

I. 素粒子理論グループ

教授 青木 慎也、石橋 延幸、宇川 彰、金谷 和至

准教授 石塚 成人、藏増 嘉伸、八田 佳孝、吉江 友照、石井 理修、
根村 英克

講師 谷口 裕介

助教 佐藤 勇二、毛利 健司

研究員 浮田 尚哉、佐々木 健志、滑川 裕介、吉田 信介

大学院生 (7名)

【人事異動】

吉田信介氏(新潟大学研究員)が研究員として着任した(2012年4月1日)。

青木慎也教授が京都大学基礎物理学研究所教授として転出した(2013年3月31日)。八田佳孝准教授が京都大学基礎物理学研究所准教授として転出した(2013年3月31日)。

藏増嘉伸准教授が教授に昇任した(2013年4月1日)。吉田信介研究員が理化学研究所仁科加速器研究センター研究員として転出した(2013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、超弦理論、高エネルギー・ハドロン物理学の、3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。

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。

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

高エネルギー・ハドロン物理の分野では、相対論的重イオン衝突後の膨張する系での熱平衡化の研究、核子スピンのツイスト解析の研究、 $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論において期待されるジェット構造の研究、さらに、LHC の陽子衝突実験で測定されたジェット抑制イベントの断面積に対する理論計算を行った。

【1】 格子場の理論

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

(1) PACS-CS Collaboration の活動

計算科学研究センターでは、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 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られる。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 π^+ メソン質量、 K^0 メソン質量、 K^+ メソン質量、 Ω 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。

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。 Ξ_{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、 Ξ_{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。

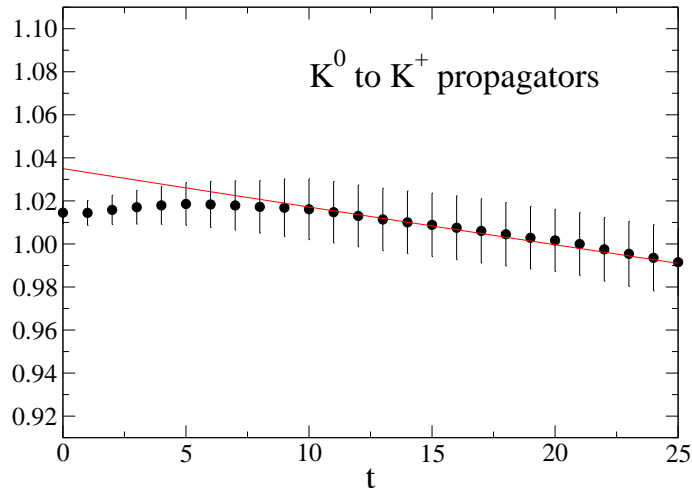


図 1: K^0 メソンと K^+ メソンの伝播関数の比。赤線は実験から期待される傾き。

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、 Ξ_{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

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」の責任者を蔵増が務めている。本課題が目指すものは、格子 QCD 計算の微細化とマルチスケール化を鍵とする新しい展開である。微細化とは、電磁相互作用や up と down クォークの質量差を取り入れた大規模シミュレーションの実現を意味する。これにより、QCD の基本パラメータであるクォーク質量を高精度で決定することが可能になる。他方、マルチスケール化とは QCD を用いて核子を複数作ることによって核子間の有効相互作用を調べたり、更には核子の束縛状態である原子核の直接構成を行うことを意味する。前者は HAL QCD Collaboration が取り組んでいるアプローチであり、後者は蔵増、宇川を中心としたグループによって推進されている（後述）。

格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定

平成 24 年 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。96⁴ 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、 π メソン質量(m_π)、 K メソン質量(m_K)、 Ω バリオン質量(m_Ω)を採用している。そのため、 m_π と m_K に対しては更に数%程度の実験値へのチューニングが必要であることが見てとれるが、その補正は今後 reweighting 法と呼ばれる計算手法を用いて行う。

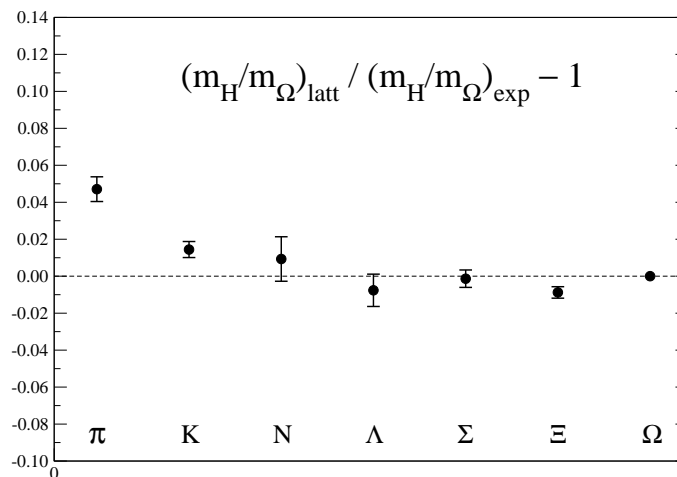


図 2: ハドロン質量と実験値との比較。

改良係数の決定

上記研究開発課題では、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、clover 項の改良係数 c_{SW} を非摂動的に決定した(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、宇川らは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(論文6)、2核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した(論文7)。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8)。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、 $m_\pi = 0.51$ 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 $\Delta E_L(^4\text{He}) = E_{^4\text{He}} - 4m_N$ 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 $\Delta E_L(^3S_1) = E_{^3S_1} - 2m_N$ 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 (1S_0) チャネルにおいても束縛状態が確認されており、これら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。

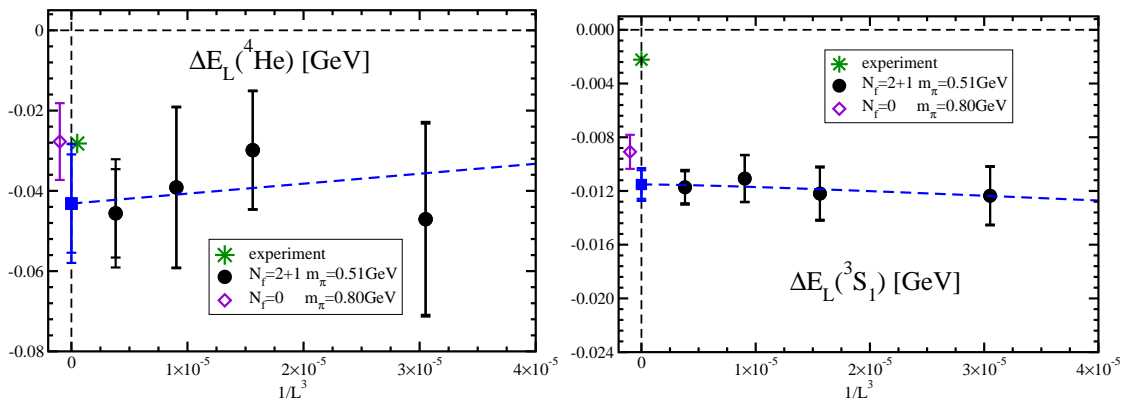


図 3: L^3 空間格子サイズにおける ^4He 原子核 (左図) と重陽子 (右図) のエネルギーシフト ΔE_L の空間体積依存性。四角に空間体積無限大極限 ($1/L^3 \rightarrow 0$) への外挿値、星印は束縛エネルギーの実験結果、白抜きダイヤはクエンチ近似の計算結果を表す。

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

2 つの核子間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に斥力芯と呼ばれる近距離での斥力、を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の 1 つである。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 9 である。また、論文 10,11 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 12 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。

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) が破れた世界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、最初はこれらを無視し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+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む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)。 $m(\text{pion})=700, 570, 411 \text{ MeV}$ 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 13, 14, 15)。

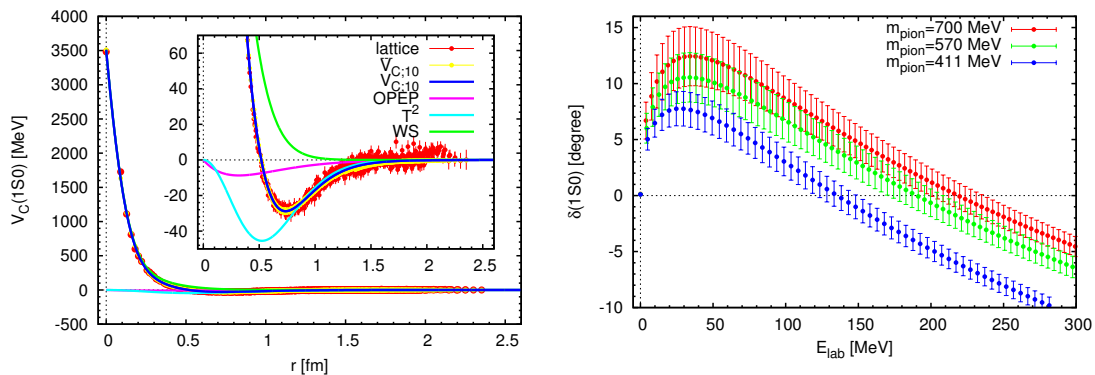


図 4: (左) 2+1 flavor 格子 QCD で計算された核力 (spin-singlet 中心力) のフィットの結果 ($m_\pi \simeq 570 \text{ MeV}$) (右) これを使った 1S_0 の散乱位相差 ($m_\pi \simeq 411, 570, 700 \text{ MeV}$)。

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 ^4He 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、論文17)。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 ^4He 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 π 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 ^4He 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 ^4He 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。

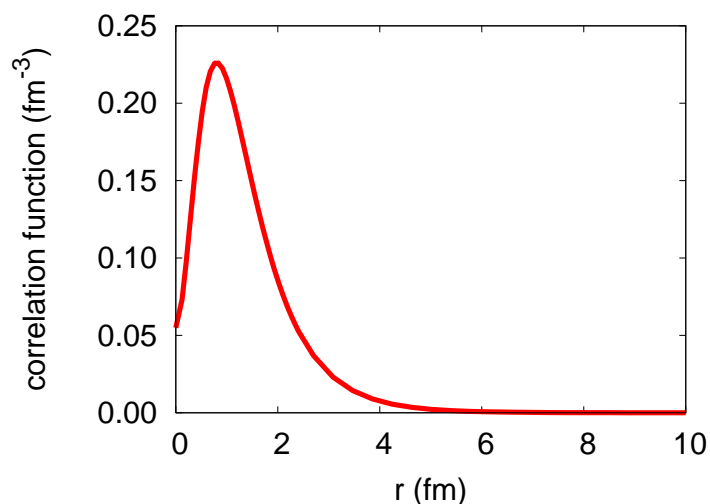


図 5: フレーバSU(3)対称点での格子QCD計算から得られた核力ポテンシャルを用いて得られた ^4He の基底状態における核子間距離 $r(\text{fm})$ に対する相関関数。陽子間のクーロンポテンシャルも考慮されている。

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

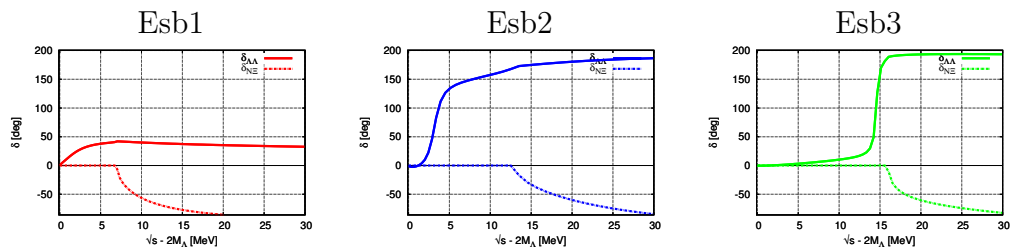


図 6: Esb1, 2, 3 における $\Lambda\Lambda$ と $N\Xi$ の散乱位相差

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 (論文 18, 19)。

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 700MeV, 570MeV, 410MeV のに対応する 3 つの異なるクォーク質量について結果の解析を行った。これらをそれぞれ Esb1, 2, 3 と呼ぶことにし、SU(3) 対称性の破れもこの順に大きくなっている事に注意する。

図 6 は、準備段階ではあるが、Esb1, 2, 3 のゲージ配位により得られた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。

Ω - Ω バリオン間相互作用の研究

Ω バリオンは、クォーク模型の分類におけるフレーバー 10 重項のなかで唯一強い相互作用で安定なバリオンである。ストレンジネス $S = -6$ にあたる Ω - Ω 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)。

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

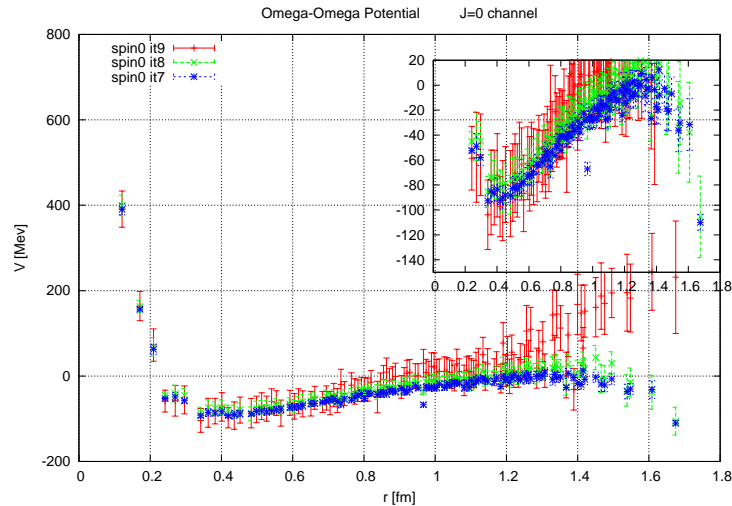


図 7: $J = 0$ である Ω - Ω 間のポテンシャル V [MeV]。横軸はバリオン間の距離 r [fm]。

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 20 を発表した。

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、Wilson 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 21)。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 22)。

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 (論文 23)。

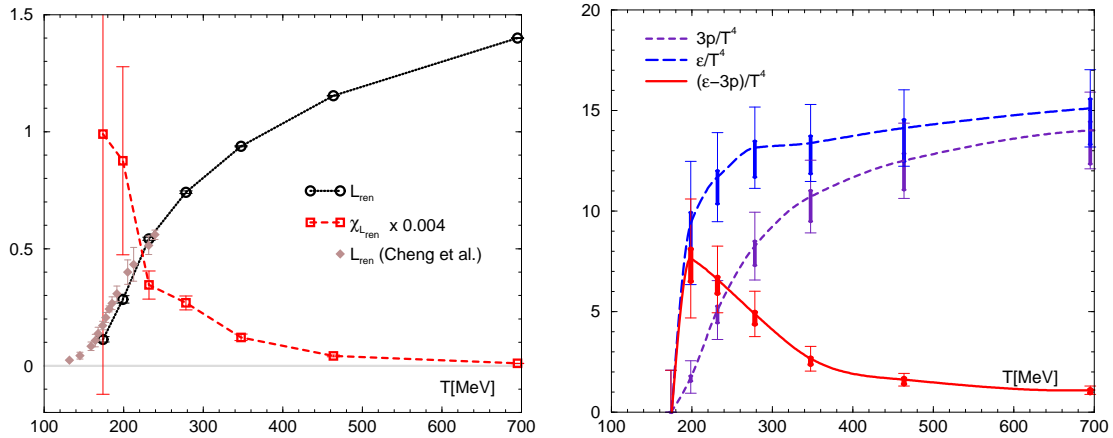


図 8: 固定格子間隔アプローチによるウィルソン型クォークを用いた有限温度 $N_f = 2 + 1$ QCD の研究 (論文 21)。 (左図) くりこまれたポリアコフループとその感受率。u,d クォークは現実より重く、 $T \sim 200$ MeV あたりが有限温度クロスオーバー温度に相当する。比較のため、スタガード型クォークを用いた固定 N_t アプローチの結果も示した。 (右図) 状態方程式。 p はクォーク物質の圧力、 ϵ はエネルギー密度、 $\epsilon - 3p$ はトレース・アノマリを表す。

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 20,24)。

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ャ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、論文 25)。

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、ポリアコフル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。 $N_F = 2$ 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。まだプレリミナリだが、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、論文 26)。

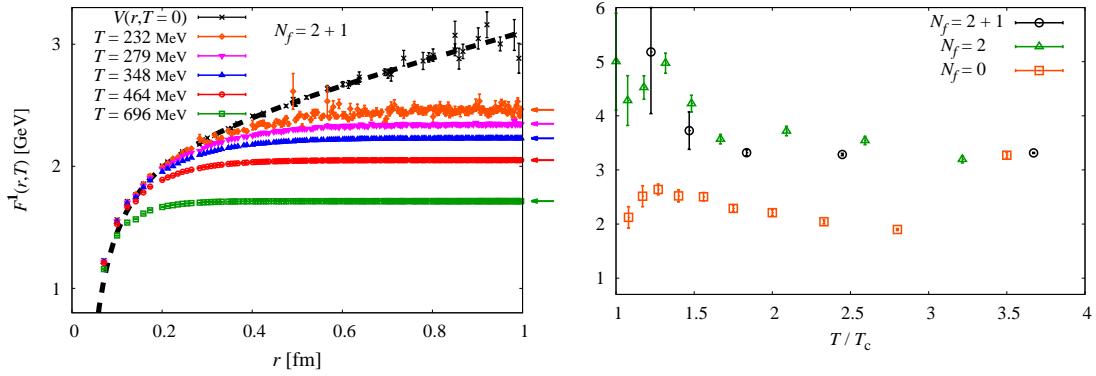


図 9: 固定格子間隔アプローチによる静的クォークの自由エネルギーの研究 (論文 22)。 (左図) $N_f = 2+1$ QCD における $Q\bar{Q}$ カラー 1 重項チャンネルの静的クォーク自由エネルギー。ゼロ温度 ($T = 0$) の自由エネルギーはウィルソン・ループの測定により、有限温度の自由エネルギーは 2 個のポリアコフ・ループの相関から評価した。固定格子間隔アプローチでは、定数くりこみの調整無しに、自由エネルギーが短距離で温度に依らないことを直接示すことが出来る。右端の矢印は、ポリアコフ・ループ 1 個の期待値から期待される自由エネルギーの遠距離極限の漸近値。 (右図) 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 190MeV を仮定した。

(6) 有限密度 QCD

有限密度 QCD 研究のためには、非ゼロ化学ポテンシャル領域での格子 QCD 計算が必要となる。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、宇川、藏増らは、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 27)。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。

(7) 有限温度における $U(1)_A$ 対称性

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

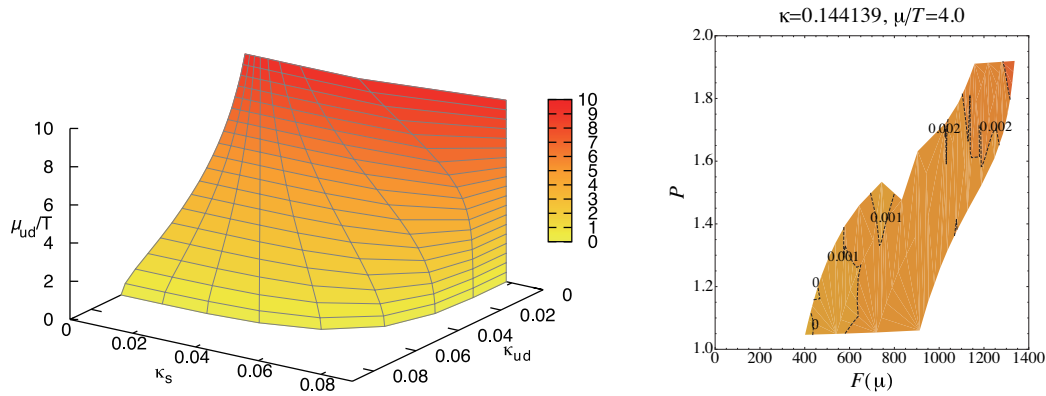


図 10: ヒストグラム法による QCD の有限温度相構造の研究。(左) 重クォーク領域における $N_f = 2+1$ QCD の臨界面 (論文 25)。 u, d クォークにだけ化学ポテンシャル μ_{ud} がかり、 s クォークにはかかっていない場合の結果。 ホッピングパラメータ κ はクォーク質量の逆数にほぼ比例する量で、 $\kappa_s = 0$ は $m_s = \infty$ 、 $\kappa_{ud} = 0$ は $m_u = m_d = \infty$ に対応する。 図の臨界面の向こう側は有限温度 QCD 転移が 1 次相転移で、手前はクロスオーバーになっている。(右) クォークが軽い $N_f = 2$ QCD の相構造の研究 (論文 26)。 有効ポテンシャルの 2 階微分を、物理量 P (ブラケット) 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。

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 (大阪大学) 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 28)。

(8) Conformal 理論の研究

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 $c \exp(-mt)$ とは異なり、指数補正のある湯川型の decay form $\tilde{c} \exp(-\tilde{m}t)/t^\alpha$ であることを示した (論文 29)。

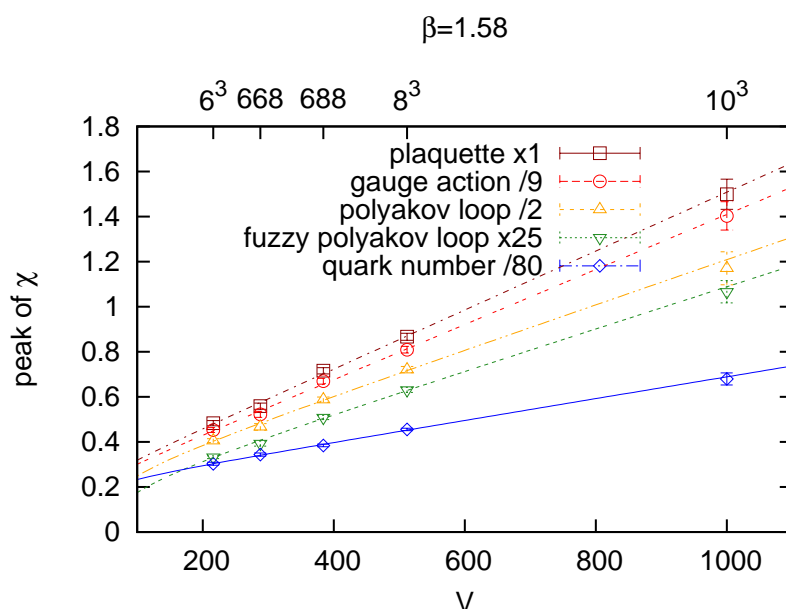


図 11: 様々な物理量に対する感受率のピークの高さの空間格子サイズ (V) 依存性。

(9) JLDG の改良と運用

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み込み、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み込み、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。

【 2 】 超弦理論

(石橋 延幸、毛利 健司、佐藤 勇二)

(1) 弦の場の理論

弦の場の理論は、弦理論を第二量子化することにより非摂動的な定義を与えようという試みである。石橋は村上(岡山光量子研)とともに、この理論について解説する教科書を著した(著書 1)。

(2) 弦の場の理論におけるゲージ不変な観測量

Witten 型の弦の場の理論においては、近年様々な古典解が見つかっており、それらの性質に関する研究が活発に行われている。古典解の性質を調べる際に最も有効なのは、ゲージ不変な観測量であるエネルギーと”gauge invariant observable”と呼ばれる量を計算することである。エネルギーの計算は弦の場 3 個の積の計

算を含んだ一般には複雑なものになるが、”gauge invariant observable”の計算は多くの場合非常に容易である。

馬場と石橋は、弦の場の理論のエネルギーが”gauge invariant observable”の一種を用いて表されることを示した。また、この関係を用いてこれまでエネルギーが計算されていなかった古典解のエネルギーを求めた（論文 30）。

(3) 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 / ウィルソンループ

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での maximally helicity violating (MHV) 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 MHV 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佐藤らは、このような極小曲面が等質サイン・ゴールドン模型と呼ばれる 2 次元可積分模型の熱力学的ベータ仮説方程式で記述されることを示した。また、その結果および g -関数（境界エントロピー）と Y -関数（スペクトルパラメタにより拡張された運動量の複比）の関係を用いることにより、運動量が 2 次元空間に制限される場合に散乱振幅 / ウィルソンループを正多角形ウィルソンループ周りで解析的に評価する方法を定式化した。

佐藤は初田（東京工業大学 / DESY）、伊藤（東京工業大学）と共に、境界のある minimal 戸田理論の反射因子や W minimal 模型の相関関数を用いることにより、運動量が 3 次元空間に制限される場合にも、このような強結合散乱振幅 / ウィルソンループが正多角形ウィルソンループ周りで解析的に評価できることを示した。また、この結果に基づき 6・7 点振幅の主要次数の展開式を具体的に導いた（論文 31,32）。

【 3 】 高エネルギー・ハドロン物理

（八田 佳孝、吉田 信介）

(1) 場の理論の非平衡現象

相対論的重イオン衝突で作られた膨張する系がいかにして熱平衡に達するかはクォークグルオンプラズマ物理の最重要問題の 1 つである。八田と西山は $O(N)$ スカラー理論に対して 2 粒子既約ポテンシャルを large- N_c の Next-to-leading order までとりいれて計算し、これをもとに系の膨張する座標系での非平衡発展を背景場を取り入れて議論した。これにより、強結合領域では熱平衡分布（指数分布）が実現されることが初めて膨張形で示された（論文 33）。

(2) 核子スピンのツイスト解析

近年の理論発展により、核子のスピン 2 分の 1 をクォークとグルオンのヘリシティと軌道角運動量にゲージ不変に完全分解することが可能になった。八田と吉田はこの分解がツイスト 3 の一般化されたパートン分布関数と関係していることを示し、正準な軌道角運動量密度のツイスト構造を明らかにした（論文

34)。また、横偏極のスピンに対するグルオンヘリシティの寄与を解析し、ツイスト解析を行うとともに、横偏極に対してはローレンツ系に依存しない分解が不可能であることを示した(論文 35)。

(3) AdS/CFT によるジェットの解析

八田らは $\mathcal{N} = 4$ 超対称ヤンミルズ理論において、結合定数が小さい領域から大きい領域に移行する際にジェットの構造がどう変化するかを考察した(論文 36)。弱結合では摂動論を用い、破碎関数を調べることでジェット内のエネルギー分布を議論した。強結合では AdS/CFT 対応を用い、ジェットに対する深非弾性散乱を解析することによりジェットの内部構造を調べた。

(4) LHC でのジェットの抑制

LHC の ATLAS 実験で前方と後方でジェットを測定し、かつそれらの間に 20 GeV 以上のジェットがないという制約を課したイベントの断面積が測られた。このような事象を解析するためには摂動論をもちいたエネルギーの流れの計算が重要である。八田らは nonglobal logarithm の効果を取り入れてこの条件のもとで断面積を計算し、実験結果をよく再現することに成功した(論文 37)。

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. Yoshié, 1+1+1 flavor QCD+QED simulation at the physical point, *Phys. Rev. D* 86, No.3 (2012) ref.034507, pp.1-6
3. 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
4. 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
5. Y. Taniguchi, Non-perturbative evaluation of c_{sw} for smeared link clover fermion with Iwasaki gauge action, *PoS (LATTICE 2012)* (2012) ref.236, pp.1-7

6. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Helium nuclei in quenched lattice QCD, Phys. Rev. D 81, No.11 (2010) ref.111504(R), pp.1-4
7. T. Yamazaki, Y. Kuramashi, and A. Ukawa for PACS-CS Collaboration, Two-nucleon bound states in quenched lattice QCD, Phys. Rev. D 84, No.5 (2011) ref.054506, pp.1-14
8. 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
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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
14. 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
15. N. Ishii for HAL QCD Collaboration, Baryon-baryon Interactions from Lattice QCD, PoS (CD12) ref.025, to be appeared
16. 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

17. 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.
18. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.157, pp.1-7
19. 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
20. 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
21. 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
22. 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
23. 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
24. 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
25. 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
26. 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

27. 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
28. 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.
29. 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
30. T. Baba and N. Ishibashi, Energy from the gauge invariant observables, JHEP 1304 (2013) 050
31. Yasuyuki Hatsuda, Katsushi Ito and Yuji Satoh, Null-polygonal minimal surfaces in AdS_4 from perturbed W minimal models, JHEP 1302 (2013) 067
32. Yuji Satoh, Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability, International Journal of Modern Physics: Conference Series 21 (2013) pp.1-21
33. Y. Hatta and A. Nishiyama, Nonequilibrium 2PI evolution of the $O(N)$ model with longitudinal expansion, Phys. Rev. D86 (2012) 076002, pp.1-8
34. Y. Hatta and S. Yoshida, Twist analysis of the nucleon spin in QCD, JHEP1210 (2012) 080, pp.1-15
35. Y. Hatta, K. Tanaka and S. Yoshida, Twist-three relations of gluonic correlators for the transversely polarized nucleon, JHEP1302 (2013) 003, pp.1-15
36. Y. Hatta, E. Iancu, A.H.Mueller, and D.N. Triantafyllopoulos, Jet evolution at weak and strong coupling, JHEP1212 (2012) 114, pp.1-52
37. Y. Hatta, C. Marquet, C. Royon, G. Soyez, T. Ueda and D. Werder, A QCD description of the ATLAS jet veto measurement Phys. Rev. D87 (2013) 054016, pp.1-9
38. Y. Hatta, Hard processes in AdS/CFT, Int. J. Mod. Phys. A3&4, (2013) 1340003, pp.1-12

著書・総説等

1. 石橋延幸、村上公一
「弦の場の理論-弦理論のより深い理解のために」 サイエンス社

2. 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
3. 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
4. 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
5. 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)

学位論文

[博士論文]

1. 齋藤 華
「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)」

[修士論文]

1. 崔 在敦
「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)」

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、集中広義「格子ゲージ理論入門」立教大学 理学部、2012年6月7-9日

研究成果発表（講演）

[国際会議]

1. Y. Hatta, 「Hard processes in AdS/CFT」(招待講演),
Progress in quantum field theory and string theory (Osaka City University, Osaka, Japan, Apr. 3-7, 2012)
2. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability」(招待講演),
International conference on Progress in Quantum Field Theory and String Theory (Osaka City University, Osaka, Japan, Apr. 3 - 7, 2012)
3. 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)
4. 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)
5. 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)
6. 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)
7. Y. Taniguchi 「Non-perturbative evaluation of c_{SW} 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)
8. 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)
9. 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)

10. K. Sasaki for HAL QCD Collaboration 「Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD」,
The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2013)
(Cairns Convention Center, Cairns, Australia, Jun. 24-29, 2012)
11. Yuji Satoh 「Conformal/supersymmetric interfaces in string theory」(招待講演),
CQeST-IEU Focus program on Finite-size Technology in Low Dimensional
Quantum System (VI) (Seoul, South Korea, Jun. 24-Jul. 9, 2012)
12. Sinya Aoki 「Hadron interactions in lattice QCD」(招待講演),
Lattice Hadron Physics IV (CSSM, University of Adelaide, Adelaide, Aus-
tralia, Jul. 2-4, 2012)
13. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable sys-
tems」(招待講演),
APCTP-CQeST-IEU Workshop on Quantum Integrability and its Applica-
tions (Seogwipo, Jeju Island, South Korea, Jul. 7-13, 2012)
14. Yoshinobu Kuramashi 「Lattice QCD – From quarks to nuclei –」(招待講
演),
10th International Meeting on High-Performance Computing for Computa-
tional Science (VECPAR2012) (Kobe University, Kobe, Jul. 17-20, 2012)
15. 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)
16. 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 Jeffer-
son National Accelerator Facility, Newport News, Virginia, USA, Aug. 6-10,
2012)
17. 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)
18. 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)
19. 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)

20. 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)
21. 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)
22. 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)
23. 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)
24. 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)
25. 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)
26. 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)
27. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable systems」(招待講演),
Yukawa International Seminar (YKIS) 2012 "From Gravity to Strong Coupling Physics" (YITP, Kyoto, Japan, Oct. 15-19, 2012)
28. Nobuyuki Ishibashi 「Energy from the Gauge Invariant Observables」(招待講演),
String Field Theory and Related Aspects V, SFT 2012 (The Israel Institute for Advanced Studies, Jerusalem, Israel, Oct. 28-Nov. 1, 2012)

29. 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)
30. Y. Hatta, 「Fragmentation in AdS/CFT」,
Workshop on fragmentation functions and QCD 2012 (RIKEN, Wako, Nov. 9-11, 2012)
31. Y. Namekawa 「Charmed baryons from lattice QCD」,
Hadron Structure and Interactions 2012 (Osaka, Japan, Nov. 16-17, 2012)
32. 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)
33. Yuji Satoh 「Gluon scattering amplitudes from gauge/string duality and integrability」(招待講演),
Light-Cone Physics: Hadronic and Particle Physics (University of Delhi, Delhi, India, Dec. 10-15, 2012)
34. 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)
35. 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)
36. 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)
37. 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)
38. 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)
39. 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)

40. 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)
41. 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)
42. 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)
43. Y. Hatta, 「Resummation of nonglobal logarithms at finite N_c 」,
Kick-off meeting of 'Brain circulation program' (Brookhaven National Laboratory, New York, USA, Mar. 21, 2013)
44. 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)

[国内学会、研究会]

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. 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)
3. 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)
4. 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)
5. 佐藤 勇二 「On supersymmetric interfaces in string theory」,
基礎研究会「場の理論と弦理論」 (京都大学基礎物理学研究所, 京都, Jul. 23-27, 2012)

6. 馬場 隆行 「Relevant deformation 解のエネルギーの計算」,
基研研究会「場の理論と弦理論」(京都大学基礎物理学研究所, 京都, Jul. 23-27,
2012)
7. 金谷 和至 「Lattice QCD at finite T and μ – 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)
8. 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)
9. 八田 佳孝 「核子スピンのツイスト解析」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
10. 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)
11. 佐藤 勇二 「On supersymmetric interfaces in string theory」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
12. 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)
13. 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)
14. 馬場 隆行 「Relevant deformation 解を用いたエネルギーの計算」,
日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都, Sep. 11-14, 2012)
15. 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)
16. 佐藤 勇二 「Gluon scattering amplitudes and two-dimensional integrable sys-
tems」(招待講演),
研究集会「場の数理とトポロジー」(信州大学, 松本, Feb. 6-8, 2013)
17. 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)

18. 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)
19. 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)
20. 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)
21. 佐藤 勇二 「Analytic expansion of MHV amplitude at strong coupling」,
日露共同研究ミニワークショップ(ヴィアーレ大阪・大阪科学技術センター, 大阪, Mar. 23-25, 2013)
22. 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)
23. 佐藤 勇二 「Null-polygonal minimal surfaces in AdS_4 from perturbed W minimal models」,
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)
24. 吉田 信介 「シングルスピン非対称性における 3 グルーオン相関関数の研究」(招待講演),
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)
25. 齋藤 華 「格子 QCD シミュレーションにおける 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)
26. 馬場 隆行 「Modified cubic theory におけるエネルギーとゲージ不変量の関係」,
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)

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
3. 吉田 信介：
「シングルスピンの非対称性における3グルーオン相関関数の研究」、第7回(2013年)日本物理学会若手奨励賞(理論核物理領域)/第14回核理論新人論文賞

国際会議・研究会の実施

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」/
H P C I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-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. 八田 佳孝 他、
研究会「強相関量子多体系としてのハドロンクォーク物質」
2012年9月15日、京都大学時計台国際交流ホール、京都(参加者84名)
4. 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」/
H P C I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)

国内外の共同組織への参加

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>