

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、吉江 友照、石井 理修、根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、毛利 健司

研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介

大学院生 (7名)

【人事異動】

金谷和至教授が数理物質系長に就任した(2013年4月1日)。

藏増嘉伸准教授が教授に昇任した(2013年4月1日)。

宇川彰教授が理化学研究所計算科学研究機構(AICS)副機構長として転出した(2014年3月31日)。

山崎剛博士が数理物質系准教授として着任する(2014年4月1日)。

大野浩史博士が計算科学研究センター国際テニユアトラック助教として着任する(2014年4月1日)。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度、格子場の理論と超弦理論の2つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。格子場の理論グループの研究者の大半が参加している主要プロジェクトとして、HPCI戦略プログラム分野5(後述)における研究開発課題1「格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定」がある。これは、PACS-CS Collaboration(2011年9月末のPACS-CS機シャットダウンに伴って解散)が取り組んで来た物理点での $N_f = 2 + 1$ QCDシミュレーションやup-downクォーク質量差および電磁相互作用を取り入れた $N_f = 1 + 1 + 1$ QCD+QEDシミュレーションを発展的に引き継いだものであり、HAL QCD Collaborationが推進している核子間ポテンシャルやハドロン間相互作用の計算も取り入れている。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究を推進しているWHOT-QCD Collaborationや、高エネルギー加速器研究機構(KEK)と共同してカイラルフェルミオンを用いた研究を推進しているJLQCD Collaborationなどで、活発な研究を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、「京」コンピュータを中核とした革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラの構築を主導するために、「High Performance Computing Infrastructure(HPCI)戦略プログラム」が文部科学省によ

り推進されている。その HPCI 戦略プログラムの 5 つの戦略分野の 1 つとして、京都大学基礎物理学研究所青木慎也教授 (本学客員教授) が統括責任者を努める分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」が採択され、2011 年度から本格的に活動が始まり、2012 年度は、秋から共用が開始された「京」コンピュータを中心に、その研究活動が活発化している。詳しい活動内容は、<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>を参照していただきたい。また、分野 5 の戦略プログラムを実施する機関は、青木教授が拠点長を努める「計算基礎科学連携拠点」であるが、その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp/>に詳しい。

超弦理論の分野では弦の場の理論、超弦理論とゲージ理論との対応という 2 つの関連するテーマを中心として研究が行われた。最近この分野においては、D-ブレーンと呼ばれるソリトン解の研究を通じて、弦理論の非摂動的定式化としての弦の場の理論や、超弦理論とゲージ理論の双対性等のテーマが盛んに研究されている。特に近年、超弦理論とゲージ理論の関係が定量的なレベルまで明らかにされる等の大きな発展があった。この状況の下で、弦の場の理論の次元正則化とループ振幅、重力理論／ゲージ理論双対性と強結合グルーオン散乱振幅等についての研究を行った。

【1】 格子場の理論

(宇川 彰、金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、吉江 友照、石井 理修、根村 英克、谷口 裕介、浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介)

(1) HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題

分野 5 「物質と宇宙の起源と構造」の戦略目標は、ビッグバンに始まる宇宙の歴史に於ける、素粒子から元素合成、星・銀河形成に至る物質と宇宙の起源と構造を、複数の階層を繋ぐ計算科学的手法で統一的に理解することにある。この目標を目指して 4 つの研究開発課題が設定されており、そのうちの一つである「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」の責任者を藏増が務めている。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、電磁相互作用や up と down クォークの質量差を取り入れた大規模シミュレーションの実現を意味する。これにより、QCD の基本パラメータであるクォーク質量を高精度で決定することが可能になる。他方、マルチスケール化とは QCD を用いて核子を複数作ることによって核子間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチであり、後者は藏増、宇川を中心としたグループによって推進されている (後述)。

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

平成 24 年度秋の「京」の共用開始以降、ゲージ配位生成の本格計算を継続している。DDHMC(Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法によるゲージ配位生成においては、 96^4 の格子サイズ、0.1 fm の格子間隔を採用し、2+1 フレーバー ($m_u = m_d \neq m_s$) QCD のシミュレーションを実行している。平成 24

年度中に、人為的に設定した初期状態から出発して熱平衡状態に到達することができた。生成されたゲージ配位は5分子動力学時間毎に保存し、ネットワークを通じて筑波大学へ転送し、HA-PACS（計算ノード数268、GPU部ピーク演算性能713Tflops、CPU部ピーク演算性能89Tflops）を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を行っている。図1はこれまで得られた安定な(強い相互作用で崩壊しない)ハドロンの質量の計算結果を実験値と比較したものである。既に0.1%オーダーの統計誤差に到達していることがわかる。ここでは、クォーク質量 ($m_u = m_d \neq m_s$) と格子間隔を決めるための3つの物理量として、 π 中間子質量 (m_π)、 K 中間子質量 (m_K)、 Ω バリオン質量 (m_Ω) を採用している。 m_π と m_K に対しては更に数%程度の実験値へのチューニングが必要であることが見てとれるが、その補正は今後 reweighting 法と呼ばれる計算手法を用いて行う予定である。

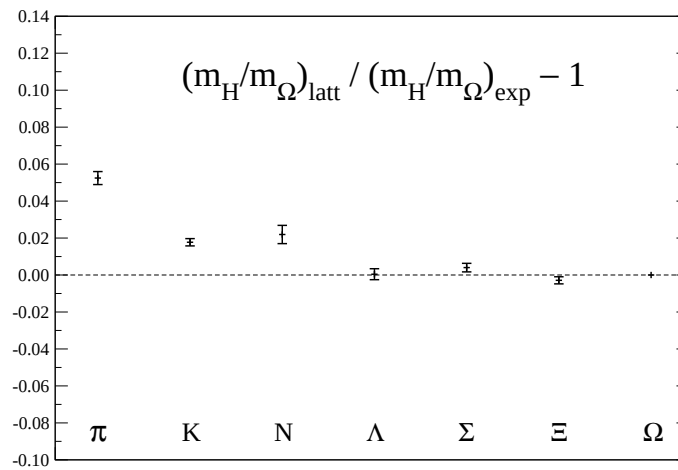


図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られた安定ハドロン質量 (Ω バリオン質量との比) と実験値との比較。

ハドロン質量の計算が0.1%オーダーの統計誤差に到達したことは、本研究開発課題の目標である原子核の直接構成に基づく束縛エネルギーの測定および2体・3体バリオン間ポテンシャルの計算にとって本質的に重要である。というのも、重いクォーク質量を用いた先行研究により、軽原子核の束縛エネルギーを20%ないしはそれ以下の統計誤差で計算するためには、核子質量が0.1%オーダーの統計誤差で得られている必要があることがわかっている。

格子 QCD 共通コード開発

格子 QCD 共通コード Bridge++の開発を進めた(論文1)。格子 QCD 共通コード Bridge++ は、QCD を含む格子ゲージ理論シミュレーションのためのコードである。様々な格子作用やアルゴリズムを取り扱うことが可能であり、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。最先端の研究に必要なパフォーマンスを実現でき、なおかつ使い易いものを目指している。2012年7月に Bridge++ ver.1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>)。

本年度は、コード全体に大きく手が入れた。種々の物理量測定が追加され、またファクトリー化等のコード構造化がより一層推し進められた。2013年7月に Bridge++ ver.1.1.0 としてメジャーアップデートが行われた。その後も、コードの修正、改良が進められている。最新版は、ver.1.1.3 である。

(2) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、宇川は名古屋大学山崎特任助教との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであったが、その後、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、近似を排したより現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。ただし、この計算は π 中間子質量 0.5 GeV 相当のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14 GeV に相当) よりもかなり重い。現在、物理点へ向けてクォーク質量依存性を調べるために、 π 中間子質量 0.3 GeV 相当のクォーク質量での計算を遂行中である (論文 2)。図 2 は ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーのクォーク質量依存性をプロットしたものである。 π 中間子質量 0.5 GeV での結果と 0.3 GeV での結果を比較すると、誤差の範囲を超えた顕著なクォーク質量依存性は認められない。今後、 π 中間子質量 0.3 GeV の結果の誤差を小さくするとともに、平成 26 年度は「京」を用いた物理点での軽原子核束縛エネルギー計算に取り組む。

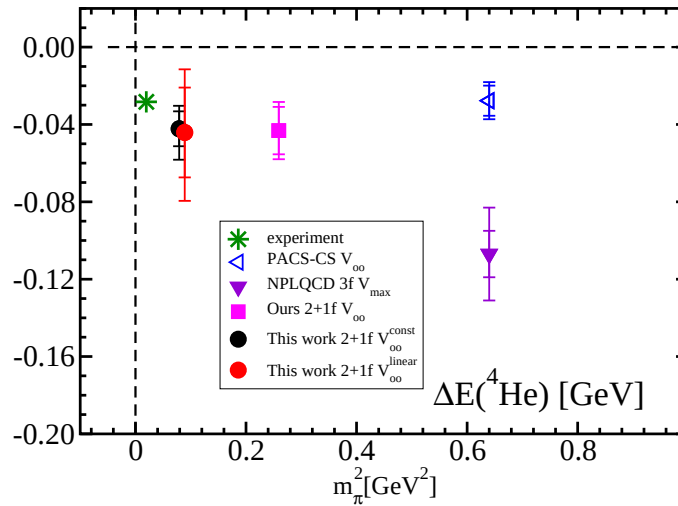


図 2: ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーの π 中間子質量依存性。白抜きはクエンチ近似の結果を表す。

(3) K 中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決問題で、かつ理論の検証において極めて重要な問題が残されている。 K 中間子崩壊での $\Delta I = 1/2$ 則の解明と、CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) の理論からの予測である。これらの問題には、 K 中間

子が二つの π 中間子に崩壊する過程での崩壊振幅の計算が必要である。崩壊過程には、終状態のアイソスピンが $I = 0$ と $I = 2$ の二つの場合があり、それぞれの崩壊振幅を A_0 と A_2 と呼ぶ。

石塚、宇川、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を数値計算し、問題の研究を行った（論文 3）。計算は、 π 中間子質量 $m_\pi = 280 \text{ MeV}$ のもとで行った。 A_0 の計算では、非連結ダイアグラムからの寄与を求める必要がある。このダイアグラムの存在により、崩壊振幅の統計誤差が非常に大きくなることが知られていた。この計算では、ホッピング定数展開法と不完全収束法を用いて、統計揺らぎを小さくすることに成功した。

得られた結果と実験値は以下である。

	結果	実験値
$\text{Re}A_2(\times 10^{-8} \text{ GeV})$	2.426 ± 0.038	1.479 ± 0.004
$\text{Re}A_0(\times 10^{-8} \text{ GeV})$	60 ± 36	33.2 ± 0.2
$\text{Re}A_0/\text{Re}A_2$	25 ± 15	22.45 ± 0.06
$\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)(\times 10^{-3})$	0.79 ± 2.54	1.65 ± 0.26

(1)

$\text{Re}A_2$ が実験値と大きくずれているが、これは計算が実際の quark 質量より重い所で行われた為であると考えられる。質量依存性は、有効理論から $\text{Re}A_2 \propto (m_K^2 - m_\pi^2)$ の形をしていると予想されており、これを実際に数値計算で確かめることが、今後の課題として残された。 $\text{Re}A_0$ の統計誤差はいまだに大きい、 A_0 の値が A_2 より非常に大きくなるという $\Delta I = 1/2$ 則の兆候が見えている。CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) に関しては統計誤差が非常に大きく、計算の改善が必要である。現在、二体 π 中間子の演算子の改良を検討中である。

(4) チャームバリオンの研究

物理点直上の格子 QCD シミュレーションを行い、チャームクォークを含むバリオンの検証及び予言を与えた（論文 5）。本計算により、チャームクォーク 1 つを含むバリオン質量スペクトルは実験値を再現する事が分かった。他方、チャームクォークを 2 つ含むバリオン Ξ_{cc} の質量値は、報告されている実験値と有意に異なった。 Ξ_{cc} の実験値は 1 つの実験グループからしか報告されておらず、他の実験グループによる検証では既存の実験値付近にシグナルは発見されていない。本計算も、他の実験同様、既存の実験報告値に疑義を呈しており、今後の検証が待たれる。また、チャームクォークを 2 個ないし 3 個含む Ξ_{cc} 以外の未発見バリオンに対する質量予言も行った。

(5) 有限温度・有限密度 QCD の研究 (WHOT-QCD Collaboration)

金谷らは、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田准教授、理化学研究所初田主任研究員、京都大学基礎物理学研究所青木教授らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度 QCD の研究を引き続き推進した。

有限温度・有限密度 2 フレーバー QCD におけるカイラル相転移

QCD の有限温度・有限密度相構造を研究する上で、軽い u, d クォークのみを持つ 2 フレーバー QCD のカイラル極限近傍の相転移は重要な役割を担ってきた。

通常考えられてきたシナリオでは、ゼロ温度で量子効果で陽に壊れている軸性 $U(1)$ 対称性が有限温度相転移近傍でも十分強く壊れ、その結果、2 フレーバー QCD の有限温度相転移は 3 次元 $O(4)$ スピン系と同じユニバーサリティー・クラスに属する 2 次相転移になる。実際、筑波大のグループを中心とした（改良）Wilson クォークを用いた一連の研究により、 $O(4)$ のスケーリング関数と臨界指数で 2 フレーバー QCD のカイラル凝集のクォーク質量と温度依存性がよく説明されることが示されている。またスタガード・クォークを用いた BNL-Bielefeld グループの研究でも、QCD が $O(4)$ スケーリングに従うことが報告されている。他方、青木・深谷・谷口の最近の研究により、軸性 $U(1)$ 対称性が高温相で有効的に回復するだろうことが議論された。これは、2 フレーバー QCD の有限温度相転移が 1 次転移である可能性を示唆する。しかし、その場合のカイラル・スケーリングは $O(4)$ とは大きくずれるはずであり、上記の結果と矛盾する。

この研究では、2 フレーバー QCD のカイラル・スケーリングを再度検証し、またそれを有限密度に拡張した（図 3、論文 6）。 $16^3 \times 4$ 格子と $16^3 \times 24$ 格子で $m_{PS}/m_V \approx 0.65$ と 0.80 に相当する数点でシミュレーションし、有限密度効果は、我々の以前の研究と同様に、reweighting 係数の評価に Taylor 展開を利用した reweighting 法を使って計算した。詳細は、論文 6 とその引用文献を参照。

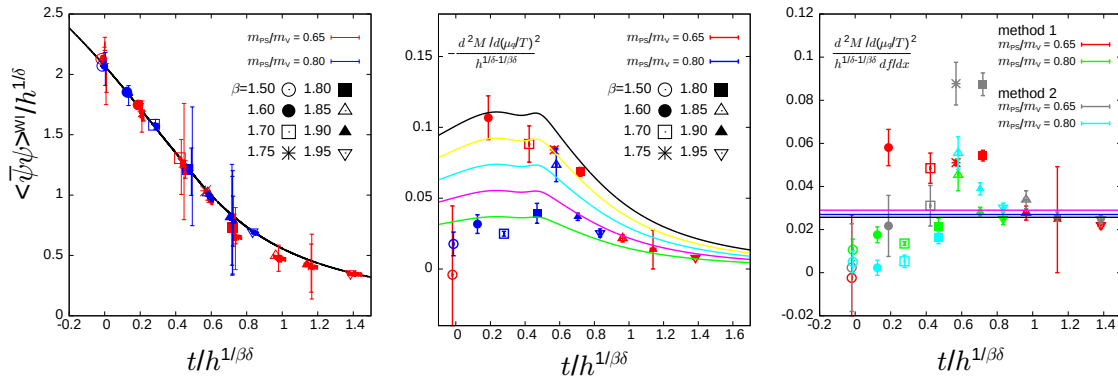


図 3: 2 フレーバー QCD の有限温度・有限密度カイラル相転移近傍のスケーリング（論文 6）：(左図) カイラル凝集の $O(4)$ スケーリング。 $\mu_q/T < 1$ の全データが示されている。誤差の大きなデータは $\mu_q/T \sim 1$ のもの。曲線は $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数。(中央) カイラル凝集の μ_q/T に関する 2 次微分係数。method 1 の結果。 $\mu_q/T < 1$ (右図) 係数 c 。

化学ポテンシャル μ_q によるカイラルの破れの効果は、最低次で温度による破れの効果と同じであり、 μ_q/T が小さい領域におけるスケーリング解析では、有効温度変数を

$$t = \beta - \beta_c + \frac{c}{2} \left(\frac{\mu_q}{T} \right)^2$$

のように補正することで吸収できると期待される。 $(\beta$ は格子上のゲージ結合定数で、スケール変換を通じて温度を動かす役割を果たす。)有限密度でのスケーリングの検証は、上記の問題を考察する上で非自明な情報を提供すると期待される。さらに、この補正に現れる係数 c は、有限温度相転移が有限密度で化学ポテンシャルとともにどの様に移動するかを決めるものであり、高エネルギー重イオン衝突実験によるクォーク・グルオン・プラズマの現象論的研究に重要である。

図3左図に、 $\mu_q/T < 1$ におけるカイラル凝集の結果を示す。曲線は $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数。様々な温度や化学ポテンシャル、クォーク質量の結果を $O(4)$ 臨界指数を使って再編すると、 $O(4)$ スピン模型のスケーリング関数をよく再現することがわかる。

図3中央に、カイラル凝集の μ_q/T に関する2次微分係数を示す。 $\mu_q/T < 1$ のデータを $(\mu_q/T)^2$ の1次関数でフィットして評価した(method 1)。曲線は、様々な c の場合の $O(4)$ スケーリング関数の μ_q/T に関する2次微分係数。微分係数を直接評価する方法(method 2)でも同様の結果を得た。相転移点近傍では統計誤差や系統誤差がまだ大きい、高温両域(主に図の右側のデータ)では $c \approx 0.0290$ に調整(マゼンタの曲線)すればひとつのユニバーサルな曲線に乗る傾向が見られる。図3右図は、それを c へのフィットとして表したもので、マゼンタの線が $c = 0.0290$ で、青い線が、全データの平均 $c = 0.0273(42)$ である。これから、プレリミナリな結果として $-(1/T_c)[d^2T_c/d(\mu_q/T)^2] \approx 0.05-0.06$ を得た。

まだ領域によって統計誤差も系統誤差も小さくないが、有意な領域の誤差の範囲で、有限密度でもQCDのデータが $O(4)$ スケーリングと矛盾しないことがわかった。ユニバーサリティー・クラスに関する明確な結論を引き出すためには、この研究を発展させ、格子体積や格子間隔をシステムティックに変化させてスケーリングの性質を確定する必要がある。

ヒストグラム法による重クォーク QCD の有限温度・有限密度相転移

有限温度・有限密度 QCD の相図を判定するうえで、観測量のヒストグラムやその対数として定義される有効ポテンシャルは、最も直感的な情報を提供するが、変数の広い領域で有効ポテンシャルを精度よく評価する必要があり、統計的に大きな課題を含んでいる。他方、系のパラメータ依存性を調べる上で強力な手法である reweighting 法では、系の作用に現れる物理量に関するヒストグラムを必ず計算する。我々は、これらの物理量のヒストグラムと reweighting 法を組み合わせることにより、様々なパラメータにおけるヒストグラムをつなぎあわせ、変数の広い領域で有効ポテンシャルを精度よく評価することにより、相転移次数を容易に判定する解析方法(「ヒストグラム法」)を開発した。その最初の検証として、方法のテストを兼ねて、クォークが重い領域の QCD の相構造を研究した。2011 年に行った密度ゼロでの研究を発展させて、多数点のシミュレーション結果を結合させる multipoint reweighting 法を用い、さらに有限密度に拡張して、QCD の相構造を導いた(論文7)。

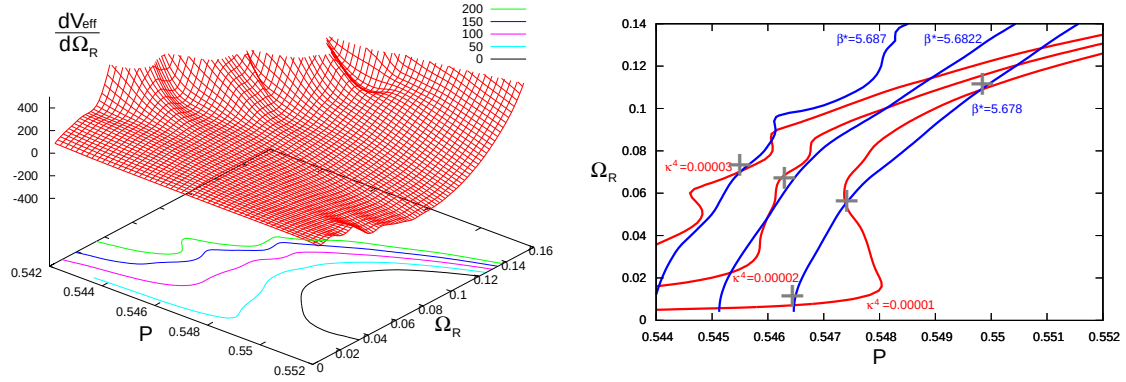


図 4: ヒストグラム法によるクォークが重い領域の QCD における有限温度相構造の研究 (論文 7)。(左) プラケット (ゲージ場のエネルギー) とポリアコフループ (重いクォークのエネルギー) に関する有効ポテンシャルのポリアコフループに関する微分と、ポリアコフループ方向の傾き一定の線。(右) 前述の有効ポテンシャルにおけるプラケット方向とポリアコフループ方向の傾き一定の線。詳細は本文参照。

クォークが重い領域では、クォークが重い極限から reweighting することにより、SU(3) 純ゲージ理論のシミュレーションとホッピングパラメータ展開が適用出来る。この研究では、プラケット (ゲージ場のエネルギーの自由度に対応する) に関する有効ポテンシャル、ポリアコフループ (重いクォークのエネルギーの自由度に対応する) に関する有効ポテンシャル、及び、両者の 2 重分布に関する有効ポテンシャルをシミュレーションと multipoint reweighting 法により評価した。クォークが重い極限の 1 次相転移は、クォークを軽くしたり密度を上げるなどするとクロスオーバーに変化すると期待されている。1 次相転移領域の端の 2 次の臨界点の位置を、有効ポテンシャルの振る舞いから特定した。(クォークが軽い現実的な QCD において、物理点のクロスオーバー転移が密度やクォーク質量を変化させた時に 1 次相転移に変化する臨界点の特定は現象論的に重要である。この研究はそのモデルケースとして行っている。)

図 4 に、プラケットとポリアコフループの 2 重分布に関する有効ポテンシャルの傾きに関する結果を示した。reweighting 法により、ゲージ結合パラメータやクォーク質量を動かすと、有効ポテンシャルの傾きにそれぞれある定数が加わることが示される。つまり、傾き一定の曲線は、別のパラメータ点における傾きゼロの曲線と読み替えることができる。2 つの方向の傾きが伴にゼロの点は安定な基底状態の相や準安定相、および、鞍点に相当する。傾きゼロの曲線が 3 点で交差するパラメータ点は 1 次相転移近傍であり、それが 1 点だけで交差するようになれば、そのパラメータ点はクロスオーバー領域に有る。それらの領域の端が臨界点である。

3 種類の有効ポテンシャルにより計算された臨界点の位置は相互にコンシステントで、それらの解析を組み合わせることにより、臨界点を (ここで導入した重いクォークの近似の範囲で) 精度よく特定できた。なお、有限密度の効果と

しては、有限密度のクォーク位相を評価した結果、臨界点の位置に関しては極めて小さいことが示された。

この成果を受けて、クォークが軽い領域における QCD の有限密度相構造の解明に向けて研究を進めている。

(6) 有限密度 QCD

有限密度 QCD 研究のためには、非ゼロ化学ポテンシャル領域での格子 QCD 計算が必要となるが、化学ポテンシャルの導入は「符号問題」を引き起こしてしまうことが知られている。藏増、宇川は、金沢大学武田助教、理研計算科学研究機構 (AICS) 中村研究員および Jin 特別研究員との共同研究のもと、行列式的高速計算手法を開発し、reweighting 法を用いて 4 フレーバー有限密度 QCD に対して有限サイズスケーリング解析を行った。4 フレーバー QCD では、ある有限のクォーク質量領域において一次相転移を起こすことが期待されているが、それを示せるか否かは我々の計算手法の良いベンチマークテストとなる。シミュレーションでは、 $O(a)$ 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を採用し、「時間方向」の格子サイズを 4 に固定し、空間格子サイズを $V = 6^3 \sim 10^3$ まで変化させた。Plaquette や Polyakov loop などの様々な物理量に対する感受率のピークの高さの V 依存性を調べ、その依存性が線形であることから、一次相転移であることの確証を得た。これは世界で初めての有限密度 QCD に対する有限サイズスケーリング解析の応用であり、その有効性を実証できた意義は大きい (論文 8)。次のステップとして、我々は 3 フレーバー有限密度 QCD における臨界終点 (Critical End Point) の同定計算を試みた。4 フレーバーの場合と同じクォーク作用とゲージ作用を採用し、「時間方向」の格子サイズを 6 に固定し、空間格子サイズを $L^3 = 8^3, 10^3, 12^3$ と変化させた。化学ポテンシャルを $\mu=0.1$ として、 κ - β (クォーク質量-温度) 平面上の相転移を系統的に調べ、有限サイズスケーリング解析手法の一つである尖度 (kurtosis) 交叉法によって臨界終点の位置を決定することに成功した。図 5 は、Plaquette の kurtosis の β 依存性であり、異なる L に対応する線の交点が臨界終点を表す (論文 9)。

(7) 有限温度における $U(1)_A$ 対称性

2 個のクォークを含む $N_f = 2$ QCD において、 $SU(2) \times SU(2)$ のカイラル対称性の他にアノマリーで破れていた $U(1)_A$ 対称性も有限温度で回復する可能性が高いことが先行研究から明らかになった。昨年度は $N_f = 2$ QCD の低エネルギー有効理論である中間子有効理論を用いた相転移次数の研究を青木、深谷両氏と共に行った。具体的には、有限温度における有効理論として $SU(2) \times SU(2)$ カイラル対称性と共に $U(1)_A$ 対称性を保持している理論を構成し、摂動展開と ϵ 展開を用いて求めた繰り込み群の流れから許される相転移の次数を調査した。中間子的な量で書かれた order parameter が熱力学的極限で全て消えるように構成された有効理論においては、繰り込み群方程式に安定な赤外固定点が存在せず、 $N_f = 2$ QCD の相転移の次数は一次であることが強く示唆される (論文 12)。

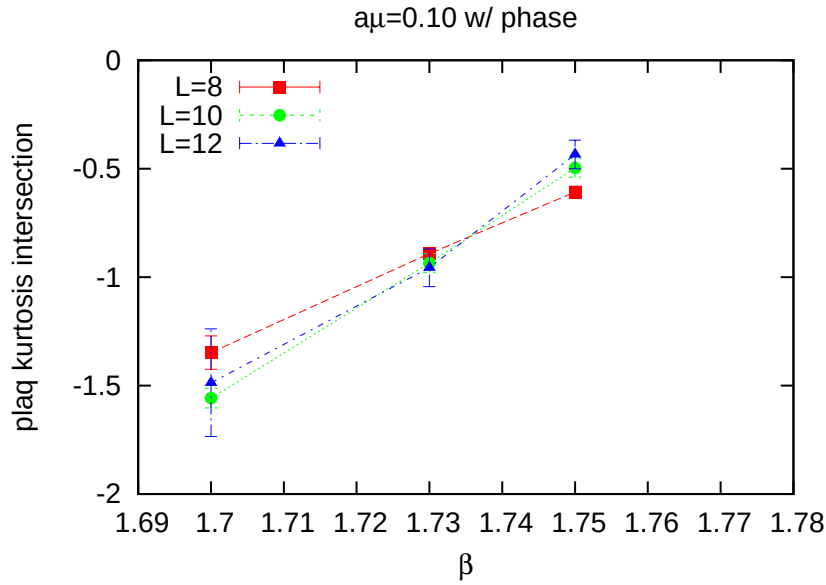


図 5: Plaquette に対する kurtosis の β 依存性。異なる L に対応する線の交点が臨界終点を表す。

(8) 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究 (HAL QCD Collaboration)

2つの核子間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に斥力芯と呼ばれる近距離での斥力、を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。石井、根村、佐々木は、京都大学基礎物理学研究所青木教授、理化学研究所初田主任研究員らと HAL QCD Collaboration を結成し、2核子間の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を応用して、様々な粒子間のポテンシャルを格子 QCD の数値シミュレーションで計算してきた。論文 13 では、3 体力を HAL QCD の方法を用いて計算する場合、その理論的基礎となる 3 体（以上）の NBS 波動関数の漸近形と S 行列の位相差との関係を明らかにしたものである。論文 14 では、HAL QCD の方法で求められたポテンシャルから計算した位相差と Lüscher の有限体積法で求められた位相差が良く一致する事を $I = 2$ の $\pi\pi$ 散乱の場合に示した。論文 15 は、HAL QCD の方法で得られたポテンシャルを用いて核物質の状態方程式や中性子星の最大質量などのクォーク質量依存性を計算したものである。論文 16 では、HAL QCD の方法をチャームクォークを含んだメソン間の相互作用に応用し、4 体クォーク状態の存在の可能性を研究した。

以下では、石井、根村、佐々木、及び青木教授の学生である山田の 2013 年度の研究成果を紹介する。

格子 QCD による反対称 LS 力

Momentum wall source と cubic group を駆使して、格子 QCD により、負パリティセクタのハイペロン力と反対称 LS 力を研究した。格子 QCD 計算には、CP-PACS/JLQCD 生成の flavor SU(3) limit の 2+1 flavor ゲージ配位を用い

た。計算の都合上、flavor 既約表現 1 を除いた $27 \oplus 10 \oplus 10^* \oplus 8$ 表現についてのポテンシャルを求め、それを $NA-N\Sigma$ 結合チャンネルポテンシャルの形に変形した。この段階では、反対称 LS 力は対称 LS 力に比べて非常に小さい物であったが、 $N\Sigma$ sector を integrate out することによって有効 NA ポテンシャルを求めることによって、反対称 LS 力は大きくなった。現象論的に、対称 LS 力と反対称 LS 力の cancellation が期待されており、我々の結果はこれに対してポジティブである。

一般化されたバリオン間ポテンシャルの高速計算コードの開発

物理点での格子 QCD による (一般化) 核力ポテンシャルの導出に備えて、この計算の基本部分となる Nambu-Bethe-Salpeter(NBS) 波動関数の格子 QCD 計算を効率よく高速に行うためのアルゴリズムの開発並びに実際に大型計算機で高速に動くプログラムの開発を進めた。物理点になるべく近い格子 QCD 計算では、フレーバ SU(3) 対称性の破れを直接扱う必要があるため、計算すべきチャンネルが膨大になり、その各チャンネルの計算を系統的に効率よく行うことが求められる。また、こうした計算には大型計算機の使用が不可欠であるため、大型計算機上の計算効率の向上は、全体の研究の進捗を左右する重要な要素である。より具体的には、NBS 波動関数を求める際の数値計算の主要部分 (Wick contraction を計算する部分) のアルゴリズムの抜本的な整備をまずすすめた。核子だけでなく、 Λ や Σ 、 Ξ など、ハイペロンを含む複数 (例えば 52 チャンネル) の NBS 波動関数を、一度の計算で同時にかつ効率よく計算することのできるアルゴリズムを開発した。クォーク演算子の内部自由度とフェルミ統計性に起因する演算の繰り返しの回数を、unified contraction 法よりも数分の一程度に短縮することに成功した。このアルゴリズムを、C++ で書かれたプログラムとして実装することにも成功しており、格子 QCD 共通コード (Bridge++) と組み合わせて計算することが可能である。大型計算機 (BlueGene/Q) 上で、分散メモリ用の並列処理 (MPI) と共有メモリ用の並列処理 (OpenMP) を同時に利用したハイブリッド並列実行が可能であり、MPI 並列数とスレッド並列数の様々な組み合わせにおいて、安定して効率よく計算が行えることを確認した。

ハイペロン間相互作用の研究

ストレンジネス (S) を含むバリオン間相互作用の研究は、バリオン間の近距離斥力の起源を明らかにする上で重要である。佐々木らは、HAL QCD collaboration によるポテンシャルの導出方法を用いて、 $\Xi\Xi$ 間に働く相互作用についての研究を行った。この系は NN 系とフレーバーに関して共役関係になっており、バリオン間力の対称性を調べるうえで重要となっている。

計算は PACS-CS collaboration によって生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位を用い、 π 中間子質量が 700MeV, 570MeV, 410MeV のに対応する 3 つの異なるクォーク質量について結果の解析を行った。これらをそれぞれ Esb1, 2, 3 と呼ぶことにし、SU(3) 対称性の破れもこの順に大きくなっている事に注意する。

図 6 は、準備段階ではあるが、Esb1, 2, 3 のゲージ配位により得られた 1S_0 の $\Xi\Xi$ 間ポテンシャル (左図) と、そのポテンシャルを用いて計算された $\Xi\Xi$ の散乱位相差を示している。この図から、クォーク質量が軽くなり、SU(3) の破れが大きくなるにつれてポテンシャルの近距離斥力が徐々に強くなり、この影響で散乱位相差が斥力的に移り変わっていく様子を確認する事が出来た。

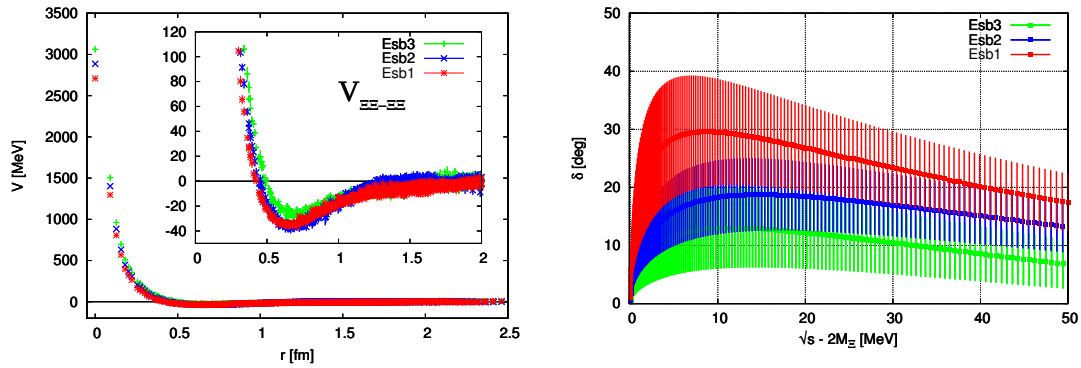


図 6: 1S_0 チャンネルにおける $\Xi\Xi$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

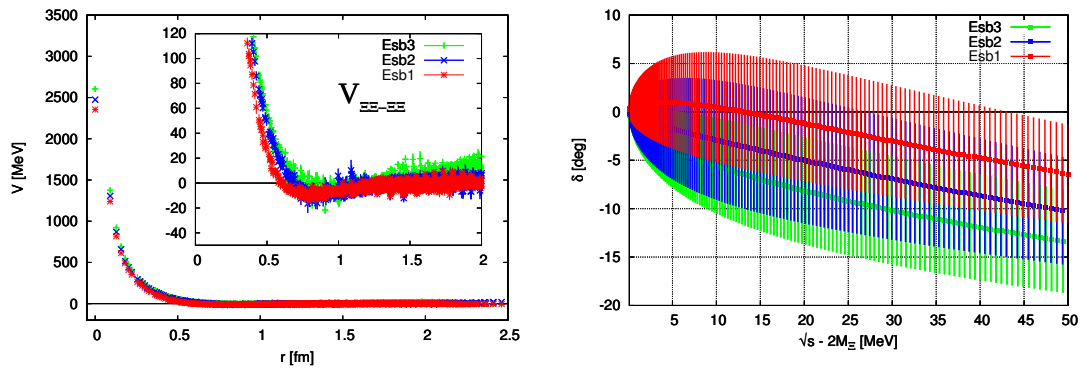


図 7: 3S_1 チャンネルにおける $\Xi\Xi$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

図 7 は、先ほどと同様に 3S_1 の $\Xi\Xi$ 間ポテンシャル (左図) と、そのポテンシャルを用いて計算された $\Xi\Xi$ の散乱位相差を示している。ここでは、 1S_0 の場合と事なり、得られたポテンシャルは強い斥力的な性質を示すことが分かった。この性質は構成子クォーク模型で予想された性質と一致しており、バリオン内のクォーク自由度によるパウリ斥力の存在を示していると言える。また、この状態はフレーバー 10 次元表現に属し、 NN 系の重陽子状態が属する 10 次元表現とは共役関係にあるが、この系には束縛状態が存在しない事が明らかとなった。

今後は、他の系についても解析をすすめ、中間子交換模型との差異を明らかにしつつ、2 バリオン系における束縛状態の有無などを調べようと考えている。

Ω - Ω バリオン間相互作用の研究

Ω バリオンは、クォーク模型の分類におけるフレーバー 10 重項のなかで唯一強い相互作用で安定なバリオンである。山田らは、 Ω - Ω のポテンシャルを HAL QCD collaboration による核力ポテンシャルの導出方法を使い計算した。昨年に引き続き、クォーク模型の計算で強い引力があると予想されるトータルスピン $J = 0$ の状態の計算を行った。

前回までの計算では、CP-PACS/JLQCD collaborations が生成した 2+1 フレーバーの現実より重いクォーク質量 (π 中間子質量 875[MeV] に対応)、体積としては 1 辺 1.934(26)[fm] のゲージ配位を用いていたが、今回の計算ではより体積の大きい 1 辺 2.902(42)[fm] の PACS-CS collaboration が生成したゲージ配位 (π 中間子質量 700[MeV] に対応) を用いた。

結果は中心に斥力芯があり中距離には引力ポケットが存在していることがわかる (図 8)。前回と同様に強い引力であることは間違いないが、束縛するかどうかはギリギリのポテンシャルであるので、今後も慎重に解析を進めていこうと考えている。

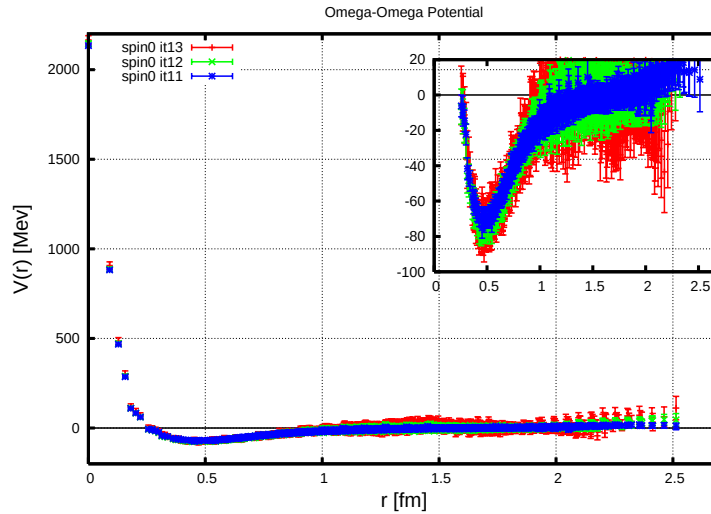


図 8: $J = 0$ である Ω - Ω 間のポテンシャル V [MeV]。横軸はバリオン間の距離 r [fm]。

(9) 重いクォークに対する改良型フェルミオン作用

KEK を中心とした JLQCD collaboration では重いクォーク系の精密計算に向けて、残余質量の小さいドメインウォールフェルミオン作用を用いて細かい格子の配位生成が進められている。それと平行して進められているのが、趙が担当している重いクォークを扱うための改良型フェルミオン作用の開発である。趙は高エネルギー加速器機構の橋本省二教授、野秋淳一特任助教らと共に、ブリルアンフェルミオンと呼ばれる新しいタイプのフェルミオン定式化に注目し、この離散化誤差を削減する改良を行った (論文 25)。改良型フェルミオンを用いた分散関係や固有値分布は連続理論に近い性質を持っていることが明らかになっている。

図9は、自由場上で分散関係を示している。緑はウィルソnfエルミオン、青はブリルアンフェルミオン、マゼンダは改良型ブリルアンフェルミオンを表す。横軸は運動量、縦軸は運動量を表しており、各フェルミオン作用に関して運動量の方向(1,0,0),(1,1,0),(1,1,1)を同時にプロットしている。)またクエンチ近似配位($a = 0.052 - 0.099\text{fm}$)を用いたスケーリングテストを英国サウサンプトン大学のグループ(UKQCD collaboration)と共同で行っており共著論文を作成中である。さらにブリルアンフェルミオンや改良型フェルミオン作用の摂動的性質を調べるため、米国 Brookhaven National Laboratory の Christoph Lehner 氏と共同で PhySyHCAL(A PhysicsSystem based on Hierarchical Computer Algebra)を用いた研究を進めている。

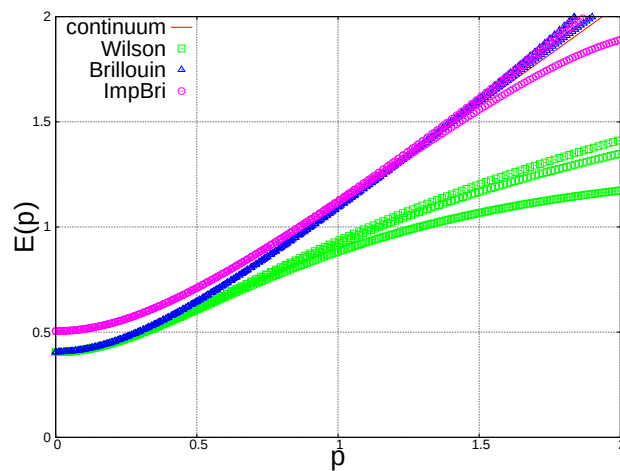


図 9: 自由場上で分散関係。 $m_q a = 0.5$ 。

(10) コンフォーマル理論の研究

吉江は、コンフォーマル理論の数値的研究を、岩崎(筑波大学・KEK)、石川(広島大学)、中山(Caltech)と共同で行った。前年度の、有限カットオフをもつコンフォーマル理論の相構造の解明に続き、(a)有限格子サイズの $N_f = 7, 8, 12, 16$ QCDのコンフォーマル領域の真空は、空間方向のポリヤコフラインが非自明な $Z(3)$ twistedの値を取る(論文26)、(b) $N_f = 2$ QCDの高温相にもコンフォーマル領域が存在すること(論文27)、(c) $N_f = 2$ 高温相に於けるコンフォーマル領域の温度 T/T_c と、コンフォーマル領域のフレーバー数 N_f には、中間子伝搬関数の対応関係があること(論文26)、を示した。

(11) JLDGの改良と運用

吉江は、格子QCDデータグリッドJLDGの改良を、建部、天笠(筑波大電子情報)等と行った。主な改良は、(a)京都大学基礎物理学研究所拠点及び理化学研究所仁科加速器研究センター拠点の新設、(b)HPCI共用ストレージ・JLDG連携システムの構築(仮想組織管理サーバ改修を含む)、(c)監視システムZabbixの導入、などである。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

弦の理論は散乱振幅が摂動論を用いて有限に計算できることが知られているが、発散は相殺するのであり、最初からないわけではない。従って、点粒子の場の理論と同様に、うまい正則化の方法を考えることは重要である。特に超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上（岡山光量子研）らとのこれまでの研究で、次元正則化を用いた計算により、tree 振幅については第一量子化の計算と一致する結果を得ることができることを示している。今年度はボゾン弦の場合にこの結果を拡張し、次元正則化を用いた計算によりループ振幅についても第一量子化の計算と一致する結果を得ることができることを示した（論文 28）。

(2) 重力理論／ゲージ理論双対性と強結合グルーオン散乱振幅

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。これまでの研究により我々は、このような極小曲面が等質サイン・ゴールドン模型と呼ばれる 2 次元可積分模型の熱力学的ベータ仮説方程式で記述されることを示した。また、その結果および g -関数（境界エントロピー）と Y -関数（スペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比）の関係をを用いることにより、運動量が 2、3 次元空間に制限される場合に、対応するウィルソンループが正多角形となる極限の周りで maximally helicity violating (MHV) 振幅を解析的に評価する方法を定式化した。

佐藤は初田（DESY）、伊藤（東京工業大）、鈴木（静岡大）と共に、2 次元可積分系の基本関係式である量子ロンスキアン関係式を用いた新たな散乱振幅の解析的評価法を開発し、一般の 4 次元運動量に対する 6 点 MHV 振幅の主要次数の展開式を導いた（論文 30）。

〈論文〉

1. S. Ueda S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Bridge++: an object-oriented C++ code for lattice simulations, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 412.
2. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Multi-nucleon bound states in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 230.

3. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 474.
4. K. Sasaki, N. Ishizuka, M. Oka, T. Yamazaki, Scattering lengths for two pseudoscalar meson systems, Phys. Rev. D89 (2014) ref. 054502.
5. PACS-CS Collaboration: Y. Namekawa, S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshié, Charmed baryons at the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 87, No. 9 (2013) ref. 094512.
6. T. Umeda, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Maezawa, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, S. Yoshida (WHOT-QCD Collaboration), Scaling properties of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with improved Wilson fermions, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 450.
7. H. Saito, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, K. Okuno, T. Umeda, Histograms in heavy-quark QCD at finite temperature and density, Phys. Rev. D 89, No.3 (2014) ref. 034507.
8. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Finite size scaling study of $N_f = 4$ finite density QCD on the lattice, Phys. Rev. D88 (2013) ref. 094508.
9. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Finite size scaling study for 3 and 4-flavor QCD with finite chemical potential, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 203.
10. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Zeros of QCD partition function from finite density lattices, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 204.
11. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Grassmann Tensor Renormalization Group Approach to One-Flavor Lattice Schwinger Model, arXiv:1403.0642[hep-lat].
12. S. Aoki, H. Fukaya, and Y. Taniguchi, 1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 139.
13. Sinya Aoki, Noriyoshi Ishii, Takumi Doi, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Asymptotic behavior of Nambu-Bethe-Salpeter wave functions for multi-particles in quantum field theories, Phys. Rev. D88 (2013) ref. 014036.
14. T. Kurth, N. Ishii, T. Doi, S. Aoki and T. Hatsuda, Phase shifts in $I = 2$ $\pi\pi$ -scattering from two lattice approaches, JHEP1312 (2013) ref. 015.

15. Takashi Inoue, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD collaboration) , Equation of State for Nucleonic Matter and its Quark Mass Dependence from the Nuclear Force in Lattice QCD, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) ref. 112503.
16. Yoichi Ikeda, Bruno Charron, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Charmed Tetraquarks T_{cc} and T_{cs} from Dynamical Lattice QCD Simulations, Phys. Lett. B729 (2014) 85.
17. N.Ishii, 2+1 Flavor QCD Results of Nuclear Forces, Few Body Syst. 54 (2013) 1071.
18. N.Ishii for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD, Proceedings of Science (Chiral Dynamics 2012) ref. 025 in press.
19. N.Ishii, K.Murano, H.Nemura, K.Sasaki for HAL QCD Collaboration, The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 234.
20. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, Lambda N and Sigma N interactions from lattice QCD, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems 54 (2013) 1223.
21. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, An Implementation of Hybrid C++ Code for the Four-Point Correlation Function of Various Baryon-Baryon Systems, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 426.
22. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Studies of multi-strangeness baryon-baryon interactions from lattice QCD, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 233.
23. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to baryon-baryon interactions with strangeness on the lattice, To be appeared in Few-Body Systems.
24. M. Yamada, Omega-Omega Interaction on the Lattice, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 232.
25. Y.G. Cho, S. Hashimoto, J.I. Noaki, A. Jüttner and M. Marincovic, $O(a^2)$ -improved actions for heavy quarks and scaling studies on quenched lattices, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 255.
26. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, Global Structure of Conformal Theories in the SU(3) Gauge Theory, arXiv:1310.5049[hep-lat].

27. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, Conformal Behavior in QCD, arXiv:1304.4345[hep-lat].
28. N. Ishibashi and K. Murakami, Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Bosonic String Field Theory in Noncritical Dimensions, JHEP 1309 (2013) ref. 053.
29. T. Baba and N. Ishibashi, Energy from the gauge invariant observables, JHEP 1304 (2013) ref. 050.
30. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, Quantum Wronskian approach to gluon scattering amplitudes at strong coupling, preprint UTHEP-662.
31. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, Nuclear Physics B Proceedings Supplement, in press.
32. 佐藤 勇二, AdS 空間中の極小曲面とグルーオン散乱振幅, RIMS Kokyuroku (数理解析研究所講究録) 1880 (2014) 42.

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 馬場 隆行

「Energy from the gauge invariant observables (弦の場の理論の古典解における、エネルギーとゲージ不変観測量の関係)」

〈研究成果発表 (講演)〉

[国際会議]

1. Yuji Satoh, 「MHV amplitude around the regular-polygonal limit」(招待講演),
Lectures at Eotvos Spring School on Recent Advances in AdS/CFT (Eotvos University, Budapest, Hungary, May 27-31, 2013).
2. Yuji Satoh, 「MHV amplitude around regular-polygonal limit」(招待講演),
Kavli IPMU Workshop on Gauge and String Theory (Kavli IPMU at University of Tokyo, Kashiwa, Japan, Aug. 26-Sep. 6, 2013).
3. N. Ishii, 「Lattice QCD approach to Nuclear Physics」(招待講演),
13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2013) (Rome, Italy, Sep. 30-Oct. 4, 2013).

4. N. Ishii, 「Baryon-baryon interaction from Lattice QCD」 (招待講演) ,
Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar
2013 (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).
5. Y. Kuramashi, 「Lattice QCD – From Quarks to Nuclei –」 (招待講演) ,
University of Tsukuba and Beihang University Collaboration Meeting on Nu-
clear Physics (Tsukuba, Japan, Nov. 11-12, 2013).
6. Y. Kuramashi, 「Elementary Particle Physics in Future HPC」 (招待講演) ,
The 4th AICS International Symposium (Kobe, Japan, Dec. 2-3, 2013).
7. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge string field theory and dimensional
regularization」 (招待講演) ,
KEK Theory Workshop 2014 (KEK, Tsukuba, Japan, Feb. 18-21, 2014).
8. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」 ,
International Lattice Data Grid 19 (TV workshop hosted by INTF, Italy, May
5, 2013).
9. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Lattice QCD approach to the strangeness
 $S = -2$ two-baryon system」 ,
THE 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE PHYSICS OF EX-
CITED NUCLEONS (Valencia, Spain, May 27 - 30, 2013).
10. Y. Kuramashi, 「2+1 Flavor Lattice QCD Simulation on K Computer」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
11. Yusuke Taniguchi, 「1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition
of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
12. Yong-Gwi Cho, 「 $O(a^2)$ -improved actions for heavy quarks and scaling studies
on quenched lattices」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
13. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved
Wilson fermion」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
14. T. Umeda, Y. Nakagawa, S. Aoki, H. Saito, K. Kanaya, H. Ohno, T. Hatsuda,
S. Yoshida, Y. Maezawa (WHOT-QCD Collaboration), 「Scaling properties
of the chiral phase transition in the low density region of two-flavor QCD with

- improved Wilson fermions」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
15. Hana Saito (WHOT-QCD Collaboration), 「QCD phase transition at finite T and μ in the heavy quark region」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 16. N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「The anti-symmetric LS potential in flavor SU(3) limit from Lattice QCD」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 17. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Studies of multi-strangeness baryon-baryon interactions from lattice QCD」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 18. M. Yamada, 「Omega-Omega interaction on the Lattice」 ,
The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013)
(Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
 19. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Coupled channel approach to baryon-baryon interactions with strangeness on the lattice」 , The 22nd European Conference on Few Body Problems in Physics (Krakow, Poland, Sep. 9-13 2013).
 20. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Hypernuclei on the Lattice」 ,
Forth International Conference on Nuclear Fragmentation (NUFRA2013) (Kemer, Antalya, Turkey, Sep. 29 - Oct. 6, 2013).
 21. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Strangeness $S = -2$ baryon-baryon interactions on the lattice」 ,
ECT* Conference: Strangeness in the Universe? Theoretical and experimental progress and challenges (Trento, Italy, Oct. 21-25, 2013).
 22. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Recent developments on LQCD studies of nuclear force」 ,
The Seventh International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei (Beijing, China, Oct. 27-30, 2013).
 23. Yusuke Taniguchi, 「The order of finite temperature phase transition of $N_f = 2$ QCD from effective theory analysis」 ,
German-Japanese Seminar 2013: Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).

24. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」 ,
International Lattice Data Grid 21 (TV workshop hosted by CSSM, Australia,
Dec. 13, 2013).
25. Yuji Satoh, 「Remainder function of $N=4$ SYM and massless TBA」 ,
Workshop on Progress in the Synthesis of Integrabilities Arising from Gauge-
String Duality (KKR hotel Biwako, Ootsu; Ritsumeikan Univ., Kusatsu, Mar.
4-7, 2014).
26. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, 「Study of hyperon potentials from
 $2+1$ Lattice QCD」 ,
The Third Korea-Japan on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC (Incheon,
Korea, Mar. 20-21, 2014).

[国内学会、研究会]

1. 石橋 延幸 「弦の場の理論」 (招待講演) ,
場の理論の進展 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2013 年 5 月 18 日).
2. 佐藤 勇二 「AdS 空間中の極小曲面とグルーオン散乱振幅」 (招待講演) ,
RIMS 研究集会「部分多様体の微分幾何学の深化」 (京都大学数理解析研究所,
京都, 2013 年 6 月 24 日-26 日).
3. 石井 理修 「時間相関と空間相関」 (招待講演) ,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
4. 藏増 嘉伸 「PACS-CS Project and beyond」 (招待講演) ,
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013 年 12 月 20-21 日).
5. 滑川 裕介 「格子 QCD によるヘビーハドロン」 (招待講演) ,
「ヘビークォークハドロンと原子核のスペクトルと構造」研究会 (高エネルギー
加速器研究機構, つくば, 2014 年 2 月 26-28 日).
6. 谷口 裕介 「Two flavor QCD の有限温度相転移次数の有効理論による解析」 ,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
7. 石井 理修, 村野 啓子, 根村 英克, 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration
「格子 QCD による反対称 LS 力」 ,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
8. 平沼 孝一郎, 石井 理修, 岡 真 「波動関数等価ポテンシャルの微分展開」 ,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
9. 佐々木 健志 for HAL QCD Collaboration 「格子 QCD によるハイペロン間ポ
テンシャルの性質」 ,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).

10. 趙 栄貴 「ブリルアンフェルミオンを用いた格子上での重いクォークの定式化の開発」,
日本物理学会 2013 年 秋季大会 (高知大学, 高知, 2013 年 9 月 20-23 日).
11. 吉江 友照 「HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携」,
HPCI システム利用研究課題 中間報告会 (東京, 2013 年 10 月 3-4 日).
12. 石塚 成人 「格子 QCD による共鳴状態の研究」,
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013 年 12 月 20-21 日).
13. 吉江 友照 「LDG/JLDG と HPC」,
新学術領域「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
のまとめと今後を語る研究会 (鳴子温泉, 宮城, 2013 年 12 月 20-21 日).
14. 谷口 裕介 「1st or 2nd; the order of finite temperature phase transition of $N_f = 2$ QCD from effective theory」,
計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 研究会「Lattice QCD at finite temperature and density」 (高エネルギー加速器研究機構, つくば, 2014 年 1 月 20-22 日).
15. 吉江 友照 「ILDG/JLDG の進捗」,
HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」全体シンポジウム (富士ソフトアキバプラザ, 秋葉原, 2014 年 3 月 3-4 日).
16. 石井 理修, 村野 啓子, 根村 英克, 佐々木 健志, 井上 貴史 for HAL QCD Collaboration 「格子 QCD による反対称 LS 力 (II)」,
日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大学, 平塚, 2014 年 3 月 27-30 日).
17. 根村 英克 HAL QCD Collaboration 「格子 QCD による一般化核力研究のための高速アルゴリズムの検討」,
日本物理学会 第 69 回年次大会 (東海大学, 平塚, 2014 年 3 月 27-30 日).

〈国際会議・研究会の実施〉

1. HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」/計算基礎科学連携拠点/京都大学基礎物理学研究所主催,
サマ-スク-ル「クォークから超新星爆発まで」-基礎物理の理想への挑戦-
2013 年 8 月 20 日-24 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都
2. 計算基礎科学連携拠点・HPCI 戦略プログラム分野 5「物質と宇宙の起源と構造」主催
HPCI 戦略プログラム分野 5 全体シンポジウム,
2014 年 3 月 4 日-5 日, 富士ソフトアキバプラザ 6 階セミナールーム 1, 東京

〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

1. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. High Performance Computing Infrastructure (HPCI) 戦略プログラム
<http://www.jicfus.jp/field5/jp/>
3. 計算科学研究機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.jp/>
4. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
6. 佐藤勇二, 欧州の学際研究教育ネットワーク「Gauge Theory as an Integrable System (GATIS)」のグローバルネットワークへの参加
7. 佐藤勇二, Hungarian Academy of Sciences (HAS) との二国間交流事業（共同研究）「ゲージ理論/重力理論双対性における可積分性と強結合ゲージ理論ダイナミクス」代表
8. 佐藤勇二, 日本物理学会素粒子論領域運営委員