

### 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	青木 慎也、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、藏増 嘉伸、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

##### 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部分は、2006 年 7 月に計算科学研究センターの次期並列計算機として PACS-CS が導入されたのを契機として新たに立ち上げられた研究グループ PACS-CS Collaboration に参加している。PACS-CS Collaboration では、計算科学研究センターの PACS-CS や T2K-Tsukuba を主要な計算機資源として、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことを目的として、3 種類 (up、down、strange) の軽いクォークをその物理的質量 (物理点) において動的に扱う  $N_f=2+1$  QCD の大規模シミュレーションを進めてきた。更に発展的課題として、up、down クォーク間の質量差や電磁相互作用を取り入れる  $N_f=1+1+1$  QCD の研究や、格子 QCD による He 原子核の研究なども推進した。PACS-CS Collaboration は 2011 年 9 月末の PACS-CS 機シャットダウンに伴って解散したが、これまで取り組んできた研究課題は HPCI 戦略プログラム分野 5 (後述) における研究開発課題として発展的に引き継がれている。さらに、これと並行して、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 や、核子間ポテンシャルやハドロン間相互作用の研究に取り組んでいる HAL QCD Collaboration、有限温度・有限密度 QCD の研究を推進している WHOT-QCD 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。

一方、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、青木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、秋から一般利用が開始された「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】 PACS-CS Collaboration の活動（全員）

当センターでは、平成 17 年度から 3 ヶ年計画で特別教育研究経費（拠点形成）を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機 PACS-CS（計算ノード数 2560、ピーク演算性能 14.3Tflops）が平成 18 年 7 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として格子 QCD の研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学域メンバーを中心として組織されている。その目標は、3 種類（up、down、strange）の軽いクォークをその物理的質量（物理点）において動的に扱うシミュレーションを行い、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことである。平成 18、19 年度から物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くし、平成 20 年度より PACS-CS プロジェクトの目標である物理点でのシミュレーションへの取り組みを開始し、平成 21 年度に、reweighting 法を用いた物理点直上でのシミュレーションに成功した。その後、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションの開発に取り組み、up、down クォークの質量差と電磁相互作用を reweighting 法によって取り入れることに成功し、平成 24 年度にその成果を論文として発表した。

なお、PACS-CS は平成 23 年 9 月末をもって運用を終了し、平成 24 年 2 月より後継機となる密結合並列演算加速機構実証システム 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）が稼働を開始した。

#### (1) 1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーション

従来の格子 QCD 計算では、アルゴリズム的理由により up と down クォークの質量は人為的に等しくし（2+1 フレーバー）、電磁相互作用の効果も無視していた。これに対して、1+1+1 フレーバー QCD+QED シミュレーションでは自然界を再現すべく up、down、strange クォークの質量をすべて独立なものとして扱い、電磁相互作用の効果も同時に評価することを目指している。電磁相互作用および up と down クォークの質量差は reweighting 法によって取り入れる。その際、変形 block BiCGSTAB アルゴリズムの開発を行うことによって、reweighting 法の高効率実行を可能とした（論文 1）。本格計算は  $32^3 \times 64$  の格子サイズを用いて行われ、up クォーク質量、down クォーク

質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するための 4 つの物理インプットとして  $\pi^+$  メソン質量、 $K^0$  メソン質量、 $K^+$  メソン質量、 $\Omega$  バリオン質量を採用した。これにより、up と down クォークの質量差を直接定量的に評価することが可能となった(論文 2)。図 1 は電磁相互作用と up と down クォークの質量差を取り入れた  $K^0$  メソンと  $K^+$  メソンの伝播関数の比を時間の関数としてプロットしたものである。赤線は  $K^0$ - $K^+$  質量差の実験値 ( $K^0$  と  $K^+$  の平均質量の 1%未満) から期待される傾きであり、計算結果は誤差の範囲で実験値を再現している ( $t=0$  の近傍は励起状態の寄与のため実験値からずれている)。なお、本計算では PACS-CS 機の他に超並列クラスタ計算機 T2K-Tsukuba (計算ノード数 648、ピーク演算性能 94 Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始) も利用している。

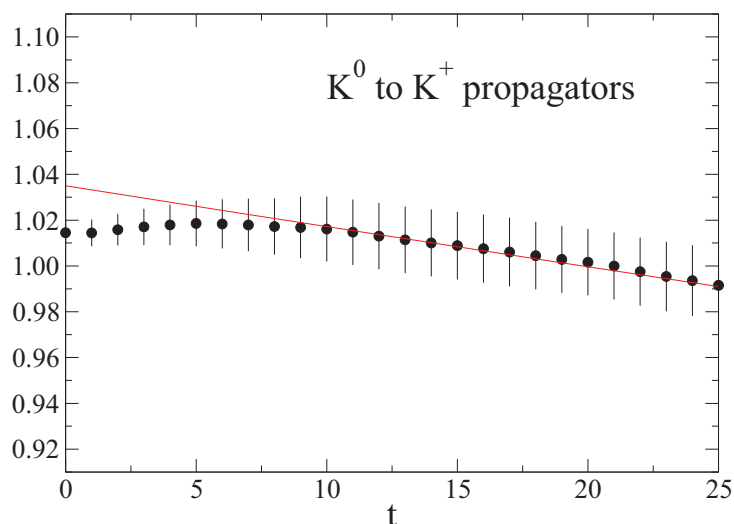


図 1:  $K^0$  メソンと  $K^+$  メソンの伝播関数の比。赤線は実験から期待される傾き。

## (2) チャームバリオンの研究

物理点直上の極めて現実に近いシミュレーションにより、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 3、4)。チャームクォーク 1 つを含むバリオンは実験的に高精度で調べられている。他方、チャームクォークを 2 つ含むバリオンは、 $\Xi_{cc}(3520)$  のみが実験的発見を報告されている。ただし、この発見を報告している実験グループは 1 つのみであり、他の実験グループからは否定的な結果が報告されている。 $\Xi_{cc}$  の存在は未だ確定していない。本計算により、まず、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。次に、 $\Xi_{cc}$  の質量値を求め、3603(15)(16) MeV を得た。この値は、報告されている実験値 3520 MeV と有意に異なる。

る。本研究は、既存の実験報告値 3520 MeV が誤りであり、真の値は 100 MeV 程度高いと示唆する。また、 $\Xi_{cc}$ に加え、チャームクォークを 2つ及び3つ含む他の未発見バリオンに対する質量予言値を 2%の精度で決定した。

## 【2】 HPCI 戦略プログラム分野 5 における研究開発課題（青木、石塚、藏増、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 クォークの質量差を取り入れた大規模シミュレーションの実現を意味する。これにより、QCD の基本パラメータであるクォーク質量を高精度で決定することが可能になる。他方、マルチスケール化とは QCD を用いて核子を複数作ることによって核子間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者は青木、初田（理研）を中心とした 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9月28日に「京」コンピュータの共用が開始されて以降、ゲージ配位生成の本格計算を開始した。96<sup>4</sup>の格子サイズ、0.1 fmの格子間隔を採用し、DDHMC (Domain-Decomposed Hybrid Monte Carlo) アルゴリズムを用いて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。HMCアルゴリズムは人為的に導入された擬時間に対する分子動力学法を組み入れたモンテカルロ法の一つであり、格子QCD シミュレーションにおいて広く採用されている。DDHMC法では、4次元時空間格子を小領域に分割し、擬時間に対するハミルトン方程式を階層的に積分することによってアルゴリズムの効率化を図っている。熱平衡状態に達したことを確認した後、5 分子動力学時間（擬時間の単位）毎にゲージ配位を保存し、そのゲージ配位を用いてハドロン質量などの基本物理量の測定を並行して行っている。図2 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1%程度の統計誤差に到達していることがわかる。ここでは、クォーク質量 ( $m_u=m_d \neq m_s$ ) と格子間隔を決めるための3つの物理量として、 $\pi$ メソン質量 ( $m_\pi$ )、Kメソン質量 ( $m_K$ )、 $\Omega$ バリオン質量 ( $m_\Omega$ ) を採用している。そのため、 $m_\pi$  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、その補正は今後reweighting 法を用いて行う。

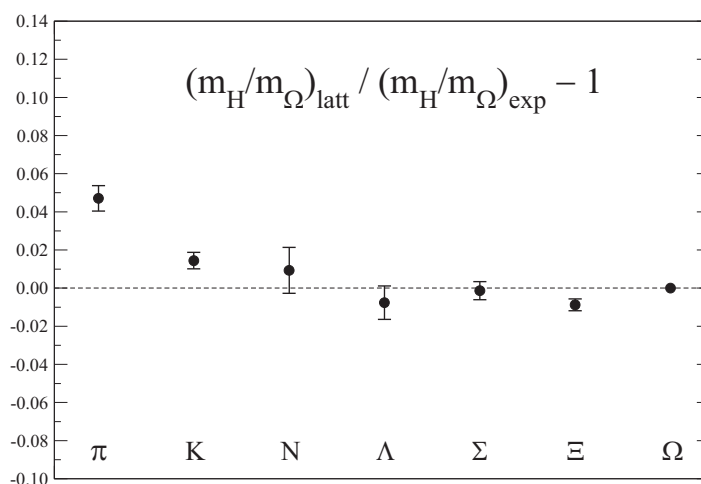


図 2 : ハドロンの質量と実験値との比較。

なお、本研究開発課題では、クォーク作用として smeared link を用いた Wilson-clover 作用を用いている。谷口はにより、clover 項の改良係数 csw が非摂動論的に決定されている（論文 5）。

### 【3】 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、宇川らは山崎（名古屋大）とともに 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た後、2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。ただし、これらは計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ物理的な値よりも重いクォーク質量で行った計算であるため、次のステップとしてクォークの真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー格子 QCD 計算への拡張を行った。その結果、クエンチ近似だけでなく 2+1 フレーバー QCD においてもヘリウム原子核と重陽子が束縛することが確認された（論文 4）。ただし、クォーク質量は依然として物理的な値よりも重く、 $m_\pi = 0.51 \text{ GeV}$  相当である。図 3 左は  ${}^4\text{He}$  原子核のエネルギーシフト  $\Delta E_L({}^4\text{He})$  の空間体積依存性を表している。ここで、エネルギーシフトは  ${}^4\text{He}$  原子核の基底状態と自由な 4

個の核子の質量との差  $\Delta E_L(^4\text{He})=E_L(^4\text{He})-4m_N$  で定義される。有限の空間体積 ( $L^3$ ) では、4 個の核子同士の散乱の効果も  $\Delta E_L(^4\text{He})$  に含まれるため、束縛エネルギーのみを取り出すためには、空間体積無限大極限 ( $1/L^3 \rightarrow 0$ ) への外挿が必要となる。星印は束縛エネルギーの実験結果を表しており、我々の計算結果も同程度の値を再現していることがわかる。図 3 右は重陽子のエネルギーシフト  $\Delta E_L(^3\text{S}_1)=E(^3\text{S}_1)-2m_N$  の空間体積依存性を表している。重陽子の場合、束縛エネルギーの計算結果が実験結果よりも 5 倍程度大きい。また、我々の計算では、実験的には束縛していないスピン一重項 ( $^1\text{S}_0$ ) チャンネルにおいても束縛状態が確認されており、これらの結果はクォーク質量が物理的な値よりも重いためではないかと推察している。今後クォーク質量を更に軽くして現実の値に近づけていくことが重要である。

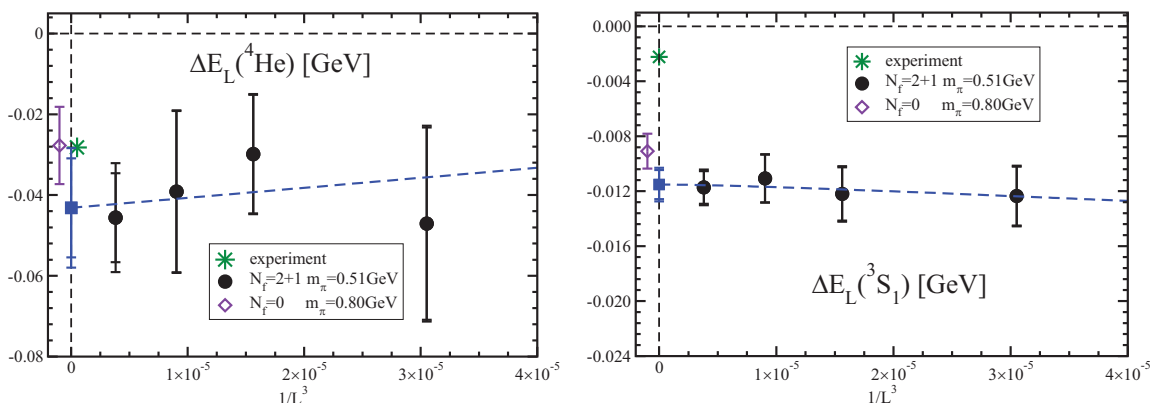


図 3 :  $L^3$  空間格子サイズにおける  $^4\text{He}$  原子核 (左図) と重陽子 (右図) のエネルギーシフト  $\Delta E_L$  の空間体積依存性。四角は空間体積無限大極限 ( $1/L^3 \rightarrow 0$ ) への外挿値、星印は束縛エネルギーの実験結果、白抜きダイヤはクエンチ近似の計算結果を表す。

#### 【4】 格子 QCD によるバリオン間相互作用の研究 (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。青木、石井、根村、佐々木は、理化学研究所の初田らと 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。その一連の研



究成果をレビューしたものが、論文 5 である。また、論文 6、7 では、斥力芯の起源を演算子積展開と摂動論的 QCD の繰り込み群という解析的な手法で研究し、格子 QCD の計算結果と比較している。論文 8 は、HAL QCD が用いてきた方法を非弾性散乱に拡張する方法を提案したものである。以下では、石井、根村、佐々木、及び青木の学生である山田の 2012 年度の研究成果を紹介する。

### (1) 負パリティセクタのハイペロン力・対称および反対称 LS 力

かねてよりの懸案であった flavor SU(3) 極限におけるハイペロン力の一般形について、二核子系の Okubo-Marshak の方法を拡張する事によって求める事に成功した。Octet-baryon の二体系は、flavor 規約表現で、8 表現が 2 度現れ、二粒子の交換に対して、対称な物(s)と反対称な物(a)に分類される。この二つをつなぐ、反対称 LS 力が二核子系との唯一の違いであった。同様に、flavor SU(3)が破れた状況下での一般形を求めた。ここでは、ハイペロンの結合チャンネルの off-diagonal 部分に二核子系では排除されていた形の項がたくさん生き残り、ポテンシャル逆構成の際にどのくらいまじめに取り扱うべきか悩んでいる。とりあえず、最初はこれらを見捨てて計算を進めるつもりである。これらの計算を実行するため、新型の contraction code の開発を行った。平成 25 年度の早期の段階で結果を出して、現実的な計算につなげていきたい。

### (2) 2+1 flavor QCD による核力

平成 22 年度から 23 年度にかけて開発した”時間依存型” Schrödinger-like eq. の方法は、バリオン 4 点関数の ground state saturation を必要としないため、小さな  $t$  でも安定してバリオン間ポテンシャルを計算できる方法である。PACS-CS のゲージ配位を用いた 2+1 flavor QCD の核力のデータに対して、統計を上げてこの方法を適用して再解析を行った。長距離における one pion exchange 極限を考慮するため、AV18 型の関数形を用いて、二つの中心力と一つのテンソル力の同時フィットを行った。ここでは実験的に周期境界の影響を取り込めるようなフィットを試してみた。滑らかにパラメトライズされたポテンシャルを使って求めた位相差は、引力的だが絶対値が実験値よりも遥かに小さかった(束縛状態は存在していない)。  $m_\pi=700, 570, 411$  MeV と変化させたが、この領域ではまだ実験値に向かって引力が強くなる傾向は見られていない(図 4、論文 9)。

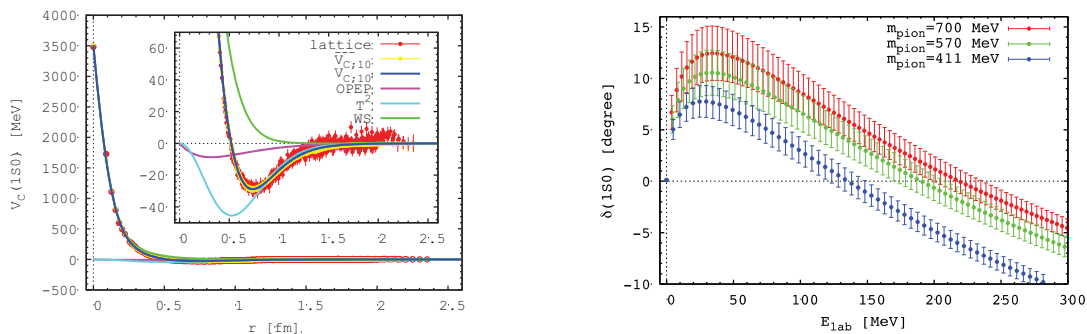


図 4：（左）2+1 flavor 格子 QCD で計算された核力 (spin-singlet 中心力) のフィットの結果 ( $m_\pi=570$  MeV)。(右) これを使った  $1S_0$  の散乱位相差 ( $m_\pi=411, 570, 700$  MeV)。

### (3) 格子 QCD で得られた核力ポテンシャルによる少数核子多体系の研究

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、Nambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数から得られた (一般化) 核力ポテンシャルを用いて散乱位相などの物理量を導出するための各種方法の確立および軽い原子核構造への適用のための準備を進めた。より具体的には、フレーバーSU(3)対称点で得られた核力ポテンシャルの偶パリティ成分 ( $1S_0$  および  $3S_1-3D_1$  状態に働く中心力およびテンソル力) を用いた  $4\text{He}$  原子核の少数多体問題を精密に解き、束縛状態が存在することを確認した (図 5)。この束縛状態の結合エネルギーは約 4.4 MeV (陽子間のクーロン力も同時に考慮して 4 体問題を解いた場合) もしくは約 5.1 MeV (クーロン力を考慮せず 4 体問題を解いた場合) であり、現実の  $4\text{He}$  に比べて非常に小さい。この結果は、既に行われているテンソル力を繰り込んだ中心力のみで 4 体問題を解いた近似計算と定性的に良く似た結果である。今回用いた核力ポテンシャルは  $\pi$  中間子に対応するハドロンの質量が約 469 MeV であり、クォーク質量は現実よりも重く、得られた核力ポテンシャルのテンソル力成分は現実の場合に比べて非常に弱いと考えられる。4 体問題を解いて得られた  $4\text{He}$  の基底状態における全軌道角運動量 ( $L=2$ ) の状態の期待値はわずか 1.3% (クーロン力有り) ないしは 1.4% (クーロン力無し) である。これまでの現象論的に決められた現実的核力に基づいて計算された  $4\text{He}$  の基底状態の  $L=2$  状態の期待値が 10%程度であることが知られているので、物理点上での核力ポテンシャルの計算が極めて重要であることを示している。



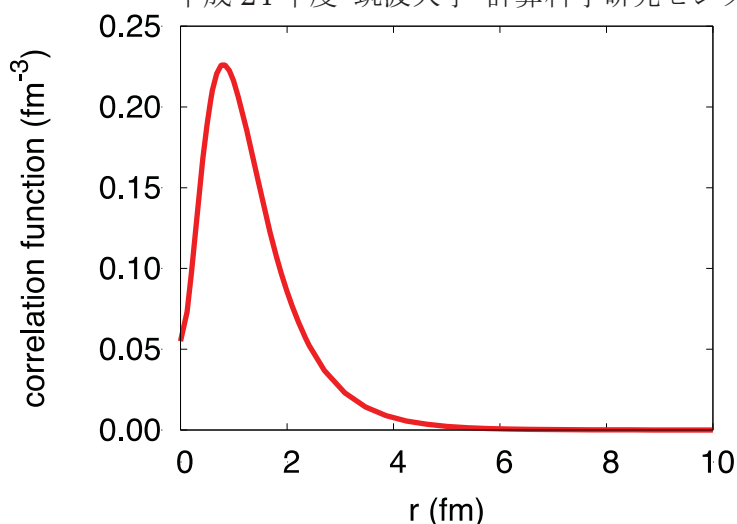


図 5：フレーバーSU(3)対称点での格子 QCD 計算から得られた核力ポテンシャルを用いて得られた  ${}^4\text{He}$  の基底状態における核子間距離  $r$  [fm] に対する相関関数。陽子間のクォークポテンシャルも考慮されている。

#### (4) 結合チャンネル手法を用いたバリオ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結合チャンネル Schrödinger 方程式に拡張しストレンジネスを含むバリオン 2 体系のポテンシャル行列を系統的に調べてきた。本年度は、バリオン間の近距離斥力の消失に伴い現れると期待されている H-dibaryon 状態に着目し、 $S=-2$  のバリオン間ポテンシャルを用いてこの状態に関する研究を行った。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、パイオン質量が 700 MeV、570 MeV、410 MeV 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ポテンシャルから計算された  $\Lambda\Lambda$  と  $N\Xi$  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束縛状態にあった H-dibaryon が共鳴状態に移り変わっていく様子を確認する事が出来た。今後はこの散乱位相差の誤差を評価し、H-dibaryon の様子を詳細に調べることを計画している。また、他の系についても解析をすすめ、束縛状態の有無などを調べようと考えている。

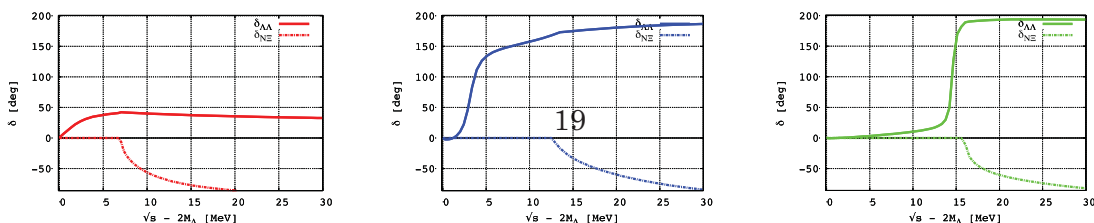
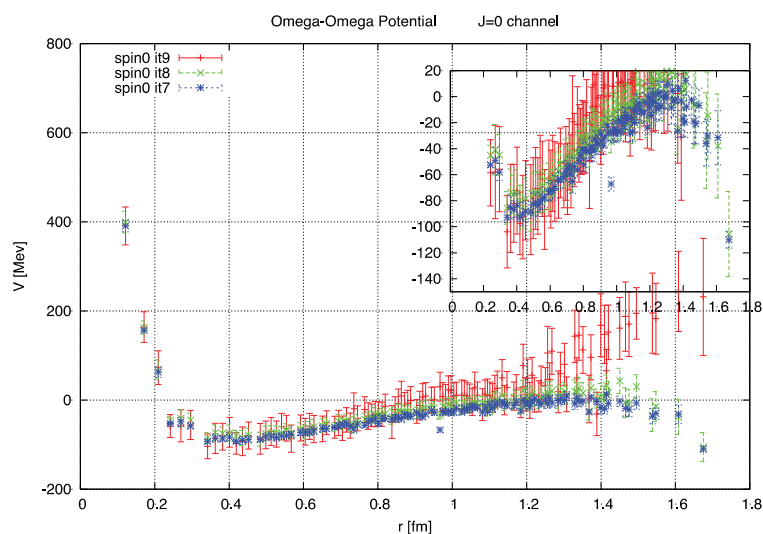


図 6 : Esb1 (左)、2 (中)、3 (右) における  $\Lambda\Lambda$  と  $N\Xi$  の散乱位相差。**(5)  $\Omega$ - $\Omega$ バリオオン間相互作用の研究**

$\Omega$ バリオオンは、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オンである。ストレンジネス  $S=-6$  にあたる  $\Omega$ - $\Omega$ 間のポテンシャルを HAL QCD Collaboration による核力ポテンシャルの導出方法を用いて計算した。フレーバー10重項の粒子間のポテンシャルの計算は今回が初めてである。今回は、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  $J=0$  の状態を計算した。計算には CP-PACS Collaboration 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 (パイオン質量 875 MeV に対応) のゲージ配位を用いた。結果は中心には斥力芯があり、中距離には引力ポケットがあり、束縛状態とは断言できないものの強い引力があることを示唆している (図 7)。

図 7 :  $J=0$  である  $\Omega$ - $\Omega$ 間のポテンシャル  $V$  [MeV]。横軸はバリオオン間の距離  $r$  [fm]。**【5】有限温度・有限密度 QCD の研究 (青木、金谷)**

金谷、青木らは、理化学研究所初田主任研究員、新潟大学江尻准教授、広島大学梅田准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。WHOT-QCD Collaboration のこれまでの主要成果をまとめて、論文 10 を発表した。

## (1) 固定格子間隔アプローチと T-integral 法による状態方程式の研究

平成 20 年度に開発した T-integral 法に基づく固定格子間隔アプローチは、様々な温度のシミュレーションを、一つの格子スケールで実行する方法である。特に、固定格子間隔アプローチでは、既存のゼロ温度配位を活用できるメリットがあり、計算時間を大幅に抑えつつ、精度の高い有限温度計算を遂行する可能性を拓いている。平成 20 年度にクエンチ近似による試験研究で方法としての有効性を確認し、平成 21 年度から、現実的な  $N_f=2+1$  でのシミュレーションを進めている。第一段階として  $N_f=2+1$  QCD の有限温度シミュレーションを実行し、u、d クォーク質量が現実より重い点ではあるが、ウィルソン型クォークとして初めて、 $N_f=2+1$  の状態方程式の計算に成功した。この研究では、CP-PACS+JLQCD グループによる  $N_f=2+1$  QCD の温度ゼロでの研究結果と公開されているゼロ温度ゲージ配位を利用することで、計算コストを大幅に削減した (図 8、論文 11)。また、固定格子間隔アプローチで生成された  $N_f=2+1$  QCD の配位、及び平成 20 年度の試験研究で生成されたクエンチ近似の配位を使って、固定格子間隔アプローチによる静的クォークの自由エネルギーを計算し、固定格子間隔法が自由エネルギーの研究においても利点があることを示した (図 9、論文 12)。現在、u、d クォーク質量を物理点まで下げた PACS-CS グループのゼロ温度配位を利用した、物理点での有限温度シミュレーションに向けて、準備を進めている。

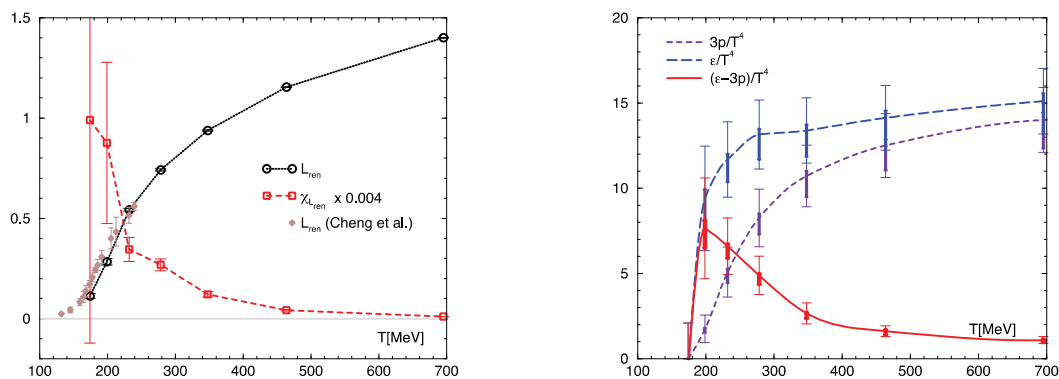


図 8：固定格子間隔アプローチによるウィルソン型クォークを用いた有限温度  $N_f=2+1$  QCD の研究 (論文 11)。(左図) くりこまれたポリアコフ ループとその感受率。U、d クォークは現実より重く、 $T \sim 200$  MeV あたりが有限温度クロスオーバー温度に相当する。比較のため、スタガード型クォークを用いた固定  $N_t$  アプローチの結果も示した。

(右図) 状態方程式。  $p$  はクォーク物質の圧力、  $\varepsilon$  はエネルギー密度、  $\varepsilon - 3p$  はトレス・アノーマリを表す。

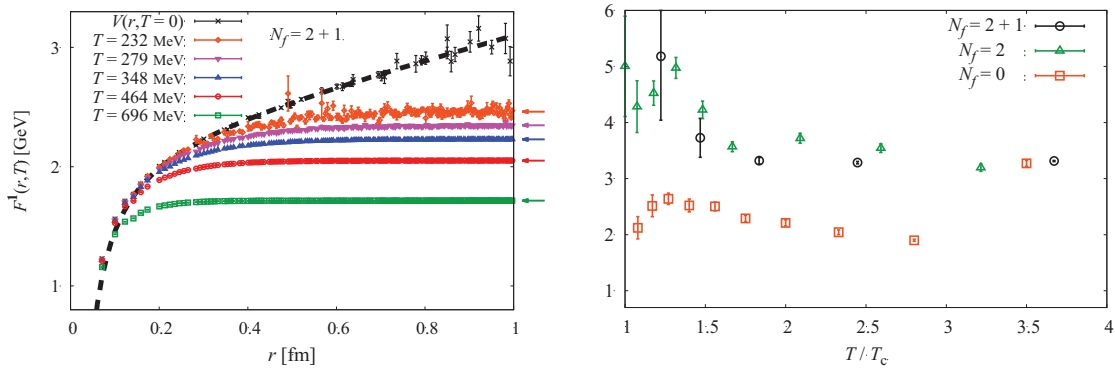


図 9: 固定格子間隔アプローチによる静的クォークの自由エネルギーの研究(論文 12)。

(左図)  $N_f=2+1$  QCD における  $QQ$ -bar カラー 1 重項チャンネルの静的クォーク自由エネルギー。ゼロ温度 ( $T=0$ ) の自由エネルギーはウィルソン・ループの測定により、有限温度の自由エネルギーは 2 個のポリアコフ・ループの相関から評価した。固定格子間隔アプローチでは、定数くりこみの調整無しに、自由エネルギーが短距離で温度に依らないことを直接示すことが出来る。右端の矢印は、ポリアコフ・ループ 1 個の期待値から期待される自由エネルギーの遠距離極限の漸近値。(右図) デバイ遮蔽質量  $m_D(T)$  のフレーバー数依存性。縦軸は  $m_D(T)/T$ 、横軸は  $T/T_c$ 。  $T_c$  は相転移温度で、  $N_f=2+1$  では 190 MeV を仮定した。

### (5) ヒストグラム法による QCD 有限温度・有限密度相転移の研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の性質や次数を判定するうえで、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、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(論文 10、13)。最初に、方法のテストとして、クォークが重い領域の QCD の相構造を、ポリアコフループなどの有効ポテンシャルの振る舞いから相構造を研究した。純ゲージ理論の有限温度 1 次相転移が、動的クォーク効果によりクロスオーバーに変わる臨界点の位置を、一般の化学ポテンシ

ラルの場合に計算した。クォークの有限密度位相項がどう振る舞うかを評価した結果、臨界点の位置に関しては極めて小さいことを示した。これにより、臨界点の位置を、クォーク質量と化学ポテンシャルの関数として計算した (図 10 左)。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。クォークが軽くなると、ポリアコフープは重要な役割を果たさなくなるので、クォーク部分の内部エネルギーに対応する、クォーク行列式そのものに関する有効ポテンシャルを研究する。N<sub>f</sub>=2 QCD の場合に位相項を無視した phase-quenched QCD シミュレーションを実行し、位相の効果を再重み付け法により評価した。まだプレリナリだが、化学ポテンシャルを大きくしてゆくと、クロスオーバー転移が 1 次転移に変わる点を示唆する結果を得た (図 10 右)。

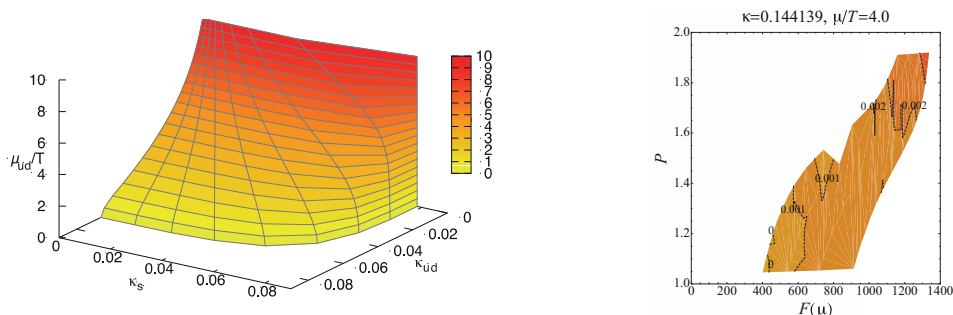


図 10 : ヒストグラム法による QCD の有限温度相構造の研究。(左) 重クォーク領域における N<sub>f</sub>=2+1 QCD の臨界面。u、d クォークにだけ化学ポテンシャル  $\mu_{ud}$  がかかり、s クォークにはかかっていない場合の結果。ホッピングパラメータ  $\kappa$  はクォーク質量の逆数にほぼ比例する量で、 $\kappa_s=0$  は  $m_s=\infty$ 、 $\kappa_{ud}=0$  は  $m_u=m_d=\infty$  に対応する。図の臨界面の向こう側は有限温度 QCD 転移が 1 次相転移で、手前はクロスオーバーになっている。(右) クォークが軽い N<sub>f</sub>=2 QCD の相構造の研究。有効ポテンシャルの 2 階微分を、物理量 P (プラケット) と F (クォークの自由エネルギーに関する量) の関数として示す (プレリナリ)。この量がゼロになる点で、クロスオーバーが 1 次相転移になる。

## 【6】有限密度 QCD (藏増)

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。しかし、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。そのような困難を克服すべく、藏増、宇川らは、武田 (金沢大) とともに符号問題の解析的研究を行った。具体的には、クォーク行列式を巻き付き展開法を用いて表すことに



より、符号問題の根源である複素位相を解析的に表現し、さらに重質量展開法を適用することによって位相の上限値が格子の空間体積に比例し、時間方向の伸張とともに指数関数的に抑制されることを見出した。我々は先ず小さな格子サイズを用いたテスト計算によってこの解析的結果を検証し、論文に取り纏めた（論文 14）。その後、次のステップとして数値的に 4 フレーバー 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 はあるクォーク質量領域において一次相転移を起こすことが期待されており、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。図 11 は「時間方向」の格子サイズを 4 に固定し、空間格子サイズを  $V=6^3 \sim 10^3$  まで変化させた場合の様々な物理量に対する感受率のピークの高さの  $V$  依存性を表している。その依存性が線形であることから、一次相転移と結論することができる。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。現在結果を論文に取り纏めている。

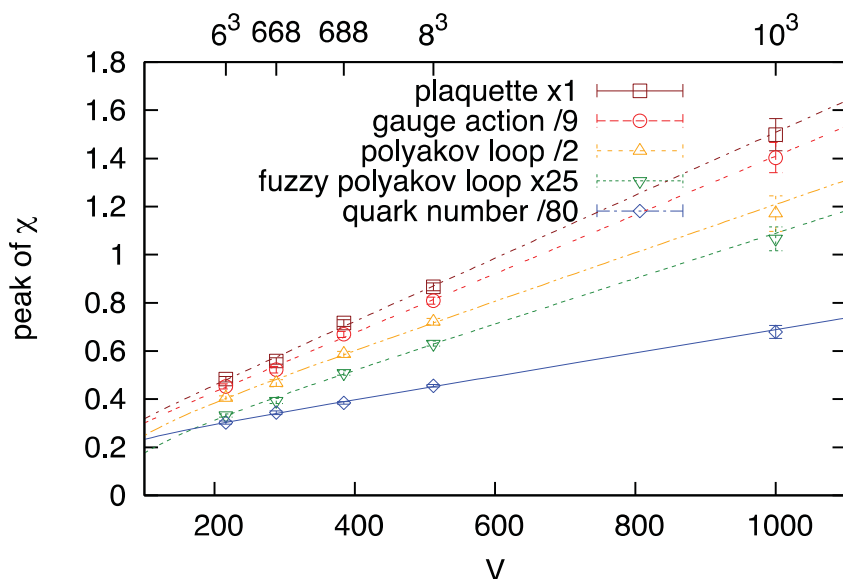


図 11：様々な物理量に対する感受率のピークの高さの空間格子サイズ ( $V$ ) 依存性。

### 【7】有限温度における $U(1)_A$ 対称性 (谷口)

谷口は、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を青木、深谷(大阪大)両氏と共に示した。具体的には、 $SU(2) \times SU(2)$  のカイラル対称性が高温で回復することを前提として、その対称性の回復した Ward-Takahashi 恒等

式をインプットとして、 $U(1)_A$  対称性の Ward-Takahashi 恒等式を調査し、 $U(1)_A$  対称性も熱力学的極限を正しく取れば、回復することを示した。有限温度において回復する対称性の種類は有限温度相転移の次数に強い影響を与えることから、今回の結果は  $N_f=2$  QCD の相転移の次数が一次であることを強く示唆している（論文 15）。

#### 【8】 Conformal 理論の研究（吉江）

Conformal 理論は、素粒子標準模型を越えた理論の候補であるテクニカラー理論との関連で興味深く、近年多くの研究がなされている。吉江は、岩崎筑波大名誉教授、中山 Caltech 教授、石川広島大准教授との共同研究で、格子数値シミュレーションによる conformal 理論の研究を行い、 $SU(N)$  ゲージ理論に  $N_f$  個のフェルミオンが結合した系で、 $N_f$  が conformal window 内にある場合の、理論の dynamics に関する新しい知見を得た。つまり、infrared cutoff を持つ "conformal 理論" では、1) フェルミオン質量の大小によって、閉じ込め相と "conformal 相" に分離されること、2) 2 相間の転移は、1 次転移であること、3) "conformal 相" でのメソン伝搬関数  $G(t)$  は、閉じ込め相での時間  $t$  に関する指数関数型 decay form  $c \cdot \exp(-mt)$  とは異なり、指数補正のある湯川型の decay form  $c' \cdot \exp(-m't)/t^\alpha$  であること、を示した（論文 16）。

#### 【9】 JLDG の改良と運用（吉江、浮田）

国内の格子 QCD 研究者の為のデータグリッド Japan Lattice Data Grid (JLDG) の利便性・可用性の向上のため、吉江は、建部筑波大准教授、天笠筑波大准教授、及び、JLDG 他拠点担当者と、以下の改良等をおこなった。1) 東京大学、名古屋大学拠点の立ち上げ、2) メタデータサーバと *gfarm* の更新、3) 筑波大 HA-PACS FE、WG 群への JLDG クライアント機能の組込み、4) KEK スパコンシステム A FE への JLDG クライアント機能の組込み、5) 管理・運用・保守支援業務の外部委託開始。また、HPCI 共用ストレージと JLDG の連携システム構築の為の、技術検討・システム設計をおこなった。

### 4. 教育

#### 【1】 学位論文

1. 斎藤華、博士論文「Finite density QCD in the heavy quark region (クォーク質量が大きい領域での有限密度 QCD)」

2. 崔在敦、修士論文「Phase diagram at finite temperature and chemical potential in strong coupling limit of lattice QCD (有限温度および化学ポテンシャルにおける格子 QCD の相図の強結合極限)」

## 【2】 非常勤講師・集中講義

1. 青木慎也、東京大学大学院総合文化研究科客員教授2012年4月から2014年3月まで(2年間)。2012年度は「格子ゲージ理論の基礎と応用」に関する講義を行った。
2. 青木慎也、集中講義「格子ゲージ理論入門」立教大学理学部、2012年6月7-9日

## 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「格子量子色力学による核力の研究」、第23回つくば賞(2012年10月17日)、茨城県科学技術振興財団
2. 青木慎也、初田哲男、石井理修「格子量子色力学に基づく核力の導出」、2012年度仁科記念賞(2012年12月6日)、仁科記念財団

### 【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』」、492,939,785円
2. 青木慎也(代表)、科学研究費補助金・新学術領域研究、平成20年度採択、「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」、5,900千円
3. 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」、3,200千円
4. 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」、1,000千円
5. 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

6. 藏増嘉伸（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(A)、平成22年度採択、「強い相互作用が織り成す物質形態のQCDによる統一的研究」、11,300千円
7. 藏増嘉伸（分担）、科学研究費補助金・新学術領域研究、平成20年度採択、「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」、5,100千円
8. 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
9. 吉江友照（分担）、科学研究費補助金・新学術領域研究、平成20年度採択、「分野横断アルゴリズムと計算機シミュレーション」、10,000千円
10. 谷口裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成22年度採択、「格子上の非摂動論的な繰り込みの実践」、650千円
11. 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」、1,200千円
12. 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」、1,170千円

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

1. Y. Nakamura, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, T. Sakurai, H. Tadano, Modified block BiCGSTAB for lattice QCD, Comp. Phys. Commun. 183, No.1 (2012) 34-37
2. PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, and T. Yoshie, 1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point, Phys. Rev. D 86, No.3 (2012) ref.034507, pp.1-6
3. 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.

- Yoshie, Charmed baryons at the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, arXiv:1301.4743
4. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, Helium nuclei, deuteron, and dineutron in 2+1 Flavor lattice QCD, Phys. Rev. D 86, No.7 (2012) ref.074514, pp.1-9
  5. Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Keiko Murano, Hidekatsu Nemura, Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration), Lattice QCD approach to Nuclear Physics, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, No.1 (2012) ref.01A105, pp.1-38
  6. Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, Toward an understanding of short distance repulsions among baryons in QCD – NBS wave functions and operator product expansion – , Prog. Theor. Phys. 128, No.6 (2012) 1269-1282
  7. S. Aoki, J. Balog, T. Doi, T. Inoue, P. Weisz, Short Distance Repulsion Among Baryons, Int. J. Mod. Phys. E22, No.5 (2013) ref.1330012, pp.1-16
  8. Sinya Aoki, Bruno Charron, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takashi Inoue, Noriyoshi Ishii, Construction of energy-independent potentials above inelastic thresholds in quantum field theories, Phys. Rev. D87, No.3 (2013) ref.34512, pp.1-10
  9. N. Ishii, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, K. Murano, H. Nemura and K. Sasaki (HAL QCD Collaboration), Hadron-Hadron Interactions from Imaginary-time Nambu-Bethe-Salpeter Wave Function on the Lattice, Phys. Lett. B712 (2012) 437-441
  10. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, and Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, Ab initio study of the thermodynamics of quantum chromodynamics on the lattice at zero and finite densities, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, No.1 (2012) ref.01A104, pp.1-35



11. T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Equation of state in 2 + 1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, Phys. Rev. D 85, No.9 (2012) ref.094508, pp.1-11
12. Y. Maezawa, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya and H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Application of fixed scale approach to static quark free energies in quenched and 2 + 1 flavor lattice QCD with improved Wilson quark action, Prog. Theor. Phys. 128, No.5 (2012) 955-970
13. S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Nakagawa, H. Ohno, H. Saito, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Numerical study of QCD phase diagram at high temperature and density by a histogram method, Cent. Eur. J. Phys. 10, No.6 (2012) 1322-1325
14. Shinji Takeda, Yoshinobu Kuramashi, and Akira Ukawa, Phase of quark determinant in lattice QCD with finite chemical potential, Phys. Rev. D85 No.9 (2012) ref.096008, pp.1-12
15. S. Aoki, H. Fukaya and Y. Taniguchi, Chiral symmetry restoration, the eigenvalue density of the Dirac operator, and the axial U(1) anomaly at finite temperature, Phys. Rev. D 86, No.11 (2012) ref.114512, pp.1-18.
16. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama and T. Yoshie, Conformal theories with an infrared cutoff, Phys. Rev. D87, No.7 (2013) ref.071503(R), pp.1-5

B) 査読無し論文

1. Y. Namekawa for PACS-CS collaboration, Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.139, pp.1-7
2. Y. Taniguchi, Non-perturbative evaluation of cSW for smeared link clover fermion with Iwasaki gauge action, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.236, pp.1-7

3. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, 2+1 flavor QCD result of nuclear forces, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems in press
4. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD, PoS (CD12) ref.025, to be appeared
5. 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 in press
6. H. Nemura for HAL QCD Collaboration, Lattice calculation of baryon-baryon interaction and few-body systems, Proceedings of the International Workshop on Strangeness Nuclear Physics, to be published in Genshikaku Kenkyu Suppl.
7. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.157, pp.1-7
8. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to S-wave hyperonic interactions from lattice QCD, Proceedings of the 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Few-Body Systems in press
9. T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), Thermodynamics in 2 + 1 flavor QCD with improved Wilson quarks by the fixed scale approach, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.074, pp.1-7
10. S. Ejiri, Y. Nakagawa, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, T. Hatsuda, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD collaboration), Probability distribution functions in the finite density lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.089, pp.1-7
11. Y. Nakagawa, S. Ejiri, S. Aoki, K. Kanaya, H. Saito, H. Ohno, T. Hatsuda, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), Phase structure of finite density QCD with a histogram method, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.092, pp.1-7

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature」 (招待講演) , Workshop 'New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions' (BNL, Upton, NY, USA, May 14-16, 2012)
2. Yoshinobu Kuramashi 「1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point」 (招待講演) , Workshop 'New Horizons for Lattice Computations with Chiral Fermions' (BNL, Upton, NY, USA, May 14-16, 2012)
3. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD」 (招待講演) , International Workshop on heavy quark hadrons at J-PARC of Technology 2012 (Tokyo, Japan, Jun. 18-22, 2012)
4. Sinya Aoki 「Hadron interactions in lattice QCD」 (招待講演) , Lattice Hadron Physics IV (CSSM, University of Adelaide, Adelaide, Australia, Jul. 2-4, 2012)
5. Yoshinobu Kuramashi 「Lattice QCD – From quarks to nuclei –」 (招待講演) , 10th International Meeting on High-Performance Computing for Computational Science (VECPAR2012) (Kobe University, Kobe, Jul. 17-20, 2012)
6. Sinya Aoki 「Hadron interactions from lattice QCD」 (招待講演) , INT Program 'Lattice QCD studies of excited resonances and multi-hadron systems' (INT, Seattle, USA, Jul. 30-Aug. 31, 2012)
7. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, 「Baryon-baryon interaction from lattice QCD」 (招待講演) , The 7th International Workshop on Chiral Dynamics (CD12) (Thomas Jefferson National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA, Aug. 6-10, 2012)

8. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration, eigenvalue density of Dirac operator and axial U(1) anomaly at finite temperature」 (招待講演) , Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory' (GGI, Florence, Italy, Aug. 27-Sep. 28, 2012)
9. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Strangeness S=-2 baryon-baryon systems from Lattice QCD」 (招待講演) , Tours2012, VIII Tours symposium on Nuclear physics and Astrophysics on Black Forest (Lenzkirch-Saig, Germany, Sep. 2-7, 2012)
10. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lattice Calculation of Hyperon Potential and Few-Body System」 , The 2nd Korea-Japan Workshop on Nuclear and Hadron Physics at J-PARC (Busan, Seoul, Sep. 24-25, 2012)
11. Sinya Aoki 「Hadron interactions from lattice QCD」 (招待講演) , Workshop 'New Frontiers in Lattice Gauge Theory' (GGI, Florence, Italy, Aug. 27-Sep. 28, 2012)
12. Sinya Aoki 「Computing Nuclear Force in Lattice Gauge Theory」 (招待講演) , QCD Structure I (Central China Normal University, Wuhan, China, Oct. 7-20, 2012)
13. K. Kanaya 「Finite density QCD with Wilson quarks using the histogram method」 (招待講演) , International workshop "QCD Structure I" (Wuhan, China, Oct. 7-20, 2012)
14. Sinya Aoki 「Hadron interaction from lattice QCD」 (招待講演) , KMI workshop on "Strong Coupling Gauge Theories in the LHC Perspective", (Sakata-Hirata Hall, Nagoya University, Nagoya, Japan, Dec. 4-7, 2012)
15. Sinya Aoki 「Quarks to Universe in computational science」 (招待講演) , Symposium "Quarks to Universe in Computational Science" (QUCS2012) (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec. 13-16, 2012)

16. Sinya Aoki 「Nuclear force in lattice QCD」 (招待講演) , KEK theory center workshop on 'Hadron physics with high-momentum hadron beams at J-PARC in 2013' (KEK Tsukuba Campus, Japan, Jan. 15-18, 2013)
17. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Baryon-baryon interactions in strangeness sector from lattice QCD」 (招待講演) , Workshop on Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics in 2013 (Tokai, Japan, Feb. 11-13, 2013)
18. K. Kanaya 「Finite density QCD on the lattice with a histogram method」 (招待講演) , International workshop on "Quarks, Gluons, and Hadronic Matter under Extreme Conditions" (St. Goar, Germany, Mar. 18, 2013)
19. K. Kanaya 「Finite density QCD with a histogram method」 (招待講演) , School and workshop "New Horizons in Lattice Field Theory" (Natal, Brazil, Mar. 25, 2013)

B) 一般講演

1. Sinya Aoki 「Chiral symmetry restoration and eigenvalue density of Dirac operator at finite temperature」 , The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Cairns Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
2. Y. Taniguchi 「Non-perturbative evaluation of csw for smeared link clover fermion with Iwasaki gauge action」 , The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) (Cairns Convention Centre, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
3. N. Ishii for HAL QCD Collaboration 「2+1 flavor QCD results of nuclear forces」 , The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) (Cairns Convention Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)



4. Y. Namekawa 「Charmed baryon spectroscopy on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」, The XXX International Symposium on Lattice Field Theory (Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
5. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD」, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2012) (Cairns Convention Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
6. N. Ishii for HAL QCD Collaboration 「2+1 flavor QCD results of nuclear forces」, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012)
7. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lambda N and Sigma N interactions from lattice QCD」, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, Japan, Aug. 20-25, 2012)
8. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to S-wave hyperonic interactions from lattice QCD」, The 20th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics (Fukuoka, JAPAN, Aug. 20-25, 2012)
9. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Lattice calculation of baryon-baryon interaction and few-body systems」, The International Workshop on Strangeness Nuclear Physics (Osaka, Japan, Aug. 27-29, 2012)
10. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to hyperonic interactions from lattice QCD」, HYP2012-XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics (Barcelona, Spain, Oct. 1-5, 2012)
11. Y. Namekawa 「Charmed baryons from lattice QCD」, Hadron Structure and Interactions 2012 (Osaka, Japan, Nov. 16-17, 2012)

12. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Coupled channel approach to  $S=-2$  baryon-baryon system in Lattice QCD」, International Symposium on "Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012)" (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec. 13-16, 2012)
13. M. Yamada 「Omega-Omega interaction on the Lattice」, Symposium:Quarks to Universe in Computational Science (QUCS 2012) (Nara New City Hall, Nara, Japan, Dec.13-16, 2012)
14. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Hyperonic nuclear forces from lattice QCD and toward an application to few-body systems」, YITP workshop Nuclear equation of state and hypernuclear physics (Kyoto, Japan, Jan. 4-31, 2013)
15. Y. Namekawa 「Charm quark physics from lattice QCD at the physical point」, Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics (Ibaraki, Japan, Feb. 11-13, 2013)
16. H. Nemura for HAL QCD Collaboration 「Hyperonic potentials from lattice QCD and toward an application to few-body problems」, The 5th GCOE International Symposium on "Weaving Science Web beyond Particle-Matter Hierarchy (Sendai, Japan, Mar. 4-6, 2013)

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 青木慎也「はじめに」(招待講演), 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会 (名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
2. 滑川裕介「Charm quark system on the physical point in 2+1 flavor lattice QCD」(招待講演), 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)

3. 金谷和至「Lattice QCD at finite T and  $\mu$  – updates from Lattice 2012」(招待講演), 基研研究会「熱場の量子論とその応用2012」(京都大学基礎物理学研究所, 京都, Aug. 22-24, 2012)
4. 藏増嘉伸「京コンピュータとHPCI戦略プログラム分野5」(招待講演), 日本物理学会2012年秋季大会理論核物理領域-素粒子論領域-宇宙線・宇宙物理領域合同シンポジウム「動き出した京コンピュータと素粒子・原子核・宇宙の計算物理」(京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
5. 青木慎也「HAL QCD」(招待講演), 第25回理論懇シンポジウム「計算宇宙物理学の新展開」(つくば国際会議場中ホール300, つくば, Dec. 22-24, 2012)
6. 藏増嘉伸「計算素粒子物理学のフロンティア」(招待講演), 日本物理学会第68回年次大会素粒子論領域-理論核物理領域-領域3-9-領域11-12合同シンポジウム「エクサスケールに向けて歩み出す計算物理学」(広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)

B) その他の発表

1. 石塚成人「Resonance on the lattice」, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
2. 佐々木健志 for HAL QCD collaboration 「Coupled Channel Approach to Baryon-Baryon Interactions in Lattice QCD」, 新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」クロスオーバー研究会(名古屋大学, 名古屋, Jul. 12-13, 2012)
3. 石井理修 for HAL QCD Collaboration 「PACS-CSゲージ配位を用いた2+1 flavor QCDによる核力ポテンシャル」, 日本物理学会2012年秋季大会(京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
4. 滑川裕介「物理点における2+1フレーバー格子フルQCDシミュレーションによるチャームバリオンの研究」, 日本物理学会2012年秋季大会(京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)

5. 佐々木健志 for HAL QCD collaboration 「格子QCDによるハイペロン間相互作用のクォーク質量依存性の研究」, 日本物理学会2012年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
6. 吉江友照「HEPnet-J/sc報告」, HEPnet-Jユーザー会 (九州大学, 福岡, Feb. 20-21, 2013)
7. 吉江友照「JLDGの現状と計画」, 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 (秋葉原, 東京, Mar. 5-6, 2013)
8. 佐々木健志 for HAL QCD collaboration 「格子QCDによるS=-2バリオン間相互作用のクォーク質量依存性の研究」, HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」シンポジウム (秋葉原, 東京, Mar. 5-6, 2013)
9. 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 (内幸町, 東京, Mar. 15-16, 2013)
10. 齋藤華「格子QCD シミュレーションにおける $\beta$ 関数の計算に関する研究」, 日本物理学会第68回年次大会 (広島大学東広島キャンパス, 東広島, Mar. 26-29, 2013)

(4) 著書、解説記事等

1. 藏増嘉伸「スーパーコンピュータ京と量子論の数値計算」パリティ2013年1月号丸善出版
2. 青木慎也、石井理修、初田哲男、根村英克「QCD による核力研究とその展開」日本物理学会誌2012年67巻11号
3. 青木慎也「2012 年ゴートン・ベル賞：石山智明氏、似鳥啓吾氏、牧野淳一郎氏」日本物理学会誌2013年68巻3号
4. 山田信博監修、「科学の芽」賞実行委員会編 (岩崎洋一, 白川秀樹, 金谷和至他著)「もっと知りたい!『科学の芽』の世界part 3」筑波大学出版会 (2012)

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. International Lattice Data Grid (ILDG)

<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>

4. 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. 青木慎也 他、新学術領域「素核宇宙融合」×「新ハドロン」、HPCI戦略プログラム分野5共催クロスオーバー研究会「多彩なフレーバーで探る新しいハドロン存在形態の包括的件研究」共催、2012年7月12、13日、名古屋大学坂田・平田ホール、名古屋（参加者75名）
2. 青木慎也 他、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」/HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」/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-、2012年7月27日-31日、京都大学基礎物理学研究所、京都（参加者61名）
3. 青木慎也 他、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」/HPCI戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」  
Symposium: 'Quarks to Universe in Computational Sciences (QUCS 2012)', 主催、2012年12月13日-16日、奈良新公会堂、奈良（参加者101名）

#### 9. 管理・運営

1. 青木慎也、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、蔵増嘉伸、計算機システム運用委員会委員

#### 10. 社会貢献・国際貢献

なし

11. その他

なし