# 1.素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏增 嘉伸 准教授 石塚 成人、山崎 剛、吉江 友照、根村 英克 講師 谷口 裕介 助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、佐藤 勇二、毛利 健司 客員教授 青木 慎也(京都大学基礎物理学研究所) 研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介 大学院生 (9名)

【人事異動】

山崎剛博士が数理物質系准教授として着任した(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ュアトラック助教として着任した (2014年4月1日)。

伊敷吾郎博士が数理物質系テニュアトラック助教として着任した(2014年11月1日)。

金谷和至教授が数理物質系長を退任し、素粒子論研究室の教授に復帰する(2015年4月1日)。

## 【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、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、テンソルネットワーク形式に基 づく格子ゲージ理論の研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を 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・コンピューテイング・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)が統括責任者を務める分 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務 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。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ・重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。11月1日より、超弦理論に数値的手法を取り入れる研究を行っている伊敷氏が加わり、研究の幅が広がっている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅、行列模型における古典極限等、超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

# 【1】 格子場の理論

(金谷 和至、藏增 嘉伸、石塚 成人、山崎 剛、吉江 友照、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、そのうちの一つが 「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」である。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、アイソスピン対称性の破れの効果を取り入れた計算 や、低エネルギーのハドロン構造計算を意味する。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、山崎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、継続的に実行していたゲージ配位生成が終了した。DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) 法を用いて、96<sup>4</sup>の格子サイズ、0.1 fm 程度の格子間隔を持つ、2+1 フレーバー  $(m_u = m_d \neq m_s)$  QCD のゲージ配位を生成した。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 332、GPU 部ピーク演算性能 1.048Pflops、CPU 部ピー

ク演算性能 0.118Pflops)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物理点でのハドロン質量の計算結果を実験値と比較したものである。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、 $\pi$ 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。



図 1: 2+1 フレーバー格子 QCD 計算で得られたハドロン質量と実験値との比較。白抜きシンボル はクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

まだすべてのゲージ配位の解析が終了したわけではいないが、安定粒子(強い 相互作用で崩壊しない)は実験値と誤差の範囲で一致しているのに対して、不 安定粒子(強い相互作用で崩壊する ρ や Δ など)は、誤差の範囲を超えて実 験値との有意なズレが見て取れる。これは、現在採用しているハドロン質量の 計算方法が不安定粒子に対しては有効でないことを表しており、これまで長い 間期待されていたことであるが、今回初めて確認に成功した。ハドロン質量の 計算と並行して、擬スカラー中間子の崩壊定数、カイラル摂動論における低エ ネルギー定数、核子のシグマ項、ハドロンの各種形状因子などの様々な物理量 の計算を行っており、興味深い結果を得ている。

- (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、山崎は理研計算科学研究機構(AICS)の宇川副機構長との共同研究に 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ェ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。そのため、物理点へ向けた 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

量での計算を遂行し、本年度結果を論文として発表した(論文1)。図2は<sup>4</sup>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 0.5 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。現在、「京」で生成された 96<sup>4</sup> 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点での軽原子核束縛エネルギー計算 に取り組んでいる。



図 2: <sup>4</sup>He 原子核の束縛エネルギーのπ中間子質量依存性。白抜きシンボルはクェンチ近似の結果 を表す。

(3) K中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、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  $\pi$  中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、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。 $\pi$ 中間子質量  $m_{\pi} = 280$  MeV のもとで、終状態の $\pi$ 中間子が運動量をもたない場合の計算を完成させた(文献 3)。この計算により、 $\Delta I = 1/2$  則の兆候を見ることができた。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。

また、この計算を運動量をもつ現実の場合に拡張し、より信頼性の高い振幅を 求めることを考えた。具体的には、 $\pi$ 中間子質量 $m_{\pi} = 250$  MeV に下げ、格子 の一辺を 1.5 倍にし、運動量を持たせる方法をとる。現在、この場合の崩壊振 幅の計算を行う為に、あらたにゲージ配位を生成している。また、本格計算に 向けた試験計算を行っている。

(4) トポロジカルチャージの研究

滑川は、トポロジカルチャージの系統的比較研究を行い、トポロジカルチャー ジ定式化間における結果の同等性を定量的に明らかにした(論文4)。トポロ ジカルチャージは量子色力学において真空を特徴付ける重要な物理量である。 但し、その定式化は数種類存在しており、定式化間における結果の一致・不一 致が不明であった。本研究により、単純なグルーオン的演算子及び平滑化を 用いた場合、厳密な指数定理の結果との一致度が70-80%に留まる事が分かっ た。また、演算子及び平滑化の改良により、一致度を90%強に引き上げ可能で ある事を示した。

(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。改良Wilson クォークによる $N_f = 2 + 1$  QCDの物理 点近傍における状態方程式のための配位生成を継続して推進するとともに、状 態方程式の評価に必要なベータ関数をQCDの多変数空間で精度よく決定する 手法として、多重点再重み付け法によるベータ関数評価の試験を行った。



図 3:  $N_f = 2$  QCD における多重点再重み付け法の試験研究(論文 5)。左図:改良プラケット  $P = c_0 W^{1\times1} + 2c_1 W^{1\times2}$ の期待値の $\beta = 1.825$ における $\kappa$ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーショ ン点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。パ ラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3 点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。中央および右図:再重み付け法で重 要な、作用の $\beta$ 微分、 $\kappa$ 微分のヒストグラムのパラメータ依存性。様々なシミュレーション点のデー タを組み合わせることにより、重ねあわせ問題を回避してパラメータ空間の広い領域をカバーするこ とができる。

多重点再重み付け法による QCD ベータ関数

有限温度・有限密度 QCD の状態方程式や物理量の温度・密度依存性を計算する ためには、理論のパラメータ空間内の「等物理線(Line of Constant Physics: LCP)」(同一の物理系を様々な格子間隔で表現)と、LCP 上でパラメータの格 子間隔依存性をあらわす「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲー ジ結合定数 ( $\beta$ ) と複数のクォーク質量 ( $\kappa$ ) や化学ポテンシャル ( $\mu$ ) を基本パラ メータとして持つが、多次元のパラメータ空間で LCP やベータ関数を精度よ く評価することは簡単ではない。それを解決するために「多重点再重み付け法 (multi-point reweighting 法)」を検討し、密度ゼロの  $N_f = 2$  QCD の場合に 試験研究を行った(論文5)。

系のパラメータ依存性を調べる有力な方法として、再重み付け法(reweighting 法)がよく使われるが、有限温度・有限密度 QCD の研究で要求されるような、 パラメータ空間の広い領域に応用することには困難が伴う。図3左に、改良プ ラケット  $Po\kappa$  依存性を示す。黒丸は3つのシミュレーション点における観 測結果で、紫、緑、青は、それぞれのシミュレーション点のデータを使って再 重み付け法を使って計算した  $Po\kappa$  依存性の予言をあらわす。パラメータを 大きく動かすと観測結果を再現できないことがわかる。誤差評価も信頼性が低 く、このまま LCP やベータ関数の計算に使うことは難しい。これは、再重み 付け法に必要なヒストグラムを、各シミュレーション点での期待値近傍でしか 信頼できる評価ができず、期待値が大きく動く事に対応するようなパラメータ の大きな変化に対応できない事による(「重ねあわせ問題」)。



図 4: 多重点再重み付け法による、 $N_f = 2$  QCD の等物理線(左図)と、ゲージ結合パラメータに 関するベータ関数(右図)(論文 5)。

多重点再重み付け法では、重ねあわせ問題を解決するために、複数のシミュ レーションデータを統合して再重み付けする(方法の詳細は論文5を参照)。 図3左の赤線で、3つのシミュレーション点のヒストグラムを合わせて多重点 再重み付け法により計算した結果を示す。観測結果(黒丸)をスムースに繋 ぎ、シミュレーション点の間の領域も含め、広いパラメータ領域で信頼性と精 度の高い結果が得られた。

図3中央と右に、再重み付け法に必要なヒストグラムのβおよびκ依存性を示

す。 $\beta$ および $\kappa$ の様々なシミュレーション点のデータを組み合わせることにより、LCP とベータ関数の計算に必要な、パラメータ空間の広い領域で精度の高い結果が得られることがわかる。それに基づいて計算した  $N_f = 2$  QCD のLCP とベータ関数の結果の一部を、図4に示す。いずれも十分な精度で評価することが出来た。

この手法の $N_f = 2 + 1$  QCD や有限密度 QCD への応用を計画している。

(6) 有限温度・有限密度 QCD の研究(BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration)

大野は、国際テニュアトラック助教として米国 Brookhaven National Laboratory (BNL) に長期滞在し、Frithjof Karsch 教授を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加して有限温度・有限密度 QCD の共同研究を行っている。

格子 QCD によるストレンジネス及びチャームの揺らぎとそれらの間の相関の研究

閉じ込め・非閉じ込め相転移の前後では、系の自由度がハドロンからクォーク に変化する。保存電荷の揺らぎやそれらの間の相関は、この自由度の変化に敏 感であり、相転移の性質を詳細に調べるのに有用である。

大野は、BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration において、2+1フレーバーのHighly Improved Staggered 作用を用いた格子 QCD シミュレーションにより、ストレ ンジやチャーム等、様々な保存電荷の揺らぎのキュムラントを計算する共同研 究を行った(論文6、7)。そして、得られた結果を、相互作用の無い様々なハ ドロンからの寄与の重ね合わせに基づく、hadron resonance gas (HRG) モデ ルで計算されたものと比較した。図5に示す通り、実験的に見つかったハドロ ンを用いるだけでは、HRG モデルの結果は我々の結果を記述できなかった。 一方で、ある種のクォークモデルにより予言される、未発見のハドロンまで含 めた HRG モデルは、カイラルクロスオーバー温度以下において、我々の結果 をよく再現した。このことから、カイラルクロスオーバー温度近傍で、ストレ ンジハドロンやチャームハドロンは消失していることが示唆された。加えて、 実験的に見つかっていないハドロンの存在も示唆された。

有限温度格子 QCD によるチャーモニウム・ボトモニウム相関関数の研究

チャームやボトムといった、重いクォークとその反クォークの束縛状態であ るクォーコニウムは、RHICやLHCでの相対論的重イオン衝突実験における クォーク・グルオン・プラズマ(QGP)生成を確かめるプローブのひとつで ある。従って、クォーコニウムの高温媒質中での振る舞いを理論的に調べるこ とは、QGPの性質を理解し、実験結果を説明する上で重要である。また、近 年では、クォーク・グルオン・プラズマの流体力学的性質に関する研究も盛ん に行われており、重いクォークの輸送等についても理論的理解が必要となって いる。

これらのことを第一原理から調べるため、本研究では有限温度における格子 QCDによる数値シミュレーションを用いて、クォーコニウムの相関関数を計 算し、その温度依存性を調べた。その際、相関関数からより多くの情報を引き 出せるよう、格子サイズとして 96<sup>3</sup> × 24 から 192<sup>3</sup> × 96 と非常に大きなものを



図 5: ストレンジネス・チャーム等の揺らぎの様々なキュムラントの比。PDG-HRG、QM-HRG及 び QM-HRG-3 はそれぞれ、実験的に見つかったハドロンを用いた HRG モデルの結果、ある種の クォークモデルで予言されるハドロンまで含めた HRG モデルの結果及び、同じクォークモデルが予 言する 3GeV 以下の質量を持つハドロンを含めた HRG モデルの結果。

用いた。また、計算コストを抑えるため、動的クォークの効果を無視したクェ ンチ近似を適用した。さらに、チャームからボトムまでクォーク質量を変化さ せ、チャーモニウムとボトモニウムの違いを調べた(論文8)。

まず、図6に、ベクターチャネルの空間的相関関数より計算された基底状態の 遮蔽質量の温度依存性を示す。ここで、ゼロ温度において遮蔽質量はクォーコ ニウムの質量と等しくなるのに対して、高温の極限では自由クォークの場合に 収束する。チャーモニウムの場合を見ると、温度上昇に伴い、遮蔽質量も上昇 しており、媒質の影響を強く受けていることが分かった。一方、ボトモニウム の場合は、温度依存性が比較的小さく、高温でも安定に存在していることが示 唆された。次に、クォーコニウムのスペクトル関数の温度変化を間接的に調べ るため、1.4T<sub>c</sub>(T<sub>c</sub>は臨界温度)における通常の時間的相関関数と、0.7T<sub>c</sub>にお ける時間的相関関数を用いて作られた reconstructed correlator とを比較した。 通常の相関関数を reconstructed correlator で割った量を調べた結果、虚時間 っ大きい領域で大きな変化が見られた。この変化は、温度変化に伴ってスペク トル関数の低周波数領域に大きな変化が現れたことに対応すると考えられる。 これは、スペクトル関数のゼロ周波数近傍に transport peak が現れたことに よると予想された。このことから、スペクトル関数のその他の部分の温度変化 が比較的小さいと仮定して、通常の相関関数から reconstructed correlator を 引くことで、transport peak の寄与を抜き出し、これより重いクォークの拡散 係数を概算した。その結果は、先行研究と矛盾のないものだった。



図 6: ベクターチャネルの遮蔽質量の温度依存性。横軸は温度を臨界温度*T<sub>c</sub>*で規格化、縦軸は 0.7*T<sub>c</sub>*の遮蔽質量で規格化したものである。チャーモニウムの結果を中抜き、ボトモニウムの結果を中塗りのシンボルで表す。また、粗い格子間隔の結果を四角、細かい格子間隔の結果を丸で表す。

(7) 3フレーバーにおける有限温度・有限密度 QCD (藏増)

温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ を関数とする QCD の相図を確定させ ることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。藏 増は、理研計算科学研究機構(AICS)の宇川副機構長、中村研究員、金沢大 学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のも と、O(a) 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用 いて、T、μ、クォーク質量 m<sub>a</sub>のパラメータ空間における3フレーバー QCD の臨界線の決定に取り組んでいる。先ず、最初のステップとして $\mu = 0$ (密度 ゼロ)における臨界終点を決定した(論文9)。われわれが用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケーリング解析手法の一種であり、 一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異 なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。「時間方向」の格子サイズを  $N_T = 4$ 、6、8と変化させることによって格子間隔依存性を調べ、連続極限に おける臨界終点の温度として $T_E = 133(2)(1)(3)$  MeV、また、擬スカラー中間 子質量として m<sub>PS</sub> = 306(7)(14)(7) MeV という値を得た(図7参照)。本研究 は、世界で初めて3フレーバー QCD における臨界終点の決定に成功したもの であり、QCDの相構造を理解する上での非常に重要な礎石となる。

次のステップとして、われわれは本研究を有限密度領域 $\mu \neq 0$ へと拡張した。 具体的には、「時間方向」の格子サイズを $N_T = 6$ に固定し、 $\mu/T - (m_{PS})^2$ 平面 における $\mu = 0$ 近傍での臨界線の曲率を決定した(論文10)。有限の化学ポ



図 7: 臨界終点における擬スカラー中間子質量(左)と転移温度(右)の1/(N<sub>T</sub>)<sup>2</sup>依存性。

テンシャル $\mu \neq 0$ における臨界終点の決定は、 $\mu = 0$ の場合と同様である。また、 $\mu \neq 0$ におけるクォーク行列式からの位相の寄与は、reweighting法によって取り入れた。更に、幅広い $\mu$ の領域に対する臨界線の振る舞いを調べるために、マルチパラメータ reweighting 法を採用した。図8は、 $\mu/T - (m_{PS})^2$ 平面における臨界線の振る舞いをプロットしたものである。赤シンボルと青シンボルの違いは、格子間隔を決めるための物理インプットの選択の任意性による不定性を表している。臨界線が曲率を持っていることは明らかであるが、定量的に評価するために以下の関数形でフィットを行った結果、 $\alpha_1 = 1.924(60)$ (赤シンボル)、 $\alpha_1 = 2.148(39)$ (青シンボル)という値を得た。

$$\left(\frac{m_{\rm PS,E}(\mu)}{m_{\rm PS,E}(0)}\right)^2 = 1 + \alpha_1 \left(\frac{\mu}{\pi T_{\rm E}(0)}\right)^2 + \alpha_2 \left(\frac{\mu}{\pi T_{\rm E}(0)}\right)^4$$



図 8:  $\mu/T - (m_{PS})^2$  平面における臨界線。赤シンボルと青シンボルは、格子間隔を決めるための異なる物理インプットを表す。



図 9: 左図:クォーク化学ポテンシャル  $\mu/T$ の関数としてのクォーク数密度の2次キュムラント  $\langle \hat{N}^2 \rangle_c / (VT^3)$ 。グラフは上から高温側: $\beta = 2.1$  (orange)、1.9 (red)、1.7 (magenta)、1.5 (green)、 1.3 (dark green)、1.1 (blue)、0.9 (black):低温側。右図:グランドカノニカル分布から求めた クォーク化学ポテンシャル  $\mu/T$ の関数としてのカイラル凝縮  $-\int d^3x \langle \bar{\psi}\psi \rangle / (VT^3)$ 。グラフの色と  $\beta$ の関係は左図と同じ。ただし、上側が低温、下側に行くほど高温側。

(8) カノニカル法を用いた有限密度 QCD の研究(谷口)

有限密度格子 QCD には複素作用の問題、及びその派生としての符合問題と呼 ばれる未解決の問題がある。2014 年度はこの複素作用の問題を直接回避する 方策として、カノニカル分配関数をフガシティー展開の係数として直接計算す るカノニカル法と呼ばれる手法を採用した。更に重いクォークに対して有効な hopping parameter 展開を採用することで、広い温度領域でカノニカル分配関 数の計算を行った。物理量の計算としては、求めたカノニカル分配関数を用い てグランドカノニカル分配関数を実化学ポテンシャルの関数として再構成し たことが挙げられる。その結果、クォークの閉じ込め相である低温側から出発 して、実化学ポテンシャルを上げて行った時の各種物理量の振る舞いを見るこ とができた(図9)。そこからはクォークの閉じ込めー非閉じ込め相転移(図9 左)や自発的に破れているカイラル対称性が回復する相転移の様子(図9右) が見て取れた。特に明らかな閉じ込め相において、比較的大きな化学ポテン シャルでの相転移現象を捉えることができたことは特筆すべき点であると思わ れる。

(9) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD を用いた数値計算の最大の特徴は非摂動的な第一原理計算であり、 それは強い相互作用の定量的理解を可能とする。過去30年以上にわたって継 続的なアルゴリズムの開発・改良が行われた結果、スーパーコンピュータの著 しい性能向上と相俟って、現在では自然界のu、d、sクォーク質量(物理点) を用いたシミュレーションや質量数4以下の軽原子核の束縛エネルギー計算も 可能となりつつある。このような成功の一方で、長年にわたり本質的問題と して認識されながらも、効果的な解決策が見出されることなく取り残された ままの課題が存在する。その代表的かつ重要な例として、以下の3つが挙げられる。

i) 負符号問題

現在の典型的な格子 QCD 計算である 2+1 フレーバー QCD シミュレーション では、s クォークは独立に扱うが、u、d クォーク質量は人為的に縮退させる ( $m_u = m_d$ )。この操作により、軽い質量のクォークに起因する負符号問題を アルゴリズム的にうまく回避することが可能となる。もし、仮にu、d クォー クを独立に扱おうとすると ( $m_u \neq m_d$ )、現在広く用いられているモンテカル ロアルゴリズムでは、分配関数 (経路積分) における Boltzman weight の部分 に負符号の寄与が現れ、確率解釈が困難になってしまう。

ii) 複素作用を持つ系のシミュレーション

格子 QCD において Strong CP 問題や有限密度 QCD を扱う場合、作用が複素 数となってしまう。具体的には、前者の場合は通常の QCD 作用に付加する $\theta$ 項が複素数となり、後者の場合は非ゼロ化学ポテンシャル $\mu$ の導入が複素作用 の問題を引き起こしてしまう。格子 QCD を用いて Strong CP 問題や有限密度 QCD の物理を系統的に研究するためには、複素作用を持つ分配関数の精確な 数値評価は避けて通れない課題であるが、いまだ効果的な解決策が見つかって いないのが現状である。

iii) フェルミオン系の計算コスト

格子 QCD シミュレーションが多大な計算コストを必要とすることはよく知ら れた事実だが、その原因はモンテカルロ法においてグラスマン数を直接扱えな いことに起因する。現在広く用いられているアルゴリズムでは、QCD 作用に おけるフェルミオン場を一旦解析的に積分し、その後改めてボゾン場を用いて QCD の有効作用を構築し、その Boltzman weight をもとにモンテカルロ計算 を行っている。しかしながら、ボゾン場で記述された QCD の有効作用は非局 所的なものとなってしまい(オリジナルな QCD 作用は局所的)、そのシミュ レーションに要する計算コストは膨大なものとなる。

以上の3つの問題の原因を考察してみると、いずれもモンテカルロ法の本質的 な欠点に起因していることがわかる。すなわち、現在の格子 QCD 計算が抱え る重要な問題は、そのベースとなるアルゴリズムとしてモンテカルロ法を採用 している限り、根本的解決は難しい。

一方、他分野に目を転じてみると、物性物理(あるいは統計基礎論)分野においても分配関数を用いた数値計算が行われているが、比較的シンプルなモデルを扱っているということもあり、格子 QCD よりもはるかに多様なアルゴリズムが開発・試行されている。そのような状況のもと、2007年 Levin と Nave により、テンソルネットワーク形式に基づいたテンソル繰り込み群という古典格子スピンモデルに対する新たな計算アルゴリズムが提案された。この手法では、先ず分配関数を局所的(格子点)に定義されたテンソルの積で書き表す。

$$Z = \sum_{i,j,k,\dots} e^{-S(i,j,k,\dots)} = \sum_{i,j,k,\dots} T_{ijkl} T_{imno} T_{jpqr} T_{ksuv} T_{lwxy} \cdots$$

ここでは2次元正方格子を仮定しているが、それ以外の場合でも、相互作用が 局所的であれば必ず上式のようなテンソルネットワーク形式で表せることが知 られている。もちろん、このテンソル積の添字に関する縮約をすべて実行して しまえば、厳密な分配関数 Z の値が得られるが、それでは自由度が巨大過ぎ て、たとえ最先端のスーパーコンピュータであっても計算可能な格子サイズは 非常に小さなものに限られる。そのため、Levin と Nave は、特異値分解に基 づいた重要度の高い自由度の選択とブロック変換の一種による疎視化を組み合 わせた手続きを反復することにより、分配関数 Z の値そのものを高精度で計 算することが可能なアルゴリズムを提唱した。なお、特異値分解とは行列の近 似手法であり、画像データの圧縮など幅広い分野で応用されている。このアル ゴリズムの最大の長所は、符号問題や複素作用の問題がないことであり、欠点 はモデルの高次元化に伴ってテンソルの添字が増えることによる計算コスト の増大である(注:ただし、計算コストに関しては、一辺の長さLのd次元格 子体積 $L^d$ に対して $d\log L$ でしか増大しないという大変魅力的な側面もある。 ちなみに、4次元格子 QCD 計算において、現在広く用いられているモンテカ ルロ法をベースとしたアルゴリズムでは、計算コストの体積依存性は L<sup>5</sup> であ る)。 その後、物性物理分野の研究者によりテンソル繰り込み群のアルゴリズ ム改良が提案され、実際に幾つかの2次元スピン系と3次元イジングモデルの 高精度計算に応用された。

藏増と理研計算科学研究機構(AICS)の清水特別研究員は、先ず論文15にお いてテンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し(グラスマン テンソル繰り込み群)、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用 を行った。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて1フレーバー の2次元格子 Schwinger モデル(2次元格子 QED)における相構造を調べた。 相転移に対しては、Lee-Yang/Fisher ゼロの有限サイズスケーリング解析を行 い、フェルミオンのゼロ質量極限における2次相転移を確認し、その臨界指数 の高精度計算を行うことによって、ユニバーサリティクラスを同定した。この 論文において、テンソル繰り込み群がグラスマン数に対しても定式化可能で あり、必要な計算コストがボゾン系の場合と変わらないことおよびフェルミオ ン系に起因する負符号問題がないことを示した。また、論文16では、論文15 中の作用に $\theta$ 項を付け加えた系の相構造を調べた。この系では $\theta = \pi$ の場合、 フェルミオン質量がある有限の値以上であれば一次相転移が起きることが期待 されている。われわれは、論文15と同じ解析手法を用いて、期待されている 一次相転移を確認した。さらに、臨界終点における2次相転移の臨界指数の高 精度計算を行うことによって、そのユニバーサリティクラスを同定した。これ により、グラスマンテンソル繰り込み群が、複素作用の分配関数も精確に取り 扱えることを示した。以上2本の論文において、われわれは2次元 Schwinger モデルを用いて、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が 持つ3つの重要問題をすべて解決していることを示すことに成功した。

(10) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補で

ある。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子標準模型 では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる。しか し、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称 性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学素粒子宇宙起源 研究機構 (KMI)を中心とした LatKMI Collaborationの研究者、山脇幸一特別 教授、青木保道准教授らと共に、格子ゲージ理論を用いた数値計算からそのよ うな条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行った。これまでの4、8 (論文17)、12 (論文18) フレーバーSU(3)ゲージ理論の研究から、8フレー バー理論がそれら条件を満たす可能性がある事を示した。特に、論文17では、 ウォーキングテクニカラー模型ではヒッグス粒子に対応するフレーバー1 重項 スカラー中間子が、π中間子と同程度に軽くなるという結果を得た。この結果 は、8フレーバー理論がウォーキングテクニカラー模型の理論として好ましい 性質を持っている事を示唆している。

(11) 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(Walter Burke Institute)、野秋, Cossu(KEK)と共同で 行った。繰り込み群の議論から、i)赤外固定点(クォーク質量はゼロ)でのメ ソン伝搬関数の体積依存性に関するスケーリング則を導き、ii)そのスケーリ ング則を満たす点をサーチする事で、 $N_f = 7$ 、8、12、16 QCD での赤外固定 点を同定した(論文19)。

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

陽子および中性子(核子)を結びつけ、原子核を構成している力(核力)は、 現象論的には中間子交換によって生じると考えられているが、その起源をより 基本的なクォーク・グルーオンの自由度に基づいて理解すること、とりわけ短 距離核力における斥力芯の発現機構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。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 20 では、 $m_{\pi} \approx 470$  MeV において得られた核力ポテン シャルの、有限核(<sup>16</sup>O および<sup>40</sup>Ca)への適用を行った。論文 21 では、核力の スピン軌道力成分を格子 QCD 計算から導出できることを具体的に示した。論 文 22 は、HAL QCD の方法を用いて、核子と  $\Omega$  粒子との間に働くポテンシャ ルを計算したものである。以下では、根村、佐々木、及び青木教授の学生であ る山田、宮本の 2014 年度の研究成果を紹介する。

4 点相関関数の GPGPU 対応高速計算コードの開発および格子 QCD に基づく 核力ポテンシャルによる精密少数系の研究

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



図 10: ΛN-ΣN 結合チャンネルポテンシャル。赤は中心力、青はテンソル力を表す。

機で高速に動くプログラムの開発を進めた。とりわけ今年度は、演算加速器 (GPGPU)を搭載した大型計算機である HA-PACS 上で、2+1 フレーバ格子 QCD 計算のもとで4 点相関関数を効率よく計算するためのアルゴリズムの開 発ならびに、複数の GPGPU を利用可能な、MPI+OpenMP+CUDA によるハ イブリッド並列化された C++プログラムを作成した。また、これまでに得ら れている正パリティの核力ポテンシャル(中心力、テンソル力)に加え、負パ リティの核力(中心力、テンソル力、スピン軌道力)を含んだ格子 QCD によ る核力ポテンシャルを用いた <sup>4</sup>He の精密計算を行った。

結合チャンネルポテンシャル法を用いたハイペロン力の研究

佐々木は、従来の HAL QCD Collaboration によるポテンシャルの導出方法を 結合チャンネル Schrödinger 方程式に適用しストレンジネスを含む 2 体バリオ ン系のポテンシャル行列を導出してきた。本年度は、これらをさらに拡張し、 スピン3重項状態におけるテンソル力も含めた結合系ポテンシャルの導出に成 功した。PACS-CS Collaboration によって生成されたパイオン質量が701 MeV に対応する 2+1 フレーバーゲージ配位を使って計算した ΛN-ΣN 結合系のポ テンシャルを図 10 に示す。今度はこれらのポテンシャルを使って、散乱観測 量の計算を行う予定である。

格子 QCD を用いた Ω-Ω 相互作用の研究

ストレンジクォークを含むハイペロン間の相互作用の研究は自然を理解する上 で重要かつ実験と理論の両側が互いに協力して研究されている分野である。特 にストレンジクォークを多く含む  $\Omega$ バリオンは実験が難しく格子 QCD を用い た理論的導出が重要な手がかりになると期待されている。山田らは、HALQCD 法を用いて  $\Omega$ - $\Omega$  間のポテンシャルを計算した。これまでの計算では体積が小 さく(格子の一辺1.9 fm、 $\pi$ 中間子質量 875 MeV)ポテンシャルがシミュレー ション空間に入りきっていない可能性があるものであった。また大きい体積の 結果では統計が少なくシグナルが統計エラーに埋もれていた。本年度は大きい 体積(格子の一辺2.9 fm、 $\pi$ 中間子質量 701 MeV)での統計を上げポテンシャ ルを計算した。計算の結果を図 11 に示す。図より近距離には斥力芯があり、中 距離には強い引力ポケットがある事がわかる。

 $\Lambda_{c}$ -N相互作用の研究

チャームクォークを含む重いバリオンの物理を調べることは、物質世界の謎 を解明する上で重要なことである。宮本らは、チャームクォークを含むバリオ



図 11: Ω-Ωの中心力ポテンシャル(色の違いはソースとシンクの相対時間)。

ンのうち最も軽いとされる  $\Lambda_c^+(J^P = \frac{1}{2}^+)$  と核子との間に働く核力ポテンシャルを HAL QCD Collaboration による方法を用いて数値的に計算した。本研究では CP-PACS/JLQCD Collaborations により生成された 2+1 フレーバーのゲージ配位 (格子の一辺 1.934(26) fm、 $\pi$ 中間子質量 884.04(81) MeV)を用い、チャームクォークの伝搬関数はストレンジククォークの質量を重く設定することで部分クエンチ近似的に解いた。また、比較のために同じゲージ配位で  $\Lambda$ -N 間のポテンシャルも計算した。計算の結果を図 12 に示す。図より、 $\Lambda_c$ -N 間のポテンシャルが  $\Lambda$ -N のものに比べて斥力芯が弱いことと、引力が小さいことが分かる。今後得られたポテンシャルを適当な解析関数によって表現し、位相差などの物理量を求めていく予定である。



図 12:  $\Lambda$ -N(黒) と $\Lambda_c$ -N(赤)の中心ポテンシャル。

(13) 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) 阪大 RCNP での JLDG FUSE mount の実 装、運用開始、(b) Metadata Slave サーバの阪大 RCNP への設置、(c) HPCI 共用ストレージ・JLDG 連携システムの運用開始、などである。

(14) 格子 QCD 共通コード開発

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++の開発を進めた(論文24、 25、26)。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汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリ ズムを適用可能で、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。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/)。素粒 子理論グループからは、金谷、滑川、根村、谷口、浮田が参加している。

本年度は、OpenMP によるスレッド並列化への対応を進めた。また、ゲージ 群を SU(3) から一般の SU(N) へと拡張した。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.2.0 へのメジャーアップデートが 2014 年 9 月に行われた。その後も、コー ドの細かい改定、改良が進められている。最新版は、ver.1.2.2 である。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

(1) 弦の場の理論におけるタキオン真空解の研究

弦の場の理論は弦の理論の非摂動効果を研究することができる定式化である。 この理論の大きな成果の一つはタキオン真空解の構築である。タキオン真空と はタキオンが凝縮してDブレーンが消滅した状態であり、この状態を開弦の 場の理論の古典解として実現することができる。タキオン真空解の周りの弦の 場の理論は閉弦の場の理論を記述するのではないかと予想されている。しか し、現在実際に得られているタキオン真空解の周りの弦の場の理論についてこ の予想を示した例はない。石橋は、高橋・谷本解と呼ばれるタキオン真空解と その周りの弦の場の理論を調べ、この場の理論をうまく定義するための正則化 を提案した。この正則化を用れば、上記の予想を示すことができるのではない かと期待されている(論文31)。

(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、双対性の背後に現れる可 積分模型を用いて強結合散乱振幅を解析的に求める方法を定式化してきた。 佐藤は初田(DESY)、伊藤(東京工業大学)、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 32)。

(3) 行列幾何とコヒーレント状態

超弦理論の非摂動的定式化として知られる行列模型において、弦やDブレー ンといった物体は、行列を用いて記述される。このような従来微分幾何を用い て記述される連続的な物体に対して、行列を用いた離散的な記述を与えること を行列正則化と呼ぶ。行列正則化はまだ理解されていない側面が多く、特に大 きな問題として次の二つが挙げられる。一つ目は任意の多様体に対する行列正 則化の構成法が知られていないこと、そして二つ目は与えられた行列の配位か ら、対応する微分幾何を読み取る方法が知られていないことである。

伊敷は量子力学におけるコヒーレント状態の考えを一般の行列幾何の場合に 拡張し、これを用いて後者の問題についての解を与えた。この結果により、与 えられた行列の配位から、対応する多様体やその上に定義される計量や曲率と いった幾何学的な量を計算することが可能となった(論文34)。

(4) Sine-square deformation と共形場の理論

一次元スピン系において、隣のスピンとの相互作用を位置のサイン関数の2乗に比例するようにとった場合、その基底状態は相互作用が位置に寄らない場合と一致することが桂(東大)らの研究によってわかっている。石橋は多田(理研)とともに、この現象を共形対称性がある場合について調べた。相互作用をサイン関数の2乗にとった場合と定数の場合は、ある共形変換で結びついていることを示し、この共形変換から基底状態等の性質が理解できることを示した(論文35)。

(5) 共形界面と弦理論

共形場理論において共形対称性を保つ欠陥(defect)/界面(interface)は共形 欠陥/界面と呼ばれる。弦理論の世界面からのアプローチでは共形対称性は指 導原理の一つともなっているため、共形境界(boundary)が弦理論のソリト ン(Dブレイン)を表すように、共形対称性を保つ対象は弦理論において基本 的な役割を果たすと期待される。

佐藤は菅原(立命館大学)と共に、「T-fold」など非幾何学的背景時空中の弦 を記述する新たなタイプの分配関数が共形界面を用いて構成されることを示 した(論文36)。

〈論文〉

1. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Akira Ukawa, Study of quark mass dependence of binding energy for light nuclei in 2+1 flavor lattice QCD, arXiv:1502.04182.

- Takeshi Yamazaki, Hadronic interactions, Proceeding of Science (LATTICE 2014) 009.
- 3. N. Ishizuka, K.I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Calculation of  $K \to \pi \pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 364.
- 4. Y. Namekawa, Comparative study of topological charge, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 344.
- Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state, Proceeding of Science (LAT-TICE2014) ref. 222.
- A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner and M. Wagner, Additional Strange Hadrons from QCD Thermodynamics and Strangeness Freezeout in Heavy Ion Collisions, Phys. Rev. Lett. 113, No. 7 (2014) ref. 072001.
- 7. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, S. Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner and M. Wagner, The melting and abundance of open charm hadrons, Phys. Lett. B 737 (2104) ref. 210.
- 8. H. Ohno, H.-T. Ding and O. Kaczmarek, Quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 219.
- X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD, Phys. Rev. D91 (2015) ref. 014508.
- X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Curvature of the critical line on the plane of quark chemical potential and pseudoscalar meson mass for three-flavor QCD, arXiv:1503.00113.
- Y. Nakamura, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, S. Takeda, and A. Ukawa, Update on the critical endpoint of the finite temperature phase transition for three flavor QCD with clover type fermions, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 194.
- X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, Scalar correlators near the 3-flavor thermal critical point, Proceedings of Science (LAT-TICE2014) ref. 195.

- 13. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, Critical end point in  $N_f = 3$  QCD with finite density and temperature, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 196.
- A. Nakamura, S. Oka, Y. Taniguchi, Canonical approach to the finite density QCD with winding number expansion, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 198.
- Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Grassmann tensor renormalization group approach to one-flavor lattice Schwinger model, Phys. Rev. D90 (2014) ref. 014508.
- 16. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, Critical behavior of the lattice Schwinger model with a topological term at  $\theta = \pi$  using the Grassmann tensor renormalization group, Phys. Rev. D90 (2014) ref. 074503.
- 17. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Light composite scalar in eight-flavor QCD on the lattice, Phys. Rev. D 89 (2014) ref. 111502(R).
- Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), Conformality in twelve-flavor QCD, Proceeding of Science (LAT-TICE2014) ref. 256.
- 19. K.-I.Ishikawa, Y.Iwasaki, Yu Nakayama, T.Yoshié, IR fixed points in SU(3) gauge Theories, arXiv:1503.02359[hep-lat].
- T. Inoue, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Medium-Heavy Nuclei from Nucleon-Nucleon Interactions in Lattice QCD, Phys. Rev. C 91, 011001(R).
- K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, H. Nemura, K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Spin-Orbit Force from Lattice QCD, Phys. Lett. B 735 (2014) 19.
- 22. F. Etminan, H. Nemura, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, N. Ishii, K. Murano, K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Spin-2 NΩ Dibaryon from Lattice QCD, Nucl. Phys. A 928 (2014) 89.
- H. Nemura, for HAL QCD Collaboration, Recent developments on LQCD studies of nuclear force, Proceedings of the Seventh International Symposium on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei, Int. J. Mod. Phys. E23 (2014) 1461006.

- 24. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, N. Ukita, Development of Lattice QCD Simulation Code Set "Bridge++" on Accelerators, Procedia Computer Science Volume 29 (2014) 1701.
- S. Ueda S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Development of an object oriented lattice QCD code 'Bridge++', J. Phys. Conf. Ser. 523 (2014) 012046.
- 26. S. Ueda S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, S. Motoki, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, N. Ukita, Lattice QCD code Bridge++ on multithread and many core accelerators, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 036.
- 27. Sinya Aoki, Michael Creutz, Pion masses in 2-flavor QCD with  $\eta$  condensation, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) ref. 141603, 1-5 (arXiv:1402.1837[hep-lat]).
- H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, Computation of the electromagnetic pion form factor from lattice QCD in the epsilon regime. Phys. Rev. D 90, (2014) ref. 034506 (arXiv:1405.4077 [hep-lat]).
- Sinya Aoki, Janos Balog and Peter Weisz, Walking in the 3-dimensional large N scalar model, JHEP 1409 (2014) 167 (arXiv:1407.7074[hep-lat]).
- Xu Feng, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, Time-like pion form factor in lattice QCD, Phys. Rev. D91 (2015) ref. 054504 (arXiv:1412. 6319[hep-lat]).
- N. Ishibashi, Comments on Takahashi-Tanimoto's scalar solution JHEP 1502 (2015) 168.
- Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, Quantum Wronskian approach to gluon scattering amplitudes at strong coupling, JHEP 1408 (2014) 162.
- Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, Nuclear Physics B Proceedings Supplement 251-252 (2014) 123-128.
- 34. Goro Ishiki, Matrix Geometry and Coherent States, arXiv:1503.01230 [hep-th], UTHEP-669.
- 35. N. Ishibashi and T. Tada, Infinite circumference limit of conformal field theory, UTHEP-672.
- Yuji Satoh and Yuji Sugawara, Non-geometric backgrounds based on topological interfaces, preprint UTHEP-667.

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 趙 栄貴

「Improvement of the Brillouin fermion action for heavy quark (重いクォー クの物理に向けたブリルアンフェルミオン作用の改良)」

2. 山田 真徳

「A study of the Omega-Omega interaction using the central potential in Lattice QCD (格子 QCD での中心力ポテンシャルを用いたオメガバリオン間 の相互作用に関する研究)」

[修士論文]

- 酒井 慧
   「テンソル繰り込み群の開発と応用」
- 2. 鈴木 遊
   「カノニカル法を用いた格子 QCD における高次キュムラントの計算」
- 3. 寺松 宏平

 $I = 2 \pi \pi$  散乱における HAL method での演算子依存性」

宮本 貴也
 「格子 QCD を用いた Λ<sub>c</sub>-N 核子間相互作用の研究」

## 〈研究成果発表(講演)〉

[国際会議]

- Sinya Aoki, 「Some topics in 2-flavor QCD at zero and finite temperature」 (招待講演), Workshop "Facing Strong Dynamics" (Liselund Castle, Denmark, June 2-6, 2014).
- Yuji Satoh, 「Quantum wronskian relation and gluon scattering amplitudes at strong coupling」(招待講演),
   Finite-size Technology in Low Dimensional Quantum System (VII) (Eotvos University, Budapest, Hungary, June 16-27, 2014).
- Takeshi Yamazaki, 「Hadronic Interactions」(招待講演), The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, USA, June 23-28, 2014).

- Sinya Aoki, 「Finite-volume methods for hadrons and their interactions in lattice QCD」(招待講演), CERN Theory Workshop "Conceptual advances in lattice gauge theory (LGT14)" (CERN, Geneva, Switzerland, July 21-August 1, 2014).
- Nobuyuki Ishibashi,「Comments on the Takahashi-Tanimoto tachyon vacuum solution」(招待講演),
   String field theory and related aspects VI, SFT2014 (SISSA, Trieste, Italy, July 24-August 1, 2014)
- Yusuke Namekawa, 「Heavy hadrons from lattice QCD」(招待講演), Structure and productions of charmed baryons II (Tokai, Japan, August 7-9, 2014).
- Sinya Aoki, 「Hadron interactions from lattice QCD」(招待講演), KITPC program "Present Status of the Nuclear Interaction Theory" (KITPC/ITP-CAS, Beijing, China, August 25-September 19, 2014).
- 8. Sinya Aoki, 「2-flavor QCD with non-degenerate quarks」(招待講演), Creutz Fest 2014 "A Celebration of the Career and Accomplishments of Michael Creutz" (Physics Department, BNL, USA, September 4-5, 2014).
- Yoshinobu Kuramashi, 「Lattice QCD」(招待講演), US/Japan Exascale Applications Workshop (Gatlinburg, Tennessee, USA, Sep. 5-6, 2014).
- Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」(招待講演), Advances and perspectives in computational nuclear physics (Hilton Waikoloa Village, USA, Oct. 5-7, 2014).
- K. Sasaki, 「Coupled channel approach to hyperon-nucleon interaction from-Lattice QCD」(招待講演), Workshop "Achievements and Perspectives in Low-energy QCD with Strangeness" (Trento, Italy, Oct. 27-31, 2014).
- K. Sasaki, 「Hadron interactions and resonances from lattice QCD」(招待講 演),
   Workshop "Resonance Workshop at Catania" (Catania, Italy, Nov. 3-7, 2014).
- Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」(招待講演), RIKEN BNL Research Center workshop "Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD" (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6, 2015).
- 14. Naruhito Ishizuka,  $\lceil K \to \pi \pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion」 (招待講演),

RIKEN BNL Research Center workshop "Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD" (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6, 2015).

- Sinya Aoki, 「Hadron interaction in lattice QCD」(招待講演), Long-term workshop on "Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (HHIQCD2015)" (YITP, Kyoto, Japan, February 12-March 21, 2015).
- 16. H. Nemura (for HAL QCD Collaboration),「Stochastic variational calculation of 4He using lattice NN potential」(招待講演), International Workshop on New Frontier of Numerical Methods for Many-Body Correlations — Methodologies and Algorithms for Fermion Many-Body Problem (University of Tokyo, Tokyo, Japan, Feb. 18-21, 2015).
- Yoshinobu Kuramashi, 「2+1 flavor lattice QCD simulation on K computer」 (招待講演),
   CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
- 18. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of K  $\rightarrow \pi\pi$  amplitudes」(招待講演), CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
- Yusuke Taniguchi, 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」(招待講演), CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
- Hiroshi Ohno, 「Quarkonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD」(招待講演), CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
- Hiroshi Ohno, <sup>「</sup>Lattice QCD study on quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature」, The XXIV International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2014) (Darmstadt, Germany, May 19-24, 2014).
- 22. Sinya Aoki, 「Pion masses in 2-flavor QCD with eta condensation」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- 23. Naruhito Ishizuka, <sup> $\lceil$ </sup>Calculation of  $K \to \pi\pi$  decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD<sub> $\rfloor$ </sub>, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).

- 24. Yusuke Taniguchi, 「Canonical approach to the finite density QCD with winding number expansion」,
  The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- 25. Hiroshi Ohno, 「Quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature」,
  The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- 26. Y.Namekawa, 「Comparative study of topological charge」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- 27. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), <sup>「</sup>Multipoint reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- Masanori Yamada, for HAL QCD Collaboration, 「Omega-Omega interaction from 2+1 flavor QCD」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
- Tomoteru Yoshié, 「Report from JLDG」, International Lattice Data Grid 22 (Columbia University, New York, USA, June 24, 2014).
- 30. Yusuke Taniguchi, 「Canonical approach to the finite density lattice QCD with winding number expansion (II) hadronic observables」, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (Hawaii, USA, October 7-11, 2014).
- 31. Masanori Yamada, for HAL QCD Collaboration, 「Omega-Omega interaction on the Lattice」, Fourth Joint Meeting of the Nuclear Physics Divisions of the American Physical Society and The Physical Society of Japan (Hawaii, USA, October 7-11, 2014).
- Goro Ishiki, <sup>「</sup>Matrix Geometry and Coherent States」, KEK Theory Workshop 2015 (KEK, Tsukuba, Japan, Jan. 28-31, 2015).

 Takeshi Yamazaki, <sup>「</sup>Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (Kyoto University, Kyoto, Feb. 15-Mar. 21, 2015).

[国内学会、研究会]

- 山崎 剛,「hadronic interaction and beyond standard model from lattice gauge theory」(招待講演), 素粒子物理学の進展 2014 (京都大学基礎物理学研究所,京都, 2014 年 7 月 28 日-8 月 1 日).
- 青木 慎也,「Toward the entanglement entropy in lattice gauge theories」(招待講演),
   「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 2014 (慶應大学日吉キャンパス,神奈川, 2014 年 9 月 12 日-15 日).
- 山崎 剛,「格子 QCD を用いた原子核直接計算」(招待講演), RCNP workshop "QCD を基礎とする核子多体系物理の理解"(大阪大学 RCNP, 大阪, 2014 年 12 月 19-20 日).
- 谷口裕介,「カイラル相転移を追いかけて」(招待講演), 素粒子論の展望:80年代、90年代から未来へ(大阪大学,豊中市,2015年2月 14日).
- 5. 谷口裕介,「カノニカル法による格子 QCD 有限密度相転移現象への挑戦」(招 待講演), 九大研究会 -格子 QCD と現象論模型による有限温度・有限密度の物理の解明-(九州大学,福岡市, 2015 年 2 月 19 日).
- 石橋 延幸,「Multiloop amplitudes of light-cone gauge superstring field theory in noncritical dimensions」(招待講演), 弦の場の理論 15 奈良 (奈良女子大学, 奈良, 2015 年 3 月 5 日-6 日).
- 7. 青木 慎也,「全体概要」(招待講演),
   素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム(紀尾井フォー ラム,東京, 2015年3月11日-12日).
- 4. 山崎 剛,「格子 QCD を用いた軽い原子核の計算」(招待講演), 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム(紀尾井フォー ラム,東京, 2015年3月11日-12日).
- 9. 谷口裕介,「カノニカル法による格子 QCD の有限密度相転移現象への挑戦」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会 「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光市, 2014 年 9 月 3 日-5 日).

- 大野浩史,「有限温度格子 QCD におけるチャーモニウム及びボトモニウム相 関関数の研究」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光市, 2014年9月3日-5日).
- 石塚成人,「Calculation of K to ππ decay amplitudes with improved Wilson fermion」,
   日本物理学会 2014 年 秋季大会 (佐賀大学, 佐賀, 2014 年 9 月 18 日-21 日).
- 山崎 剛 for LatKMI Collaboration,「Study of hadron spectra in 8-flavor QCD with lattice gauge theory」,
   日本物理学会 2014 年 秋季大会 (佐賀大学, 佐賀, 2014 年 9 月 18 日-21 日).
- 13. 根村 英克 (HAL QCD Collaboration), 「Study of hyperon potentials from lattice QCD and hypernuclei」, 「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会 (熱川ハイツ, 静岡, 2014 年9月 25 日-27 日).
- 14. 佐々木 健志, 「格子 QCD から導くハイペロン間相互作用の研究」, 「ストレンジネスを含む原子核の最近の展開」研究会 (熱川ハイツ, 静岡, 2014 年 9 月 25 日-27 日).
- 15. 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 成果報告会 (東京, 2014 年 10 月 30 日-31 日).
- 16. 吉江 友照, 「HEPnet-J/sc 報告」, HEPnet-J ユーザー会 (KEK, つくば, 2014 年 12 月 11 日-12 日).
- 17. 吉江 友照,「格子 QCD データ共有・管理基盤 JLDG/ILDG」, 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 (東 京, 2015 年 3 月 11 日-12 日).
- 山崎 剛 for LatKMI Collaboration,「格子ゲージ理論を用いた8フレーバー QCD における近似的共形対称性の研究」, 日本物理学会 第70回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015年3月21日-24日).
- 19. 谷口裕介,「カノニカル法による格子 QCD の有限密度相転移現象の研究」, 日本物理学会 第70 回年次大会 (早稲田大学,東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
- 20. 大野浩史,「有限温度格子 QCD による チャーモニウム及びボトモニウムの研究」,
  日本物理学会 第 70 回年次大会 (早稲田大学,東京, 2015 年 3 月 21 日-24 日).
- 21. 佐藤 勇二, 菅原祐二, 「Non-geometric backgrounds based on topological interfaces」,
  日本物理学会 第70回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015年3月21日-24日).

- 22. 伊敷 吾郎, 「Matrix Geometry and Coherent States」, 日本物理学会 第70回年次大会 (早稲田大学, 東京, 2015年3月21日-24日).
- 23. 鈴木 遊,「カノニカル法を用いた格子 QCD における高次キュムラントの計算」,
  日本物理学会 第70回年次大会 (早稲田大学,東京, 2015年3月21日-24日).
- 24. 大野浩史,「有限温度格子 QCD によるチャーモニウム・ボトモニウム 及び重 クォーク拡散係数の研究」, チュートリアル研究会「重イオン衝突の物理:基礎から最前線まで」(理化学 研究所,和光, 2015 年 3 月 25 日-27 日).

#### 〈受賞〉

青木慎也、初田哲男、石井理修
 「量子色力学の第一原理計算に基づく核力の研究」、平成26年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞(研究部門)、2014年4月7日、文部科学省

#### 〈国際会議・研究会の実施〉

- 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「クォ-クから超新星爆発まで」-基礎物理の理想への挑戦-, 2014年7月22日-26日,京都大学基礎物理学研究所,京都.
- 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 主催, 素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム,ポスト「京」 重点課題(9)「宇宙の基本法則と進化の解明」, 2015年3月11日-12日, 紀尾井フォーラム,東京.
- 3. 筑波大学計算科学研究センター/理研 BNL 研究センター共催, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015), 2015 年 3 月 12-13 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.

〈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. 石橋延幸, 日本学術振興会学術システム研究センター専門委員
- 7. 石橋延幸, PTEP 編集委員
- 8. 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)」 (http://gatis.desy.eu/) のグローバルネットワークへの参加
- 9. 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
- 10. 佐藤勇二, 日本物理学会素粒子論領域運営委員