

### 3 各研究部門の報告

#### I. 素粒子物理研究部門

##### 1. メンバー

教授 藏増 嘉伸、青木 慎也(筑波大学客員教授)、宇川 彰 (計算科学研究センターフェロー)、金谷 和至 (共同研究員)  
 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  
 研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介  
 学生 大学院生 6名、学類生 2名

##### 2. 概要

当部門では、本年度も格子QCDの大型シミュレーション研究の分野で活発な研究活動が行われた。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Nf=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Nf=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」コンピュータを中心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。

### 3. 研究成果

#### 【1】 HPCI 戰略プログラム分野5における研究開発課題（藏増、青木、石塚、石井、根村、谷口、浮田、佐々木、滑川）

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夸克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夸克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）。

##### (1) 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、夸克質量 ( $m_u=m_d \neq m_s$ ) と格子間隔を決めるための3つの物理量として、 $\pi$  中間子質量 ( $m_\pi$ )、K中間子質量 ( $m_K$ )、 $\Omega$  バリオン質量 ( $m_\Omega$ ) を採用している。 $m_\pi$  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、その補正是今後reweighting法と呼ばれる計算手法を用いて行う予定である。

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、重い夸克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つている。

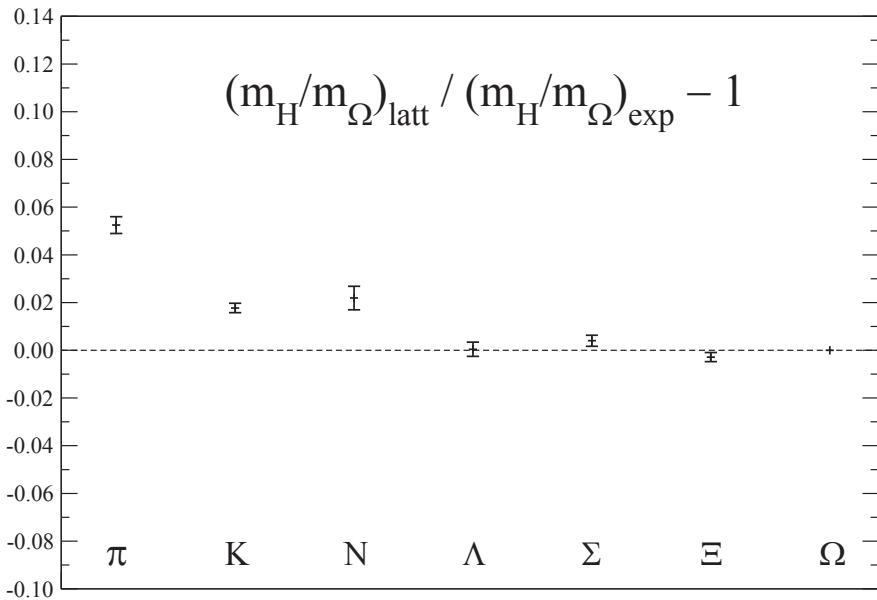


図1：2+1フレーバー格子QCD 計算で得られた安定ハドロン質量（ $\Omega$ バリオン質量との比）と実験値との比較。

## (2) 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られた。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）

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 $\pi$ 中間子質量0.5GeV相当のクォーク質量を用いたものであり、

物理点（ $\pi$  中間子質量0.14GeV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、 $\pi$  中間子質量0.3GeV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。 $\pi$  中間子質量0.5GeVでの結果と0.3GeV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、 $\pi$  中間子質量0.3GeV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。

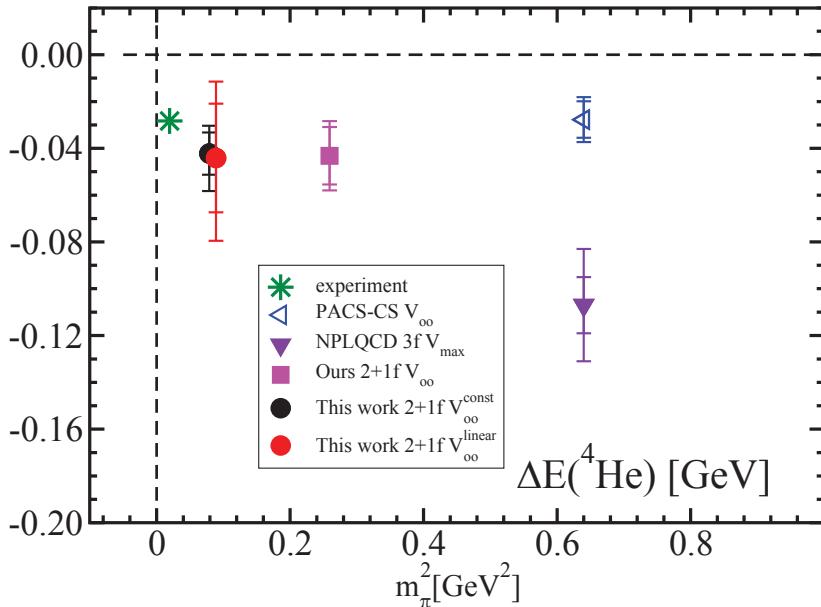


図2： ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーの $\pi$  中間子質量依存性。白抜きはケンチ近似の結果を表す。

### 【3】 K 中間子崩壊幅の研究（石塚、宇川、吉江）

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( $\epsilon'/\epsilon$ )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 $\pi$  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A0とA2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、 $\pi$  中間子質量 $m_\pi = 280\text{MeV}$ のもとで行った。A0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のようである。

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

$\text{Re}A_2$ 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が、 $A_0$ 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( $\epsilon'/\epsilon$ )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  $\pi$  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（滑川）

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  $\Xi_{cc}$  の質量値は、報告されている実験値と有意に異なった。 $\Xi_{cc}$  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  $\Xi_{cc}$  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、青木）

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。

##### （1）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

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)とは大きく異なるはずであり、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  $m_p/m_v \approx 0.65$  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 展開を利用して 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。化学ポテンシャル  $\mu_q$  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、 $\mu_q/T$  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  $t = \beta - \beta_c + c/2(\mu_q/T)^2$  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よう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  $\mu_q/T$  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  $\mu_q/T$  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が、高温領域（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  $-(1/T_c)[d^2 T_c / d(\mu_q/T)^2] \approx 0.05-0.06$  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・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。

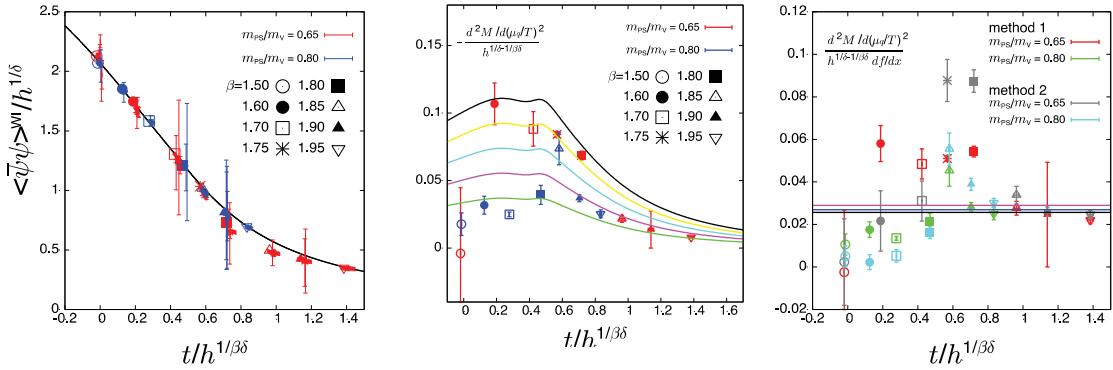


図3：2フレーバーQCDの有限温度・有限密度カイラル相転移近傍のスケーリング（論文6）：(左図) カイラル凝集のO(4)スケーリング。 $\mu_q/T < 1$ の全データが示されている。誤差の大きなデータは $\mu_q/T \sim 1$ のもの。曲線はO(4)スピン模型のスケーリング関数。(中央) カイラル凝集の $\mu_q/T$ に関する2次微分係数。method 1の結果。 $\mu_q/T < 1$ (右図) 係数c。

## (2) 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）。

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ィントで、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。

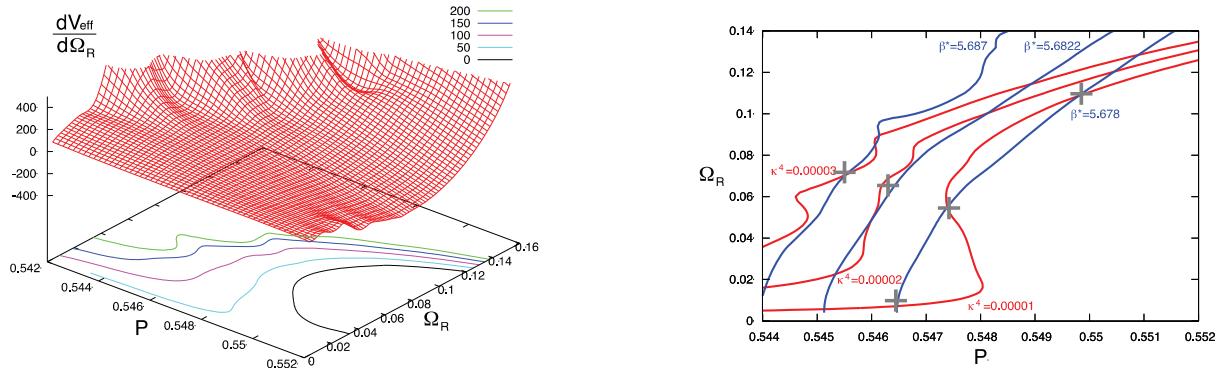


図4：ヒストグラム法によるクォークが重い領域のQCDにおける有限温度相構造の研究（論文7）。(左) プラケット(ゲージ場のエネルギー)とポリアコフループ(重いクォークのエネルギー)に関する有効ポテンシャルのポリアコフループに関する微分と、ポリアコフループ方向の傾き一定の線。(右) 前述の有効ポテンシャルにおけるプラケット方向とポリアコフループ方向の傾き一定の線。詳細は本文参照。

## 【6】 有限密度 QCD (藏増、宇川)

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、行列式の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、ある有限のクオ

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、 $\kappa \cdot \beta$ （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 $\beta$ 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）。

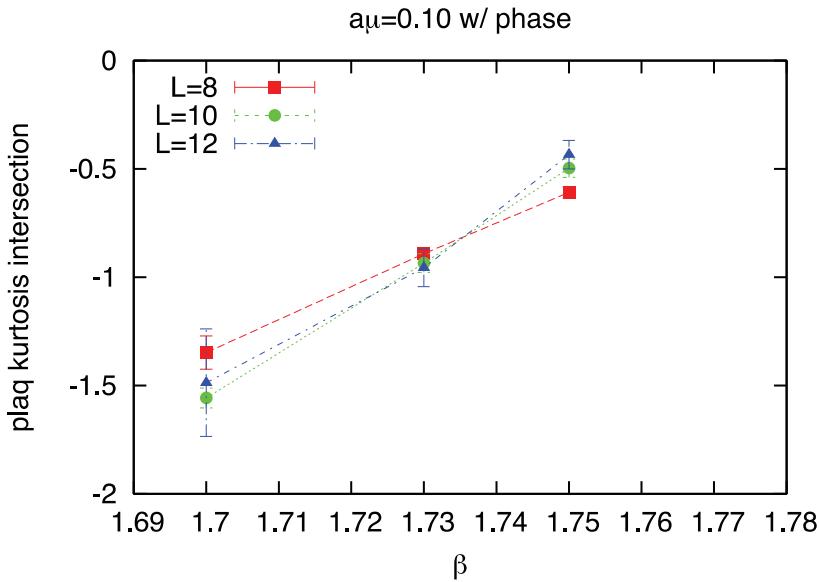


図5：Plaquetteに対するkurtosisの $\beta$ 依存性。異なる $L$ に対応する線の交点が臨界終点を表す。

## 【7】有限温度における $U(1)_A$ 対称性（谷口）

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 $\epsilon$ 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）。

### **【8】 格子QCDによるバリオン間相互作用の研究 (HAL QCD Collaboration: 青木、石井、根村、佐々木)**

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体力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。

#### **(1) 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 $N\Lambda\cdot N\Sigma$ 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 $N\Lambda$ 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。

#### **(2) 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、フレーバーSU(3)対称性の破れを直接扱う必要があるため、計算するべきチャネルが膨大になり、その各チャ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、 $\Lambda$ や $\Sigma$ 、 $\Xi$ など、ハイペロンを含む複数（例えば52チャネル）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。

### (3) 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、 $\pi$ 中間子質量が700MeV, 570MeV, 410MeV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つた。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。

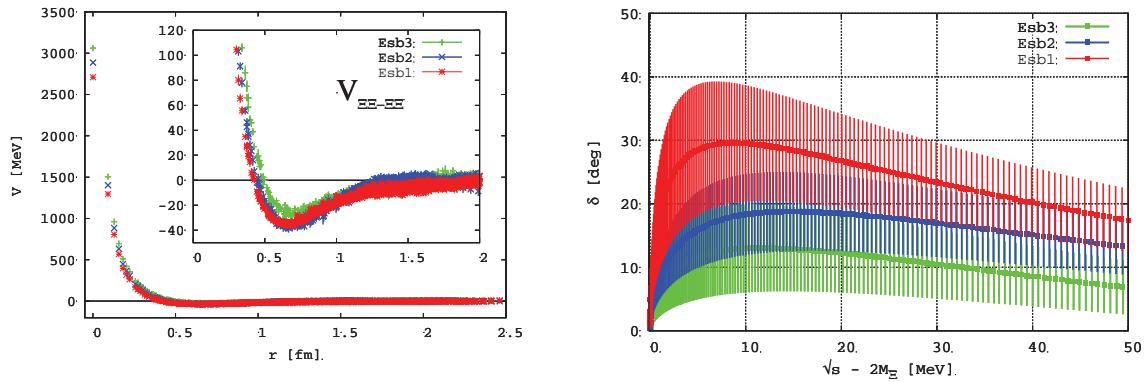


図6： $^1S_0$ チャンネルにおける $\Sigma$  $\Sigma$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

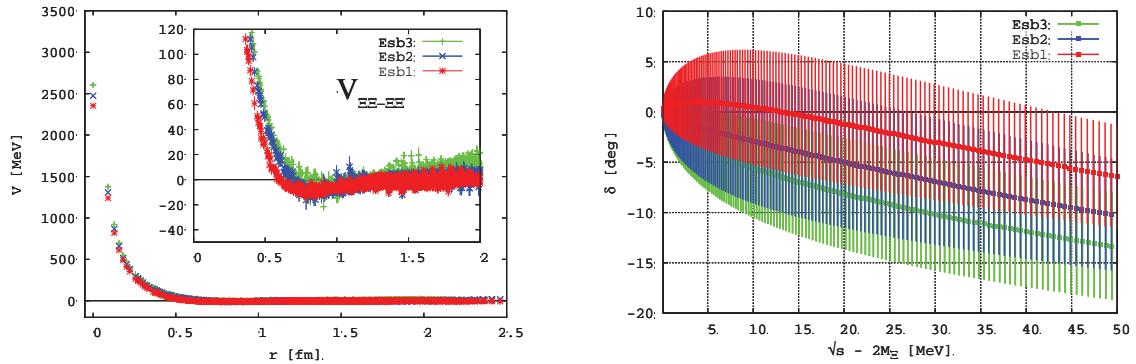


図7： $^3S_1$ チャンネルにおける $\Sigma$  $\Sigma$ 間のポテンシャルと散乱位相差。

#### (4) $\Omega$ - $\Omega$ バリオン間相互作用の研究

$\Omega$ 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、 $\Omega$ - $\Omega$ 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（ $\pi$ 中間子質量875MeV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（ $\pi$ 中間子質量700MeV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くと考えている。

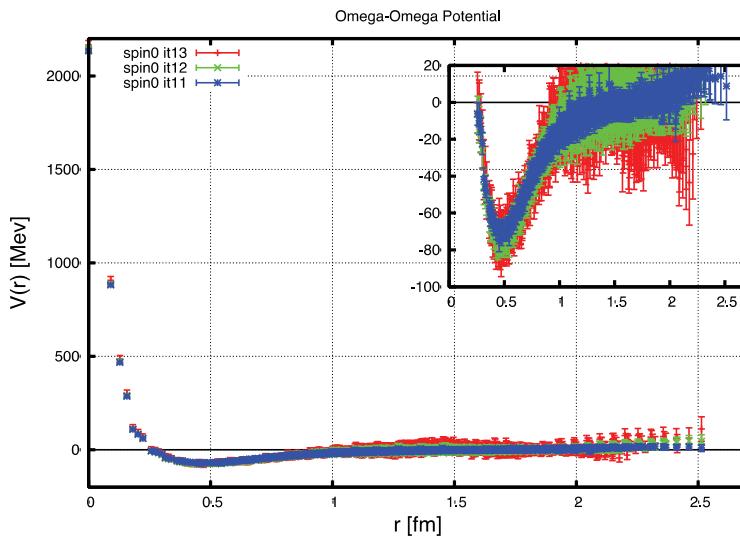
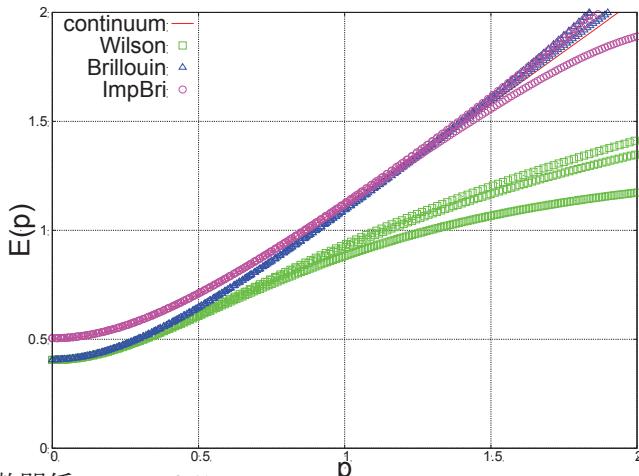


図8 : J=0である $\Omega$ - $\Omega$ 間のポテンシャルV [MeV]。横軸はバリオン間の距離r [fm]。

### 【9】 重いクォークに対する改良型フェルミオン作用（趙）

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、自由場上での分散関係を示している。緑はウィルソンフェルミオン、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：自由場上での分散関係。 $m_q a = 0.5$ 。**【10】コンフォーマル理論の研究（吉江）**

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 の値を取ること（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）**

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。

**4. 教育****5. 受賞、外部資金、知的財産権等****【1】外部資金**

1. 青木慎也（代表）、高性能汎用計算機高度利用事業費補助金、平成23年度採択、「HPCI戦略プログラム分野5『物質と宇宙の起源と構造』」、492,939,785円
2. 金谷和至（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)(一般)、平成21年度採択、「物理的クォーク質量における有限温度・有限密度QCDの格子研究」、3,000千円
3. 金谷和至（分担）、科学研究費補助金・基盤研究(A)、平成23年度採択、「湯川・朝永・坂田記念史料から分析する日本の素粒子物理学者の系譜100」、1,300千円

4. 石塚成人（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成23年度採択、「格子QCDによるK中間子崩壊振幅の研究」、2,900千円
5. 藏増嘉伸（分担）、戦略的創造研究推進事業(CREST)、平成23年度採択、「ポストペタスケールに対応した階層モデルによる超並列固有値解析エンジンの開発」、1,428千円
6. 浮田尚哉（代表）、科学研究費補助金・若手研究(B)、平成24年度採択、「物理点での格子QCD+QED数値計算の実現と陽子荷電半径の計算」、1,100千円
7. 滑川裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成24年度採択、「格子量子色力学による未発見ハドロン探索」、1,040千円
8. 根村英克(代表)、科学研究費補助金・新学術領域研究(研究領域提案型)、平成25年度採択、「格子QCDによるハイペロン相互作用の研究とハイパー核への展開」、1,040千円

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

- A) 査読付き論文
1. K. Sasaki, N. Ishizuka, M. Oka, T. Yamazaki, “Scattering lengths for two pseudoscalar meson systems”, Phys. Rev. D89 (2014) ref. 054502.
  2. 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.
  3. 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.
  4. 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.
  5. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, “Grassmann Tensor Renormalization Group Approach to One-Flavor Lattice Schwinger Model”, to be appeared in Phys. Rev. D.
  6. 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.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, “Global Structure of Conformal Theories in the SU(3) Gauge Theory”, Phys. Rev. D89 (2014) ref. 114503.
11. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, “Conformal Behavior in QCD”, arXiv:1304.4345[hep-lat].

#### B) 査読無し論文

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. 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.

5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. N. Ishii, “2+1 Flavor QCD Results of Nuclear Forces”, Few Body Syst. 54 (2013) 1071.
9. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, “Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD”, Proceedings of Science (Chiral Dynamics 2012) ref. 025.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, “Studies of multi-strangeness baryon-baryon interactions from lattice QCD”, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 233.
14. 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.
15. M. Yamada, “Omega-Omega Interaction on the Lattice”, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 232.

16. Y.-G. Cho, S. Hashimoto, J.I. Noaki, A. Jüttner and M. Marinovic,  $O(a^2)$ -improved actions for heavy quarks and scaling studies on quenched lattices, Proceedings of Science (Lattice 2013) ref. 255.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. N. Ishii, 「Lattice QCD approach to Nuclear Physics」, 13th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon (MENU2013) (Rome, Italy, Sep. 30-Oct. 4, 2013).
2. N. Ishii, 「Baryon-baryon interaction from Lattice QCD」, Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers, German-Japanese Seminar 2013 (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).
3. Y. Kuramashi, 「Lattice QCD – From Quarks to Nuclei –」, University of Tsukuba and Beihang University Collaboration Meeting on Nuclear Physics (Tsukuba, Japan, Nov. 11-12, 2013).
4. Y. Kuramashi, 「Elementary Particle Physics in Future HPC」, The 4th AICS International Symposium (Kobe, Japan, Dec. 2-3, 2013).

B) 一般講演

1. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」, International Lattice Data Grid 19 (TV workshop hosted by INTF, Italy, May 5, 2013).
2. 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 EXCITED NUCLEONS (Valencia, Spain, May 27 - 30, 2013).
3. 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).
4. 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).
5. 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).

6. 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).
7. 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).
8. Hana Saito (WHOT-QCD Collaboration), 「QCD phase transition at finite  $T$  and  $\mu$  in the heavy quark region」, The XXXI International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2013) (Mainz, Germany, Jul. 29-Aug. 3, 2013).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).
15. 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).

16. Yusuke Taniguchi, 「The order of finite temperature phase transition of Nf=2 QCD from effective theory analysis」, German-Japanese Seminar 2013: Lattice Field Theory on multi-PFLOPS computers (Regensburg, Germany, Nov. 6-8, 2013).
17. Tomoteru Yoshié, 「Metadata Working Group Report」, International Lattice Data Grid 21 (TV workshop hosted by CSSM, Australia, Dec. 13, 2013).
18. 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).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 石井理修「時間相関と空間相関」, 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).
2. 藏増嘉伸「PACS-CS Project and beyond」, 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).
3. 滑川裕介「格子QCDによるヘビーハドロン」, 「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).

B) その他の発表

1. 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).
2. 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).
3. 平沼孝一朗, 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).
4. 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).
5. 趙榮貴「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).
6. 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).

7. 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）.
8. 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）.
9. 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）.
10. 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）.
11. 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）.
12. 根村英克 for 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）.

(4) 著書、解説記事等

**7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等**

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. 理化学研究所 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>

**8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績**

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，  
サマースクール「クオ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 戰略プログラム分野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

**9. 管理・運営**

1. 藏増嘉伸、運営委員会委員、運営協議会委員
2. 吉江友照、共同研究運用委員会委員
3. 吉江友照、藏増嘉伸、計算機システム運用委員会委員

**10. 社会貢献・国際貢献**

**11. その他**