要不可欠である。バリオンはクォーク・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、従来のバリオン間力研究では、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、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。本研究の目的は、格子 QCD 第一原理計算により、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決定を行うことである。さらに、得られたバリオン間力、特にハイペロン力を用い、物質の新しい存在形態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。

格子 QCD 計算によりバリオ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る。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おり、これまでも様々なバリオン間力の計算に加え、得られたバリオン間力を用いた原子核の性質や中性子星の構造の計算にも成果を収めてきた。しかし、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。そこで本研究では、

理研 FX100 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、統計揺らぎが大きく非常に挑戦的課題であるため、本課題では前年度からの継続課題として、モンテカルロ統計数を増やして精度を向上させることを主眼とした計算を行った。

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、分野間のミッシングリンク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、超新星爆発・中性子星連星合体など宇宙における爆発的現象、元素の起源の由来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でも主要な目標となっており、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、LIGO/Virgo/KAGRA による重力波観測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。

本研究は、HAL QCD グループが参画している、ポスト京重点課題 9「宇宙の基本法則と進化の解

明」(およびそれに先立つ HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」との密接な連携の下で行った。即ち、戦略分野 5 で京コンピュータを用いて生成された物理点近傍・大体積 QCD ゲージ配位を用い、バリオン間力の大統計計算を理研 FX100、および京、筑波 HA-PACS を活用して行った。特に、戦略分野/重点課題における京の利用経験に基づき、理研 FX100 で約 17%という高い実行効率を実現するコードを前年度に開発済みである。本年度はこのコードを利用しつつ、新たな相互作用の研究に向けてコードの拡張をも行った。

2. 具体的な利用内容、計算方法

本研究では、格子 QCD 第一原理計算により、現実的クォーク質量、大体積格子を用いた現実的バリオン間力の計算を行った。本課題は前年度からの継続課題であり、本年度の主目的は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である。バリオン間力としては、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)を対象とした。中でもハイペロン力は、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。これらの計算は、我々独自の理論定式化・アルゴリズム開発・コードチューニングにより初めて可能となったものである。以下では理論定式化・数値計算それぞれの側面について述べると共に、本研究で用いた格子 QCD 計算セットアップを述べる。

[理論定式化]

格子 QCD を用いたバリオ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バリオン間力を導出するもので、散乱位相差に忠実なバリオ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バリオ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。特に、クォーク質量を現実の値に近づけていき(軽くしていき)、格子体積を大きくするにつれ、直接計算法における固有状態の分離は指数関数的に困難になることが知られている。我々の最新論文では、従来の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いる。(T. Iritani et al. (HAL Coll.) JHEP1610(2016)101.)

また、ハイペロン力の決定においては、結合チャンネル系の計算が重要となるが、従来の直接計算法では取り扱いが困難であった。これについても HAL QCD 法においては理論定式化を拡張することで、結合チャンネルバリオン間力が決定可能になっている。

このように、物理点近傍という非常に軽いクォーク質量かつ大体積格子を用い、結合チャンネル系も含む現実的バリオン間力の決定を目指す本研究は、我々が開発した HAL QCD 法により初めて可能となった研究である。

[数値計算]

格子 QCD 計算は、モンテカルロ法を用いた第一原理計算を行うものである。特に本研究の目的である物理点計算では、統計揺らぎが非常に大きく、高精度の結果を得るにはモンテカルロ統計数を増やして統計誤差を減らすことが重要である。しかし、本研究で必要となる NBS 相関関数の計算は、(1)核力からハイペロン力まで系統的に扱うため、計算する NBS 相関関数の数(バリオンチャンネル数)が多い(2)各 NBS 相関関数で扱うクォーク数が多い(3)各クォークはカラーとスピノルという多くの自由度を持つ、などの理由により、莫大な計算コストを要していた。我々はこの点において、統一縮約法という独創的計算アルゴリズムを開発しており、バリオン間力計算を(系に応じて)数倍から数万倍以上高速化することに成功している。

本研究では、京コンピュータ用によくチューニングされた統一縮約法コードおよびクォークソルバーコードを用い、さらに理研 FX100 用の最適

化を行うことで、ピーク比実効性能の値として、約 17%という高い効率を達成している。これは、理研 FX100 が持つ長所（高いメモリバンド幅等）が有効に活用されていることを示している。本年度はさらに新たな研究の方向性として、8 重項-10 重項バリオン間力を 3%程度の小さな追加計算コストで実装することに成功し、その予備的計算をスタートさせた。

[格子 QCD 計算セットアップ]

本研究では、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、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である。ゲージ配位の生成においては、ダイナミカルクォークの効果が入った、(2+1)-flavor clover fermion + Iwasaki gauge, 6-APE stout smearing という作用が用いられ、格子間隔は $a=0.085\text{fm}$ である。配位は 5 trajectory 毎に約 2000 trajectories が生成されている。

バリオン間力の計算においては、上記配位生成と同じクォーク質量点での測定計算を行った。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。

本年度の理研 FX100 では、本報告書提出時点までに、およそ 207 ゲージ配位 x 4 回転 x 20 測定に対応する計算を行った。なお、消費計算時間については、申請時間に対して小さな消費に留まっているが、8 重項-10 重項バリオン間力計算を新たに組み込む際の作業オーバーヘッド、大量の出力データの外部転送待ち、システムの混雑などの複合要因によるものである。このうち組み込み作業は既に終了し、また出力データの転送については、つい先日外部データグリッド (JLDG) への転送拠点をスパコンネットワーク上に設定していただいたので、今後はボトルネックになることはないものと考えている。情報基盤センターのサポートに感謝したい。また、ハードウェア側の問題

により計算が頻繁にハングアップする時期があり、多くの再計算を余儀なくされた。これについては、我々もできる限りの情報提供をしつつ、ベンダーに解決を依頼しているところである。以下で示す物理解析の結果については、理研 FX100 のデータに、京および筑波 HA-PACS で計算したデータも含め、モンテカルロ統計数を上げた場合の解析結果を示す。

3. 結果

本研究では、核力、ハイペロン力を系統的に計算し、偶パリティチャンネルにおける中心力、テンソル力を決定した。8 重項バリオンの 2 体系について 52 チャンネル全てを計算すると共に、10 重項バリオンの 2 体系についても $\Omega\Omega$ バリオン系の相互作用を決定した。本年度での測定計算と前年度で行った測定計算のデータを併せて解析した結果、測定間の自己相関は小さく、測定数の冪根と対応するほぼ理想的な統計誤差の減少(約 40%)が得られている。統計誤差が抑えられたことにより、相関関数において虚時間の長さをより大きく取ることが可能となり、系統誤差が改善された。得られたバリオン間力、特にハイペロン力を用い、エキゾチックなダイバリオン状態についての定量的予言を行った。さらに、格子 QCD ハイペロン力に基づく高密度核物質系の性質の研究も行った。

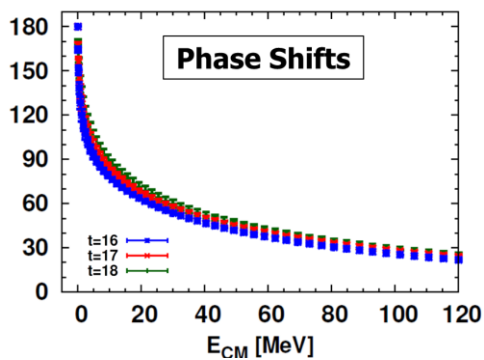
格子 QCD の特性として、ストレンジネス $|S|$ (ストレンジクォークの個数) が大きくなるほど、そのバリオン間力は精度良く決定できる。一方、実験においては $|S|$ が大きいほどバリオン間力の決定は困難になる。従って、本研究による予言は、実験と相補的な関係にある。

本報告書では、代表的な成果例として、 $\Omega\Omega$ バリオン系 ($|S|=6$)、 $\Xi\Xi$ バリオン系 ($|S|=4$)、 $\Lambda\Lambda$ - $N\Xi$ - $\Sigma\Sigma$ バリオン系 ($|S|=2$)、 ΛN - ΣN バリオン系 ($|S|=1$) 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。

[$\Omega\Omega$ 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

くのスレンジネスを含む系である。特に S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャネルは現象論的に興味を持たれてきたが、これまでの模型計算では、相互作用が引力か斥力かすら、模型依存性がある状況であった。本研究では格子 QCD 第一原理計算の結果として、 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系には強い引力が働いており、ユニタリー極限と呼ばれる特異的状况に対応する系となっていることを明らかにした。下に示すのは、得られたバリオン間力と対応する $\Omega\Omega$ (1S_0) 散乱位相差であり、414 ゲージ配位 x 4 回転 x 48 測定の統計データにより得られた計算結果である。昨年度と比べ統計数が 2 倍になった結果、虚時間 $t = 18$ を取ることで非弾性状態に起因する系統誤差を抑制しつつ、統計誤差に関して非常に精密な結果を得ることができた。図の散乱位相差は、束縛エネルギー $2 \pm 1\text{MeV}$ の束縛状態に対応している。本結果は既に実験へのインパクトを与えており、今後重イオン衝突実験での $\Omega\Omega$ 相関観測による検証が期待される。

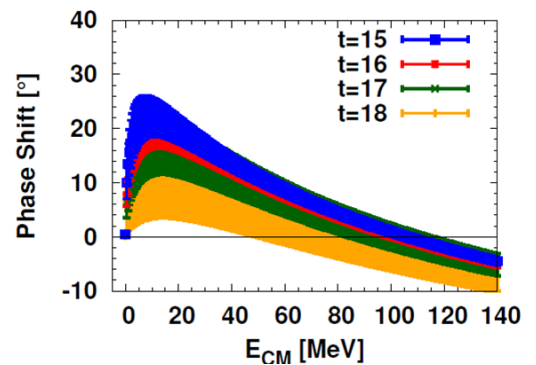


$\Omega\Omega$ (1S_0) 散乱位相差

[$\Xi\Xi$ バリオン系] ($|S|=4$)

$\Xi\Xi$ バリオン系の 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) と同種の性質を持つ (フレーバー SU(3) で同じ 27 表現に属する) 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。下図に示すのが、414 ゲージ配位 x 4 回転 x 48 測定の統計データで得られた $\Xi\Xi$ (1S_0) 散乱位相差である。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

いことが明らかとなった。この研究においても、昨年度と比べ統計数が 2 倍になった結果、虚時間 t を大きく取ることができるようになり、系統誤差がより減少していることが重要である。理想的には $t=18$ でさらに精度の良い結果を得ることが望ましいが、計算済みだが未解析のデータ、および現在計算中のデータを併せることで統計数がさらに 2 倍になる見込みであり、十分実現可能な見通しである。



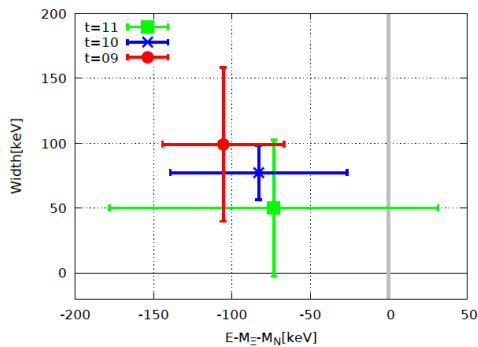
$\Xi\Xi$ (1S_0) 散乱位相差

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

uuddss クォークから成る S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャネルにおける相互作用の解明は、40 年前に R. L. Jaffe によってエキゾチックな H ダイバリオン状態の存在の可能性が指摘されて以来、原子核物理における積年の課題である。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。その結果、強い引力が $N\Xi$ 間に存在していることを明らかにした。これは、SU(3) 基底においてフレーバー 1 重項に強い引力が存在することの反映と解った。得られたバリオン間力を解析することで、H ダイバリオンと対応をなす散乱振幅の極が $N\Xi$ 閾値のごく近傍に存在することを明らかにした。下図に見せるのが、 $N\Xi$ 閾値のすぐ下にある場合の共鳴状態のエネルギーと幅である。本年度の計算により統計数が 414 ゲージ配位 x 4 回転 x 28 測定にまで増大し、

虚時間依存性も含めた解析が可能となった。今後、未解析データおよび現在計算中のデータを併せて解析することで、虚時間依存性に関する系統誤差の検証をさらに進めていく。また、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が間もなく開始される予定であり、具体的な観測量を通じた密接な連携を行っていく予定である。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 $N\Xi$ 相関観測にも大きなインパクトが期待される。



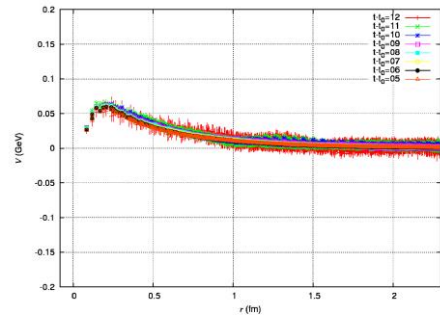
$\Lambda\Lambda-N\Xi-\Sigma\Sigma$ (1S_0) チャンネルにおける
共鳴状態のエネルギーと幅

[$\Lambda N-\Sigma N$ バリオン系] ($|S|=1$)

ハイパー核物理において最も大きな役割を果たすのが、uds クォークから成る Λ ハイペロンであり、その核子 (N) との相互作用である。 ΛN 間相互作用において重要視されているのが $\Lambda N-\Sigma N$ 結合チャンネルを通じた力であり、これは、 Σ ハイペロンを介することでパイオン交換が可能となり、特にテンソル力を通して強い引力をもたらすためである。また、最新の高密度核物質系の研究でも $\Lambda N-\Sigma N$ 結合の重要性が指摘されており、その第一原理計算による決定は大きなインパクトを持つ。

下図に示すのは、 $\Lambda N-\Sigma N$ 結合チャンネル系のスピン 3 重項 ($^3S_1-^3D_1$) における、 $\Lambda N-\Sigma N$ 間テンソル力の結果である。統計数としては 207 ゲージ配位 x 4 回転 x 52 測定を用いた。強いテンソル力が $\Lambda N-\Sigma N$ 間に存在していることが第一原理計算の結果として初めて明らかになった。 またこの結果は、同時に計算した $\Lambda N-\Lambda N$ 間テンソ

ル力 (図は省略) が弱いことと対照的である。今後、高統計データにより虚時間依存性に関する系統誤差を検証すると共に、ハイパー核や高密度核物質系の性質などを計算していく予定である。

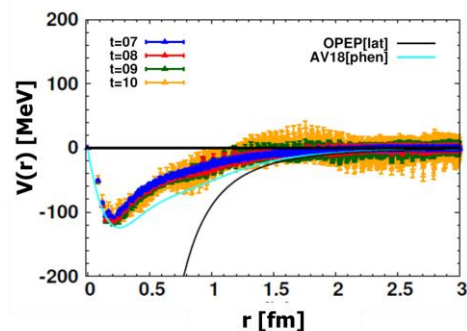


$\Lambda N-\Sigma N$ 間テンソル力

[二核子系] ($|S|=0$)

二核子系のバリオン間力 (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 ($^3S_1-^3D_1$) チャンネルについて、S 波-D 波結合チャン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 x 4 回転 x 48 測定を用いた。現象論的な核力模型 (AV18) と定性的に類似の振る舞いが観察されているが、昨年度と比べ高統計になったことで、テンソル力の振る舞いがより明瞭になった。今後は、中心力と併せて散乱位相差の解析を行うと共に、未解析データ・計算進行中のデータを含め、虚時間依存性に関する系統誤差を検証する予定である。

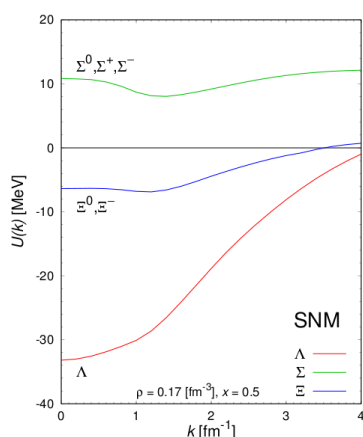


二核子間テンソル力

[格子バリオン間力に基づく高密度核物質系]

高密度核物質系の状態方程式は、中性子星の構造やその合体現象時の重力波など、原子核物理だけでなく宇宙天体物理とも深く関わっている。しかしその決定は、特にハイペロン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。対称核物質 (密度 0.17fm^{-3}) におけるハイペロン 1 体ポテンシャルについて、得られた結果を下に示す。実験の情報を基に現象論的に推定されていた従来の結果と、定性的に一致する結果が得られている。この解析では、SU(3) の破れの効果の扱いなど、幾つかの点で近似計算になっているが、QCD から高密度系、そして宇宙天体物理までを繋ぐうえで大きなステップとなる研究である。



対称核物質における
ハイペロン 1 体ポテンシャル

4. まとめ

本研究では、格子 QCD 第一原理計算を用い、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の決定を世界で初めて行った。これは前年度からの継続課題であり、本年度は特にモンテカルロ統計数を増大させて

精度の向上を図った。スパコン利用においては、FX100 に良く最適化されたコードを用い、約 17% という高効率での計算を行った。本年度の計算によって統計誤差はほぼ理想的に (約 40%) 減少し、ひいては系統誤差をより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重要な成果を得た。 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系については、強い引力が働いており、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。 $\Xi\Xi$ (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、より精度良く結論された。長年の謎であった $\Lambda\Lambda$ - $N\Xi$ - $\Sigma\Sigma$ (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が $N\Xi$ 閾値のごく近傍に存在することが明らかになった。 ΛN - ΣN (3S_1 - 3D_1) バリオン系については、強い ΛN - ΣN 間テンソル力の存在を明らかにした。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った。対称核物質系の計算では現象論的な知見と定性的に一致する結果を得ており、QCD から核物質系、宇宙天体物理までを繋ぐ道筋がつつある。

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 $\Lambda\Lambda$ 、 $N\Xi$ 、 $\Xi\Xi$ 、 $\Omega\Omega$ 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。

5. 今後の計画・展望

前年度、今年度の計算により、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、ほぼその当初目標に到達したものと考えている。(最大統計の達成のために来年度追加計算を予定して

いるが、相対的に小さな資源で可能である。) 特に、ストレンジネス $|S|$ が大きいチャンネルについては統計誤差、系統誤差共にコントロールされた定量的予言を達成し、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った、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。これらの情報は、元素の起源や超新星爆発現象などを解明する上で必要不可欠である。

今後重要なもう一つの方向性は、格子 QCD で決定されたバリオン間力をインプットとした様々な物理量の予言である。そのような“応用研究”の一つとして、本年度は核物質系のハイペロン 1 体ポテンシャルの研究を行ったが、重イオン衝突実験におけるバリオン間相関、J-PARC 実験におけるハイパー核物理への予言など、さらに様々な方向性へと広げていきたいと考えている。

平成 28 年度 利用研究成果リスト

【国際会議などの予稿集、proceeding】

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

“Baryon Interactions from lattice QCD with physical masses -- Overview and $S = 0, -4$ sectors --”
submitted to

Proc. of “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”,
arXiv:1702.01600 [hep-lat].

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

“Baryon Interactions from lattice QCD with physical masses -- $S = -3$ sector: $\Xi\Sigma$ and $\Xi\Lambda$ - $\Xi\Sigma$ --”
submitted to

Proc. of “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”,
arXiv:1702.03495 [hep-lat].

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

“Baryon Interactions from lattice QCD with physical masses -- $S = -2$ sector --”
submitted to

Proc. of “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”,
arXiv:1702.06241 [hep-lat].

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

“Lambda-Nucleon and Sigma-Nucleon interactions from lattice QCD with physical masses”
submitted to

Proc. of “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017)”,
arXiv:1702.00734 [hep-lat].

(5) T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

“Hyperon single-particle potentials from QCD on lattice”
submitted to

Proc. of “The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016)”,
arXiv:1612.08399 [hep-lat]

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

“First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (2) -- $S = -3$ and $S =$

-4 sectors (XiXi, XiSigma and XiLamba-XiSigma channels) --”

PoS LATTICE 2015 (2016) 087.

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

“First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (3) - Strangeness $S = -2$ two-baryon system”

PoS LATTICE 2015 (2016) 088.

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

“A Fast Algorithm for Lattice Hyperonic Potentials”

submitted to

Proc. of “The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015)”,
arXiv:1604.08346 [hep-lat].

【国際会議、学会などでの口頭発表】

(1) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD”

Invited Talk given at KEK theory center workshop on “Hadron and Nuclear Physics in 2017”,
KEK, Tsukuba, Japan, 7–10 Jan. 2017.

(2) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD Nuclear Physics from Lattice QCD”

Invited Talk given at First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on “microscopic theories of nuclear structure and dynamics”,

RIKEN, Saitama, Japan, 12–16 Dec. 2016.

(3) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD”

Talk given at International Molecule-type Workshop “Realistic hadron interactions in QCD”,
YITP, Kyoto, Japan, 21 Nov. – 02 Dec. 2016.

(4) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Two- and Three-Baryon Forces from Lattice QCD”

Invited Talk given at YIPQS long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop on “Nuclear Physics, Compact Stars, and Compact Star Mergers (NPCSM) 2016”,

YITP, Kyoto, Japan, 17 Oct. – 18 Nov. 2016.

(5) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon interactions from lattice QCD with physical masses -- Overview and $S = 0$, -4 sectors --”

Talk given at “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)”,

Southampton, UK, 24-30 Jul. 2016.

(6) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon Interactions from Lattice QCD with physical masses”

Talk given at INT Program “Nuclear Physics from Lattice QCD”, Institute for Nuclear Theory (INT), Seattle, USA, 17 Mar. - 27 May 2016.

(7) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon forces from physical point lattice QCD [3] -- General overview and $S=0$, -4 sectors --”

Talk given at JPS meeting,

University of Miyazaki, Miyazaki, Japan, 21-24 Sep. 2016.

(8) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

” Lattice QCD calculation of baryon forces -- Current status and Future prospects --”

Talk given at Symposium on “From K to post-K supercomputer in particle, nuclear and astrophysics”, Tokyo, Japan, 30-31 Mar. 2016.

(9) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon forces from physical point lattice QCD [2] -- General overview and two-nucleon forces --”

Talk given at JPS meeting,

Tohoku Gakuin University, Sendai, Japan, 19-22 Mar. 2016.

(10) N. Ishii, for HAL QCD Collaboration

“Baryon Interactions from lattice QCD with physical masses -- $S = -3$ sector: $\Xi\Sigma$ and $\Xi\Lambda$ - $\Xi\Sigma$ -

Talk given at “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)”, Southampton, UK, 24-30 Jul. 2016.

(11) 石井理修 for HAL QCD Coll.,

”物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[3] - $S=-3$ セクター”,

日本物理学会 2016 年秋期大会, 2016 年 9 月 21 日~24 日, 宮崎大学

(12) 石井理修 for HAL QCD Coll.,

”物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[2]-- $S=-4$ セクタと $S=-3$ セクタ”,

日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19 日~22 日, 東北学院大学

(13) K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration

“Baryon Interactions from lattice QCD with physical masses -- $S = -2$ sector --”

Talk given at “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)”, Southampton, UK, 24-30 Jul. 2016.

(14) 佐々木健志 for HAL QCD Coll.,

平成 28 年度 利用報告書

“物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[3] – S=-2 セクター”,
日本物理学会 2016 年秋期大会, 2016 年 9 月 21 日～24 日, 宮崎大学

(15) 佐々木健志 for HAL QCD Coll.,

“物理点格子 QCD によるバリオン間相互作用[2]--S=-2 セクタ”,
日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19 日～22 日, 東北学院大学

(16) H. Nemura, for HAL QCD Collaboration

“Lambda-Nucleon and Sigma-Nucleon interactions from lattice QCD with physical masses”
Talk given at “The 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016)”,
Southampton, UK, 24-30 Jul. 2016.

(17) 根村英克 for HAL QCD Coll.,

“HAL QCD 法によるハイペロンポテンシャルとハイパー核の少数多体系計算の研究”,
日本物理学会 2016 年秋期大会, 2016 年 9 月 21 日～24 日, 宮崎大学

(18) 根村英克 for HAL QCD Coll.,

“ハイパー核の少数多体系計算に向けた HAL QCD 法によるハイペロンポテンシャルの研究”,
日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19 日～22 日, 東北学院大学

(19) T. Inoue, for HAL QCD Collaboration

“Hyperon single-particle potentials from QCD on lattice”
Talk given at “The 26th International Nuclear Physics Conference (INPC 2016)”,
Adelaide, Australia, 11-16 Sep. 2016

(20) 井上貴史 for HAL QCD Coll.,

“物理点格子 QCD によるハイペロン一体系ポテンシャル”,
日本物理学会 2016 年秋期大会, 2016 年 9 月 21 日～24 日, 宮崎大学

(21) 井上貴史 for HAL QCD Coll.,

“物理点格子 QCD によるバリオン対相関ギャップ”,
日本物理学会 2016 年年次大会, 2016 年 3 月 19 日～22 日, 東北学院大学