

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、金谷 和至、藏増 嘉伸

准教授 石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照

助教 伊敷 吾郎、大野 浩史、佐藤 勇二、毛利 健司

計算科学研究センター客員研究員 青木 慎也（京大基研）

研究員 浮田 尚哉、滑川 裕介、松本 高興、吉村 友佑

大学院生（10名）

【人事異動】

佐藤勇二助教が退職し、福井大学准教授に転出した（2019年2月28日）。

滑川裕介博士がKEK研究員に転出した（2019年3月31日）。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の2つの分野で活発な研究活動が行なわれた。

格子場の理論グループは、計算科学研究センターと密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。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、HPC(High Performance Computing)向けとしては「京」を超える国内最高性能システム）が稼働を開始した。昨年度に引き続き、本年度も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。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。弦の場の理論と次元正則化、弦の場の理論の古典解の研究、重力理論/ゲージ理論双対性とグルーオン散乱振幅、行列模型における古典極限と幾何学の関係、ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究等の超弦理論に関連する様々な分野についての研究を行った。

【1】格子場の理論

(金谷 和至、藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、浮田 尚哉、滑川 裕介、吉村 友佑)

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

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、HPC 向けとしては「京」コンピュータを抜いて現在日本最速のスーパーコンピュータである。昨年度に引き続き、本年度も 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置ける物理量計算は” 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。

昨年度、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サイズ) の配位上で π 中間子質量と崩壊定数の計算を行い、両格子サイズ上での結果に差異が見えることから、有限体積効果 (系統誤差の一つ) の存在を確認した。今年度は、計算手法の改良によって更なる高精度計算を実現し、有限サイズ効果の定量的解析に成功した。図 1(左) 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。黒シンボルは 128^4 格子サイズの結果で、青シンボルは 64^4 格子サイズの結果である。両者の有限サイズ効果による差異は 2.1(8)% である。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。 64^4 格子サイズの結果 (青シンボル) は 128^4

格子サイズの結果 (黒シンボル) と誤差 1σ の範囲でかろうじて一致しているが、reweighting(再重み付け) 法によって 128^4 格子サイズと 64^4 格子サイズの π 中間子質量が等しくなるようにすると (図1(左)の赤シンボル参照) 赤シンボルで表された結果となり、有限サイズ効果による差異は $0.66(33)\%$ となる。これらの結果は、論文3で発表済みである。

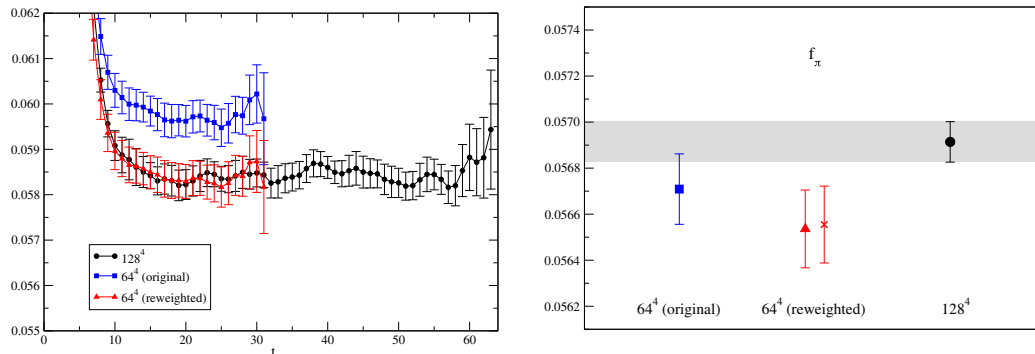


図 1: 格子サイズ 128^4 と 64^4 における π 中間子局所有効質量 (左) と π 中間子崩壊定数 (右)。

(2) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

藏増、山崎は宇川名誉教授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、試験的計算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 0.5 GeV と 0.3 GeV のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14 GeV に相当) よりも重い質量を用いていた。この成果を踏まえ、京コンピュータで生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた現実に近い π 中間子質量 0.146 GeV での軽原子核束縛エネルギー計算を進めている。この計算は統計誤差を抑えることが非常に難しく、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いる。今後は統計誤差を小さくするために、計算方法の改良も含めて研究を継続していく。

また、これまでの束縛エネルギー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。具体的には、異なる二つの演算子、指数型演算子とウォール型演算子を用いた計算を比較した。励起状態の寄与が抑えられていない小さな虚時間領域では、二つの演算子から得られた結果は異なる。ウォール型演算子では、励起状態が抑えられるまでに大きな虚時間領域を取る必要があるが、その領域で得ら

れた束縛エネルギーは、指数型演算子から得られた結果と一致した。これまでの計算で用いている指数型演算子では、励起状態の寄与はウォール型演算子よりも小さな虚時間で抑えられるため、これまでの計算では励起状態の系統誤差は十分小さいと考えられる。

さらに、ウォール型演算子から得られる有効エネルギー差の体積依存性を調べた。束縛状態、2核子散乱状態、核子-励起核子散乱状態を考慮し、各状態のエネルギーを別計算で得られた値で固定した解析を行った。図2に、各体積の有効エネルギー差のフィット結果と2核子散乱状態と核子-励起核子散乱状態の係数の体積依存性を示す。この結果から、ウォール型演算子は体積が大きくなると散乱状態の寄与が体積に比例して大きくなることを示した。つまり、ウォール型演算子は束縛エネルギー計算に適さないことを示唆した。

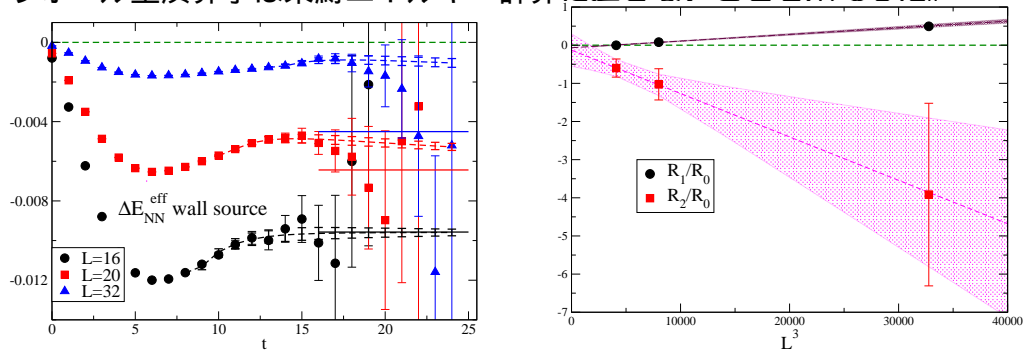


図 2: (左) ウォール型演算子を用いた有効二核子エネルギー差。各体積の色に対応する破線はフィット関数 $\Delta E_{NN}^{\text{eff}} = \sum_{i=0}^2 R_i e^{-\Delta E_i t}$ を使ったフィット結果。 $i = 0, 1, 2$ は束縛状態、2核子散乱状態、核子-励起核子散乱状態に対応する。実線は各体積での指数型演算子から得られた束縛エネルギーの値。(右) 散乱状態係数比の体積依存性。茶色と桃色破線はフィット結果。

(3) 格子 QCD を用いた核子構造研究

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かった。

藏増、山崎は、宇川名誉教授と、広島大学 石川健一准教授、東北大学 佐々木勝一准教授、理研計算科学研究センター 新谷栄悟研究員、東北大学大学院生塚本夏基氏とともに、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 146 MeV) を用いた核子形状因子計算を行ない、論文としてまとめた (論文 12)。

さらに、現実的クォーク質量直上で、一辺が 10 fm を超える体積のゲージ配位「PACS10」配位を用いた計算を行った (論文 13)。その結果を図 3 にまとめる。図 3 は、電磁形状因子から得られた荷電半径 $\langle r_E^2 \rangle_V^{1/2}$ 、磁気的半径 $\langle r_M^2 \rangle_V^{1/2}$ 、磁気能率 μ_V について、本計算結果 (青塗丸) と実験値 (緑線)、及び以前の結果

(白抜き青丸)を比較したものである。本計算は論文 12 の結果 (PACS'18) よりも高精度であり、実験と良く一致した結果が得られた。荷電半径の実験値の違いは陽子パズルとして知られており、今後さらなる高精度計算を行い、このパズルの解明に挑戦する計画である。

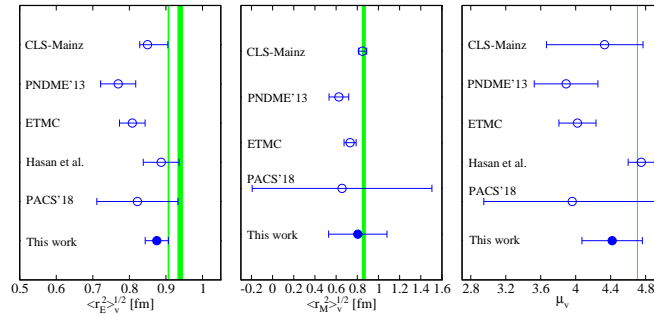


図 3: 荷電半径 $\langle r_E^2 \rangle_V^{1/2}$ (左)、磁氣的半径 $\langle r_M^2 \rangle_V^{1/2}$ (中央)、磁気能率 μ_V (右)。青塗丸、白抜き青丸、緑線は、PACS10 配位結果 (論文 13)、以前の結果、実験値を表す。PACS'18 は論文 12 の結果。

(4) 現実的クォーク質量を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算

大学院生 賀数と山崎は現実の K 中間子質量及び K 中間子質量でのセミレプトニック崩壊の動的 2 + 1 フレーバー大規模格子 QCD シミュレーションを行うことで、CKM 行列要素の一つである V_{us} (の絶対値) の決定を行った。この物理量はクォークの世代間混合を表す行列である CKM 行列の行列要素のうち、アップクォークとストレンジクォークの混合の度合いを表す量である。この行列は標準理論においてユニタリー性を持つと考えられ、ユニタリー性の確認を行うことで標準理論を超える物理の検証を行うことができる。

V_{us} の測定は K 中間子のセミレプトニック崩壊の崩壊率を測り、そこから $|V_{us}|$ とセミレプトニック形状因子と呼ばれるハドロニックな補正を表す量との積が得られる。この形状因子を制限することで $|V_{us}|$ が得られる。

本研究では K 中間子セミレプトニック崩壊を表すハドロン行列要素を計算、そこからセミレプトニック形状因子の構成を行った。また、実験でよく使われている monopole ansatz や QCD の低エネルギー有効理論であるアップ、ダウン、ストレンジクォークのカイラル対称性の破れに関わる SU(3) カイラル摂動論から得られた形状因子の表式等を使って、CKM 行列要素の評価に必要な運動量移行がゼロでの形状因子の結果を評価、これと実験結果を組み合わせ、 $|V_{us}|$ の評価を行い、標準理論の予測と無矛盾な結果を得た。図 4 には、本研究結果 (赤四角と赤丸) と標準模型の予測 (茶色帯)、及びこれまでの研究結果を示す。今後は詳細な系統誤差の見積もり、具体的には、励起状態の寄与や離散化誤差の評価等を行う予定である。

(5) 場の理論的相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数

場の理論で定義される二体粒子 Bethe-Salpeter 波動関数からは、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できるだけでなく、実

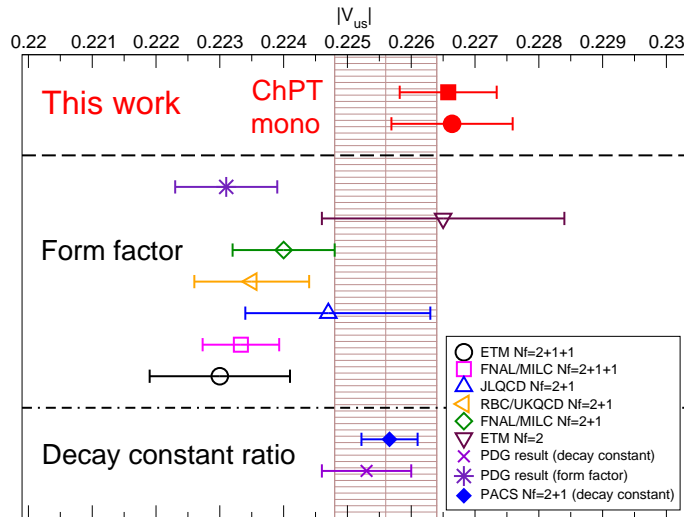


図 4: $|V_{us}|$ の他の研究結果 (形状因子の計算結果、崩壊定数の比の計算結果から) との比較。茶色の帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

験で観測される質量殻上散乱振幅を一般化した半質量殻外散乱振幅を求める公式も導出できる。

藏増、山崎は、昨年度導出した Bethe-Salpeter 波動関数と散乱振幅の関係式を元に議論を発展させ (論文 9)、現在、他グループで用いられている計算方法から正しい結果を得るために必要な条件を議論した。

(6) 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振幅

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 2 パイ中間子系において、相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いて散乱振幅を決定した (論文 6)。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。

昨年度は、さらに散乱振幅のパイ中間子質量依存性を調べ、論文としてまとめた (論文 8)。この論文では、演算子依存性や虚時間依存性などの散乱振幅の性質についても議論を行った。

(7) K 中間子崩壊振幅の研究

素粒子標準模型には、昔からの未解決な問題で、かつ標準模型の検証において極めて重要な問題が残されている。K 中間子崩壊での $\Delta I = 1/2$ 則の解明と、CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) の理論からの予測である。これらの問題には、K 中間子が二つの π 中間子に崩壊する場合の崩壊振幅の計算が必要である。

石塚、吉江らは、格子 QCD により崩壊振幅を格子 QCD により数値計算し、問題の研究を行った。 π 中間子質量 $m_\pi = 250 \text{ MeV}$ の元で、終状態の π 中間子状

態が運動量をもった物理的な崩壊過程について計算した。(文献.15)。この計算により、 $\Delta I = 1/2$ 則の兆候を見ることができた。 CP 非保存パラメータ (ϵ'/ϵ) に関しては、実験値を再現する結果が得られた： $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (1.94 \pm 5.72) \times 10^{-3}$, (実験値： $(1.66 \pm 0.23) \times 10^{-3}$)。

標準模型から実験値を再現できたことは一定の成果ではあるが、より詳細な標準模型の検証のためには、 CP 非保存パラメータの有限値を求める必要がある。そのためには現在の計算誤差を $1/5$ 以下にする必要がある。現在、 K 中間子、 π 中間子の演算子を改良し統計誤差を小さくすることを考え、その試験計算を行っている。

(8) Gradient flow による K 中間子 B パラメータの研究

K 中間子の $K^0 \bar{K}^0$ 混合は、間接的な CP の破れを与える重要な物理現象である。 $K^0 \bar{K}^0$ 混合の実験結果から弱い相互作用の CKM 行列要素を引き出すためには、強い相互作用による補正項である B パラメータ B_K を量子色力学に基づき評価しておく必要がある。非摂動的な問題なので、計算機を用いた格子による評価が重要で、多くの先行研究がある。ダブラー問題を避けて Wilson フェルミオンにより B パラメータを評価しようとする、従来の計算では、カイラル対称性の陽な破れのために、本来カイラル対称性から禁じられている寄与が混入してしまい、これを差し引きするために大きな誤差がもたらされていた。

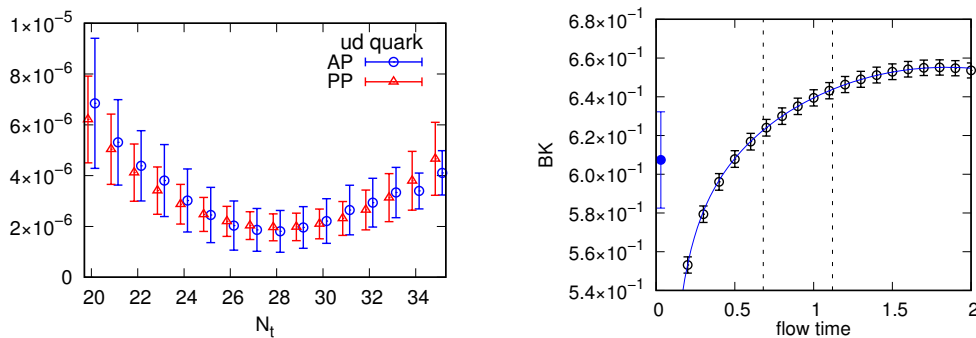


図 5: グラジエントフロー法による、 K 中間子 B パラメータの研究。左図：PCAC 関係式の計算。(学会発表 23) 横軸は空間距離。右図： K 中間子 B パラメータ B_K の計算。横軸はフロー時間 t 。(学会発表 24)

この問題に対する解決策として、我々はグラジエントフローを用いる方法を有力視している。上記有限温度の場合と同様に、ゼロ温度でも、カイラル対称性の関係した物理量の正しくくりこまれた値を評価する上で、グラジエントフロー法が有力であると期待している。グラジエントフローによるカイラル対称性の回復を確認するために、谷口、鈴木、馬場は、グラジエントフロー法を用いて PCAC 関係式の検証を行った。図 5 の左図で、赤と青のデータはそれぞれ PCAC 関係式の左辺と右辺の評価結果を表している。期待どおり、両者がよく一致していることがわかる。(学会発表 23)

これを受け、谷口と鈴木は B パラメータの数値計算に着手した。図5の右図で、今回測定された B パラメータのフロー時間依存性を示す。黒が各フロー時間 t で得られた B_K の結果を表し、青が、小さな t での格子誤差を避けながら $t \rightarrow 0$ に外挿した結果である。ここから $B_K = 0.607(24)$ を得た。ただし、現在計算に使用しているクォークは物理的な値と比して非常に重い ($m_\pi \sim 630\text{MeV}$)。このために、今回の結果は FLAG 等の結果よりも大きな値となっていると考えられる。(学会発表 24)

(9) 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、谷口らは、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授らとの共同研究で、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た。格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、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。本研究では、この非摂動的なくりこみの問題に関して、グラジエントフロー (勾配流) を用いて根本的な解決を図る。Lüscher らにより提案されたグラジエントフロー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適用して、クォーク物質の熱力学特性を研究している。2016-2017 年度に実行したクォークが重い場合の $N_F = 2+1$ QCD で最初の研究により、エネルギー運動量テンソルの対角成分が従来の方法による状態方程式を再現することを示し、カイラル感受率がクロスオーバー温度でピークを示すことをウィルソン型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を評価し、アクシオン質量がインスタントン模型の予想と一致する温度依存性を持つことを示した。2018 年度は、この研究を発展させ、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推進した。並行して、エネルギー運動量テンソルの相関関数やグラジエントフロー法のマッチング係数における高次項の効果の研究などを行った。

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

(i) 物理点でのシミュレーション

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。また、グラジエントフローのクーリング効果によって、誤差の大部分を占めるゲージ配位の揺らぎが押さえられ、従来の計算手法に比べて高精度の計算が可能になることが期待される。クォークが重い場合にグラジエントフロー法の高い有用性が示されたことをうけ、計算コストの

高い物理点での研究をグラジエントフロー法で推進することとし、改良ウィルソン型クォーク作用と岩崎ゲージ作用を用いて、クォーク質量を現実の値に合わせた研究を開始した。PACS-CS Collaboration が生成した $32^3 \times 64$ 格子、格子間隔 $a \approx 0.09\text{fm}$ のゼロ温度物理点配位を利用し、固定格子間隔法で $T \approx 122\text{-}544\text{MeV}$ ($N_t = 18\text{-}4$) の温度をシミュレーションしている。クォークが重い場合の $a \approx 0.07\text{fm}$ より格子がやや粗いので、温度 $T = 1/(N_t a)$ をより細かく変える為に、奇数の N_t も数点採用している。クォークが重い場合は 190MeV 周辺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。

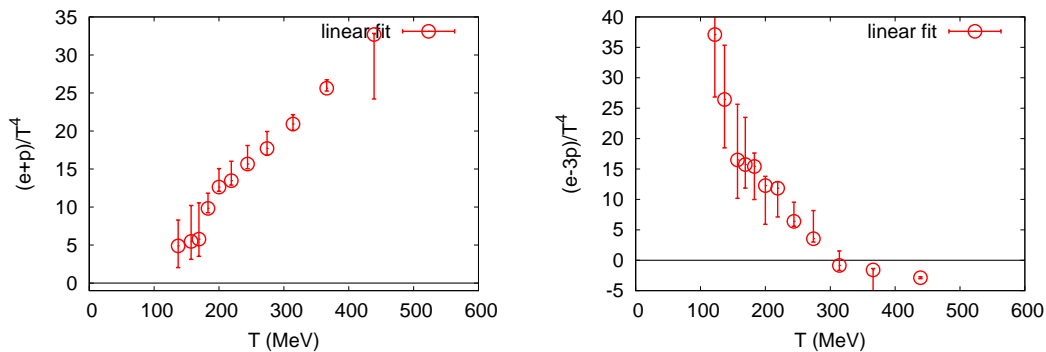


図 6: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD の状態方程式。現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。左図: エントロピー密度 $\epsilon + p$ 。右図: トレース・アノマリ $\epsilon - 3p$ 。横軸は温度 T 。(学会発表 20)

格子場の理論国際会議 LATTICE2017 で行った中間発表(論文 16)で、エネルギー運動量テンソルの一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ことが確認された。他方、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、クォークが重い場合より格子化誤差が大きい傾向があり、より高い統計と精密な系統誤差評価が必要である。この発表の段階である程度完了していた $T > 157\text{MeV}$ ($N_t \leq 14$) でのシミュレーションから、相転移温度がかなり低そうである ($T_{pc} < 169\text{MeV}$) ことが示唆されたが、相転移点の特定には至らなかった。

その後、より低温側の $T \approx 122\text{MeV}$, 137MeV ($N_t = 18, 16$) を含むシミュレーションを系統的に進めた。図 6 に、2018 年度末の学会発表の段階での状態方程式の結果を示す。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まだ無いが、クォークが重い場合の経験から、 $T > 247\text{MeV}$ ($N_t \leq 8$) では格子化誤差が小さくないと予想される。

物理点でのカイラル凝集の現状の結果を図 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。クォークが重い場合には、u, d クォーク質量が s クォーク質量と同程度だったために、両者のカイラル凝集が同様の振る舞いを示していたが、u, d クォークの質量が下がる

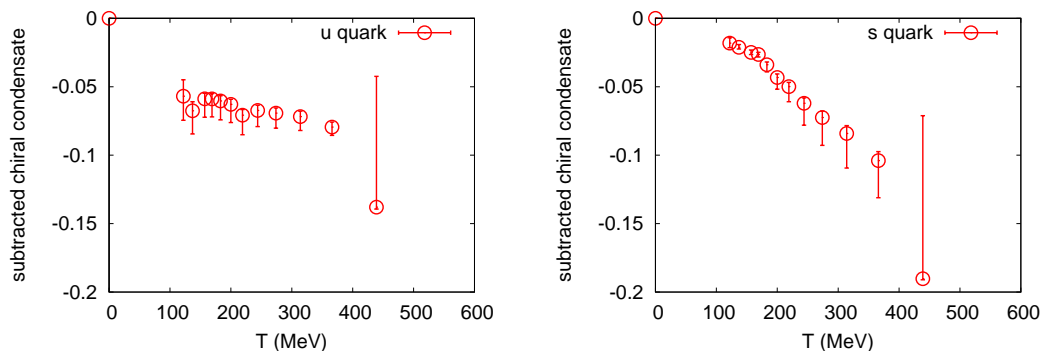


図 7: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のカイラル凝集。真空期待値が差し引かれている。現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。左図: u, d クォーク。右図: s クォーク。(学会発表 20)

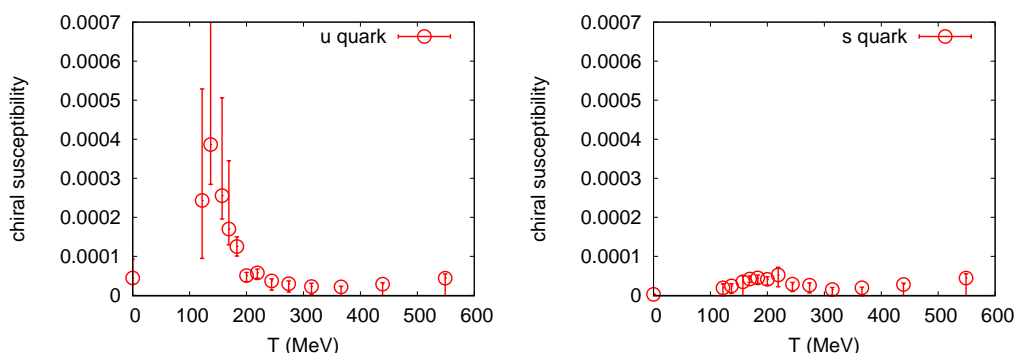


図 8: グラジエントフロー法による有限温度 (2+1)-flavor QCD のカイラル感受率の非連結部分。現実のクォーク質量の結果 (preliminary)。左図: u, d クォーク。右図: s クォーク。(学会発表 20)

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わかる。s クォークのカイラル凝集から、 $T \sim 130-150$ 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。

低温格子 ($N_t = 18, 16$ など) の統計はまだ十分ではないが、これらの結果から相転移点近傍であることが想像される。それをより明確に見るために、カイラル感受率の非連結部分を図 8 に示す。この u, d クォークの結果からは、 $122 < T_{pc} < 146$ MeV に臨界温度があると示唆される。この低い臨界温度は、改良スタガード型クォークを用いた連続極限の結果 $T \sim 150$ MeV と矛盾しない。現在、この臨界温度近傍で、統計を上げるための配位生成や、奇数 N_t シミュレーションを進めている。

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

(ii) 格子間隔依存性

2016-2017 年度に実行したクォークが重い場合の (2+1)-flavor QCD で最初の研究では、エネルギー運動量テンソルやカイラル感受率、位相感受率などで、物理的期待と一致する様々な結果が得られた。これらの結果は、 $a \approx 0.07\text{fm}$ の格子間隔 1 点で得られたものである。様々な物理量で、全く異なる評価方法の結果が良く一致していることにより、この格子が連続極限に近いことが強く示唆されるが、格子間隔依存性が小さいことは直接確認しておく必要がある。そのために、このクォークが重い場合で格子間隔を変えた研究も進めている。統計がまだ十分ではないが、状態方程式について格子間隔依存性が大きくないことを示唆する中間結果を得た。(学会発表 10)

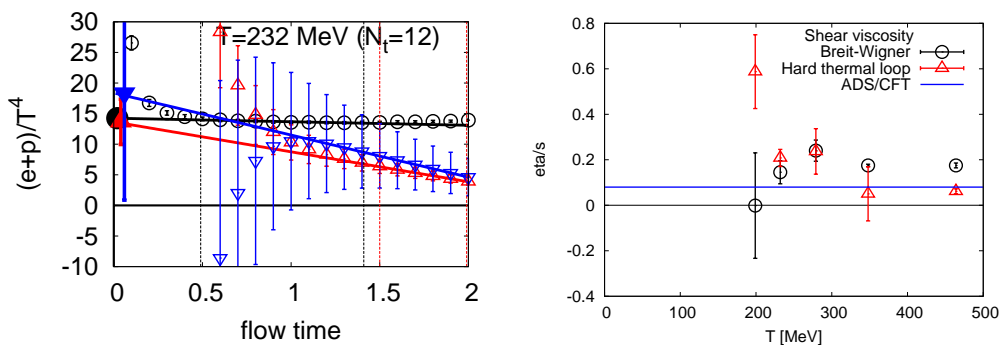


図 9: グラジエントフロー法による、有限温度 (2+1)-flavor QCD における、エネルギー運動量テンソルの二点相関関数の研究。クォークが重い場合の結果 (preliminary)。左図: 様々な方法で計算したエントロピー密度。横軸はフロー時間 t 。(論文 17) 右図: 剪断粘性係数 η とエントロピー密度 s の比。青線は ADS/CFT 対応から予言される $1/(4\pi)$ 。(論文 19)

Gradient flow を用いたエネルギー運動量テンソル相関関数と輸送係数の研究

グラジエントフロー法でエネルギー運動量テンソルそのものが計算できるようになったことにより、その非対角要素や二点相関関数も直接評価可能となった。そこから、輸送係数など、クォーク物質の様々な熱力学特性を引き出す試みを進めている。最初の試みとして、クォークが重い場合を研究した。

図 9 の左図に、様々な方法で計算したエントロピー密度の結果を示す。赤三角と青三角はエントロピー密度をエネルギー運動量テンソルの異なる成分の二点関数から線形応答関係式を用いて評価した結果で、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我々の 2017 年の結果である。誤差はまだ大きいですが、フロー時間がゼロの極限 $t \rightarrow 0$ で、格子間隔依存性が取り除かれ、三つの結果が期待どおり一致することが見て取れる。(論文 17)

図 9 の右図では、エネルギー運動量テンソルの二点関数から評価した剪断粘性係数 (shear viscosity η) の中間結果を示す。剪断粘性率の計算にはスペクトル関数の低エネルギー極限を評価する必要がある。ここでは、エネルギー運動量テンソルの二点関数をスペクトル関数に関する 2 種類のモデル関数 (Breit-Wigner 型および hard thermal loop 型) でフィットし、その低エネルギー極限をとった。図 4 の右図でこれら 2 種類の評価結果を黒丸と赤三角で示す。重イオン衝突実

験の示唆する $\eta/s \sim 0.12$ や AdS/CFT 対応理論の予言である $\eta/s = 1/(4\pi)$ に近い結果を得た。ただし、二点関数では格子化誤差が一点関数より大きくなる傾向があり、系統誤差の精密な評価に向けて更なる研究が必要である。(論文 19)

その他

相転移点の特定において、カイラル感受率の非連結部分が大きな役割を果たした。カイラル感受率の連結部分については、計算にクォーク二体演算子の相関関数の評価が要求される。スタガード型クォークなどを使った先行研究では、カイラル感受率の連結部分は相転移に敏感では無さそうであることが報告されている。グラジエントフローを使ってクォークが重い場合の連結部分を評価した結果、ウィルソン型クォークでも同様の振る舞いが示唆されることを見た。(論文 18)

フル QCD の研究と並行して、SU(3) ゲージ理論における一次相転移の研究も継続している。これは、有限密度 QCD やクエンチ近似 QCD 近傍のクォークが非常に重い場合に期待されている一次相転移やその端点(臨界点)の検出に向けての計算技法開発の一環でもある。グラジエントフロー法を用いて SU(3) ゲージ理論の潜熱評価を見直し、従来の方法との比較や、格子間隔効果、有限体積効果の検証を行った。(論文 20)

(10) 4 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点

有限温度 QCD における相転移の次数は、クォークのフレーバー数及び質量に依存して多様に変化すると予想されている。特に、3 フレーバー QCD の場合、クォーク質量 0 の極限では 1 次相転移となり、クォーク質量を大きくしていくと、2 次相転移点である臨界終点を経て、クロスオーバーになると期待されている。しかしながら、これまでの格子 QCD 研究の結果は、連続極限に近づく程、臨界終点でのクォーク質量が小さくなり、その近づき方も、フェルミオン作用の違いで大きく異なることを示しており、未だに臨界終点の位置について、確定的な結果は得られていない。

大野は、筑波大の藏増嘉伸教授、金沢大の武田真滋准教授、理研の中村宜文氏らとともに、ウィルソン型フェルミオン作用を用いて、有限温度 4 フレーバー QCD の臨界終点を調べた(論文 21)。ここで、4 フレーバー QCD は、3 フレーバー QCD と同様に、クォーク質量 0 の極限で 1 次相転移があり、スタガード型フェルミオン作用でしばしば疑問視されている rooting の必要もないため、スタガード型とウィルソン型フェルミオン作用の結果をより理想的な条件で比較できる。よって、3 フレーバー QCD の結果を検証する上でよい比較対象となる。本研究では時間方向の格子サイズを 4、6、8 として計算を行い、それらの結果を用いて臨界終点の連続極限をとった。得られた結果を、先行研究の 3 フレーバー、ウィルソン型フェルミオン作用での結果と比較すると、4 フレーバーの場合の方が、臨界終点におけるパイ中間子質量が大きいことが分かった。また、同様に、スタガード型フェルミオン作用の結果と比較すると、3、4 フレーバー共に、ウィルソン型フェルミオン作用の方が大きい π 中

間子質量を持つことが分かった (図 10)。

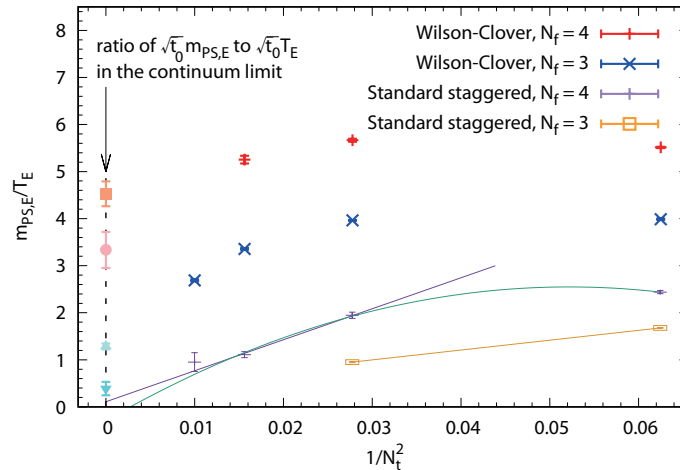


図 10: 臨界終点における π 中間子質量の格子間隔依存性。3、4 フレーバールンソン型フェルミオン作用の結果をそれぞれ青、赤色の点で示す。同様に、スタaggered型フェルミオン作用の結果をそれぞれ橙、紫色の点で示す。

(11) クォーコニウムスペクトル関数の研究

有限温度におけるクォーコニウムのスペクトル関数は、クォーコニウムの高温媒質中での振る舞いや、重クォーク輸送に関する情報を含んでおり、重イオン衝突実験で実現していると考えられるクォーク・グルーオン・プラズマの性質を、理論的に理解する上で非常に有用である。しかしながら、格子 QCD による第一原理計算において直接得られる量は相関関数であり、これはスペクトル関数を積分したものと関係している。従って、スペクトル関数は、相関関数に対する逆問題を解くことによって得ることができる。ところが、これは典型的な ill-posed 問題として知られており、解くことは一般的に非常に困難である。

大野は、主に、華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 氏、Brookhaven 国立研究所の Swagato Mukherjee 氏らと共に、Stochastic 法を用いてクォーコニウムのスペクトル関数を計算した (論文 22)。得られた結果を、従来よく用いられている最大エントロピー法の結果と比較したところ、互いに無矛盾な結果が得られることが分かった。また、スペクトル関数の形状をみることで、クォーコニウムの消失温度や重クォーク拡散係数を調べた (論文 23)。

(12) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD 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（現理研計算科学研究センター）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。

平成 30 年度における課題 (i) ~ (iv) の主要な研究成果は、以下のとおりである。課題 (i) : 3 次元 Z_2 ゲージ理論を TN 法によって数値計算するためのアルゴリズム開発を行った。具体的には、Higher Order Tensor Renormalization Group(HOTRG) 法をベースとしたアルゴリズム改良を行い、3 次元 Z_2 ゲージ理論における有限温度相転移の高精度解析に成功した。図 11(左) は、比熱の体積依存性をプロットしたものである。体積が増大するにつれて、期待通り鋭いピークが形成されている。これらの解析結果を論文にまとめ、現在学術雑誌に投稿中である（論文 27）。課題 (ii)、(iii) : 一般的に、TN 法はモデルの次元が上がるにつれて計算コストが増大する。そのため、これまで TN 法の主な応用例は 2 次元モデルに限られており、4 次元モデルへの適用例は存在しない。われわれは、4 次元における最も簡単なモデルであるイジングモデルに対して HOTRG 法を応用し、相転移現象の解析を試みた。その際、不純物テンソル法と呼ばれるグリーン関数計算手法を用いて内部エネルギーを計算し、その温度・体積依存性を詳細に調べることによって相転移の次数決定を可能とした。今後論文の取り纏めの作業に入る予定である。課題 (iv) : 素粒子標準理論およびそれを超える理論の重要な構成要素としてスカラー理論における自発的対称性の破れがある。その低次元モデルとして 2 次元 ϕ^4 理論に着目し、TN 法による自発的対称性の破れの解析に取り組んだ。具体的には、自発的対称性の破れが起きる臨界結合定数の高精度計算を行った。図 11(右) は臨界結合定

数の連続極限への外挿の様子を表している。他グループによる異なる手法で得られた結果と比較すると、連続極限において概ね誤差の範囲で矛盾しない結果が得られている (論文 26)。

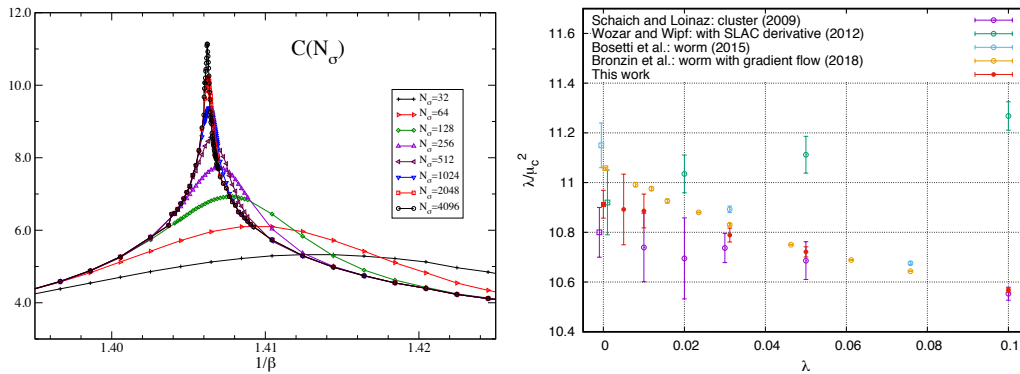


図 11: (左)3次元 Z_2 ゲージ理論における比熱の体積依存性。(右)2次元 ϕ^4 理論における臨界結合定数の連続極限への外挿。

(13) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補の一つである。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結果を加え、崩壊定数などの物理量のカイラル外挿解析を更新した。また、4、8、12フレーバー理論のフレーバー1重項擬スカラー中間子質量の比較や8フレーバー理論のSパラメータ計算を行った。

(14) 格子QCD研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用

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。2018年に実運用を開始して以来10年経過した現在、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、数年前から一定の完成の域に達しており、今年度もシステムの増強・安定運用を主眼に活動を行った。

システムメンテナンス等の日常業務以外の活動は、以下の通りである。

- (a) 東大拠点整備 (Intel AMT を利用した遠隔監視・起動・停止システム構築)
- (b) 筑波大 IPMI 管理ネットワークの整備
- (c) 公開 QCD 配位の DOI 登録 (『DOI 登録ポリシー』 『公開データ管理ポリシー』 の策定, JicFus 内に DOI 運用部会を立ち上げ)
- (d) 利用統計集計システムの整備
- (e) 新拠点設置準備
- (f) セキュリティ向上 (脆弱性対策、ILDG 基本サービスの一部中止と代替手段の提供)

【 2 】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、佐藤 勇二、毛利 健司)

(1) 光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化とループ振幅

超弦理論は散乱振幅の摂動論に紫外発散がないことが知られているが、超弦の場の理論においてはコンタクトタームの問題と呼ばれる問題があり、tree 振幅でさえ見かけ上発散してしまうため、正則化を与えなければ定義することが出来ない。また、D-ブレーンの影響等の散乱振幅とは異なる量を計算する際には、弦の理論のうまい正則化の方法を与えることが必要不可欠になる。

石橋は村上 (釧路高専) らとのこれまでの研究で、様々な場合について光円錐ゲージの超弦の場の理論の次元正則化を用いた計算により、第一量子化の計算と一致する結果を得ることができるということを示してきた。今年度は、次元正則化を用いた超弦の場の理論から計算されるすべての散乱振幅が第一量子化の結果を再現することを示した (論文 28)。また、光円錐ゲージの超弦の場の理論を用いた 1 loop の計算の例を示した。

(2) ゲージ-重力双対性と可積分性に基づく強結合ゲージ理論の研究

重力理論とゲージ理論の双対性により、planar 極限での 4 次元極大超対称ゲージ理論の強結合散乱振幅は、反ドジッター時空中の光的境界を持つ極小曲面の面積で与えられる。この散乱振幅は光的経路からなるウィルソンループの真空期待値と等価である。

佐藤は、伊藤 (東京工業大)、鈴木 (静岡大) と共に、6 点強結合散乱振幅を与える Z_4 可積分模型の熱力学的ベータ仮説方程式が、化学ポテンシャル・質量項が大きな極限で解析的に解けることを示し、対応する強結合 6 点散乱振幅を求めた。これは、散乱振幅の研究で重要な役割を果たしてきた Z_6 対称性を持つ運動学的配位および soft/collinear 極限での強結合散乱振幅を内挿する解析的表式を与えるものである。また、これまでに解析されてきた運動学的配位と対照的に、こうした運動学的配位においては強弱結合の散乱振幅の振舞いが大きく異なることを明らかにした (論文 29)。

(3) 行列模型における非可換幾何の研究

超弦理論の非摂動的定式化として期待されている行列模型では、弦やDブレーンといった物体は、行列を変数とするある種の非可換幾何により表される。伊敷・松本はSogang大学の村木研究員との共同研究において、この非可換幾何がBerezin-Toeplitz量子化と呼ばれる方法により通常の微分幾何と対応づけられることを示した(論文30)。伊敷と松本はさらにこの対応について研究を進め、非可換幾何における微分同相写像を定式化した(論文31)。また、伊敷・松本は上述の村木研究員、慶応大学の松浦教授、前橋工科大学の浅川嗣彦准教授らとともに、伊敷が過去に提唱した行列の幾何学の定式化について研究を行った。その結果、この方法が超弦理論におけるタキオン凝縮と呼ばれる現象において重要な役割を果たすことが示された(論文32)。

(4) constant magnetic field に対応した弦の場の理論の古典解の研究

弦の場の理論の運動方程式の厳密解は、Schnablによるタキオン真空解の発見以来活発に研究されている。最近ErlerとMaccaferriは、時間に依らない運動方程式の解の場合、任意のBCFTに対応する厳密解を書き下すことができることを示した。石橋は、岸本(新潟大)、増田(プラハ物理学研究所)、高橋(奈良女子大)らとともに、ErlerとMaccaferriの方法を用いて構成されたconstant magnetic fieldに対応した弦の場の理論の厳密解のベクトル場の配位とトポロジーとの関係を調べた(論文33)。

(5) ゲージ理論の部分的閉じ込め相の研究

伊敷・渡辺は英国Southampton大学の花田研究員との共同研究において、ゲージ理論における閉じ込め相と非閉じ込め相の中間領域に「部分的閉じ込め相」と呼ばれる新たな相が存在し得ることを指摘した(論文34)。伊敷らはオーダーパラメータであるポリヤコフループの位相分布が、いくつかのゲージ理論で実際に部分的に閉じ込めを起こしていることを確かめた。さらに調べた全ての例において、部分的閉じ込め相から完全な非閉じ込め相への相転移は2次元のゲージ理論において発見されたGross-Witten-Wadia相転移と同じ形をとることが確認され、この性質が部分的閉じ込め相の持つ普遍的なものであることが示唆された。伊敷らはさらにこの部分的閉じ込め相が、ゲージ/重力対応の文脈において小さなブラックホールの存在する相に対応することを議論した。

論文

1. PACS Collaboration: Eigo Shintani and Yoshinobu Kuramashi, Study of systematic uncertainties in hadronic vacuum polarization contribution to muon $g - 2$ with 2+1 flavor lattice QCD, arXiv:1902.00885 [hep-lat].
2. PACS Collaboration: Eigo Shintani and Yoshinobu Kuramashi, Analysis of systematic error in hadronic vacuum polarization contribution to muon $g - 2$, PoS(LATTICE2018) (2019) ref.060.

3. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié, Finite size effect on pseudoscalar meson sector in 2+1 flavor QCD at the physical point, *Phys.Rev. D99* (2019) no.1, ref.014504.
4. PACS Collaboration: Naoya Ukita, Ken-Ichi Ishikawa, and Yoshinobu Kuramashi, Utility of geometry in lattice QCD simulations, *Phys.Rev. D98* (2018) no.1, ref.014515.
5. PACS Collaboration: Taku Izubuchi, Yoshinobu Kuramashi, Christoph Lehner, and Eigo Shintani, Finite-volume correction on the hadronic vacuum polarization contribution to the muon $g - 2$ in lattice QCD, *Phys.Rev. D98* (2018) no.5, ref.054505.
6. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, Scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range, *Phys. Rev. D 98*, No. 1 (2018) ref. 011501, pp.1-5.
7. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, Quark mass dependence of on-shell and half off-shell scattering amplitudes from Bethe-Salpeter wave function inside the interaction range, arXiv:1904.00387 [hep-lat].
8. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki, Scattering length from BS wave function inside the interaction range, *PoS(LATTICE2018)* (2019) ref.078 pp.1-7.
9. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, Reply to “ Comment on ‘ Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory ’ ”, *Phys. Rev. D 98*, No. 3 (2018) ref.038502, pp.1-4.
10. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi, Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory, *PoS(LATTICE2018)* (2019) ref.077, pp.1-7.
11. Takeshi Yamazaki, Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range, *Springer Conference Proceedings* (2019) pp.1-7, in press.
12. PACS Collaboration: Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Natsuki Tsukamoto, Akira Ukawa, and Takeshi Yamazaki, Nucleon form factors on a large volume lattice near the physical point in 2+1 flavor QCD, *Phys. Rev. D 98*, No. 7 (2018) ref.074510, pp.1-23.

13. PACS Collaboration: Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, and Takeshi Yamazaki, Nucleon form factors and root-mean-square radii on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point, *Phys. Rev. D* 99, No. 1 (2019) ref.014510, pp.1-23.
14. PACS Collaboration: J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié, Calculation of $K \rightarrow \pi l \nu$ form factor in $N_f = 2 + 1$ QCD at physical point on $(10 \text{ fm})^3$, *PoS(LATTICE2018)* (2019) ref.265, pp.1-7.
15. N. Ishizuka, K.-I. Ishikawa, A. Ukawa, T. Yoshié, Calculation of $K \rightarrow \pi\pi$ decay amplitudes with an improved Wilson fermion action in a nonzero momentum frame in lattice QCD, *Phys. Rev. D* 92 (2015) ref.074503.
16. 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 Conferences* 175 (2018) ref.07023, pp.1-8.
17. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, 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 Conferences* 175 (2018) ref.07013, pp.1-8.
18. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi and Takashi Umeda, Measuring of chiral susceptibility using gradient flow, *PoS (LATTICE 2018)* (2019) ref.173, pp.1-6.
19. Yusuke Taniguchi, Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Asobu Suzuki, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f = 2 + 1$ full QCD for QGP viscosities, *PoS (LATTICE 2018)* (2019) ref.166, pp.1-6.
20. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda, Equation of state near the first order phase transition point of $SU(3)$ gauge theory using gradient flow, *PoS (LATTICE 2018)* (2019) ref.164, pp.1-6.
21. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions *PoS (LATTICE 2018)* (2019) ref.174.

22. H. T. Ding, O. Kaczmarek, S. Mukherjee, H. Ohno and H. T. Shu Stochastic reconstructions of spectral functions: Application to lattice QCD Phys. Rev. D 97, no. 9 (2018) ref.094503.
23. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A.-L. Kruse, R. Larsen, L. Mazur, Swagato Mukherjee, H. Ohno, H. Sandmeyer and H.-T. Shu Charmonium and bottomonium spectral functions in the vector channel Nucl. Phys. A 982 (2019) ref.715.
24. Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, and Ryoichiro Ueno, Irregular parameter dependence of numerical results in tensor renormalization group analysis, PTEP in press.
25. Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, Tensor network study of two dimensional lattice ϕ^4 theory, PoS(LATTICE2018) (2019) ref.232.
26. Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Ryo Sakai, Shinji Takeda, and Yusuke Yoshimura, Tensor network analysis of critical coupling in two dimensional ϕ^4 theory, JHEP 1905 (2019) ref.184.
27. Yoshinobu Kuramashi and Yusuke Yoshimura, Three-dimensional finite temperature Z_2 gauge theory with tensor network scheme, arXiv:1808.08025 [hep-lat].
28. N. Ishibashi, Multiloop Amplitudes of Light-cone Gauge Superstring Field Theory for Type II Superstrings, arXiv:1810.02801 [hep-th], UTHEP-724.
29. Katsushi Ito, Yuji Satoh and Junji Suzuki, MHV amplitudes at strong coupling and linearized TBA equations, JHEP **1808** (2018) 002.
30. G. Ishiki, T. Matsumoto and H. Muraki, Information metric, Berry connection and Berezin-Toeplitz quantization for matrix geometry, Phys.Rev. D98 (2018) no.2, 026002.
31. G. Ishiki, T. Matsumoto, Diffeomorphisms on Fuzzy Sphere, arXiv:1904.00308 [hep-th], UTHEP-734.
32. T. Asakawa, G. Ishiki, T. Matsumoto, S. Matsuura and H. Muraki, Commutative Geometry for Non-commutative D-branes by Tachyon Condensation, PTEP 2018, no. 6, 063B04.
33. N. Ishibashi, I. Kishimoto, T. Masuda and T. Takahashi, Vector profile and gauge invariant observables of string field theory solutions for constant magnetic field background, JHEP **1805** (2018) 144.
34. M. Hanada, G. Ishiki, H. Watanabe, Partial Deconfinement, JHEP 1903, 145 (2019).

著書・総説等

1. 藏増嘉伸
「経路積分における数値的方法 - 確率的手法と決定論的手法 - 」 数理科学
2019年2月号 サイエンス社

学位論文

[博士論文]

1. 賀数 淳平
「Calculation of V_{us} from lattice QCD」
2. 鈴木 遊
「Study of Kaon Bag Parameter with Wilson Fermion using Gradient Flow」

[修士論文]

1. 秋山 進一郎
「高次テンソル繰り込み群による4次元 Ising 模型の比熱の解析」
2. 栗田 竣介
「QED の漸近対称性と低エネルギー領域の物理」
3. 武田 潤
「非臨界次元の弦理論と $T\bar{T}$ deformation」
4. 渡辺 展正
「ゲージ/重力対応における small Schwarzschild black hole の新しい記述法」

非常勤講師・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
2018年4月から2018年9月まで。
「計算科学特論」(集中講義)を担当。

研究成果発表(講演)

[国際会議]

1. Goro Ishiki, 「Spherical transverse M5-branes from the plane wave matrix model」(招待講演)
IPMU Focus Week on Quantum Gravity and Holography (Kavli IPMU, Chiba, Japan, Apr 2-6, 2018).

2. Shinji Ejiri, Shota Itagaki, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Mizuki Shirogane, Takashi Umeda, Naoki Wakabayashi 「Thermodynamics near the first order phase transition point of SU(3) gauge theory」, YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018)
3. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda 「Thermodynamic quantity near first phase transition point using Gradient flow method」, YITP long-term workshop on New Frontiers in QCD 2018 (NFQCD2018) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, 5.28-6.29, 2018)
4. Takeshi Yamazaki 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function inside interaction range」 (招待講演) XXII International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB22) (Caen Convention Center, France, June 9-13, 2018)
5. Nobuyuki Ishibashi, 「Light-cone gauge string field theory and dimensional regularization - Computation of FI D terms」 (招待講演) 西宮湯川記念国際滞在型研究会 ”New Frontiers in String Theory 2018”, (July 2- August 3, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan).
6. Goro Ishiki, 「Diffeomorphisms for fuzzy spaces」 (招待講演) International workshop “ Matrix Models for Noncommutative Geometry and String Theory, ”(The Erwin Schrodinger International Institute for Mathematics and Physics, Vienna, Austria, Jul 9-13, 2018).
7. Takeshi Yamazaki and Yoshinobu Kuramashi 「Relation between scattering amplitude and Bethe-Salpeter wave function in quantum field theory」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
8. Yusuke Namekawa and Takeshi Yamazaki 「Scattering length from BS wave function inside the interaction range」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
9. Yoshinobu Kuramashi, Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Shoichi Sasaki, Natsuki Tsukamoto and Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration 「Nucleon form factors on a $(10.8\text{fm})^4$ lattice at the physical point in 2+1 flavor QCD」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
10. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshie for PACS Collaboration

- 「 Calculation of $K \rightarrow \pi l \nu$ form factor in $N_f=2+1$ QCD at physical point on $(10 \text{ fm})^3$ 」 The 36th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
11. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, Takashi Umeda 「 Equation of state near the first order phase transition point of $SU(3)$ gauge theory using gradient flow 」 ,
The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 12. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Asobu Suzuki, Atsushi Baba 「 Study of energy-momentum tensor correlation function in $N_f=2+1$ full QCD for QGP viscosities 」 ,
The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 13. Atsushi Baba, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Takanori Shimojo, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, Yusuke Taniguchi, Asobu Suzuki 「 Measuring of chiral susceptibility using gradient flow 」 ,
The 36th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 14. H. Ohno, Y. Kuramashi, Y. Nakamura and S. Takeda 「 Continuum extrapolation of the critical endpoint in 4 flavor QCD with Wilson Clover fermions 」 ,
The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 15. Yusuke Yoshimura and Yoshinobu Kuramashi 「 Z_2 gauge theory with tensor renormalization group 」 , The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 16. Ryo Sakai, Daisuke Kadoh, Yoshinobu Kuramashi, Yoshifumi Nakamura, Sinji Takeda, and Yusuke Yoshimura 「 Tensor network study of two dimensional lattice ϕ^4 theory 」 , The 36th Annual International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2018) (Michigan State University, MI, USA, July 22-28, 2018)
 17. Takaki Matsumoto, 「 Diffeomorphism for fuzzy sphere 」
YITP workshop "Strings and Fields 2018," (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto, Japan, Jul 30-Aug 3, 2018)
 18. Goro Ishiki, 「 The gauge/gravity correspondence for the BFSS matrix model 」
(招待講演)

International workshop “Quantum Gravity meets Lattice QFT” (The European Centre for Theoretical Studies in Nuclear Physics and Related Areas, Trento, Italy, Sep 3-7, 2018)

19. Takeshi Yamazaki 「PACS10 project in lattice QCD」(招待講演) 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (University of Tsukuba, Tsukuba, October 15-16, 2018)
20. Kazuyuki Kanaya 「Thermodynamic quantities in (2+1)-flavor QCD using gradient flow」,
CCS international symposium 2018: 10th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Univ. Tsukuba, Tsukuba, Ibaraki, Japan, 10.15-16, 2018)
21. H. Ohno 「The nature of the finite temperature phase transition of 4 flavor QCD」 Edinburgh-Tsukuba Collaboration Meeting (Bayes Center, The University of Edinburgh, Edinburgh, UK, Decenmber 3-4, 2018)
22. Yoshinobu Kuramashi 「Application of tensor network scheme to particle physics」(招待講演),
International Workshop on Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA 2018-2019), (R-CCS, Kobe, Japan, Dec. 3-6, 2019)
23. Nobuyuki Ishibashi 「An overview of string field theory」(招待講演)
KEK theory workshop 2018, (KEK, Ibaraki, Japan, Dec 17-20, 2018)
24. Takaki Matsumoto, 「Diffeomorphism for fuzzy spaces」(ポスター発表)
KEK theory workshop 2018 (KEK, Ibaraki, Japan, Dec 17-20, 2018)
25. Yuji Satoh 「World-sheet approaches to non-geometric backgrounds in string theory」(招待講演)
String: T-duality, Integrability and Geometry (Tohoku Forum for Creativity, Sendai, Japan, March 4 – March 8, 2019)

[国内学会、研究会]

1. 鈴木 博, 江尻 信司, 石見 涼, 金谷 和至, 北澤正清, 下条 昂礼, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「グラディエント・フローによる量子色力学の状態方程式」,
学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第 10 回シンポジウム (THE GRAND HALL, 東京都, 品川区, 7/12-13, 2018)
2. 谷口 裕介, 馬場 惇, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 鈴木 遊, 鈴木 博, 梅田 貴士 「QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究」,

- 熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018)
3. 金谷 和至, 江尻 信司, 石見 涼, 北澤正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 博, 谷口 裕介, 梅田 貴士 「グラジエントフローによる 2+1 フレーバー QCD の状態方程式 – 格子間隔依存性の検証」,
熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018)
 4. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹 「再重み付け法による SU(3) ゲージ理論の重いクォーク領域における一次相転移終点でのハドロン質量の計算」,
熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018)
 5. 馬場 惇, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北澤正清, 下条 昂礼, 鈴木 博, 谷口 裕介, 鈴木 遊 「Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,
熱場の量子論とその応用 2018 (TQFT2018) (理化学研究所 iTHES, 埼玉県, 和光市, 8.28-30, 2018)
 6. 松本高興 「Berezin-Toeplitz quantization and diffeomorphisms for fuzzy spaces」 (招待講演)
「離散的手法による場と時空のダイナミクス」研究会 (東北大学, 2018 年 9 月 9 日-12 日).
 7. 滑川 裕介, 山崎 剛 「格子 QCD による半質量殻外散乱振幅のクォーク質量依存性評価」日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
 8. 賀数 淳平, 石川 健一, 石塚 成人, 藏増 嘉伸, 中村 宜文, 滑川 裕介, 谷口 裕介, 浮田 尚哉, 山崎 剛, 吉江 友照 for PACS collaboration 「物理点での大規模格子 QCD による軽中間子形状因子計算」日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
 9. 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 遊, 鈴木 博, 馬場 惇 「QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量テンソル相関関数の研究」,
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
 10. 鈴木 博, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 谷口 裕介, 馬場 惇 「Thermodynamic quantities in the $N_f = 2 + 1$ QCD; the case of somewhat heavy ud quarks」,
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
 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 「Gradient flow を用いたカイラル感受率の測定」,
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)

12. 板垣 翔太, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹
「重いクォーク領域における格子 QCD の臨界質量の決定に関するホッピング
パラメータ展開の収束性」,
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
13. 清原 淳史, 板垣 翔太, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 谷口 裕介, 白銀 瑞
樹 「ポリヤコフループを含む作用に基づくモンテカルロ計算による重クォ
ーク QCD の相転移の解析」,
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
14. 鈴木 遊, 谷口 祐介 「Gradient flow を用いた $\Delta S = 1$ の 4-fermion 演算子の
繰り込み因子の計算」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018
年 9 月 14-17 日)
15. 吉村 友佑, 藏増 嘉伸 「テンソルくりこみ群による 3 次元有限温度 Z2 ゲージ
理論」, 日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 松本, 2018 年 9 月 14-17 日)
16. 伊敷吾郎, 松本高興 「Diffeomorphism for fuzzy sphere」
日本物理学会 2018 年秋季大会 (信州大学, 2018 年 9 月 14 日-17 日).
17. 江尻 信司, 金谷 和至, 梅田 貴士, 谷口 裕介, 北澤 正清, 鈴木 博, 若林 直輝, 下
条 昂礼, 鈴木 遊, 馬場 惇, 板垣 翔太, 白銀 瑞樹 「ウイルソン型フェルミオン
を用いた 2+1 フレーバー QCD の熱力学量」,
第 5 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE
GRAND HALL, 東京都, 品川区, 11/2, 2018)
18. 伊敷吾郎 「行列の幾何と Berezin-Toeplitz 量子化」(招待講演)
東京理科大学研究会「ポアソン幾何とその周辺」(東京理科大学, 2018 年 12 月
8 日-9 日).
19. 山崎 剛 「Lattice QCD studies on nucleon form factors」KEK 研究会:「QCD
と核子構造の進展 2019」(招待講演)(KEK, つくば, 2019 年 2 月 28 日-3 月 1
日)
20. 金谷 和至, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹,
鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇 「グラジエントフローによる格子 2+1 フ
レーバー QCD の熱力学研究」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
21. 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 遊, 鈴
木 博, 馬場 惇 「QGP 粘性係数導出に向けた $N_f=2+1$ QCD エネルギー運動量
テンソル相関関数の研究 (II)」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
22. 清原 淳史, 板垣 翔太, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 白銀 瑞樹, 谷口 裕 介
「改良したクエンチ QCD による重クォーク QCD の臨界点の精密解析」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)

23. 馬場 惇, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 遊, 鈴木 博, 谷口 裕介 「Wilson fermion の下での gradient flow を用いた PCAC 関係式の検証」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
24. 鈴木 遊, 石見 涼, 梅田 貴士, 江尻 信司, 金谷 和至, 北沢 正清, 下条 昂礼, 白銀 瑞樹, 鈴木 博, 谷口 裕介, 馬場 惇 「Gradient flow を用いた K 中間子の Bag パラメータの数値的研究」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
25. 秋山 進一郎, 藏増 嘉伸, 吉村 友佑, 山下 巧 「高次テンソル繰り込み群を用いた 4 次元 Ising 模型の比熱の解析」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
26. 坂井 涼, 加堂 大輔, 藏増 嘉伸, 中村 宜文, 武田 真滋, 吉村 友佑 「テンソルくりこみ群による 2 次元 ϕ^4 理論の臨界結合定数の計算」,
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 福岡, 2019 年 3 月 14-17 日)
27. J. Cotler, 花田政範, 伊敷吾郎, 渡辺展正 「ゲージ/重力対応におけるブラックホールと部分的非閉じ込めの関係」
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 2019 年 3 月 14 日-17 日)
28. 伊敷吾郎, 松本高興 「D ブレーン間の相互作用と行列正則化」
日本物理学会第 74 回年次大会 (九州大学, 2019 年 3 月 14 日-17 日)

受賞

1. 渡辺展正, 2018 年度筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻長賞

国際会議・研究会の実施

1. 伊敷吾郎, 研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス」世話人 (東北大学, 2018 年 9 月 9 日-12 日).

国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動

1. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS)
<https://www.r-ccs.riken.jp/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>
5. 山崎 剛、特別研究員等審査会専門委員
6. 山崎 剛、FLAG2019 査読者 (external reviewer)
7. 石橋延幸、日本物理学会誌副編集委員長
8. 石橋延幸、京都大学基礎物理学研究所運営協議会委員
9. 石橋延幸、湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞選考委員
10. 石橋延幸、PTEP 編集委員