

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）、金谷 和至（共同研究員）
准教授	石塚 成人、吉江 友照、根村 英克、山崎 剛（共同研究員）
講師	谷口 裕介
助教	大野 浩史（国際テニュアトラック）
研究員	浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介
学生	大学院生 9名、学類生 3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 $N_f=2+1$ 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。

3. 研究成果

【1】 HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題（藏増、青木、石塚、根村、山崎、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 하나가「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）。

(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、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、 96^4 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1.048Pfllops、CPU 部ピーク演算性能0.118Pfllops) 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、 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。

まだすべてのゲージ配位の解析が終了したわけではないが、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。

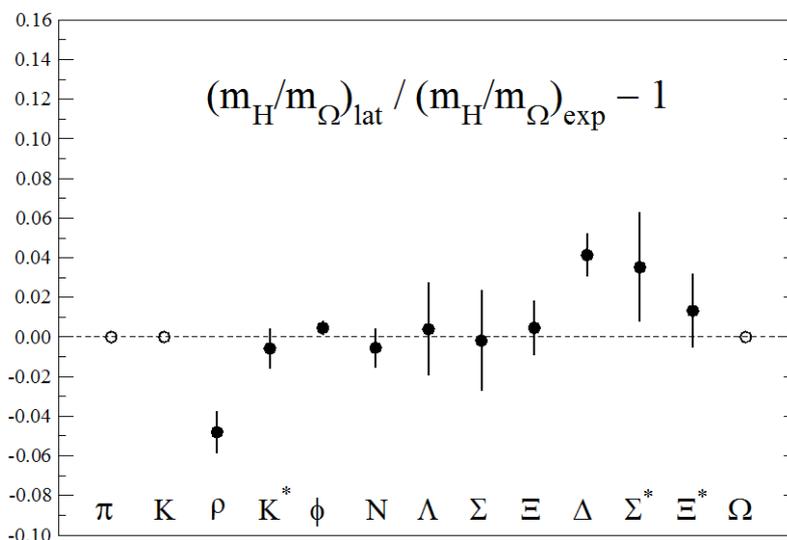


図1：2+1フレーバー格子QCD計算で得られたハドロン質量と実験値との比較。白抜きシンボルはクォーク質量と格子間隔を決めるための物理インプットを表す。

【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)

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、そのうち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。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A-1)。図2は ^4He 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。現在、「京」で生成された96⁴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。

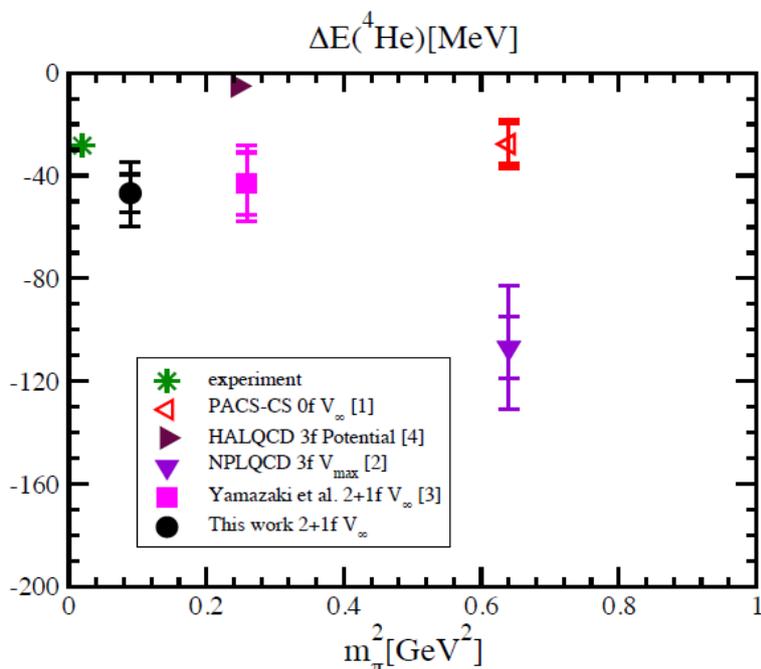


図2: ${}^4\text{He}$ 原子核の束縛エネルギーの π 中間子質量依存性。白抜きシンボルはクエンチ近似の結果を表す。

【3】 K 中間子崩壊幅の研究 (石塚、吉江)

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 (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。 π 中間子質量 $m_\pi=280$ MeVのもとで、終状態の π 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 (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。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、 π 中間子質 $m_\pi=250$ 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)

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B-3）。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、単純なグルーオンの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)

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。

(1) 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かず「ベータ関数」の情報が必要である。QCD は、ゲージ結合定数 (β) と複数のクォーク質量 (κ) や化学ポテンシャル (μ) 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 B-4)。

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 P の κ 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 P の κ 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(「重ね合わせ問題」)。

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 B-4 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）をスムーズに繋ぎ、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。 β および κ 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。

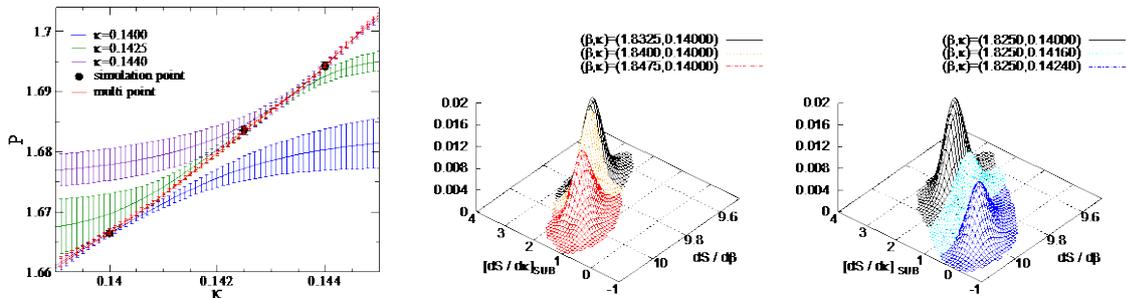


図3： $N_f=2$ QCDにおける多重点再重み付け法の試験研究（論文B-4）。左図：改良プラケット $P=c_0W^{1x1}+2c_1W^{1x2}$ の期待値の $\beta=1.825$ における κ 依存性。黒丸は、3つのシミュレーション点における観測結果。紫、緑、青は、3点それぞれのデータによる単純な再重み付け法の結果。パラメータを大きく動かすと単純な再重み付け法では観測結果を再現できないことがわかる。赤は、3点のデータを多重点再重み付け法により結合して計算した結果。中央および右図：再重み付け法で重要な、作用の β 微分、 κ 微分のヒストグラムのパラメータ依存性。様々なシミュレ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。

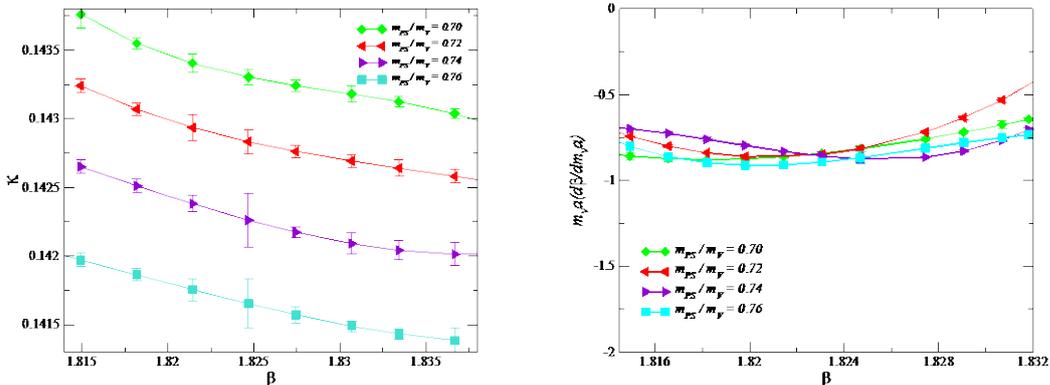


図4：多重点再重み付け法による $N_f=2$ QCDの等物理線（左図）と、ゲージ結合パラメータに関するベータ関数（右図）（論文B-4）。

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

大野は、国際テニユ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。

(1) 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A-2、A-3）。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。

(2) 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 $96^3 \times 24$ から $192^3 \times 96$ と非常に大きなものを用いた。また、計算コストを抑えるため、動的クォークの効果を見逃したクエ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B-5）。

まず、図6に、ベクターチャン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、 $1.4T_c$ (T_c は臨界温度) における通常の時間的相関関数と、 $0.7T_c$ 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 τ の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。

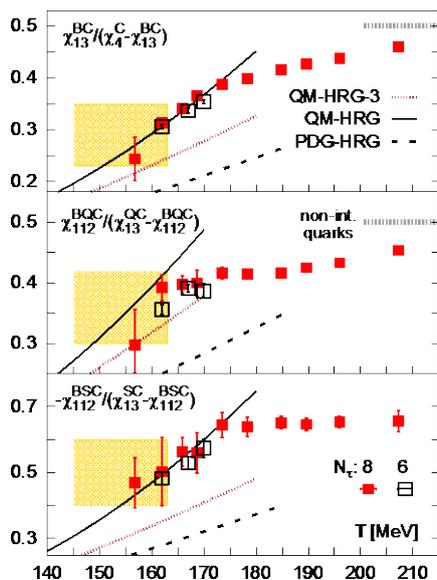


図5: ストレンジネス・チャーム等の揺らぎの様々なキュムラントの比。PDG-HRG、QM-HRG及び QM-HRG-3はそれぞれ、実験的に見つかったハドロンを用いたHRGモデルの結果、ある種のクォ

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。

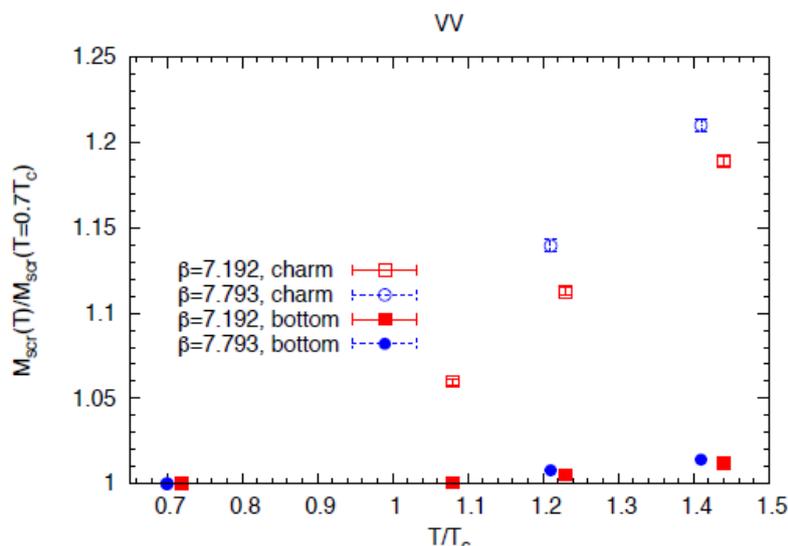


図6：ベクターチャンネルの遮蔽質量の温度依存性。横軸は温度を臨界温度 T_c で規格化、縦軸は $0.7T_c$ の遮蔽質量で規格化したものである。チャーモニウムの結果を中抜き、ボトモニウムの結果を中塗りのシンボルで表す。また、粗い格子間隔の結果を四角、細かい格子間隔の結果を丸で表す。

【7】 3フレーバーにおける有限温度・有限密度 QCD (蔵増)

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。蔵増は、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、0(a)改良を施し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_q 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。まず、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A-4)。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ル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 $N_\tau = 4, 6, 8$ 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 $T_E=133(2)(1)(3)\text{MeV}$ 、また、擬スカラー中間子質量として $m_{ps} = 306(7)(14)(7)\text{MeV}$ 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A-5)。有限の化学ポテンシャル $\mu \neq 0$ 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 μ 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。

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

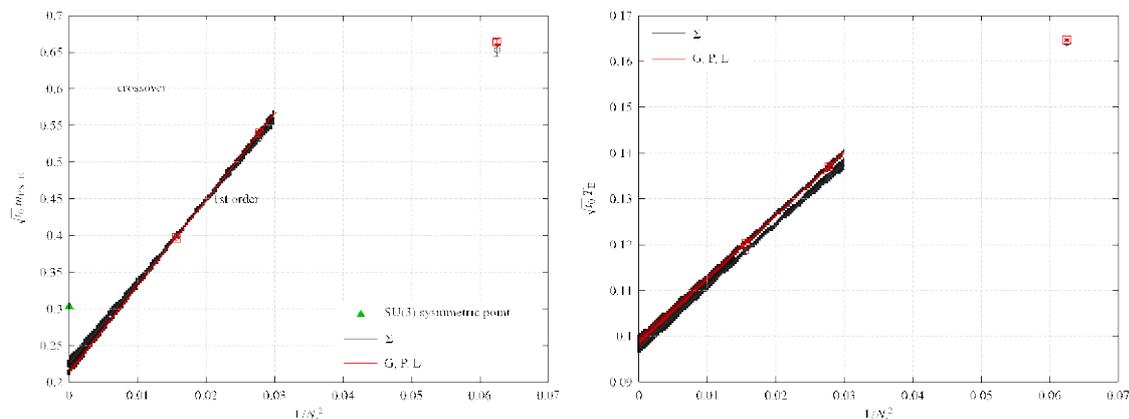


図7：臨界終点における擬スカラー中間子質量(左)と転移温度(右)の $1/(N_T)^2$ 依存性。

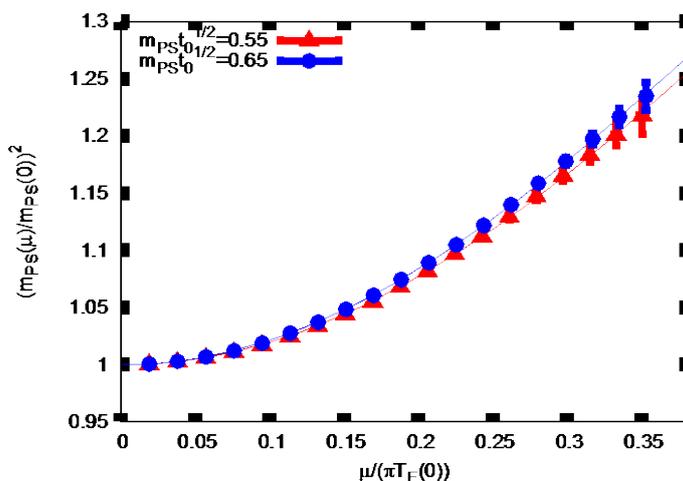


図8： $\mu/T-(m_{PS})^2$ 平面における臨界線。赤シンボルと青シンボルは、格子間隔を決めるための異なる物理インプットを表す。

【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号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-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。

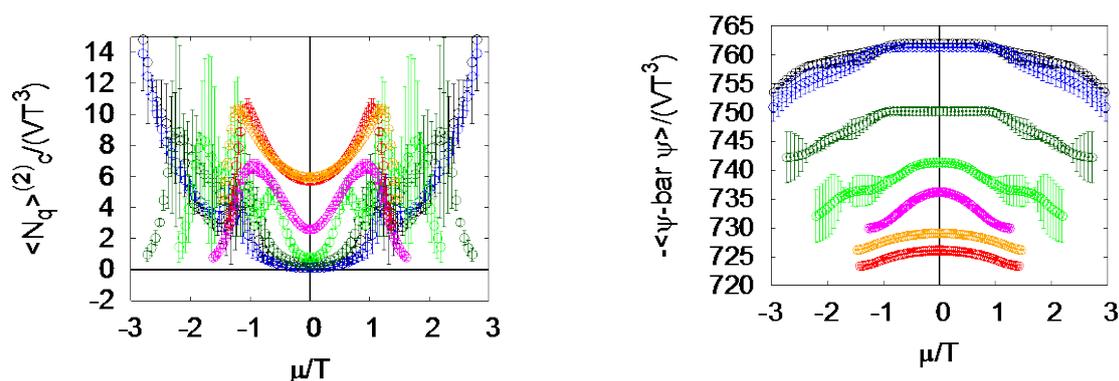


図9：左図：クォーク化学ポテンシャル μ/T の関数としてのクォーク数密度の2次キュムラント $\langle \hat{N}_q^2 \rangle_c / (VT^3)$ 。グラフは上から高温側： $\beta=2.1$ (orange)、1.9 (red)、1.7 (magenta)、1.5 (green)、1.3 (dark green)、1.1 (blue)、0.9 (black)：低温側。右図：グランドカノニカル分布から求めたクォーク化学ポテンシャル μ/T の関数としてのカイラル凝縮 $-\int d^3x \langle \bar{\psi} \psi \rangle / (VT^3)$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

【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 (蔵増)

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、作用が複素数になってしまう。具体的には、前者の場合は通常のQCD作用に付加する θ 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 μ 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う(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、ま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^5 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。

蔵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A-6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ル解析を行い、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A-7では、論文A-6中の作用に θ 項を付け加えた系の相構造を調べた。この系では $\theta = \pi$ 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A-6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 (山崎)

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A-8)、12 (論文B-10) 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A-8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)

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ルリング則を導き、ii) そのスケール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A-9)。

【12】 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究

(HAL QCD Collaboration : 青木、根村、佐々木、山田、宮本)

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A-10では、 $m_\pi \approx 470\text{MeV}$ において得られた核力ポテンシャルの、有限核 (^{16}O および ^{40}Ca) への適用を行

った。論文A-11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A-12は、HAL QCDの方法を用いて、核子と Ω 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。

(1) 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フレーバー格子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 ^4He の精密計算を行った。

(2) 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701MeV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 $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 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。

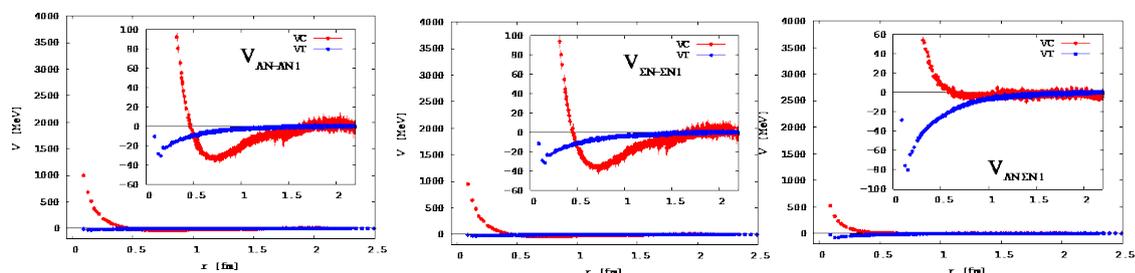


図10： $\Lambda\text{N}-\Sigma\text{N}$ 結合チャンネルポテンシャル。赤は中心力、青はテンソル力を表す。

(3) 格子 QCD を用いた $\Omega-\Omega$ 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 Ω 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りになると期待されている。山田らは、HALQCD法を用いて Ω - Ω 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（格子の一边1.9 fm、 π 中間子質量875MeV）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（格子の一边2.9 fm、 π 中間子質量701MeV）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。

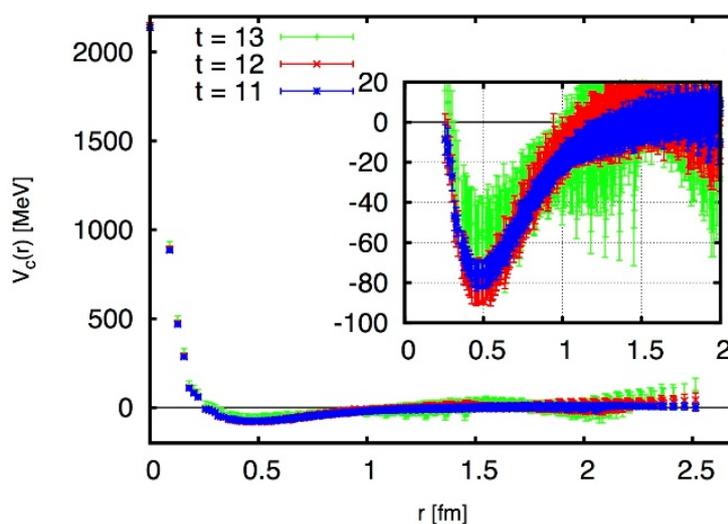


図11： Ω - Ω の中心力ポテンシャル（色の違いはソースとシンクの相対時間）。

(4) Λ_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ンのうち最も軽いとされる Λ_c^+ ($J^P=1/2^+$) 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（格子の一边1.934(26) fm、 π 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 Λ -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、 Λ_c -N間のポテンシャルが Λ -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。

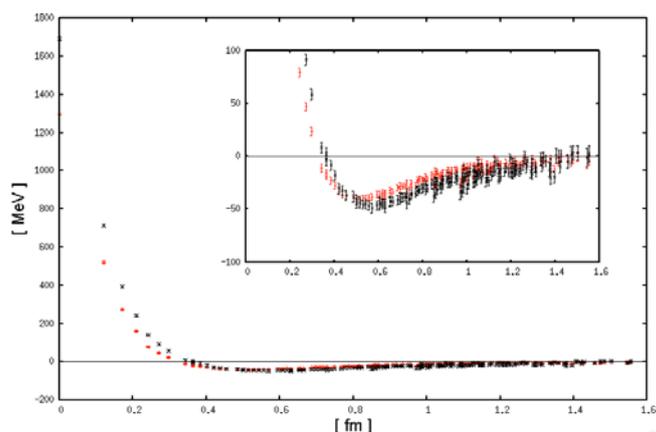


図12： Λ -N（黒）と Λ_c -N（赤）の中心ポテンシャル。

【13】 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) 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（金谷、滑川、根村、谷口、浮田）

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A-13、B-12、B-13）。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/>）。素粒子物理研究部門からは、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。

4. 教育

【1】 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)」

【2】 修士論文

1. 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」
4. 宮本貴也、「格子QCDを用いた Λ_c -N子間相互作用の研究」

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

【1】 受賞

1. 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

【2】 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』」、441,910千円
2. 青木慎也（代表）、一般受託研究、平成26年採択、『ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発 重点課題⑨宇宙の基本法則と進化の解明』、5,479千円
3. 蔵増嘉伸（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」、1,035千円
4. 山崎剛（代表）、科学研究費補助金・若手研究(B)、平成25年度採択、「量子色力学を基にしたクォーク多体系としての原子核の研究」、600千円
5. 谷口裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成24年度採択、「格子上の非摂動論的な繰り込みの実践」、500千円
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」、600千円
8. 根村英克(代表)、科学研究費補助金・新学術領域研究(公募研究)、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」、900千円

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Y. Shimizu and Y. Kuramashi, “Grassmann tensor renormalization group approach to one-flavor lattice Schwinger model”, Phys. Rev. D90 (2014) ref. 014508.
7. 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.
8. 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).
9. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, T. Yoshié, “IR fixed points in SU(3) gauge Theories”, arXiv:1503.02359[hep-lat].

10. 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).
11. 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.
12. 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 $N\Omega$ Dibaryon from Lattice QCD”, *Nucl. Phys. A* 928 (2014) 89.
13. 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.
14. Sinya Aoki, Michael Creutz, “Pion masses in 2-flavor QCD with η condensation”, *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) ref. 141603, 1-5 (arXiv:1402.1837[hep-lat]).
15. 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]).
16. 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]).
17. Xu Feng, Sinya Aoki, Shoji Hashimoto, Takashi Kaneko, “Time-like pion form factor in lattice QCD”, *Phys. Rev. D* 91 (2015) ref. 054504 (arXiv:1412.6319 [hep-lat]).

B) 査読無し論文

1. Takeshi Yamazaki, “Hadronic interactions”, *Proceeding of Science (LATTICE 2014)* 009.
2. N. Ishizuka, K.I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, “Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD”, *Proceeding of Science (LATTICE2014)* ref. 364.
3. Y. Namekawa, “Comparative study of topological charge”, *Proceeding of Science (LATTICE2014)* ref. 344.
4. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), “Multi-point reweighting method and beta functions for the calculation of QCD equation of state”, *Proceeding of Science (LATTICE2014)* ref. 222.

5. H. Ohno, H.-T. Ding and O. Kaczmarek, “Quark mass dependence of quarkonium properties at finite temperature”, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 219.
6. 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.
7. X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, “Scalar correlators near the 3-flavor thermal critical point”, Proceedings of Science (LATTICE2014) ref. 195.
8. 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.
9. A. Nakamura, S. Oka, Y. Taniguchi, “Canonical approach to the finite density QCD with winding number expansion”, Proceeding of Science (LATTICE2014) ref. 198.
10. 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 (LATTICE2014) ref. 256.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. Sinya Aoki, 「Some topics in 2-flavor QCD at zero and finite temperature」, Workshop “Facing Strong Dynamics” (Liselund Castle, Denmark, June 2-6, 2014).

2. Takeshi Yamazaki, 「Hadronic Interactions」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, USA, June 23-28, 2014).
3. Sinya Aoki, 「Finite-volume methods for hadrons and their interactions in lattice QCD」, CERN Theory Workshop “Conceptual advances in lattice gauge theory (LGT14)” (CERN, Geneva, Switzerland, July 21-August 1, 2014).
4. Yusuke Namekawa, 「Heavy hadrons from lattice QCD」, Structure and productions of charmed baryons II (Tokai, Japan, August 7-9, 2014).
5. Sinya Aoki, 「Hadron interactions from lattice QCD」, KITPC program “Present Status of the Nuclear Interaction Theory” (KITPC/ITPCAS, Beijing, China, August 25-September 19, 2014).
6. Sinya Aoki, 「2-flavor QCD with non-degenerate quarks」, Creutz Fest 2014 “A Celebration of the Career and Accomplishments of Michael Creutz” (Physics Department, BNL, USA, September 4-5, 2014).
7. Yoshinobu Kuramashi, 「Lattice QCD」, US/Japan Exascale Applications Workshop (Gatlinburg, Tennessee, USA, Sep. 5-6, 2014).
8. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」, Advances and perspectives in computational nuclear physics (Hilton Waikoloa Village, USA, Oct. 5-7, 2014).
9. K. Sasaki, 「Coupled channel approach to hyperon-nucleon interaction from Lattice QCD」, Workshop “Achievements and Perspectives in Low-energy QCD with Strangeness” (Trento, Italy, Oct. 27-31, 2014).
10. K. Sasaki, 「Hadron interactions and resonances from lattice QCD」, Workshop “Resonance Workshop at Catania” (Catania, Italy, Nov. 3-7, 2014).
11. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from lattice QCD」, RIKEN BNL Research Center workshop “Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD” (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6, 2015).
12. Naruhito Ishizuka, 「 $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion」, RIKEN BNL Research Center workshop “Multi-Hadron and Nonlocal Matrix Elements in Lattice QCD” (Brookhaven National Laboratory, USA, Feb. 5-6, 2015).
13. Sinya Aoki, 「Hadron interaction in lattice QCD」, Long-term workshop on “Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (HHIQCD2015)” (YITP, Kyoto, Japan, February 12-March 21, 2015).

14. H. Nemura (for HAL QCD Collaboration), 「Stochastic variational calculation of 4He using lattice NN potential」, 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).
15. Yoshinobu Kuramashi, 「2+1 flavor lattice QCD simulation on K computer」, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
16. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ amplitudes」, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
17. Yusuke Taniguchi, 「Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach」, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).
18. Hiroshi Ohno, 「Quarkonia in hot medium and heavy quark diffusion from lattice QCD」, CCS-BNL Workshop on Lattice Gauge Theories 2015 (CCS-BNL LGT 2015) (University of Tsukuba, Tsukuba, March 12-13, 2015).

B) 一般講演

1. Hiroshi Ohno, 「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).
2. 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).
3. Naruhito Ishizuka, 「Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with improved Wilson fermion in 2+1 flavor lattice QCD」, The 32nd International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2014) (Columbia University, New York, USA, June 23-28, 2014).
4. 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).

5. 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).
6. 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).
7. Ryo Iwami, S. Ejiri, K. Kanaya, Y. Nakagawa, T. Umeda, D. Yamamoto (WHOT-QCD Collaboration), 「Multi-point 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).
8. 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).
9. Tomoteru Yoshié, 「Report from JLDG」, International Lattice Data Grid 22 (Columbia University, New York, USA, June 24, 2014).
10. 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).
11. 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).
12. Takeshi Yamazaki, 「Light nuclei from 2+1 flavor lattice QCD」, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2015 (Kyoto University, Kyoto, Feb. 15-Mar. 21, 2015).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 山崎剛, 「hadronic interaction and beyond standard model from lattice gauge theory」, 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).

2. 青木慎也, 「Toward the entanglement entropy in lattice gauge theories」, 「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, 神奈川県, 2014年9月12日-15日).
3. 山崎剛, 「格子QCD を用いた原子核直接計算」, 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).
4. 谷口裕介, 「カイラル相転移を追いかけて」, 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」, 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).
6. 青木慎也, 「全体概要」, 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).
7. 山崎剛, 「格子QCDを用いた軽い原子核の計算」, 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).

B) その他の発表

1. 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).
2. 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).
3. 石塚成人, 「Calculation of K to $\pi\pi$ 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).
4. 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).
5. 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).
6. 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).
7. 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).

8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. 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).
13. 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).
14. 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).

(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「クォー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.

2. 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.

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