

3 各研究部門の報告

1. 素粒子物理研究部門

1. メンバー

教授	藏増 嘉伸、青木 慎也（客員研究員）、金谷 和至（共同研究員）
准教授	石塚 成人、谷口 裕介、吉江 友照、山崎 剛（共同研究員）
助教	大野 浩史（国際テニユアトラック）
研究員	浮田 尚哉、吉村 友佑、山下 巧
学生	大学院生 7名、学類生 4名

2. 概要

当部門では、数理物質系との密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を推進している。2016 年秋から JCAHPC（最先端共同 HPC 基盤施設：筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織）において Oakforest-PACS（略称「OFP」：ピーク演算性能 25PFLOPS の超並列クラスタ計算機、「京」を超える国内最高性能システム）が稼働を開始した。本年度は、筑波大学を中心とした PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、OFP を用いた大型プロジェクト研究を推進した。これと並行して、有限温度・有限密度 QCD の研究、 $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊におけるハドロン行列要素計算、テンソルネットワーク (TN) 形式に基づく格子ゲージ理論・スピンモデルの研究、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、2015 年度で終了した HPCI 戦略プログラムの後継として、「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・研究開発が始まっている。現在 9 つの重点課題が設定されており、9 番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp> に詳しい。また、重点課題と並行して、2016 年度から 4 つの萌芽的課題が設定され、1 番目の課題である「基礎科学のフロンティア - 極限への挑戦」は基礎科学における分野横断的な研究課題であり、本グループも分担機関として参加している。

3. 研究成果

【1】 PACS Collaboration による Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション

(蔵増、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田、滑川)

2016 年秋に JCAHPC において Oakforest-PACS (OFP) が導入され、稼働を開始した。OFP はピーク演算性能が 25PFlops であり、「京」コンピュータを抜いて 2017 年 4 月現在日本最速のスーパーコンピュータである。本年度は、PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、OFP を用いて物理点における 2+1 フレーバー QCD の大規模シミュレーションを推進した。

過去 30 年以上にわたり、格子 QCD は主にハドロン単体の諸性質解明を目指して来た。現在の世界的な状況においては、2 つの大きな問題点が存在する。まず、物理点直上でのシミュレーションが可能になったことは事実だが、実際には物理点のみで物理量の評価を行えるほどの精度を得るレベルには至っていない。次に、現在の格子 QCD シミュレーションにおける物理量計算は“テーラーメイド”であると評されている。これは、目的とする物理量計算に応じて、適当と思われる物理パラメータ（クォーク質量や空間体積など）を選んでシミュレーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であっても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現しないということが起こりうる。OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で $(10\text{fm})^3$ 超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記 2 つの課題を克服した計算を実現する。

2017 年度は、主に格子カットオフ $=2.33\text{GeV}$ で $(10\text{fm})^3$ 超の空間体積を持つ 2+1 フレーバー QCD のゲージ配位生成を行った。より具体的には、物理点直上で(格子間隔, 格子サイズ) $= (0.085\text{fm}, 128^4)$ のゲージ配位を生成した。図 1 (左) は、格子サイズ 128^4 と 64^4 (現在世界の格子 QCD 計算で典型的に採用されている格子体積) の配位上で計算された π 中間子の 2 点相関関数 $C_\pi(t)$ を用いて、それぞれについて時間 t における π 中間子の局所有効質量 $m_\pi^{\text{eff}}(t) = \ln(C_\pi(t)/C_\pi(t+1))$ をプロットしたものである。両者に差異が見えることから、明確な有限体積効果が存在することが見て取れる。また、図 1 (右) は、格子サイズ 128^4 と 64^4 の配位上で計算された π 中間子崩壊定数を比較したものである。こちらについても明確な有限体積効果が存在することが確認できる。

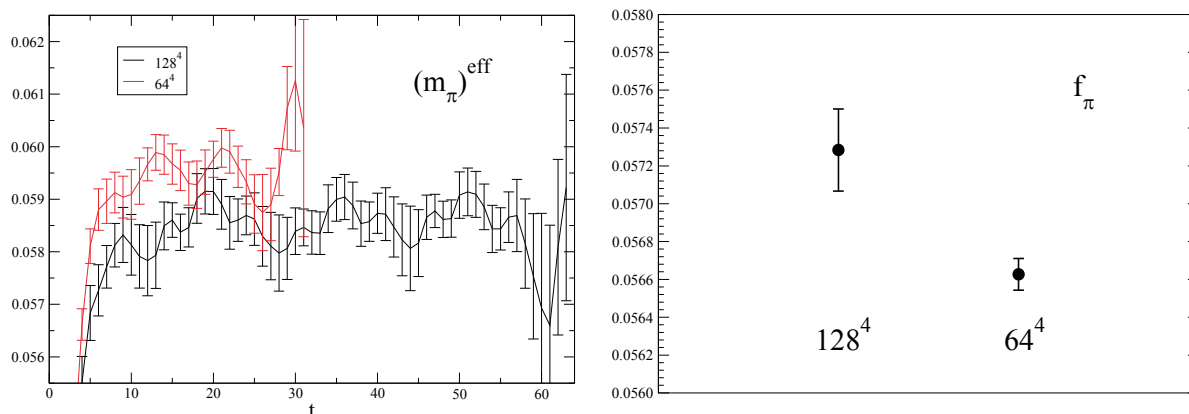


図 1: 格子サイズ 128^4 と 64^4 における π 中間子局所有効質量 (左) と π 中間子崩壊定数 (右)。両者ともに preliminary な結果。

【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、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算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。その後、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、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。この計算は π 中間子質量 0.5GeV と 0.3GeV 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 0.14GeV に相当) よりもかなり重いものを用いていた。この成果を踏まえ、「京」で生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点近傍での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。統計誤差を抑えることが難しく、ヘリウム原子核については有意な結果は得られていないが、重陽子については現状で実験値から予測された値を再現する結果が見え始めており、今後も統計誤差を小さくするための計算を継続していく。

また、これまでの計算に含まれる可能性のある励起状態からの系統誤差について、重いクォーク質量を用いた超高精度計算による調査を行った (研究論文 B-1)。図 2 には、指数型演算子とウォール型演算子を用いて計算した、二核子系有効エネルギー差 ($\Delta E_{\text{NN}}^{\text{eff}} = E_{\text{NN}}^{\text{eff}} - 2m_{\text{N}}^{\text{eff}}$) を示した。 $E_{\text{NN}}^{\text{eff}}$ と $m_{\text{N}}^{\text{eff}}$ は、それぞれ二核子有効エネルギーと核子有効質量である。異なる演算子の結果は小さな虚時間の領域では異なる値を取るが、正しい $\Delta E_{\text{NN}}^{\text{eff}}$ を求めるためには、 $E_{\text{NN}}^{\text{eff}}$ と $m_{\text{N}}^{\text{eff}}$ の両方が虚時間に依らなくなる領域を見なければならない。その領域が始まる虚時間は演算子に依存し、ウォール型演算子を用いると、一般に大きな虚時間が必要になる。図中にそれぞれの演算子でのその領域が始まる虚時間を縦破線で示した。この領域から決めた各々の演算子の結果は誤差の範囲内で一致した。この結果を踏まえると、これまでの計算

に用いた演算子は図の指数型演算子に対応するため、これまでの結果では励起状態の系統誤差は十分抑えられていたと考えられる。

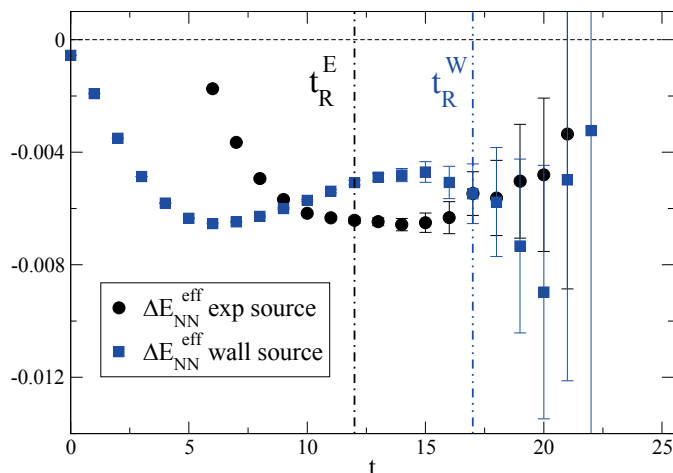


図 2: 指数型演算子 (exp source) とウォール型演算子 (wall source) を用いた有効二核子エネルギー (E_{NN}^{eff})。横軸は虚時間。破線はそれぞれの演算子の結果が虚時間に依らなくなる領域が始まる虚時間 t_R^O ($O=E$ (指数型演算子)、 W (ウォール型演算子)) を表す。

【3】 格子 QCD を用いた核子構造研究 (藏増、山崎)

陽子と中性子 (核子) はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD を用いて、核子構造に関する核子形状因子の研究が行なわれてきたが、非常に良い精度で測定されている実験値を再現できていない。この実験値との不一致の主な原因は、計算に用いられたクォーク質量が現実のものよりも大きいためであると考えられている。

藏増、山崎は、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、東北大学大学院生 塚本夏基氏、理研計算科学研究機構 (AICS) 宇川副機構長とともに、PACS Collaboration において、この原因を取り除いた計算である、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ (π 中間子質量 145MeV) を用いた核子形状因子計算を行なった (研究論文 B-2)。図 3 は電氣的形状因子と軸性ベクトル形状因子の結果である。電氣的形状因子は小さな運動量移行の領域で実験値に良く一致した結果が得られている。これはクォーク質量が大きなこれまでの計算で得られなかった結果である。一方、軸性ベクトル形状因子は実験値とは大きく異なる結果になっており、この原因を明らかにしていくのが一つの大きな目標になる。この計算結果により、平成 28 年度実施課題における HPCI 利用研究課題優秀成果賞を受賞した。

現在、理研計算科学研究機構 (AICS) 新谷栄悟研究員を共同研究者に加え、さらに大きな体積を用いた現実的クォーク質量での計算を実行している。

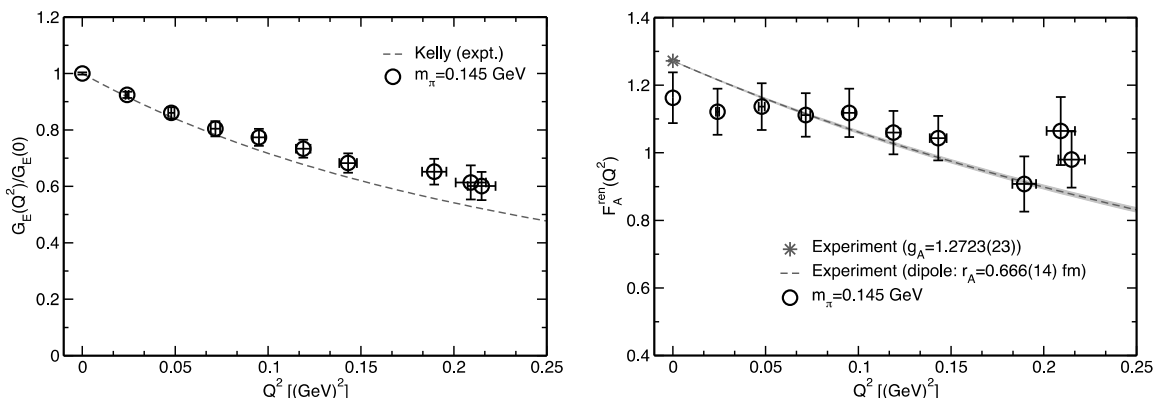


図 3：電磁的核子形状因子（左）と軸性ベクトル形状因子（右）。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す。

【4】 場の理論的相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数（藏増、山崎）

場の理論で定義される二体粒子 Bethe-Salpeter 波動関数は、二体相互作用範囲外では、量子力学の二体波動関数と同じ形を取ることが知られている。そのことを用いて、多くの格子 QCD 散乱位相差計算で使われてきた有限体積法が導出されていた。

藏増、山崎は、相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数と散乱位相差の関係を再検討し（研究論文 A-2）、散乱位相差を求めるために必要な量が何かを明確にした。さらに、量子力学的ポテンシャルを Bethe-Salpeter 波動関数で定義した際に、正しい散乱位相差を求めるための条件を明らかにし、ポテンシャルの展開について議論した。

【5】 格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱長計算

（藏増、山崎）

散乱長は、粒子間の相互作用を特徴づける基本的な物理量である。これまで、相互作用範囲外の Bethe-Salpeter 波動関数から導出された有限体積法により種々の散乱長が計算されてきた。

滑川、山崎は 2π 中間子系において、相互作用範囲外ではなく相互作用範囲内 Bethe-Salpeter 波動関数を用いて散乱振幅を決定した（研究論文 A-3）。得られた散乱振幅から散乱長を計算し、既存の手法で求められた結果との一致が確認できた。加えて、半オフシェル散乱振幅計算に世界で初めて成功した。

【6】 格子 QCD を用いた π 中間子形状因子の計算（山崎、賀数）

山崎は大学院生（博士後期課程 2 年）賀数とともに、PACS Collaboration において、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ（ π 中間子質量 145MeV）を用いた π 中間子電磁形状因子の計算を行った。この形状因子からは π 中間子の平均二乗荷電半径を見積もることができ、

π 中間子の構造を解明するためには非常に重要な物理量である。しかし、これまでの多くの π 中間子電磁形状因子の計算では、現実よりも大きなクォーク質量を用いていたため、実験値を再現できていなかった。

この研究は昨年度からの継続研究であり、昨年度からは統計を増やし、2 次のカイラル摂動論公式を用いた解析などから平均二乗荷電半径の系統誤差を見積った。それらの系統誤差は統計誤差よりは十分小さく、最終的な平均二乗荷電半径の結果は実験値をよく再現した。今後、これらの研究成果を論文としてまとめつつ、更に大きな体積を用いた計算を行う予定である。

【7】 Gradient flow を用いた Kaon B パラメーターの計算（谷口、鈴木）

Kaon B パラメーター B_K は K 中間子の K^0 - \bar{K}^0 混合に対する QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動的な効果が主として効いてくる量であるため格子上の数値計算による測定が必須となる量である。この B_K を Wilson fermion を用いて計算しようとする、カイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、gradient flow を用いる方法が有力視されている。Gradient flow は一種のくりこみ操作であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に実行することができる。Gradient flow の優れた点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げられる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として取るようになるのである。Gradient flow を課した演算子は繰り込まれた演算子を含む有限な量となっているのであるが、鈴木と谷口は研究の第一歩として gradient flow を課した 4 fermi 演算子から、高エネルギー物理学で一般的に用いられる MS-bar scheme で繰り込まれた演算子を取り出すための変換係数の計算を行なった。特に紫外発散が現れないという性質を調査する目的で、グルーオンに質量を導入した処方を採用し、変換係数の計算を行っている。

【8】 格子 QCD シミュレーションによる有限温度・有限密度 QCD の研究（金谷、谷口）

金谷、谷口らは、新潟大学 江尻信司准教授、広島大学 梅田貴士准教授、九州大学 鈴木博教授、大阪大学 北沢正清助教らとの共同研究で、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、改良ウィルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより研究し、エネルギー運動量テンソルから、圧力、エネルギー密度、エントロピー密度などの熱力学量を評価し、カイラル凝集や位相感受率から、カイラル相転移やアクシオン質量の評価を行った。

格子上ではエネルギー運動量テンソルを並進対称性に伴う保存カレントとして定義できない。これに起因して、格子 QCD によるエネルギー運動量テンソルの評価には、5 種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動的に求めなければならないという理論的・数値的な困難が存在している。本研究は、この非摂動的なくりこみの問題に関して、勾配流（グラジエントフロー）を用いて根本的な解決を図る点に特徴がある。Lüscher らにより提案された勾配流は格子上の物理量計算に様々な革新をもたらしているが、特に、共同研究者である鈴木らにより、これまで格子での計算や定義に大きな困難が伴っていた様々な物理量の非摂動的評価に新しい方法が提案された。この方法は、ウィルソン型クォーク作用で大きな困難となっていたカイラル凝集や位相感受率などの評価にも有効である。我々は鈴木らの方法を動的クォークを含む full QCD シミュレーションに世界で初めて適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究している。

2017 年度は、2016 年度に開始したクォークが重い場合の $N_f=2+1$ QCD で最初の研究を完成させ、エネルギー運動量テンソルの一点関数やカイラル凝集、位相感受率に関して非常に良い結果を得た。この成果を受けて、次の段階の研究にむけて、 $N_f=2+1$ QCD の物理点における研究を開始し、同時に、エネルギー運動量テンソルの 2 点関数から輸送係数などを引き出す研究も開始した。また、これまでに開発してきた多重点再重み付け法やヒストグラム法とグラジエントフロー法を組み合わせ、QCD のグルオン部分である $SU(3)$ ゲージ理論における潜熱などの研究を進めた。

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

a) クォークが重い場合

第一段階の研究として、2016 年に、 s クォーク質量は現実の値に近いが u, d クォークは現実より重く ($m_\pi/m_\rho \cong 0.63$)、格子間隔が $a \cong 0.07 \text{ fm}$ 一つだけの場合について、固定格子間隔法による計算を開始した。2017 年度は、系統誤差評価などの一連の解析を行って、論文にまとめた。

我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが示された。図 4 に状態方程式の最終結果を示す。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果である。 $T < 300 \text{ MeV}$ ($N_t > 8$, N_t は温度軸方向の格子点の数) で従来の方法による結果をよく再現することが示された。他方、この格子間隔では、 N_t が 8 程度より小さいと ($T > 300 \text{ MeV}$)、 $O(aT)$ の格子化誤差が大きく、両者が一致しなくなることもみてとれる。(研究論文 A-4)

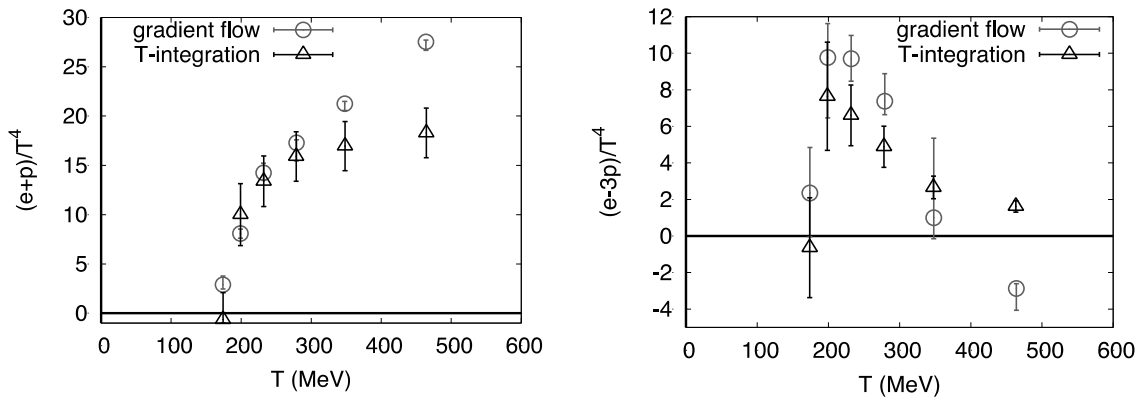


図 4：グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。クォークが重い場合の結果。左図：エントロピー密度 $\varepsilon+p$ 。右図：トレース・アノマリ $\varepsilon-3p$ 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上で T-積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度 T 。（研究論文 A-4）

さらに、同じ有限温度配位を用いて、グラジエントフロー法を用いたカイラル凝集と位相感受率の評価も行った。格子 QCD ではこれらの物理量に複雑なくりこみが要求されるが、鈴木法を用いればくりこまれた量を直接評価可能となり、計算コストを大きく抑えられる可能性がある。図 5 の左図にカイラル感受率の結果を示す。我々は、カイラル感受率がクロスオーバー温度 $T \sim 190\text{MeV}$ でピークを示すことを示した。また、s クォークよりも、軽い ud クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性をしめしており、これも理論的期待と一致する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。（研究論文 A-4）

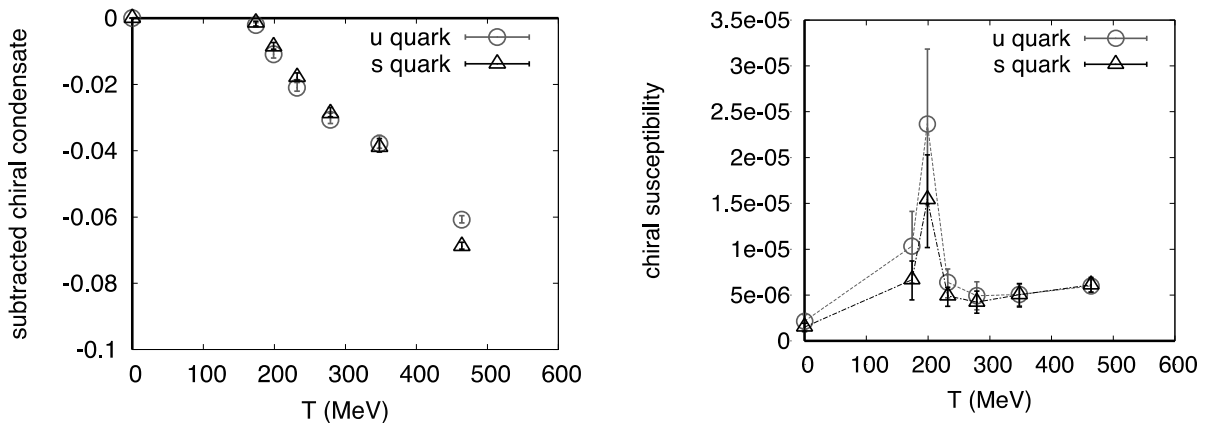


図 5：グラジエントフロー法による(2+1)-flavor QCD の熱力学特性の研究。クォークが重い場合の結果。左図：カイラル凝集。右図：カイラル感受率。赤丸は u,d クォーク、黒三角は s クォークのカイラル凝集/感受率。（研究論文 A-4）

Gradient flow を用いた有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

b) 現実のクォーク質量の場合

グラジエントフロー法による状態方程式の評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担うことを示唆している。クォークが重い場合にグラジエントフロー法が有効であるという前述の結果を受け、次の段階として、現実のクォーク質量での研究と格子間隔を変えたシミュレーションを開始し試験研究を行った。

PACS-CS Collaboration が生成した、改良ウイルソクォークを用いた、格子間隔 $a \approx 0.09\text{fm}$ の $32^3 \times 64$ 格子のゼロ温度配位を利用し、固定格子間隔法で $T \approx 160\text{-}550\text{MeV}$ ($N_t = 14, 13, \dots, 4$) の温度を研究した。クォークが重い場合は $T \approx 190\text{MeV}$ が臨界温度であったが、クォークが軽いのでより低温側にシフトすると予想される。しかし、この格子作用の場合の臨界温度はわかっていない。

まだ統計が十分ではないが、エネルギー運動量テンソルの 1 点関数やカイラル凝集について、クォークが重い場合とほぼ同様に有意な計算が可能であるという中間結果を得た。ただし、格子化誤差が大きい傾向があり、高統計と精密な系統誤差評価が必要である。クォーク質量が小さい効果に加え、格子間隔がやや粗いことが影響しているものと思われる。

状態方程式の中間結果を図 6 に示す。クォークが重い場合の経験から、 $T > 247\text{MeV}$ ($N_t \leq 8$) では格子化誤差が大きいと予想される。クォークが重い場合と違って、同じ配位を用いた通常の方法による状態方程式の結果は無いが、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果と比較すると、エントロピー密度はほぼ同じ値だが、トレース・アノマリは数倍大きくなっている。ただし、我々の結果はまだ連続極限が取られていないので、直接の比較はできない。

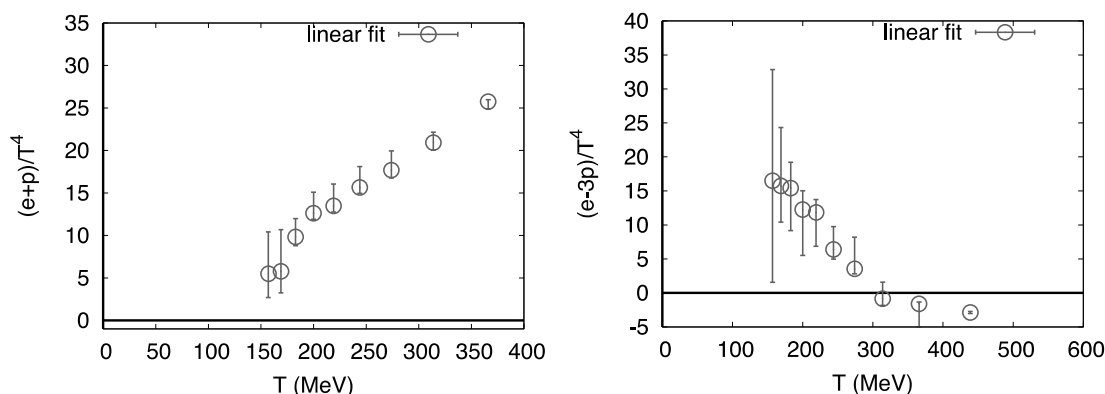


図 6：グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。左図：エントロピー密度 $\varepsilon+p$ 。右図：トレース・アノマリ $\varepsilon-3p$ 。横軸は温度 T 。(研究論文 B-3)

カイラル凝集についての中間結果を図 7 に示す。左図は u, d クォークのカイラル凝集、右図は s クォークのカイラル凝集である。図 7 の左図に示したクォークが重い場合には、クォーク質量に対する依存性は小さかったが、 u, d クォークの質量が下がると、軽いクォークのカイラル凝集の温度依存性が大きく変わることが見られる。 s クォークのカイラル凝集から、 $T \sim 130-150 \text{ MeV}$ を臨界温度と考えると、そこで軽いクォークのカイラル凝集はかなり急激に変化すると思われる。これまでシミュレーションした範囲では低温側のデータが無いので明確な結論は難しいが、クォークが軽くなればなるほどカイラル相転移が際立つだろうという理論的期待と矛盾しない。また、ここで示唆される低い臨界温度は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 $T \sim 150 \text{ MeV}$ と一致している。(研究論文 B-3)

現在、より低い温度を含む配位生成と解析を進めている。

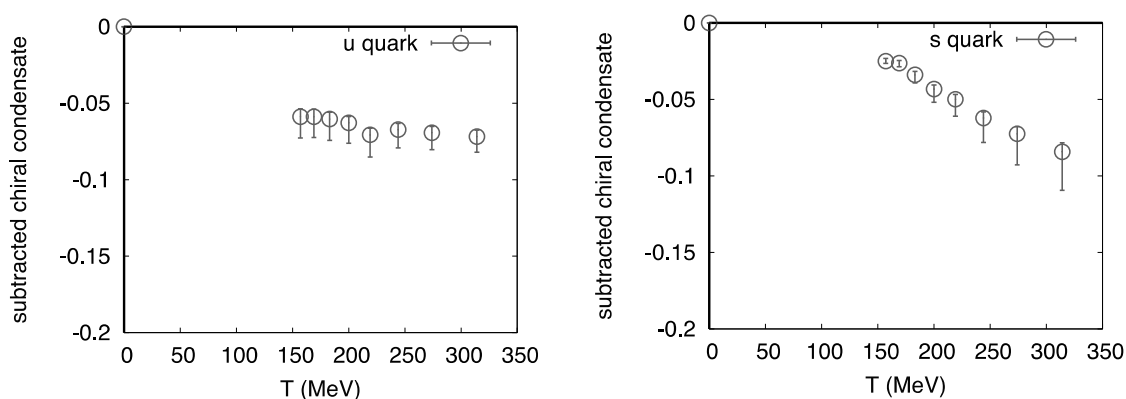


図 7: グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCD の状態方程式の研究。現実のクォーク質量の結果。左図: u, d クォークのカイラル凝集。右図: s クォークのカイラル凝集。横軸は温度 T 。(研究論文 B-3)

Gradient flow を用いた輸送係数などの研究

グラジエントフローに基づく鈴木らの方法では、エネルギー運動量テンソルそのものを直接評価することができるので、その相関関数から、輸送係数など、状態方程式以外の様々な熱力学量も評価可能になる。そこで、研究の別の展開方向として、クォークが重い $NF=2+1$ QCD の場合に、エネルギー運動量テンソルの 2 点関数の計算を開始した。

2 点関数では格子化誤差が 1 点関数より大きくなる傾向があり、現在の統計では明確な結論は難しいが、クエンチ近似 QCD の場合に FlowQCD Collaboration が行った先行研究と同様に、有望な結果をいくつか得た(図 8)。現在、統計の改善とともに、解析方法の改良を試みている。(研究論文 B-4)

我々の結果はまだ格子間隔 1 点で計算されただけであり、今後異なる格子間隔で同様の計算を行い、連続極限を取る必要がある。物理点での研究と並行して、格子間隔の違う点での研究も推進している。

また、フル QCD の研究と並行して、グラジエントフロー法を用いた SU(3)ゲージ理論の潜熱の研究も行い、中間結果を国際会議 Lattice 2017 等で報告した。

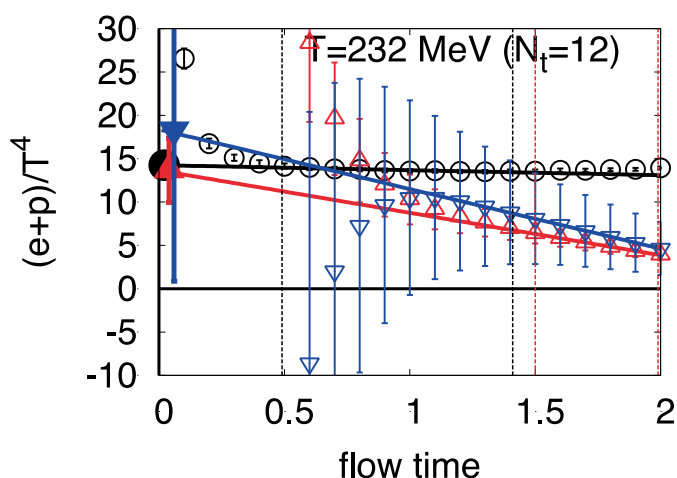


図 8 : グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCD のエントロピー密度の研究。クォークが重い場合の結果。黒丸はエネルギー運動量テンソルの一点関数から求めた結果 (研究論文 A-4) 。赤丸と青三角は異なる二点関数から線形応答関係式を用いて引き出したエントロピー密度。横軸はフロー時間 t 。格子間隔依存性が取り除かれるフロー時間の極限 $t \rightarrow 0$ で、三つの結果が期待どおり一致することが見て取れる。(研究論文 B-4)

【9】 3、4 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点 (藏増、大野)

温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ を関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。藏増は、理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学 武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、 $O(a)$ 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、 T 、 μ 、クォーク質量 m_q のパラメータ空間における 3 フレーバー QCD の臨界終線の決定に取り組んできた。まず、最初のステップとして 2015 年に $\mu=0$ (密度ゼロ) での 3 フレーバー QCD の臨界終点における π 中間子質量 ($m_{\pi,E}$) を決定した (論文発表済)。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リング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究において、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。その後、 $m_{\pi,E}$ の精度向上を目指し、更に細かい格子間隔で計算を行った結果、連続極限において $m_{\pi,E}$ の値が非常に小さい、あるいはゼロになる可能性を示唆する結果を得た (研究論文 A-5)。この結果は従来の理論予想とは異なっており、大変興味深い。現在、更に細かい格子間隔の計算を実行し、連続極限における $m_{\pi,E}$ の値がゼロになる可能性の検証に取り組んでいる。また、並行して、大野と共に 4 フレーバー QCD における臨界終点の探索を開始した。理論的には、3、4 フレーバー QCD とともにクォー

ク質量 m_q が小さな領域での一次相転移が予想されているため、4 フレーバーQCD での臨界終点の結果を理論予想と比較検討することによって、3 フレーバーQCD の結果に対する新たな理解が得られると考えられる。

【10】 総バリオン数揺らぎとその高次キュムラントの計算（大野）

総バリオン数揺らぎとその高次キュムラントは、QCD 臨界点を探索する上で重要な量である。実際、RHIC のビームエナジースキャン計画でも同様の量が測られ、特に、高次キュムラントで観測されている特徴的振る舞いの理論的理解が必要となっている。

大野は、Frithjof Karsch 氏を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加し、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered Quark 作用を用いた格子 QCD シミュレーションを行い、これらの量の計算を行った（図 9）。その結果、現在実験的に到達しているビームエネルギーの範囲において、実験結果と同様の振る舞いが格子 QCD の理論計算でも得られることを示した（研究論文 A-6）。

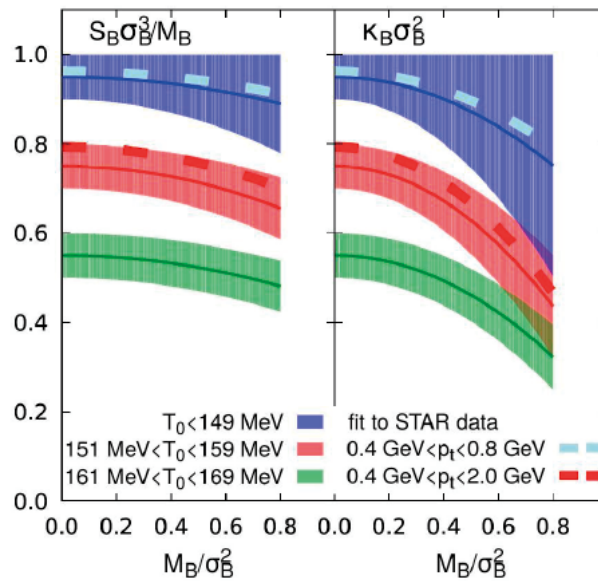


図 9：総バリオン数の歪度（左図）及び尖度（右図）。ゼロバリオン化学ポテンシャルにおけるクロスオーバー温度の違いを色の違いで示す。また、STAR Collaboration の実験から得られた結果を破線で示す。

【11】 クォーコニウム相関関数及びスペクトル関数の計算（大野）

クォークと反クォークの束縛状態であるクォーコニウムは、RHIC や LHC 等で行われている重イオン衝突実験において生成される、クォーク・グルオン・プラズマの性質を調べるための重要なプローブのひとつである。従って、高温媒質中のクォーコニウムの振る舞いを理論的に理解することは、実験結果を説明する上で必要不可欠である。

大野は、華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、Bern 大の Mikko Laine 教授及び Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏らと共に、摂動論の手法等を用いて、擬スカラーチャンネルのクォークonium スペクトル関数を計算した（研究論文 A-7）。また、クエンチ近似を用いた大規模格子 QCD 計算を行い、世界で初めて連続極限におけるクォークonium 相関関数を計算し（研究論文 B-6,7）、上記摂動論の結果と比較した。そして、チャーモニウムに関しては臨界温度の 1.1 倍の温度で、既に束縛状態がなくてもよいことを示唆する結果を得た。一方、ボトモニウムに関しては少なくとも臨界温度の 1.5 倍の温度においても、束縛状態が存在することを示す結果が得られた（図 10）。

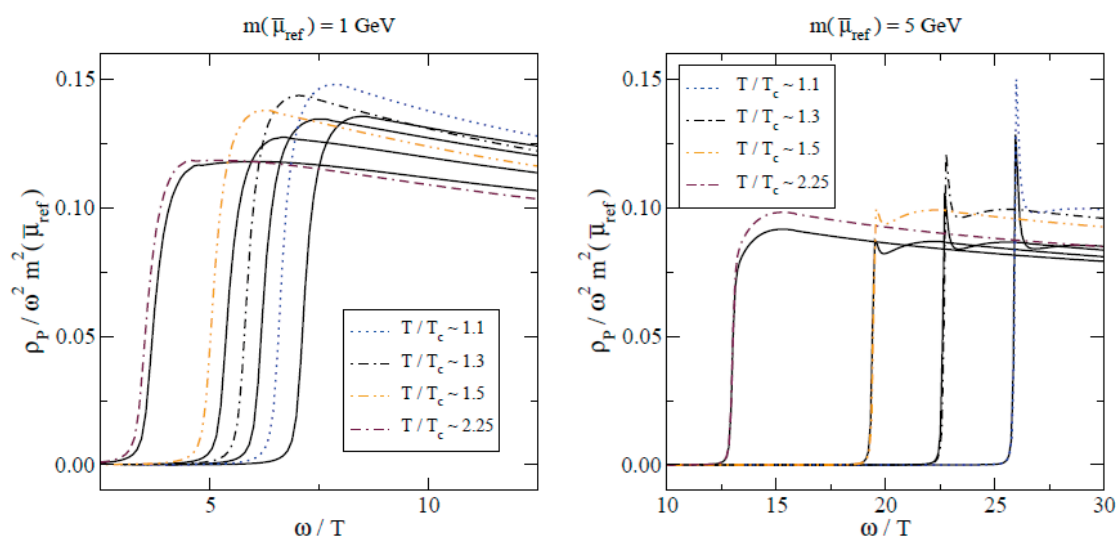


図 10：チャーモニウム（左図）及びボトモニウム（右図）スペクトル関数。摂動論の結果を実線、それを格子 QCD 計算で得られた相関関数を再現するように変更したものを破線で示す。

【12】 QCD のカイラル相転移の数値的研究（吉江）

QCD のクォーク・グルーオン相（高温相）の性質や、高温相からハドロン相（低温相）への相転移の性質の解明は、初期宇宙の進化に係わる重要な課題である。今日まで多くの研究が行われてきているが、この有限温度相転移の次数についてさえ、結論が得られていない。WMFQCD Collaboration（岩崎（筑波）、石川（広島）、中山（Kavli IPMU）、吉江）は、今日まで、多フレーバ QCD の相構造を、『繰り込み群に基づくスケーリング則を数値的に検証する』事によって調べてきた。昨年度から、同じ手法を用いて、 $N_f=2$ QCD のカイラル相転移の次数を調べている。

本研究では、まず、カイラル相転移が二次であると仮定して、体積の異なる格子上での相転移点での中間子伝搬関数のスケーリング則を導く。3 種の体積の異なる系を用いてスケーリング則が成り立っている事を数値的に示した。この事は、相転移次数が 2 次であることを強く示唆する（研究論文 A-8）。

次に、相転移に関わるカイラル $SU(2) \times U(1)$ 対称性が、相転移（の高温側）でどう回復しているかを、カイラル多重項の中間子伝搬関数を比較する事によって調べた。（技術的理由で、フレーバ 3 重項の中間子のみ調べた。）高温側では、 $SU(2)$ 対称性が回復するだけでなく、量子補正によって破れている $U(1)$ 対称性も回復していると考えられるべき結果を得た（研究論文 A-9）。

高温側で $U(1)$ 対称性が実質的に回復する場合、多くの理論モデルで一次転移を導くので、上記のスケーリング則の成立と $U(1)$ 多重項の縮退を矛盾無く説明する事が課題である。

【13】 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（藏増、吉村）

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の u 、 d 、 s クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD、格子 SUSY の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。なお、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における 4 つの萌芽的課題のうち、1 番目の課題である「基礎科学のフロンティア - 極限への挑戦」に含まれており、本グループも分担機関として参加し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用に取り組んでいる。

2014 年、藏増と理研計算科学研究機構（AICS）の清水特別研究員は、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に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 θ 項が有る場合と無い場合の 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（論文発表済）。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である 4 次元 QCD への応用に向け、(i) 非可換ゲージ理論への拡張、(ii) 高次元モデルへの応用、(iii) 物理量計算のための手法開発、という 3 つの課題に取り組む必要がある。また、並行して、素粒子物理にとって興味深い低次元モデルの解析も行う。2017 年度の主要な研究成果は、2014 年に Schwinger モデルの解析に用いたアルゴリズムを改良し、より高度な解析手法を用いて 1 フレーバー Wilson フェルミオンを持つ 2 次元格子 Schwinger モデルの詳細な相構造解析を行ったことである（研究論文 A-10）。

図 11 (左) は、強結合極限 ($g \rightarrow \infty$) における $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ (パリティ奇の部分空間への射影演算子の期待値) とセントラルチャージのフェルミオン質量依存性を表す。 $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ の振る舞いから、 $-1.8 \leq m \leq -0.7$ の領域にパリティ対称性が破れている相が存在することがわかる。また、セントラルチャージの振る舞いから、 $m \approx -0.7$ で相転移が存在し、 $m \leq -1.8$ で BKT (Berezinskii-Kosterlitz-Thouless) 転移が存在することがわかる。なお、2014 年の研究ではカイラル感受率を用いた相構造解析を行っていたため、 $m \leq -1.8$ での BKT 転移を検知することはできなかった。図 11 (右) は、強結合極限 ($g \rightarrow \infty$) と有限の結合定数 g における解析結果と統合的に考察し得られた相図である。

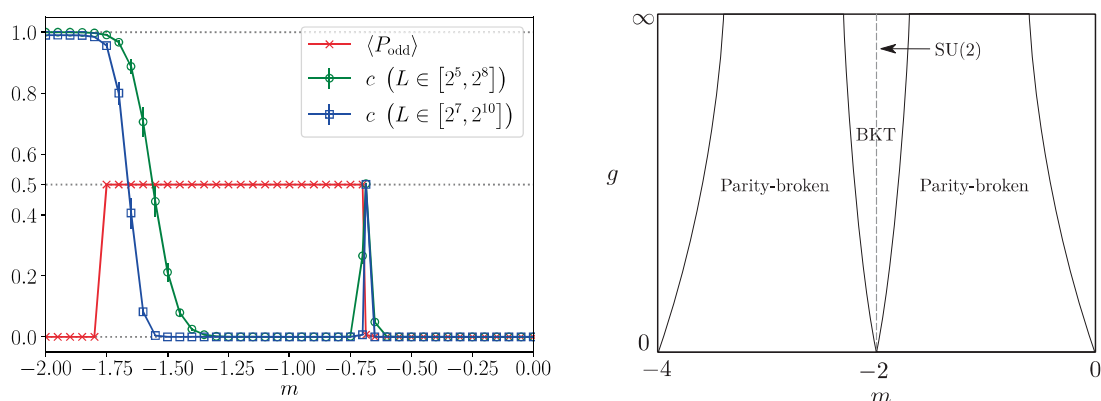


図 11 : (左) 強結合極限における $\langle P_{\text{odd}} \rangle$ とセントラルチャージのフェルミオン質量依存性。(右) 解析結果に基づく相図。BKT は Berezinskii-Kosterlitz-Thouless 転移を表す。

【14】 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の一つである。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可能性がある。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 山脇幸一名誉教授や KEK 青木保道特任准教授らと共に、LatKMI Collaboration において、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ている。

これまでの 4、8、12 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ことを示唆した。今年度は、これまでよりも大きな体積、軽いフェルミオン質量のデータを含め、系統誤差を小さくした結果から得られた研究成果を論文としてまとめた (研究論文 A-13)。さらに、8、12 フレーバー理論の性質を調べるため、フレーバー 1 重項擬スカラー中間子の計算を行い、少ないフレーバー数の SU(3) ゲージ理論とは定性的に異なるフェルミオン質量依存性を示す結果が得られた (研究論文 B-9)。

【15】 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用 (吉江、山崎)**JLDG**

JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子 QCD 研究拠点 7 箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供する SINET VPN で接続し、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねたファイルシステムである。JLDG はサブシステムとして、HPCI 共用ストレージとの連携システムと ILDG (International Lattice Data Grid) との接続システムを備えている。JLDG の運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当者、をメンバーとする JLDG チームが行っており、筑波大からは、建部、天笠 (システム情報) と山崎、吉江が参加している。

JLDG は 2005 年に開発を開始し、2007 年に運用を開始した。現在、国内の複数の大きな研究グループが研究インフラとして使用している。JLDG は実用システムとして、一定の完成の域に達しており、数年前から、システムの改良や新機能の実装よりも、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。

本年度は、ハードウェアの増強、ソフトウェアのバージョンアップ、障害対応等の定型的作業に加えて、JCAHPC に JLDG の拠点を設置する計画を立案し、ファイルサーバを設置した。次年度以降、同所のスーパーコンピュータ Oakforest-PACS に JLDG クライアント機能を導入する計画である。

ILDG

ILDG は 5 つの地域グリッドを、『格子 QCD 配位の国際規模での共有』を目的として相互運用する仕組みであり、JLDG は ILDG の日本の地域グリッドである。ILDG は 2007 年に運用を開始して以来、アンサンブルの記述言語の拡充、各地域グリッドでのシステム改良が行われてきたが、グリッドの相互運用の仕組みに変更はなく、実用システムとして研究者に利用されている。

ILDG には、「公開されている格子 QCD 配位アンサンブルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積する目的で、ILDG に公開する QCD アンサンブルに DOI (Digital Object Identifier) 登録を行う事が提案され、米国地域グリッドでは、実施済である。

JLDG では、天笠、松古 (KEK)、吉江が中心となって、DOI 登録の体制面の検討と各関係機関との調整を行って、DOI 登録は JICFuS (計算基礎科学連携拠点) の活動として位置付けること、筑波大計算科学研究センターが、DOI 登録機関の会員となり、実際の登録業務とデータへのアクセスを保証する仕組みに責任を持つこととなった。

今年度は、DOI 登録に必要なソフトウェア回りの開発(登録フォーム、ILDG QCDml ensemble xml と補足情報からの landing page の生成)を完成させた。また、登録の規約や手続き(登録作業のフロー)についても検討を行い、JICFuS に提案する規約案がほぼ完成した。

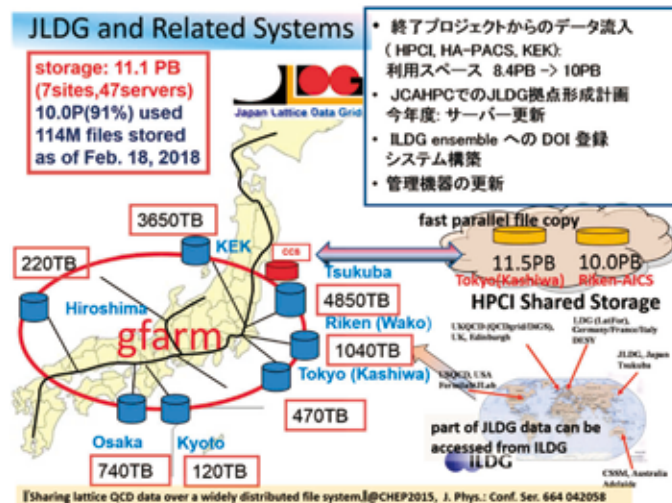


図 12 : JLDG の運用状況。2018 年 2 月時点。

[16] 格子 QCD 共通コード開発 (金谷、谷口、滑川、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。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/>)。

本年度は、インデックス、IO、フェルミオン、ゲージ固定など種々クラスの改良および修正が行われた。加えて、新規スーパーコンピュータ向けコード対応がなされた。これらの変更を含めた Bridge++ ver.1.4.4 へのアップデートが 2017 年 11 月に実施された。また、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 9 本追加された。通算 32 本の論文が共通コードを元に発表されている。共通コードはコミュニティコードとして重要な役割を果たしている。

4. 教育

学位論文

[修士論文]

1. 馬場 惇「Gradient flow による QCD の熱力学量の解析」

集中講義

1. 藏増嘉伸、神戸大学システム情報学研究科客員教授（2017年4月～2017年9月）
「計算科学特論」（集中講義）を担当

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

1. 岩崎 洋一 前学長・筑波大学名誉教授:
瑞宝重光章受章（2017年4月）、「教育研究功労」による。
2. 山崎 剛、藏増 嘉伸、浮田 尚哉、他2名:
平成28年度実施課題におけるHPCI利用研究課題優秀成果賞（2017年11月）
3. 鈴木 遊:
原子核三者若手夏の学校優秀賞（2017年8月）

外部資金

1. 青木慎也（代表）、一般受託研究、平成26年度採択、『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』、240,000千円
2. 金谷和至（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造」、900千円
3. 藏増嘉伸（分担）、一般受託研究、平成28年度採択、『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』萌芽的課題1：基礎科学のフロンティア－極限への挑戦（基礎科学の挑戦－複合・マルチスケール問題を通じた極限の探求）』、17,900千円
4. 藏増嘉伸（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「テンソルネットワーク形式による格子ゲージ理論の研究」、4,600千円
5. 石塚成人（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「格子QCDによるK中間子崩壊の直接的CP非保存パラメータの決定」、3,500千円
6. 山崎剛（代表）、科学研究費補助金・若手研究(A)、平成28年度採択、「量子色力学を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究」、7,400千円
7. 浮田尚哉（代表）、科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究、平成28年度採択、「格子数値計算による超対称性の自発的破れの解明」、1,000千円
8. 滑川裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明」、910千円

知的財産権

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. Taisuke Boku, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, and Lawrence Meadows, “Mixed Precision Solver Scalable to 16000 MPI Processes for Lattice Quantum Chromodynamics Simulations on the Oakforest-PACS System”, arXiv:1709.08785 [physics.comp-ph].
2. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, “Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory”, Phys. Rev. D 96, No. 11 (2017) ref.114511.
3. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, “Scattering amplitude from Bethe- Salpeter wave function inside the interaction range”, arXiv:1712.10141 [hep-lat].
4. Yusuke Taniguch, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), “Exploring $N_f=2+1$ QCD thermodynamics from gradient flow”, Phys. Rev. D 96, No.1 (2017) ref.014509.
5. Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Akira Ukawa, “Critical Point Phase Transition for Finite Temperature 3-Flavor QCD with Non-Perturbatively $O(a)$ -Improved Wilson Fermions at $N_t=10$ ”, Phys. Rev. D 96 (2017) ref.034523.
6. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, E. Rinaldi, H. Sandmeyer, C. Schmidt, Chris Schroeder, S. Sharma, W. Soeldner, R.A. Soltz, P. Steinbrecher, and P.M. Vranas [HotQCD Collaboration], “Skewness and kurtosis of net baryon-number distributions at small values of the baryon chemical potential”, Phys. Rev. D 96, no. 7 (2017) ref.074510.
7. Y. Burnier, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A.-L. Kruse, M. Laine, H. Ohno, and H. Sandmeyer, “Thermal quarkonium physics in the pseudoscalar channel”, JHEP 1711 (2017) ref.206.
8. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, and T. Yoshié, “RG scaling relations at chiral phase transition in two-flavor QCD”, arXiv:1704.03134 [hep-lat].
9. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, and T. Yoshié, “Nature of chiral phase transition in two-flavor QCD”, arXiv:1706.08872 [hep-lat].
10. Yuya Shmizu and Yoshinobu Kuramashi, “Berezinskii-Kosterlitz-Thouless Transition in Lattice Schwinger Model with One-Flavor of Wilson Fermion”, Phys. Rev. D 97 (2018) ref.034502.
11. Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, “Tensor Network Formulation for Two-Dimensional Lattice $N=1$ Wess-Zumino Model”, JHEP 1803 (2018) ref.141.

12. Yusuke Yoshimura, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, and Shinji Takeda, “Calculation of Fermionic Green Functions with Grassmann Higher-Order Tensor Renormalization Group”, *Phys. Rev. D* 97 (2018) ref. 054511.
13. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, and Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), “Light flavor-singlet scalars and walking signals in $N_f=8$ QCD on the lattice”, *Phys. Rev. D* 96, No. 1 (2017) ref.014508.

B) 査読無し論文

1. Takeshi Yamazaki, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration, “Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass”, *EPJ Web Conf.* 175 (2018) ref.05019.
2. Natsuki Tsukamoto, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, and Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Nucleon structure from 2+1 flavor lattice QCD near the physical point”, *EPJ Web Conf.* 175 (2018) ref.06007.
3. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda [WHOT-QCD Collaboration], “Equation of state in (2+1)-flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow”, *EPJ Web of Conf.* 175 (2018) ref.07023.
4. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, and Takashi Umeda, for the WHOT-QCD Collaboration, “Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature”, *EPJ Web of Conf.* 175 (2018) ref.07013.
5. Xiao-Yong Jin, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Akira Ukawa, “Continuum Extrapolation of Critical Point for Finite Temperature QCD with $N_f=3$ ”, arXiv:1710.08057 [hep-lat].
6. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. I. Kruse, H. Ohno, and H. Sandmeyer, “Continuum extrapolation of quarkonium correlators at non-zero temperature”, *EPJ Web Conf.* 175 (2018) ref.07010.
7. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. I. Kruse, S. Mukherjee, H. Ohno, H. Sandmeyer, and H.-T. Shu, “Thermal modifications of charmonia and bottomonia from spatial correlation functions”, *EPJ Web Conf.* 175 (2018) ref.07021.
8. R. Sakai, D. Kadoh, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, S. Takeda, and Y. Yoshimura, “Application of Tensor Network Method to Two-Dimensional Lattice $N=1$ Wess-Zumino Model”, *EPJ Web Conf.* 175 (2018) ref.11019.

9. Yasumichi Aoki, Tatsumi Aoyama, Ed Bennett, Masafumi Kurachi, Toshihide Maskawa, Kohtaroh Miura, Kei-ichi Nagai, Hiroshi Ohki, Enrico Rinaldi, Akihiro Shibata, Koichi Yamawaki, and Takeshi Yamazaki (LatKMI Collaboration), “Flavor-singlet spectrum in multi-flavor QCD, EPJ Web Conf., 175 (2018) ref.08023.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Binding energy of light nucleus from lattice QCD」 QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, Australia, July 10-14, 2017).
2. H. Ohno 「Quarkonium spectral functions on the lattice」 Workshop on Heavy Flavor Production in High Energy Collisions (LBNL, Berkeley, USA, October 30-November 1, 2017).
3. Takeshi Yamazaki 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory」 Multi-Hadron Systems from Lattice QCD (University of Washington, USA, February 5-9, 2018).
4. Yusuke Namekawa 「Scattering length from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range」 Multi-Hadron Systems from Lattice QCD (University of Washington, USA, February 5-9, 2018).

B) 一般講演

1. Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration 「A large scale simulation of 2+1 flavor lattice QCD」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017) .
2. Takeshi Yamazaki, Ken-ichi Ishikawa, and Yoshinobu Kuramashi for PACS Collaboration 「Comparison of different source calculations in two-nucleon channel at large quark mass」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017)
3. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration 「Electromagnetic pion form factor with strange quark mass reweighting in $N_f=2+1$ lattice QCD」 The 35th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Spain, June 19-24, 2017).
4. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, and S. Takeda 「Critical endpoint of 4-flavor QCD with non-perturbatively $O(a)$ -improved Wilson quarks」 , 35th International Symposium on Lattice

- Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017).
5. A. Suzuki, and Y. Taniguchi 「Calculation of BK with Wilson fermion using gradient flow」 The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos, Granada, Spain, June 18-24, 2017).
 6. Y. Taniguchi, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, H. Umeda, S. Ejiri, and K. Kanaya 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」 The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017).
 7. K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda 「Equation of state in $(2+1)$ -flavor QCD at physical point with improved Wilson fermion action using gradient flow」 The 35th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2017) (Palacio de Congresos de Granada, Granada, Spain, June 18-24, 2017).
 8. K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda 「Thermodynamics of QCD at physical point with $(2+1)$ -flavors of improved Wilson quarks using gradient flow」 The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017).
 9. Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, A. Suzuki, H. Suzuki, and T. Umeda 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」 The 15th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2017) (Univ. Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017).
 10. H. Ohno, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, Swagato Mukherjee, H. Sandmeyer, and H.-T. Shu 「Quarkonium spectral functions at finite temperature on large quenched lattices and towards the continuum limit」 The 15th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2017) (University of Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017).
 11. A. Suzuki and Y. Taniguchi 「Calculation of BK with Wilson fermion using gradient flow」 The 15th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2017) (University of Pisa, Pisa, Italy, June 26-28, 2017).
 12. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration 「Electromagnetic pion form factor at physical point from $N_f=2+1$ QCD」 QCD Downunder 2017 (Novotel Cairns Oasis Resort, Australia, July 10-14, 2017).

13. A. Suzuki and Y. Taniguchi 「Calculation of decay constant using gradient flow, towards Kaon bag parameter」 QCD Downunder 2017, (Novotel Cairns Oasis Resort, Queensland, Australia, July 10-14, 2017).
14. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, and S. Takeda 「Critical endpoint of 4-flavor QCD on the lattice」 Critical Point and Onset of Deconfinement 2017 (Stony Brook University, New York, USA, August 7-11, 2017).
15. Yusuke Taniguchi 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」 The international workshop “QCD at nonzero baryon density”(The National Research center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia, Oct. 2-4, 2017)
16. Yusuke Taniguchi 「Energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD at finite temperature」 CCS-EPCC Workshop (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Dec. 7-8, 2017).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 蔵増嘉伸 「テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用」, ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦」・「極限マテリアル」合同公開シンポジウム (東北大学, 仙台, 2017年7月18日).
2. 蔵増嘉伸 「Oakforest-PACS が切り拓く新たな格子 QCD シミュレーションの展開」, 計算科学研究センター設立 25 周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」(つくば国際会議場, つくば, 2017年10月10-11日).
3. 山崎剛 「格子量子色力学を用いた核子構造の研究」, 第4回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2017年11月2日).
4. 滑川裕介 「Successful prediction to charmed single baryons and attempt on two-hadron by lattice QCD」, ヘビークォークハドロンとエキゾチックハドロン構造 (J-PARC, 東海村, 2018年3月5-7日).
5. 蔵増嘉伸 「格子 QCD による陽子パズル解明のための理論的研究」, 日本物理学会第 73 回年次大会, 実験核物理領域-素粒子論領域-素粒子実験領域-理論核物理領域 合同シンポジウム「多様な手法によって解き明かす陽子のパズル」(東京理科大学, 野田, 2018年3月22-25日).
6. 山崎剛 「格子 QCD における Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱位相差の新しい計算方法」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大学, 野田, 2018年3月22日-25日).

B) その他の発表

1. 鈴木遊, 谷口裕介 「Gradient Flow を用いた相関関数の計算」, 原子核三者若手夏の学校, (国立オリンピック記念青少年総合センター, 東京, 2017 年 8 月 21 日-26 日).
2. 金谷和至, 江尻信司, 石見涼, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士 「グラジエントフローによる $N_f=2+1$ QCD の状態方程式 - 物理点での評価に向けて」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017).
3. 谷口裕介, 江尻信司, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木遊, 鈴木博, 梅田貴士, 若林直輝 「Gradient flow で捉える $N_f=2+1$ 有限温度 QCD のエネルギー運動量テンソル相関関数」, 熱場の量子論とその応用 2017 (TQFT 2017) (基礎物理学研究所, 京都大学, 京都, 8.28-30, 2017).
4. 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一, 佐々木勝一, 塚本夏基 for PACS Collaboration 「ウィルソフェルミオンを用いた物理点近傍での $2+1$ フレーバー QCD による核子形状因子の計算」, 日本物理学会 2017 年秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 2017 年 9 月 12-15 日).
5. 鈴木遊, 谷口裕介 「Gradient Flow を用いた Wilson フェルミオンに対する B_K の計算」, 日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 栃木, 2017 年 9 月 12 日-15 日).
6. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝 「Gradient flow で捉えるエネルギー運動量テンソル相関関数」, 日本物理学会秋季大会 (宇都宮大学, 宇都宮, 栃木, 9.12-15, 2017).
7. 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一, 浮田尚哉, 中村宜文, 滑川裕介, 賀数淳平 「格子 QCD を用いた軽い原子核計算」, 計算科学研究センター設立 25 周年記念シンポジウム「計算科学の発展と将来」 (つくば国際会議場, つくば, 2017 年 10 月 10-11 日).
8. 山崎剛, 藏増嘉伸, 石川健一 「格子 QCD を用いた軽原子核の直接計算」, 第 4 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2017 年 11 月 2 日).
9. 金谷和至, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介 「Gradient flow による $(2+1)$ -flavor QCD 状態方程式 - 物理点での試験研究」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018).
10. 谷口裕介, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 鈴木博, 馬場惇 「 $N_f=2+1$ QCD における QGP 粘性係数の計算」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018).
11. 馬場惇, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 下条昂礼, 鈴木博, 谷口裕介 「エネルギー運動量テンソル相関関数を使った線形応答関係式のテスト」, 日本物理学会第 73 回年次大会 (東京理科大, 野田, 千葉, 3.22-25, 2018).

(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. 理化学研究所計算科学研究機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.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

9. 管理・運営

1. 蔵増嘉伸、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、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

11. その他

海外長期滞在、フィールドワークなど