

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, 池田陽一, 青木慎也, 権業慎也, 井上貴史, 石井理修

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

宇宙における物質の起源とその進化を解明するには、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に行われてきており、真の基礎理論である QCD との関係は明らかでなかった。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。そこで本研究では、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、現実的なバリオン間力の決定を世界で初めて行うことを目的とした。さらに、得られたバリオン間力、特にハイペロン力を用い、物質の新しい存在形態 (束縛状態) の存否について定量的予言を目指した。

格子 QCD を用いたバリオン間力の直接決定というテーマは、我々 HAL QCD 共同研究グループが独自に開拓を行ってきたものである。理論定式化の確立に加え、他機関の計算機を用いた数値計算により、バリオン間の中心力・テンソル力、さらにスピン軌道力や三体力などの計算に既に成功してきている。しかし、これまで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きた。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、クォーク質量が物理点近傍 (パイオン質量 146MeV) かつ大体積格子 (格子体積 $(8.1\text{fm})^4$) という、物理的に望ましいセットアップの下でのバリオン間力計算を世界

で初めて遂行した。

現実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、非常に大きなインパクトを持つ。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からは、エキゾチックなダイバリオン束縛状態の存否について定量的予言が可能となる。また、格子 QCD バリオン間力に基づく核物質系の状態方程式は、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、J-PARC 実験におけるハイパー核物理の研究、先般打ち上げられた Hitomi (ASTRO-H) 衛星における中性子星観測、LIGO/Virgo/KAGRA による重力波観測などと密接な関係がある。理論・実験・観測が一体となって物理を進展させる上でも、物理的クォーク質量でのバリオン間力の決定は切望されていた。

本研究は、HAL QCD グループが参画している、HPCI 戦略プログラム分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」およびポスト京重点課題 9 「宇宙の基本法則と進化の解明」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、京の次々世代機である理研 FX100 の長所を活かせる計算コードを用いることで、貴重な理研の計算資源を最大限有効利用した研究を行った。

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。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。この計算は、我々が独自に開発した理論定式化・計算アルゴリズムにより初めて可能となったものである。さらに、2015 年度の利用期間において継続的なコード改良を行い、年度当初と比べて 40%もの計算速度向上を達成した。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り、これは従来格子 QCD で用いられてきたルッシャー有限体積法（各固有状態の分離が必要）と比べ、大きな優位性を持つ。実際、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、ルッシャー法における固有状態の分離は指数関数的に困難になるため、定量的な予言をするには HAL QCD 法の採用が必須となることが、最近の我々の研究で明らかとなっている。

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、従来のルッシャー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を直接決定可能になっている。

以上のように、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、まさに HAL QCD 法の強みが活かされるテーマとなっている。

[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り、高精度の結果を得るにはモンテカルロ統計数（QCD ゲージ配位数や配位あたりの測定数）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自の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、統一縮約法を用い、京コンピュータ用によくチューニングされたコードを用いることで、京の次々世代機に対応する理研 FX100 においても効率的な計算実行を図った。本研究期間中においても更なる計算効率の向上を目指し、様々なチューニングを継続的に施した。クォーク伝搬関数のソルバー計算部分については、戦略分野 5/AICS で開発されたブロックソルバーを新たに採用すると共に、理研 FX100 での計算に最適なパラメータチューニングを行った。NBS 相関関数の計算については、主に I/O 周りのチューニングを行った。また、年度当初と比べ、システムが徐々に安定化した点もプラスとなった（我々は非常に多くのバグ報告をすることでシステムの安定化に貢献した）。これらを併せて最終的に、年度当初と比べ約 40%の速度向上に成功した。ピーク比実効性能の値としては、年度当初の 12%から 17%へと、大幅な向上となっている。このような高効率の達成は、京の利用経験を活かすことで、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。

[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、現実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。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 $a=0.085\text{fm}$ 、配位は約 2000 trajectories が生成されている。

バリオン間力の計算においては、上記配位を用いて、配位生成と同じクォーク質量点 (unitary point) での計算を行った。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 相関関数の測定計算を行った。モンテカルロ統計数を増やすため、ゲージ配位を 4 方向に回転して用いると共に、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。

理研 FX100 では、本報告書提出時点までに、8 重項バリオン 2 体系および $\Omega\Omega$ バリオン系について、およそ 207 ゲージ配位 x 4 回転 x 22 測定の計算、さらに $\Omega\Omega$ バリオン系に特化した追加計算として 207 ゲージ配位 x 4 回転 x 12 測定の計算を行った。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、これは年度を通してシステムが非常に混雑しており、ジョブが流れなかったためである。また、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

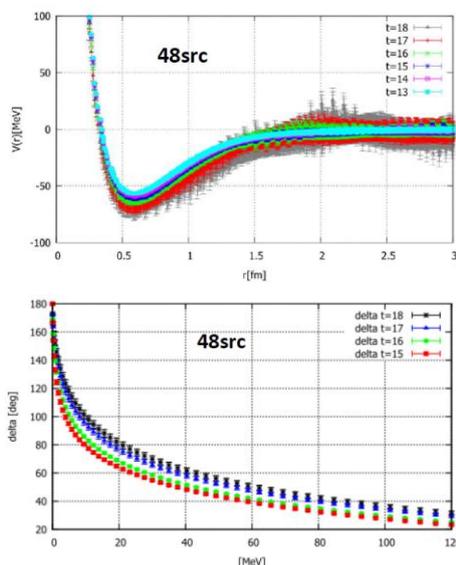
本研究では、偶パリティチャンネルにおける核力、ハイペロン力を系統的に計算し、中心力、テンソル力を導出した。8 重項バリオンの 2 体系について 52 チャンネル全てを計算すると共に、10 重項バリオンの 2 体系についても $\Omega\Omega$ バリオン系の相互作用を決定した。得られたバリオン間力、特にハイペロン力を用い、エキゾチックなダイバリオン状態の存否について定量的予言を行った。

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 (ハイペロン力) 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 ($|S|=4$)、 $\Lambda\Lambda$ バリオン系 ($|S|=2$)、そして二核子系 ($|S|=0$) について結果を報告する。

[$\Omega\Omega$ バリオン系] ($|S|=6$)

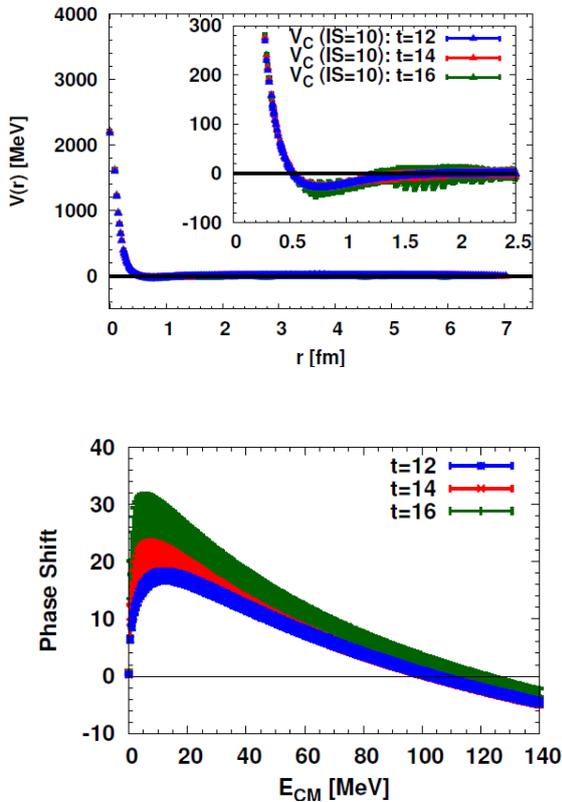
$\Omega\Omega$ バリオン系は、ダイバリオンの中で最も多くのストレンジネスを含む系であり、特に S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャンネルは現象論的に興味を持たれてきた。しかし、これまでの模型計算では、相互作用が引力か斥力かすら、模型に依って異なっている状況であった。本研究では格子 QCD 第一原理計算の結果として、 $\Omega\Omega$ (1S_0) 系には強い引力が働くことを明らかにし、エキゾチックなダイバリオン束縛状態の存在を予言した。下に示すのは、207 ゲージ配位 x 4 回転 x 48 測定の統計データにより得られた計算結果であり、下図 (上) は $\Omega\Omega$ (1S_0) バリオン間力、下図 (下) は対応する散乱位相差である。虚時間 $t = 17-18$ 程度で結果が収束しつつあり、束縛エネルギーは 5MeV 程度と計算された。本結果は既に実験へのインパクトを与えており、重イオン衝突実験での $\Omega\Omega$ ダイバリオン探索の検討が始まっている。



(上) $\Omega\Omega$ (1S_0) バリオン間力 (下) 散乱位相差

[$\Xi\Xi$ バリオオン系] ($|S|=4$)

$\Xi\Xi$ バリオオン系の S 波・スピン 1 重項 (1S_0) チャネルは、ダイバリオオン束縛状態の候補として、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チャネルだからである (フレーバー SU(3) で同じ 27 表現に属する)。模型に依存した予言が種々あるなか、本研究では第一原理計算による定量的予言を目指した。下図に示すのが、207 ゲージ配位 \times 4 回転 \times 44 測定の統計データで得られた $\Xi\Xi$ (1S_0) バリオオン間力、および対応する散乱位相差である。この結果から、 $\Xi\Xi$ (1S_0) バリオオン系は、強い引力はあるもののダイバリオオン束縛状態は存在しないことが明らかとなった。 今後、計算済みだが未解析、および本年度計算中のデータを併せることで統計数を約 2 倍にし、虚時間依存性に関する系統誤差をより詳細に検証することで最終結果を得ることが可能な見通しである。



(上) $\Xi\Xi$ (1S_0) バリオオン間力 (下) 散乱位相差

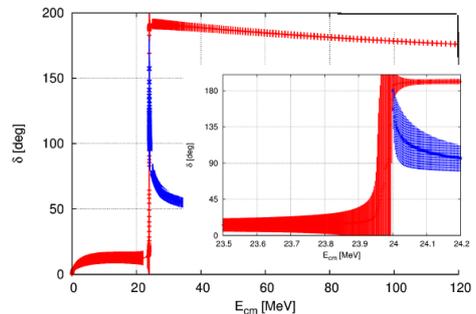
さらに、図は示していないが、 $\Xi\Xi$ バリオオン系のスピン 3 重項 (3S_1 - 3D_1) チャネルにおけるバリオオン間力の導出も行い、中心力には強い斥力芯があ

ること、またテンソル力が弱いことも明らかになった。これらの結果は、中心力についてはクォークのパウリ斥力効果が強いこと、また、テンソル力では 1 ボソン交換ポテンシャルが弱いという物理的描像とよく一致する結果である。

[Hダイバリオオン系] ($|S|=2$)

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、R. L. Jaffe(1977)によってエキゾチックな H ダイバリオ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) での格子計算により、この分野の研究を世界的にリードしてきたが、本研究で初めて現実的クォーク質量での計算を行うことに成功した。

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オン間力を決定した。その結果、強い引力がフレーバー 1 重項に相当するチャネルに存在する (バリオオンの自由度としては主に $N\Xi$ 間の引力) ことを物理点で初めて明らかにした。得られたバリオオン間力を用い、 $\Sigma\Sigma$ 閾値以下における $\Lambda\Lambda$ および $N\Xi$ の散乱位相差を計算したものが下図である。統計数は 207 ゲージ配位 \times 4 回転 \times 20 測定を用い、虚時間は $t=10$ に対応する。これにより、H ダイバリオオンが $\Lambda\Lambda$ 閾値と $N\Xi$ 閾値の間に共鳴状態として存在する可能性を予言した。



$\Lambda\Lambda$ (赤) および $N\Xi$ (青) の散乱位相差

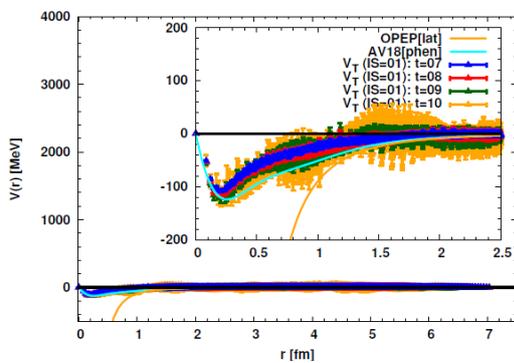
今後は虚時間依存性に関する系統誤差の検証が重要であり、そのために来年度以降含め統計数を増大させる計算を行う予定である。また、本研究による予言の結果を受けて J-PARC での H ダイ

バリオン探索実験が計画されており、実験とより密接な連携を図っていく予定である。

[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 207 ゲージ配位 x 4 回転 x 44 測定を用いた。得られたテンソル力の空間依存性は、現象論的な核力模型 (AV18) と定性的に類似の振る舞いをしており、短距離でのテンソル力が、OPEP(1パイオン交換ポテンシャル)から大幅に弱められていることが明らかになった。一方で、定量性を持った議論には、今後さらに高統計で計算し、虚時間依存性に関する系統誤差を検証する必要がある。



二核子間テンソル力

また、図は示していないが、スピン 3 重項における中心力、およびスピン 1 重項における中心力についても導出し、短距離における斥力芯、および中長距離における引力に対応する結果が得られている。

4. まとめ

本研究では、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、物理点近傍のクォーク質量における現実的バリオン間力の決定を、世界で初めて行うことに成功した。計算に用いたクォ

ーク質量はパイオン質量 146MeV に相当し、格子体積は世界最大級の $(8.1\text{fm})^4$ である。

このような計算は、理研 FX100 ならではの超大規模資源無しでは不可能なものであるが、計算資源をさらに有効に使うため、本研究期間で継続的なコード改善を行い、最終的に年度当初比で約 40% の実行性能の向上を達成した。

本研究の成果として、特に、実験的に未知であったストレンジネス $|S|$ が大きいチャンネルでのバリオン間力(ハイペロン力)について、精密な計算に成功した。得られた結果を用いて、物質の新しい存在形態(束縛状態)の存否について定量的な予言を行った。その結果、ストレンジネスを含む初めてのエキゾチック束縛ダイバリオンとして、 $\Omega\Omega$ (1S_0) ダイバリオンの存在を予言した。一方、束縛状態の存在の可能性が議論されてきた $\Xi\Xi$ (1S_0) 系については、強い引力が存在するものの束縛状態は存在しないことを明らかにした。原子核物理における長年の謎であったエキゾチック H ダイバリオン状態については、 $\Lambda\Lambda$ 閾値と $N\Xi$ 閾値の間に共鳴状態として存在する可能性を予言した。核力成分については、中心力とテンソル力の分離に成功し、現象論的核力 (AV18) と定性的に類似の振る舞いを持つテンソル力を導出した。

これらの計算結果、特にハイペロン力についての定量的予言は、将来の大規模実験の方向性に対しても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 $\Omega\Omega$ ダイバリオン探索、J-PARC 実験での H ダイバリオン探索などが検討・計画されている。

5. 今後の計画・展望

本年度の研究により、ストレンジネス $|S|$ が大きい、 $\Omega\Omega$ 、 $\Xi\Xi$ 系については既に定量的予言を達成しており、エキゾチック束縛状態の予言にも成功した。一方で、 $|S|$ が小さい系、H ダイバリオン系や二核子系については、まだ統計誤差が大きく、今後より高統計な計算を進めていく必要がある。本年度はシステムが非常に混雑していたため計算資源の消費が進まず、結果として得られたモンテカルロ統計数が少ない状態にある。来年度はさらに統計数を増やすことで統計誤差を減ら

すと共に、同じ統計数でもより精度の良い手法の開発に向けた研究を行う。

格子 QCD を用いて現実的バリオン間力の全貌を明らかにするという本プロジェクトについてより長期的な展望をすると、本年度の研究は大きなマイルストーンであると共に、小さな最初の一歩でもある。本研究では計算資源の制約から扱えなかった、奇パリティチャンネルにおけるバリオン間力や、スピン軌道力の計算、さらには三体力の計算などが将来の挑戦的課題となる。これらの情報は、高密度核物質の性質を決定し、宇宙における爆発現象や元素の起源を解明する上で大きなインパクトを持つ。また、バリオン間力のみならず、一般のハドロン間力へと視野を広げると、チャームクォークやボトムクォークに関わるエキゾチック共鳴状態の研究なども今後の大きなテーマである。理研情報基盤センターにおける大規模な計算資源は、これらの研究を進めていく上で必要不可欠な基盤であると考えている。

6. 利用がなかった場合の理由

(該当しない)

平成 27 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

“Towards Lattice QCD Baryon Forces at the Physical Point: First Results”

submitted to

Proc. of “The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015)”,
arXiv:1512.04199 [hep-lat].

(2) 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

“First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (1) -- General overview and two-nucleon forces --”

submitted to

Proc. of “The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015)”,
arXiv:1512.01610 [hep-lat].

【国際会議、学会などでの口頭発表】

(1) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Baryon Interactions from Lattice QCD with physical masses”

Invited Talk given at “The 31st Reimei Workshop on Hadron Physics in Extreme Conditions at J-PARC”,
J-PARC, Tokai, Japan, 17–21 Feb. 2015.

(2) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Nuclear Physics from Lattice QCD”

Invited Talk given at “Symposium on ‘Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)”,
Nara Kasugano International Forum IRAKA, Nara, Japan, 4–8 Nov. 2015.

(3) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“Towards lattice QCD baryon forces at the physical point: First results”

Talk given at “The 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015)”,

Tohoku University, Sendai, Japan, 7–12 Sep. 2015.

(4) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

“First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (1)
-- General overview and two-nucleon forces --”

Talk given at “The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2015)”,
Kobe, Japan, 14–18 Jul. 2015.

(5) T. Doi, for HAL QCD Collaboration

"Baryon forces from physical point lattice QCD -- General overview and twonucleon forces --"

Talk given at JPS meeting, Osaka City University, Osaka, Osaka, Japan, 25-28 Sep. 2015.

(6) N. Ishii for HAL QCD Coll.,

"First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (2)

--S=-3 and S=-4 sectors ($\Xi\Xi$, $\Xi\Sigma$, $\Xi\Lambda$ - $\Xi\Sigma$ channels)--",

Talk given at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2015), July 14-18, 2015, Kobe, Japan

(7) N. Ishii for HAL QCD Coll.,

"Lattice determination of baryon-baryon potentials",

Plenary talk given at the 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), September 7, 2015, Sendai, Japan

(8) 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 ---S=-3 セクタと S=-4 セクタ---",

日本物理学会 2015 年秋期大会, 2015 年 9 月 25 日~28 日, 大阪市立大学

(9) N. Ishii,

"QCD to Nuclear Physics via Nambu-Bethe-Salpeter amplitudes",

Invited talk given at Osaka CTSR-Kavli IPMU-RIKEN iTHES International workshop "Nambu and Science Frontier", November 17, 2015, Osaka, Japan

(10) 青木慎也、

"Hadron interactions at heavier quark masses in lattice QCD -- Are deuteron and di-neutron bound ? --"

YITP and IOPP Joint workshop on Heavy Ion Physics, February 20, 2016 CCNU, Wuhan, China

(11) K. Sasaki for HAL QCD Coll.,

"First results of baryon interactions from lattice QCD with physical masses (3)

--Strangeness S=-2 two-baryon system--",

Talk given at the 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2015), 14-18 Jul., 2015, Kobe, Japan

(12) K. Sasaki for HAL QCD Coll.,

"Coupled channel baryon-baryon interactions on the lattice",

Talk given at the 12th International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), 7-12 Sep., 2015, Sendai, Japan

(13) K. Sasaki for HAL QCD Coll.,

平成 27 年度 利用報告書

"Lattice QCD studies of baryon-baryon interactions and dibaryon states",

Invited talk given at ELPH workshop "Meson Production and Meson-Baryon Interaction", 12-14 Sep., 2015,
Sendai, Japan

(14) 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 --- ストレンジネス $S=-2$ のバリオン間相互作用とダイバリオンの可能性 ---",

日本物理学会 2015 年秋期大会,

2015 年 9 月 25 日~28 日, 大阪市立大学

(15) K. Sasaki for HAL QCD Coll.,

"Physical point lattice QCD simulation on the $S = -2$ baryon-baryon interactions",

talk given at symposium on "Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2015)" 4-8 Nov., 2015,
Nara, Japan