

3 各研究部門の報告

I. 素粒子物理研究部門

1. メンバー

教授	藏増 嘉伸、金谷 和至（共同研究員、数理物質系特令教授）
准教授	石塚 成人、山崎 剛（共同研究員、数理物質系准教授）
助教	秋山 進一郎、大野 浩史
研究員	新谷 栄悟、崔 在敦、蕭 禾、吉江 友照
学生	大学院生 5名、学類生 6名

2. 概要

当部門では、数理物質系との密接な連携のもと、筑波大学を中心としたPACS Collaborationを組織して格子QCDの大規模シミュレーション研究を推進している。昨年度に引き続き、「富岳」成果創出加速プログラム「超大規模格子QCDによる新物理探索と次世代計算に向けたAI 技術開発」（代表：山崎剛、2023年度～2025年度）を中心とした大型プロジェクト研究を遂行するとともに、「富岳」の一般利用と筑波大学計算科学研究センターの学際共同利用プログラムを利用したプロジェクト研究も継続している。また、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)では、Oakforest-PACS(略称：OFP、2021年度末に稼働停止)の後継機であるMiyabi(約80 PFLOPSのピーク演算性能を持つ大規模GPUクラスタ)が2025年1月に稼働を開始し、2025年4月から学際共同利用プログラムに計算資源を提供している。これと並行して、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、機械学習の格子QCD計算への応用、有限温度・有限密度QCDの研究など、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の運用・高度化を推進した。

3. 研究成果

[1] PACS Collaboration による「富岳」やWisteria-Odyssey を用いた大規模シミュレーション

(藏増、石塚、山崎、新谷)

PACS Collaborationに基づく共同研究体制のもとに推進してきた物理点における格子QCDの大規模シミュレーションは、昨年度採択された「富岳」成果創出加速プログラム「超大規模格子QCDによる新物理探索と次世代計算に向けたAI 技術開発」（代表：山崎剛、2023年度～2025年度）を中心として、継続的な進展を見せている。

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。「富岳」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の実現を目指している。

既に、2+1フレーバーQCDのゲージ配位生成が終了し、現在は2+1+1フレーバーQCDのゲージ配位生成に取り組んでいる。2+1+1フレーバーの場合も、2+1フレーバーと同様に異なる格子間隔3点($a \approx 0.08\text{fm}$, 0.06fm , 0.04fm)においてゲージ配位を生成し、系統誤差となる格子間隔依存性を取り除くために連続極限($a \rightarrow 0$)を取る計画である。2024年度は、最小格子サイズ 128^4 ($a \approx 0.08\text{fm}$)と中間格子サイズ 168^4 ($a \approx 0.06\text{fm}$)のゲージ配位生成が終了し、最大格子サイズ 256^4 ($a \approx 0.04\text{fm}$)のゲージ配位生成を開始した。また、並行して、これまで生成した2+1フレーバーQCDにおける格子サイズ 128^4 、 160^4 、 256^4 のゲージ配位を用いて、以下に説明するような物理量計算を行っている。

[2] 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

(蔵増、石塚、山崎)

山崎はPACS Collaborationにおいて現実クォーク質量でのK中間子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ので、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。2018年頃に $|V_{ud}|$ の値が更新されたことにより、ユニタリー性から見積もられる $|V_{us}|$ の値も大きく動いた(図1の灰色帯)。

我々の2022年度に報告した格子間隔2点(0.065fm , 0.085fm)を使った計算から得られた $|V_{us}|$ (図1の青四角)は、これまでの多くの計算結果(K_{13} , $N_f=2+1+1$, $N_f=2+1$)より若干大きく、K中間子レプトニック崩壊から決定される $|V_{us}|$ (紫丸、緑星)と一致する結果であった。しかし、結果には有限格子間隔に起因する系統誤差により大きな不定性がついていた。この不定性を取り除くため、2022年度から格子間隔 0.042fm の計算を重点的に行い(研究論文[B]-1, 2)、

3つの格子間隔の計算結果から、系統誤差を含めた連続極限の $|V_{us}|$ を見積もった(赤丸)。今後、この結果を論文としてまとめる予定である。

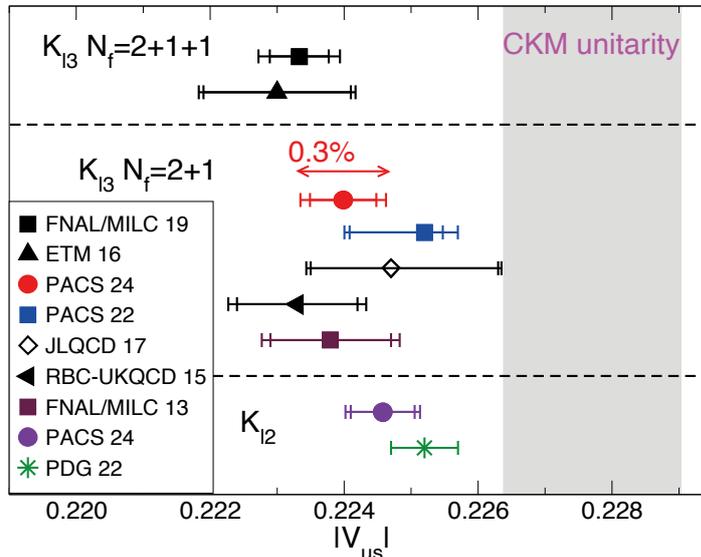


図 1: $|V_{us}|$ の比較。赤丸印は我々の最新の結果(研究論文[B]-1, 2)、青四角印は我々の 2020 年の結果。灰色帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

[3] 格子 QCD を用いた核子構造研究 (蔵増、山崎、新谷)

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。

蔵増、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、理研計算科学研究センター青木保道チームリーダー、CCS 新谷栄悟研究員、KEK 辻竜太郎研究員と共に、PACS Collaboration において、現実的クォーク質量直上で核子形状因子計算を行った。2020 年度の格子間隔 $a=0.085\text{fm}$ での形状因子計算結果から明らかになった荷電半径計算に含まれる系統誤差の原因を探るため、格子間隔 $a=0.065\text{fm}$, 0.042fm での形状因子計算を行っている(研究論文[B]-5, 6)。

また、他の形状因子には含まれない大きな πN 状態の寄与により、精密な計算が困難であった誘導擬スカラー形状因子を容易に計算可能な方法を提唱し、実際の現実的クォーク質量直上データを用いて誘導擬スカラー形状因子の精密決定を行なった(研究論文[B]-7)。

[4] 中間子電磁的 shape factor の直接微分計算法の開発研究 (山崎)

山崎と大学院生佐藤は慶應大学渡辺展正研究員と共同で、PACS Collaboration として、電磁的 shape factor の原点の傾きで定義される荷電半径を直接計算する研究を行った。一般的な荷

電半径の計算では、電磁的形状因子を離散的な運動量移行で数点計算し、電磁的形状因子の運動量移行依存性に対し関数を仮定したフィットにより荷電半径を求めている。しかし、この計算方法ではフィット関数の選択による系統誤差が含まれてしまう。荷電半径の精密決定のためには、このような系統誤差のない計算方法が望まれている。

2020年に提案された形状因子の微分を直接計算する方法と新しく提案した改良方法(研究論文[B]-3)を、現実的クォーク質量かつ大体積の格子QCD計算に適用し、図2に示すように荷電 π 中間子荷電半径(r^2_π)、荷電K中間子荷電半径($r^2_{K^+}$)、中性K中間子荷電半径($r^2_{K^0}$)を精密決定した(研究論文[B]-4)。荷電 π 中間子荷電半径は実験値(灰色帯)に比肩する誤差となっており、K中間子荷電半径に対しては実験値よりも数倍小さな誤差の結果となった。今後は小さな格子間隔の計算を行い、連続極限の結果を求めていく。

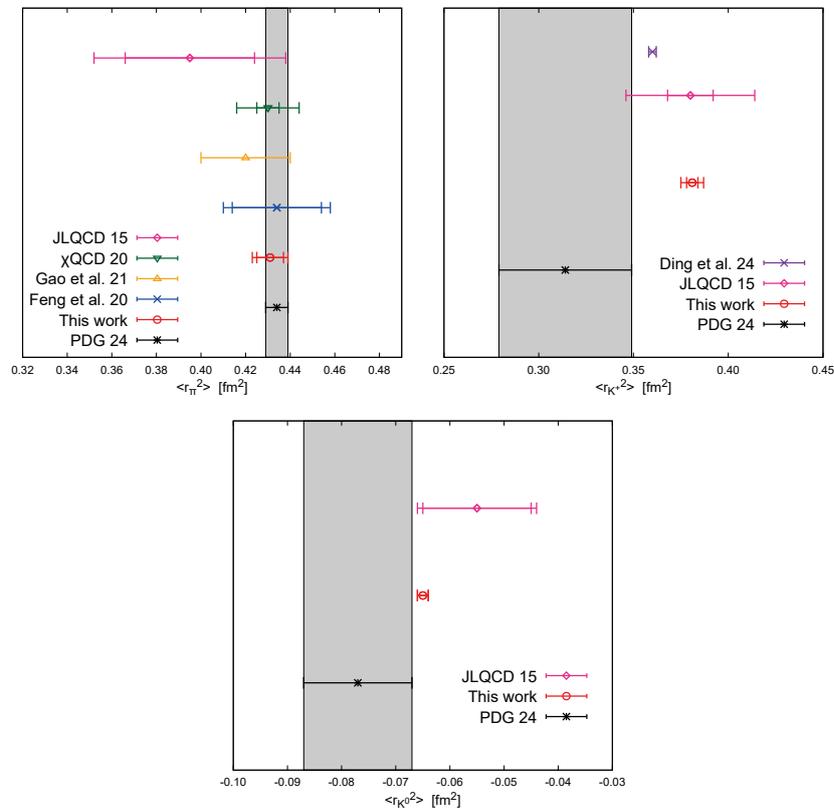


図2: 荷電 π 中間子荷電半径(r^2_π)、荷電K中間子荷電半径($r^2_{K^+}$)、中性K中間子荷電半径($r^2_{K^0}$)の実験値とこれまでの格子QCD計算結果との比較。赤丸が我々の結果。灰色帯と黒星印が実験値。それ以外がこれまでの格子QCD計算結果。

[5] クォークが重いQCDの臨界クォーク質量 (金谷)

ビッグバン直後の高温高密度な宇宙は、クォークとグルーオンが核子から溶け出したクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)状態にあったと予想されている。宇宙はその後膨張して温度と密度が下がり、量子色力学(QCD)の有限温度・有限密度相転移を経て、核子などからなる

現在の低温低密度状態になった。金谷は、京都大学北澤正清講師、九州大学鈴木博教授、新潟大学江尻信司准教授らと、QCD 相転移の性質を格子 QCD シミュレーションにより研究している。

QCD 相転移は物理点でクロスオーバーだが、近傍の臨界点の影響を受けている。臨界点はクォークが軽い側と重い側の両方に存在するが、近年の格子 QCD 研究により、軽い側の臨界点が従来の想定より遠い可能性が高いことがわかり、重い側の臨界点の影響も調べる必要が出てきた。臨界点探索で最も強力な方法は、Binder キュムラントを用いた有限サイズ臨界スケールリングの研究である。臨界スケールリングが実現していれば、Binder キュムラントは臨界点でシステムサイズ依存性が無くなり、交点の位置から臨界点を評価できる。他方、臨界スケールリングからのズレによる不定性を取り除くために、大きな空間サイズが要求される。我々は、ホッピングパラメータ展開に基づく方法を採用して重クォーク QCD シミュレーションの計算コストを大きく抑えることにより、大格子で高統計シミュレーションを遂行している。系の空間サイズ $L=aN_s$ は、臨界温度 $T=1/(aN_t)=T_c$ 近傍で、アスペクト比 $LT=N_s/N_t$ によりコントロールする (a は格子間隔、 N_s , N_t は空間方向、温度軸方向の格子サイズ)。

2023 年までに $N_t=4$ 格子での研究を完成させ、2024 年には $N_t=6$ での研究を完成させた。図 3(a) に $N_t=6$ 格子におけるポリアコフ・ループの Binder キュムラントの最終結果を示す(研究論文[A]-2)。 $LT \geq 10$ の大格子で臨界スケールリングが実現し、その交点から臨界点を高精度で決定した。連続極限にさらに近づけた $N_t=8$ シミュレーションも進めており、研究論文[B]-10, 12 でその中間結果を報告した。図 3(b) に示すように、データがまだ多少荒れているが、全体的傾向が $N_t=4, 6$ と同じであることを確認した。研究論文[B]-12 では、 $N_t=4, 6, 8$ の結果を使って、試験的に連続極限への外挿も議論した。研究論文[B]-11 では、これらを有限密度に拡張した研究を報告した。

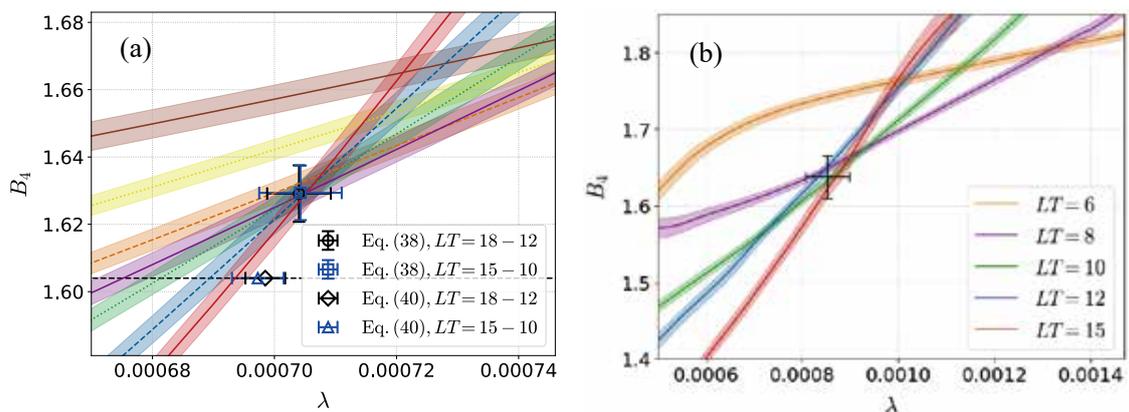


図 3: クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における Binder キュムラントの空間サイズとクォーク質量への依存性。(a) $N_t=6$ 格子の最終結果(研究論文[A]-2)。(b) $N_t=8$ 格子の中間結果(研究論文[B]-12)。

[6] Lee-Yang ゼロの臨界スケーリングの研究 (金谷)

前節の重クォーク QCD の臨界点研究の関連で、金谷は、京都大学北澤正清講師およびその修士課程大学院生の和田辰也と、Lee-Yang ゼロの臨界スケーリングを研究した。臨界点近傍で系の結合パラメータを複素数に解析接続すると、クロスオーバー領域でも、分配関数のゼロ点が複素結合パラメータで現れ、Lee-Yang ゼロと呼ばれている。クロスオーバー側では Lee-Yang ゼロは実軸を挟んだ2つのカットとして現れるが、臨界点でカット間のギャップが閉じて、一次相転移側では、一次相転移の特異性に対応して、実軸上にゼロ点が現れる。先行研究では、カットの端(Lee-Yang edge 特異点)の振る舞いから臨界点の位置を評価した。しかし、有限格子ではカットは離散的なゼロ点の集合に分解し、その端点の位置にも有限体積効果が含まれると考えられる。実際、有限格子では解析的なので、1次相転移側でも実軸上にゼロ点が存在できない。

我々は Lee-Yang ゼロの有限体積効果を含んだ臨界スケーリングを調べ、有限格子における Lee-Yang ゼロの比が Binder キュムラントとよく似た性質を持っていることを発見した。

図 4(a) に、 L^3 格子上的 3次元 Ising 模型における Lee-Yang ゼロ比 R_m の振る舞いを示す。この系は熱力学極限 $L \rightarrow \infty$ で外部磁場 $h=0$ のとき、換算温度 $t=0$ に臨界点を持ち、 $t < 0$ は1次相転移、 $t > 0$ はクロスオーバーである。Lee-Yang ゼロは h の虚軸上にあらわれる。 $L < \infty$ での離散的な Lee-Yang ゼロを、 $\text{Im } h > 0$ で実軸に近いものから1番目、2番目とラベルし、 n 番目と m 番目の Lee-Yang ゼロの比を R_m と書くと、概略図 4(a) に示したように、さまざまな L での Lee-Yang ゼロ比の交差点として臨界点の位置を評価できる。

Ising 模型と同じユニバーサリティー・クラスに属する3次元3状態 Potts 模型でその有効性を確認したシミュレーション結果を図 4(b) に示す。Lee-Yang ゼロ比で求めた臨界点と臨界指数は、同じ配位で計算した Binder キュムラント法の結果と一致する。Lee-Yang ゼロ比法を導入しこの結果を報告した研究論文[A]-3 は、Physical Review Letters の Editor's Suggestion に選定された。研究論文[B]-13, 14 では、Lee-Yang ゼロ比法を重クォーク QCD の臨界点探索に応用した中間結果も報告した。

我々が開発した Lee-Yang ゼロ比法は、臨界スケーリング研究においてこれまで最も強力な手法であった Binder キュムラント法と同等の有効性があることが確認された。Binder キュムラント法と独立で相補的な臨界点探索法として、Lee-Yang ゼロ比法は、素粒子研究だけでなく一般の物性系における臨界現象の研究に大きなインパクトを持つと思われる。

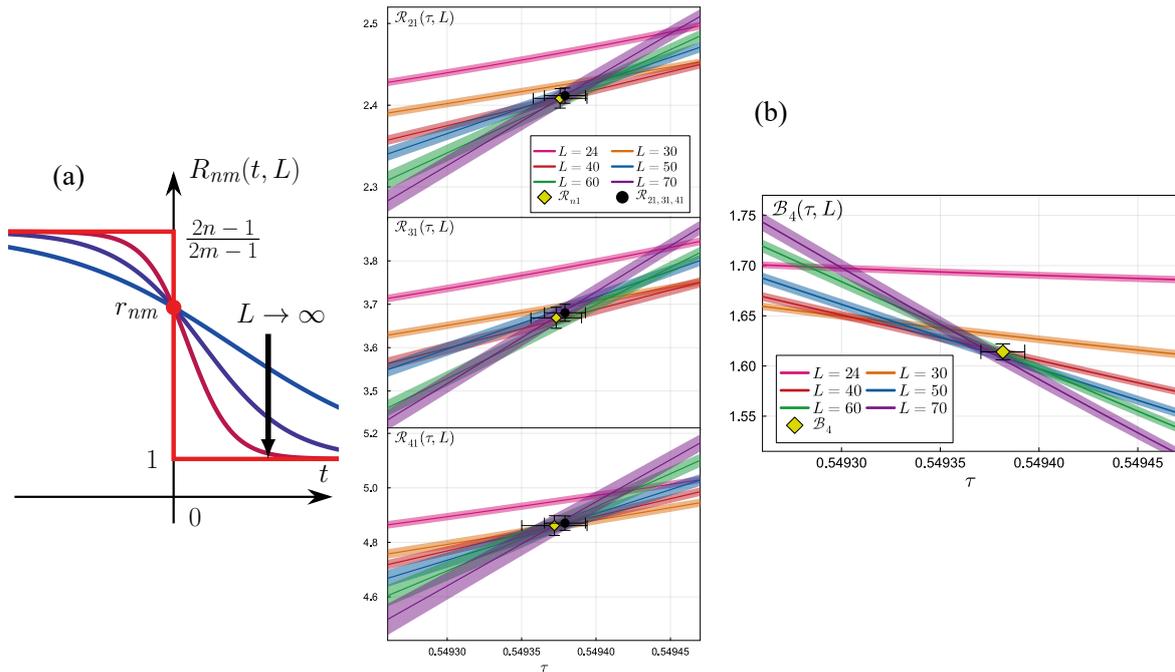


図4: (a) Ising 模型における Lee-Yang ゼロ比 R_{nm} の臨界点近傍における換算温度 t とシステムサイズ L 依存性。 $L \rightarrow \infty$ で赤線の階段関数に漸近する。(b) Potts 模型における Lee-Yang ゼロ比(左)と Binder キュムラント(右)のシミュレーション結果(研究論文[A]-3)。

[7] スパースモデリングを用いたクォークoniumスペクトル関数の推定 (大野)

クォークoniumは、チャームやボトムといった重クォークとその反クォークの束縛状態である。RHIC や LHC で行われている重イオン衝突実験では、宇宙初期や中性子星内部等のような超高温・高密度環境で実現されると考えられている、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と呼ばれる状態を作り上げる実験が行われており、クォークoniumは QGP の性質を調べるための重要なプローブの一つとなっている。また、実験結果を説明し、QGP の性質をよく理解するためには、クォークoniumや重クォークの QGP 中での振る舞いを理論的に調べる必要がある不可欠である。その際、クォークoniumのスペクトル関数が重要な役割を果たす。なぜならば、スペクトル関数は高温媒質中でのクォークoniumの振る舞いや重クォーク輸送に関する情報をすべて含んでいるからである。一方、クォークoniumのスペクトル関数を計算することは一般に困難であることが知られている。格子 QCD に基づく第一原理計算では、クォークoniumの相関関数を直接計算することができるが、スペクトル関数は相関関数から間接的にのみ得られる。しかしながら、この計算は ill-posed な問題であり、解くことが非常に困難であることが知られている。従って、より信頼できるスペクトル関数を計算するために様々な方法が試みられている。その中でもスパースモデリングは、少ない前提条件の下でスペクトル関数の推定を行うことができる手法として、近年注目を集めている。

大野は、東京女子大の富谷専任講師と気象大学校講師の高橋講師とともに、スパースモデリングを用いたクォークoniumスペクトル関数の推定に関する研究を推進した。2024年度はまず、チャーモニウムのスペクトル関数を模したテストデータに対してスパースモデリングを適用し、どのような出力が得られるかを詳細に調べた。さらに、実際の格子 QCD 計算で得られた、臨界温度前後のチャーモニウム相関関数のデータに対してスパースモデリングを適用し、対応するスペクトル関数を推定した(図 5)。この結果は、国際会議「Lattice 2024」および日本物理学会第 79 回年次大会等で発表し、「Lattice 2024」の会議録[1]にもまとめた。

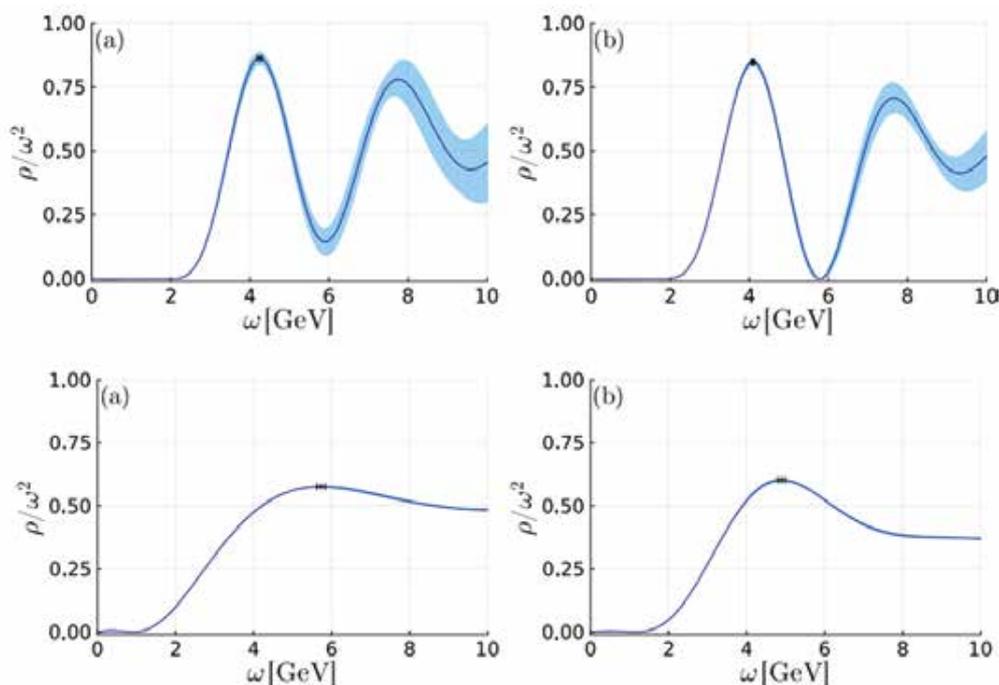


図 5: スパースモデリングにより得られたチャーモニウムのスペクトル関数。上段は臨界温度より下、下段は臨界温度より上の結果を表す。また、左列は擬スカラーチャンネル、右列はベクターチャンネルの結果を表す。

[8] 勾配ブースティング決定木を用いた格子 QCD の物理量推定 (大野)

格子 QCD 計算における計算時間の大部分は、ディラック行列と呼ばれる大規模疎行列についての連立一次方程式を解く計算が占めている。この連立一次方程式を解く計算は、例えば、ディラック行列のべき乗のトレース $\text{tr}D^k$ から計算されるカイラル凝縮とその高次キュムラントを計算する際に必要となる。これらの物理量は QCD の相転移点の探索を行う際などに重要な量であり、例えば尖度の計算には $k=1, 2, 3, 4$ のトレースが必要となる。ここで、 k の値がひとつ増えるごとに、連立方程式を解く回数が一回ずつ増えることとなり、高次キュムラントの計算には高い計算コストを要する。また、ディラック行列は大規模な疎行列のため、そのトレースを厳密に計算することは一般に困難である。よって、通常、Hutchinson の推定法に

よる近似計算を行う。この際、推定に用いるノイズベクトルの本数に比例してより多くの連立一次方程式を解く計算が必要となる。加えて、これらの計算を各ゲージ配位ごとに行う必要があり、カイラル凝縮とその高次キュムラントの計算コストは非常に高いものとなる。従って、連立一次方程式を解く計算を必要としない機械学習モデルにより $\text{tr}D^k$ を計算できれば、多くの計算コストの削減となり、格子 QCD 計算の大幅な加速が期待できる。大野は、筑波大の Choi 研究員、株式会社フレクトの住本氏、東京女子大の富谷専任講師とともに、計算コストが比較的小さい物理量をインプットとして $\text{tr}D^k$ を推定する機械学習モデルを構築し、その性能評価を行った。なお、実験には 4 フレーバーのクローバーウィルソンフェルミオンを用いて生成した有限温度ゲージ配位を使用した。まず、インプットとしては、連立一次方程式を解く計算が不要なプラケットおよびポリャコフループに加え、連立一次方程式を解く計算は必要であるが $\text{tr}D^k$ と比較して計算コストが低い $\text{tr}D^1$ ($1 < k$) を用いた。実験に用いた配位では、これらのインプットと $\text{tr}D^k$ の間には強い相関があることを確認しており、これらが $\text{tr}D^k$ を推定するためのインプットとして適当であると判断した。次に、機械学習モデルとしては、勾配ブースティング決定木を用いた。また、モデルの推定値には一般にバイアスがあるため、データの一部を用いてバイアス補正も行った。実験の結果、十分な量の学習データを用意し、バイアス補正を適切に行うことで、例えばプラケットからでも十分な精度で $\text{tr}D^k$ が推定できることが分かった。図 6 に $\text{tr}D$ をインプットとして $\text{tr}D^k$ ($k=2, 3, 4$) を推定し、これらを用いて尖度を計算した結果を示す。図の横軸は、全データの学習に用いるデータの割合を表しており、学習に用いるデータの割合が 10%程度でも、機械学習の推定値(赤)は実際の計算結果(青)とよく一致していることが分かった。この結果は、国際会議「Lattice 2024」、国際ワークショップ「German Japanese Workshop 2024」や様々な国内学会・研究会で発表し、「Lattice 2024」の会議録(研究論文[B]-16)にもまとめた。

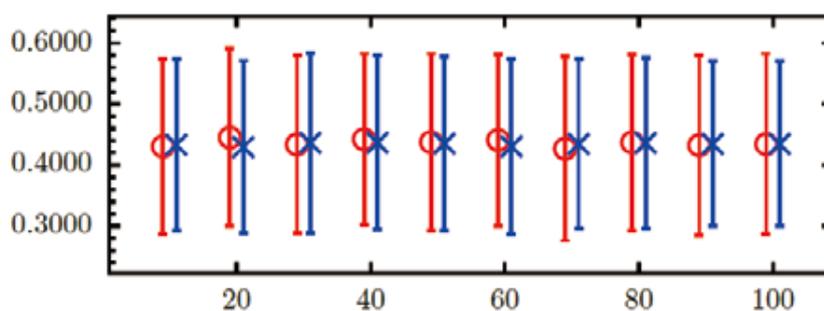


図 6: 機械学習によるカイラル凝縮の尖度の推定値(赤)と実際の計算結果(青)の比較。横軸は学習に用いたデータの割合を示す。

[9] ゲージ同変なトランスフォーマーの開発 (大野)

近年、機械学習は高エネルギー物理、とくに格子 QCD における計算負荷の高いシミュレーションの効率化において重要な役割を果たしつつある。中でも、ゲージ共変ニューラルネッ

トワークや flow-based サンプリング手法の発展により、ゲージ場の効率的な生成や非平衡モンテカルロ法への応用が進んでいる。格子 QCD に適したニューラルネットワークには、ゲージ対称性の保持、動的フェルミオンへの対応、勾配ベースの学習が可能な完全微分可能性といった条件が求められる。Transformer は非局所相関を捉える能力から注目されており、これらの要件を満たしつつ、柔軟性の高いアーキテクチャ構築が期待されている。大野は、東京女子大の富谷専任講師および東京大の永井准教授とともに、格子 QCD 計算の効率化を目的として、Transformer アーキテクチャに基づく新たなゲージ共変型ニューラルネットワーク「CASK(Covariant Attention with Staples and Links)」を提案した。CASK は、ゲージ変換に対して同変性を保持するよう設計された注意機構を採用しており、リンク変数およびステープルのフロベニウス内積を利用してアテンションを構築する点に特徴がある。これにより、Transformer の非局所的な表現能力を活かしつつ、格子ゲージ理論におけるゲージ対称性および格子上の時空間対称性(回転・並進)を厳密に保つことが可能となっている。本モデルを自己学習型ハイブリッドモンテカルロ法に組み込み、その性能を評価した結果、従来のゲージ共変ニューラルネットワークと比較してより高い受容率とサンプル効率を実現した(図7)。これにより、物理的に正確なサンプリングを維持しつつ、格子 QCD の計算コストを大幅に削減することが期待される。この結果は、国際会議「Lattice 2024」や様々な国内学会・研究会で発表し、「Lattice 2024」の会議録(研究論文[B]-17)にもまとめた。

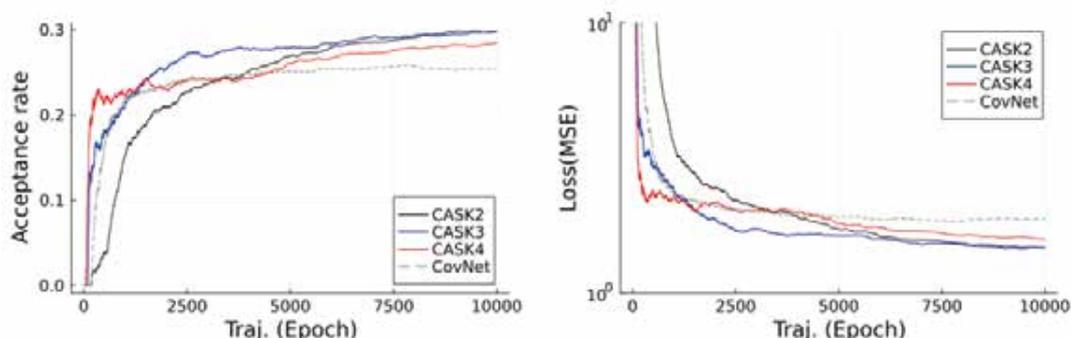


図7: CASK を用いたモデルと従来のモデルの比較。左はハイブリッドモンテカルロ法の受容率、右は誤差関数の学習時間依存性を表す。

[10] 機械学習を用いたゲージ固定の高速化 (大野)

格子 QCD 計算においてゲージ依存する物量を計算する際には、ゲージ固定が必要となる。例えば、格子上のランダウゲージ固定は、リンク変数のトレースの全方向全格子点についての和を最大化することで実現される。通常これには、まず収束が保証されている SU(2) 部分群を更新していく方法を行ってリンク変数のトレースをある程度大きくしたのち、再急降下法により高速に最大値へ収束させる方法がとられる。しかしながら、格子サイズが大きくなると、SU(2) 部分群の更新で実現されるリンク変数の更新幅が非常に小さくなる臨界減速の問題

が現れる。従って、臨界減速の問題を解決し、より高速にゲージ固定を実現する方法の開発が求められている。大野は、筑波大の Hsiao 研究員および Choi 研究員、東京女子大の富谷専任講師とともに、ゲージ固定を行う機械学習モデルの開発を行った。このモデルは、ゲージ固定の情報がより速く遠方まで伝わるよう、様々な長さや形を持ったウィルソンラインの組み合わせによって構成した。図 8 は予備的な実験の結果を示しており、この機械学習モデルを使った更新は、従来の SU(2) 部分群の更新に比べて、ゲージ固定の収束性をある程度改善可能であることが示唆された。この結果は、日本物理学会 2025 年春季大会で発表した。

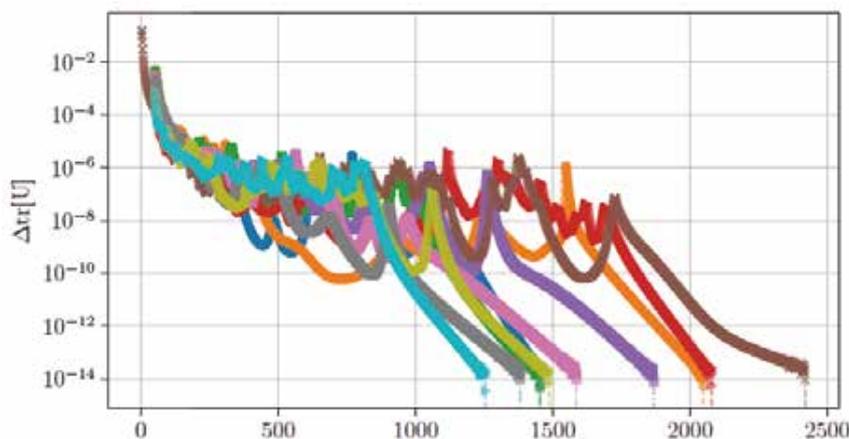


図 8: 様々な機械学習モデルと従来法(茶色)におけるゲージ固定の収束性の比較。横軸はゲージ変換の反復回数。

[11] 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、秋山)

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。

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)の清水裕也特別研究員は、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。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。現在、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、(iv) 興味深い低次元素粒子論モデルへの応用、(v) 物性物理学における強相関電子系への応用、という 5 つの課題に取り組んでいる。

2024 年度は、上記課題(i)～(v)のうち、特に(iv)に関して以下に述べるような重要な進展があった。 θ 項(トポロジカル項)入りのゲージ理論は、 $\theta = \pi$ で CP などの離散対称性の自発的破れを引き起こし、素粒子物理にとって大変興味深いモデルである。しかしながら、 θ 項の導入は符号問題を引き起こすため、これまでその非摂動的な性質を数値的に調べることは難しかった。蔵増と秋山は 2 次元の θ 項入り U(1) ゲージ Higgs モデルの相構造解析に対してテンソル繰り込み群を応用した。このモデルは、Higgs 粒子の質量 M が重い場合に $\theta = \pi$ で一次相転移を起こすが、質量が軽くなるにつれて一次相転移は徐々に弱くなり、臨界終点 M_c で一次相転移が消失する。われわれは、ボンド重み付きテンソル繰り込み群と呼ばれる改良アルゴリズムを用いて臨界終点の Higgs 質量を決定するとともに、近年提案されたテンソルネットワーク法によるレベルスペクトロスコーピーの手法を併用することによって、臨界終点での相転移が 2 次元イジングモデルのユニバーサリティクラスに属することを示した。図 9(左)は、 $M \rightarrow \infty$ 極限における $\theta = \pi$ 近傍でのトポロジカルチャージ密度 $\langle Q \rangle / V$ の θ 依存性である。 $\theta = \pi$ において明確なトビが観測できることから、一次相転移が起きていることがわかる。図 9(右)は、臨界終点近傍におけるスケール次元 $x_1(L)$ のシステムサイズ $(L \times L)$ 依存性を表している。臨界終点 ($M_c = 2.99748$) で $x_1(L)$ の L 依存性が消失し、その値が $1/8$ となることから、2 次元イジングモデルのユニバーサリティクラスと判断できる。さらに本研究の特筆すべき点として、Lüscher 型の U(1) ゲージ作用を採用していることが挙げられる。この作用は、格子上においてゲージ場のトポロジカルな性質を厳密に議論するために提案されたものであるが、Monte Carlo 法を用いた配位生成においてエルゴード性を満たすことが困難であるため、数値的手法による非摂動的研究はなされてこなかった。しかしながら、テンソル繰り込み群は分配関数そのものを計算できるため、Monte Carlo 法におけるエルゴード問題は存在しない。われわれは、本研究により、テンソル繰り込み群が Monte Carlo 法における符号問題だけでなくエルゴード問題も同時に解決していることを実証した。本研究の成果は学術論文(研究論文[A]-4, [B]-18)として出版され、国際会議(国際会議[B]-13, 25, 33)、国内学会(国内学会[B]-35)での発表を行なった。

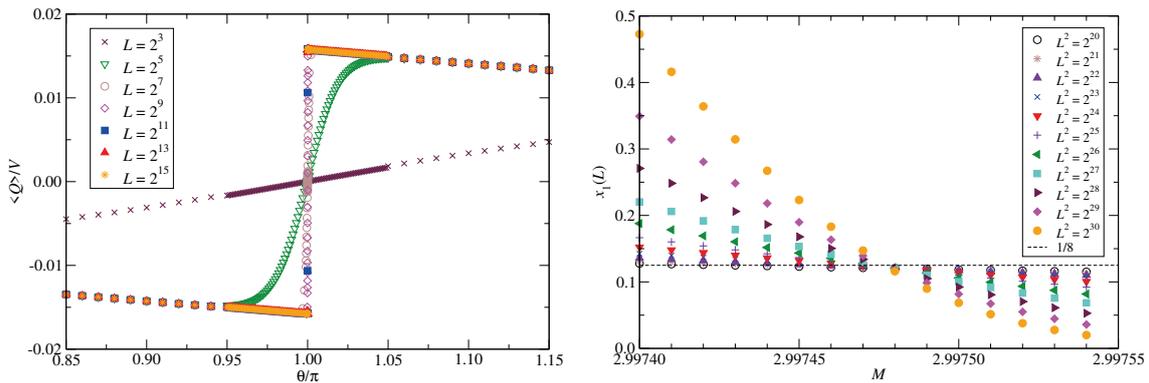


図 9: (左) Higgs 質量無限大極限におけるトポロジカルチャージ密度の θ 依存性。(右) 臨界終点近傍におけるスケーリング次元 $x_1(L)$ のシステムサイズ依存性(研究論文[A]-4)。

藏増と博士後期課程 3 年の羅は、テンソル繰り込み群を用いて(1+1)次元 0(3)非線形モデルの有限密度相転移を調べた。このモデルは、漸近自由性を持つなど 4 次元非可換ゲージ理論と共通の性質を有しており、素粒子論的に非常に興味深いモデルである。しかしながら、化学ポテンシャル μ の導入が符号問題を引き起こすため、このモデルの有限密度相転移はこれまでモンテカルロ法で調べることが出来なかった。図 10(左)は、転移点近傍における粒子数密度の化学ポテンシャル依存性である。実線は関数 $A(\mu - \mu_c)^\nu$ による fit を表しており、この結果から臨界指数 $\nu = 0.512(15)$ が得られた。また図 10(右)は、転移点近傍における時間方向の相関長を化学ポテンシャルの関数としてプロットしたものである。この傾きから、動的臨界指数 $z = 1.96(6)$ が得られた。これらの臨界指数の数値的決定は世界初であるが、今回のわれわれの計算により、臨界指数は理論的な予想 $\nu = 0.5$, $z = 2$ と一致していることが確認された。本研究の成果は、学术论文(研究論文[A]-5)として出版され、国際会議(国際会議[B]-14)においても発表を行った。

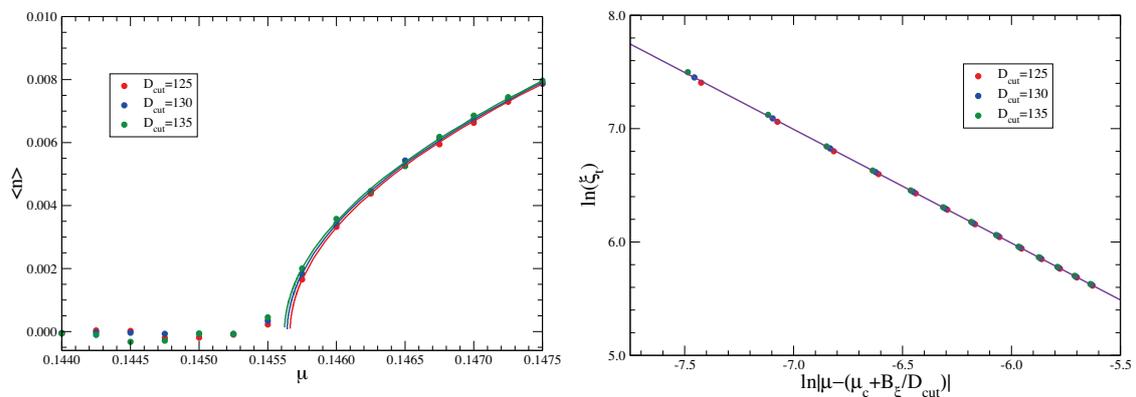


図 10: (左) 粒子数密度の μ 依存性。Dcut はボンド次元を表す。(右) 時間方向の相関長の μ 依存性(研究論文[A]-5)。

秋山は、Jefferson 研究所の Raghav G. Jha 氏、Fermi 国立加速器研究所の Judah Unmuth-Yockey 氏と協力し、3次元 SU(2) プリンシパル・カイラル模型の経路積分をキャラクター展開によって離散化し、SU(2) 対称性を明示的に保持した形式に基づくテンソル繰り込み群 (TRG) 計算に取り組んだ。非可換な自由度の効率的な離散化は、テンソルネットワーク法による古典的計算手法に加え、近年では量子計算の文脈においても多様な方法論が提案されている。本研究では、キャラクター展開の打ち切り次数が熱力学極限における物理量に与える影響を系統的に解析し、有限の打ち切り次数においても、離散化前の連続模型と同じユニバーサリティクラスが実現されていることを確認した。特に、Triad TRG 法と Anisotropic TRG (ATRG) 法の2種類のアルゴリズムを用いた数値解析を通じて、ATRG 法による計算の方が一点関数の評価においてより安定した結果が得られることを明らかにした(図 11)。これらの成果は、高次元系への TRG アルゴリズムの拡張や改良に向けた今後の研究において、有用な指針となると考えられる。本研究の成果は、学術論文(研究論文[A]-7)として出版され、国内学会(国内学会[B]-13)においても発表を行った。

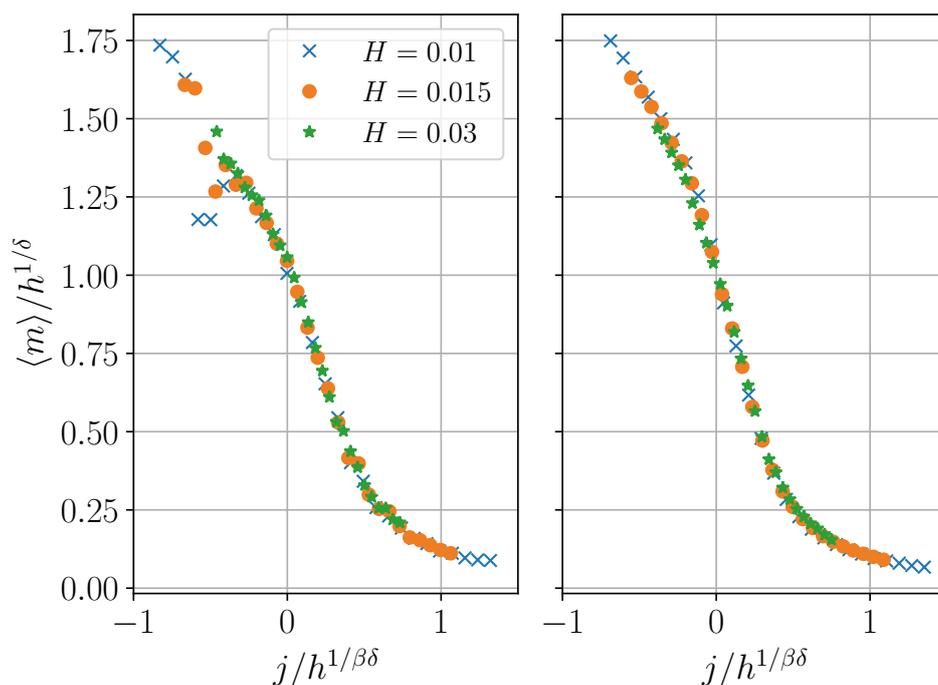


図 11: 3次元 SU(2) プリンシパルカイラル模型の磁化のスケーリング。(左)Triad TRG 法による結果。(右)ATRG 法による結果。

さらに、秋山は東京大学の藤堂眞治氏と同研究室に所属する博士後期課程学生の Ho Pai Kwok 氏と共に、格子フェルミオン系向けのテンソルネットワーク手法である Grassmann テンソルネットワーク法の研究・開発に取り組み、2次元有限密度 2 カラーQCD への応用を進めた。本研究では、ランダムサンプリングによるゲージ場の離散化と Grassmann テンソルネッ

トワーク形式を組み合わせることで理論のテンソルネットワーク表現を構成し、ネットワークの表現次元(ボンド次元)を特異値分解によって事前に削減する手法を開発した。本手法により、初期のテンソルのサイズ(全要素数)を1000分の1程度にまで削減することが可能になった。この手法を2次元有限密度2カラーQCDへ応用することで、粒子数密度、ダイクオーク凝縮、カイラル凝縮を有限化学ポテンシャル領域で計算することが可能になった。特に、有限ゲージ結合定数かつ有限密度の非可換ゲージ理論のTRG計算はこれまでに前例がなく、QCDに対するTRG法の本格的な応用を今後進めていく上で、本研究は重要なマイルストーンとなっている。この成果は学術論文(研究論文[A]-8)として出版された。また、格子フェルミオンとして、従来のテンソルネットワーク計算で広く使われているスタッガードフェルミオンに加え、Wilsonフェルミオンによる数値計算にも取り組んだ。特に、2次元有限密度2カラーQCDにおいて、いずれのフェルミオンを用いた場合にも、その経路積分が同じボンド次元のテンソルネットワークで表現できることを見出した(研究論-[21])。以上の研究成果は、共同研究者のHo Pai Kwok氏により、複数の国際会議(国際会議[B]-16, 31, 34)および国内学会(国内学会[B]-15, 36)で発表された。

また、秋山は、理化学研究所の菅野颯人氏、東京科学大学の村上耕太郎氏、金沢大学の武田真滋氏との共同研究において、 θ 項を含むSchwingerモデルの数値研究にも取り組んだ。このモデルは、QCDのトイモデルの一つであり、特に近年では、2フレーバー系における相構造の解明が進展し、1フレーバー系とは異なる相構造が現れる可能性が理論的に指摘されている。本研究では、連続極限において2フレーバーの理論に帰着するよう、スタッガードフェルミオンを用いてモデルを格子上に定式化した。このモデルに対しては、先行研究としてworld-line表現を用いたMonte Carlo法やTRG法による数値計算が報告されているが、world-line表現では有限質量領域の扱いが困難であるという制約があった。そこで本研究では、Grassmannテンソルネットワーク法を応用することで、フェルミオン自由度を直接的に取り扱えるようにし、自由エネルギー(図12)、トポロジカル電荷密度、およびトポロジカル感受率の数値計算を有限質量領域においても実現した。この成果は、共同研究者である菅野颯人氏によって、国際会議(国際会議[B]-15)および国内学会(国内学会[B]-14)にて発表され、その一部は同国際会議の会議録に掲載された(研究論文[B]-20)。

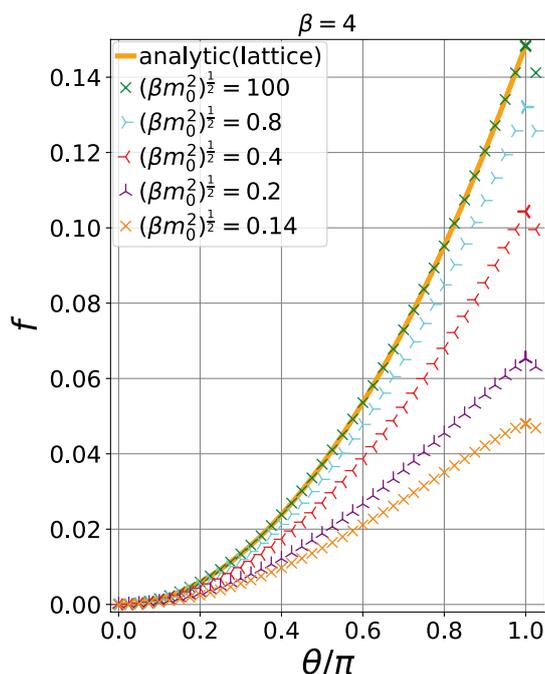


図 12: Schwinger 模型の自由エネルギーの θ 依存性。

この他、秋山は、Grassmann テンソルネットワーク法に関するレビュー論文を執筆した(研究論文[A]-6)。本論文は、英国物理学会が発行する学術雑誌からの招待を受けて執筆されたものであり、国際共著による総説論文である。

[12] 格子 QCD 研究用データグリッド ILDG/JLDG の運用 (藏増、大野、吉江)

JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の格子 QCD 及び関連分野の研究者・研究グループが、QCD 配位等の貴重なデータを大域的かつ効率的に共有し、研究の促進と計算資源の有効活用を図る事を目的に構築されたデータグリッドである。現在 JLDG には、国内の主要な 7 つの計算素粒子物理研究拠点が参加しており、各拠点到置かれたファイルサーバは NII SINET6 上の VPN 「HEPnet-J/sc」 で接続されている。さらに、これらのファイルサーバは、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm により束ねられており、ユーザは単一のファイルシステムのように利用することが可能である。

JLDG の運用は、拠点の代表、研究グループ代表、及び本学の計算機工学者から構成される「JLDG 管理者グループ」により行われている。本学物理学域からは藏増、吉江、大野が参加し、管理グループの代表は大野が務めている。また、本学計算科学研究センターの高性能計算システム研究部門からは建部修見教授、同計算情報学研究部門(データ基盤分野)からは天笠俊之教授が参加している。建部教授は Gfarm の開発者であり、主に Gfarm に関する技術的な助言や支援を提供している。天笠俊之教授は QCD 配位検索システム「QCDml Faceted

Navigation」の開発や、公開 QCD 配位への Digital Object Identifier (DOI)の付与などを中心に連携している。

JLDG は、2008 年に実運用を開始して以来 17 年経過し、実用システムとして(一定の)完成の域に達しており、ここ数年の管理者グループの活動は、システムの改良や機能追加から、安定運用や利便性向上の為の作業に主軸を移している。2024 年度は、メンテナンス・ユーザ対応・システム障害対応等の日常業務以外に、主に以下の活動を行った。

- CentOS 7 EOL に伴うサーバ・クライアントの OS アップデート
- これまで使用していた仮想組織管理システム (VOMS) のサポート終了に伴い、新規システムの構築
- トークンを用いた新認証方式への移行のための準備
- ILDG (International Lattice Data Grid) に関する活動: ILDG は世界の研究者が格子 QCD の基礎データを相互利用することを目的として運用されている国際的なデータグリッドで、JLDG を含む全世界の 5 つの地域グリッドによって構成されている。2024 年度の主な活動としては、国際会議「Lattice 2024」における plenary talk、国際ワークショップ「German Japanese Workshop 2024」での講演及び QCD 配位のメタデータ記法である QCdml の更新などが挙げられる。また、新しい board chair として蔵増が選出された。

4. 教育

[博士論文]

1. 佐藤 航平

「Mean-Square Charge Radius Calculation Without Fit Ansatz and Its Application to Large-Volume Lattice QCD Configuration at the Physical Point」

2. 羅 梟

「Tensor renormalization group approach to quantum field theories with continuous internal degree of freedom」

[集中講義]

1. 秋山 進一郎

「格子場の理論におけるテンソル繰り込み群の方法」, 基礎物理学研究所物理学第二特別講義 1 (京都大学基礎物理学研究所, 2024 年 6 月 5 日-7 日)

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

1. 佐藤航平, 日本物理学会学生優秀発表, 「PACS10 配位を用いたパイ中間子と K 中間子荷電半径の計算」, 2024 年 9 月

外部資金

1. 蔵増嘉伸(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(A)「テンソルネットワーク法が拓く計算素粒子物理学の新たな展開」、令和6年度採択、8,000千円
2. 蔵増嘉伸(代表)、科学研究費補助金・学術変革領域研究(A)領域「極限宇宙の物理法則を創る—量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」、公募研究「テンソル繰り込み群による場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの研究」、令和6年度採択、1,800千円
3. 大野浩史(分担)、科学研究費補助金・学術変革領域研究(A)領域「「学習物理学」の創成—機械学習と物理学の融合新領域による基礎物理学の変革」、計画研究「計算物理学と機械学習の融合」、令和4年度採択、11,060千円
4. 秋山進一郎(代表)、科学研究費補助金・若手研究「内部自由度に富んだ格子理論に対するテンソル繰り込み群法の開発と応用」令和5年度採択、800千円
5. 山崎剛(代表)、「富岳」成果創出加速プログラム(標準課題)「超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発」、令和5年度採択、20,215千円
6. 山崎剛(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(B)「素粒子標準模型を超える物理探索に向けた格子 QCD 精密化」、令和5年度採択、5,500千円
7. 金谷和至(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(C)「グラジエントフローによる QCD 有限温度相転移の研究」、令和4年度採択、1,100千円
8. 新谷栄悟(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(C)、令和5年度採択、「格子 QCD を用いたミュー粒子 $g=2$ の理論計算」、700千円

知的財産権

該当なし

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. Fathiyya Izzatun Az-zahra, Shinji Takeda, Takeshi Yamazaki, “Spectroscopy with the tensor renormalization group method”, Phys. Rev. D 110, No. 3 (2024) ref. 034514, pp.1-18.

- <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.034514>
2. Ryo Ashikawa, Masakiyo Kitazawa, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, “High-precision analysis of the critical point in heavy-quark QCD at $N_f=6$,” Phys. Rev. D 110, No. 7 (2024) ref. 074508, pp.1-13.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.074508>
 3. Tatsuya Wada, Masakiyo Kitazawa, Kazuyuki Kanaya, “Lee-Yang-zero ratios for locating a critical point,” Phys. Rev. Lett. 134 (2025) ref. 162302, pp.1-6.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.134.162302>
 4. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta=\pi$ with Lüscher’s admissibility condition”, JHEP 09 (2024) 086.
[https://doi.org/10.1007/JHEP09\(2024\)086](https://doi.org/10.1007/JHEP09(2024)086)
 5. X. Luo and Y. Kuramashi, “Quantum phase transition of (1+1)-dimensional O(3) nonlinear sigma model at finite density with tensor renormalization group”, JHEP 11 (2024) 144.
[https://doi.org/10.1007/JHEP11\(2024\)144](https://doi.org/10.1007/JHEP11(2024)144)
 6. S. Akiyama, Y. Meurice, R. Sakai, “Tensor renormalization group for fermions”, Journal of Physics: Condensed Matter 36 (2024) ref. 343002 (招待論文).
<https://doi.org/10.1088/1361-648X/ad4760>
 7. S. Akiyama, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, “SU(2) principal chiral model with tensor renormalization group on a cubic lattice”, Phys. Rev. D110, No. 3 (2024) ref. 034519, pp.1-11.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.110.034519>
 8. K. H. Pai, S. Akiyama, S. Todo, “Grassmann tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional two-color lattice QCD at finite density”, JHEP 03 (2025) 027.
[https://doi.org/10.1007/JHEP03\(2025\)027](https://doi.org/10.1007/JHEP03(2025)027)

B) 査読無し論文

1. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “ $|\text{Vus}|$ from kaon semileptonic form factor in $N_f=2+1$ QCD at the physical point on $(10\text{ fm})^4$ ”, PoS(LATTICE2023) (2024) 276, pp.1-7.
<https://doi.org/10.22323/1.453.0276>
2. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita for PACS Collaboration, “Update of kaon semileptonic form factor using $N_f=2+1$ PACS10 configurations”, PoS(LATTICE2024) (2024) 227, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0227>

3. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, “Comparison with model-independent and dependent analyses for pion charge radius”, PoS(LATTICE2023) (2024) 312, pp.1-7.
<https://doi.org/10.22323/1.453.0312>
4. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Calculation of meson charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration”, PoS(LATTICE2024) (2025) 324, pp.1-8.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0324>
5. Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Discretization effects on nucleon root-mean-square radii from lattice QCD at the physical point”, PoS(LATTICE2023) (2024) 323, pp.1-7.
<https://doi.org/10.22323/1.453.0323>
6. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, K. Sato, S. Sasaki, E. Shintani, H. Watanabe, T. Yamazaki for PACS Collaboration, “Studies of nucleon isovector structures with the PACS10 superfine lattice”, PoS(LATTICE2024) (2025) 318, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0318>
7. S. Sasaki, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, K. Sato, E. Shintani, H. Watanabe, T. Yamazaki for PACS Collaboration, “A proposal for removing πN -state contamination from the nucleon induced pseudoscalar form factor in lattice QCD”, PoS(LATTICE2024) (2025) 310, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0310>
8. Fathiyya Izzatun Az-zahra, Shinji Takeda, Takeshi Yamazaki, “Spectroscopy using tensor renormalization group method”, PoS(LATTICE2024) (2024) 356, pp.1-9.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0356>
9. Yasumichi Aoki, Ed Bennett, Ryan Bignell, Kadir Utku Can, Takumi Doi, Steven Gottlieb, Rajan Gupta, Georg von Hippel, Issaku Kanamori, Andrey Kotov, Giannis Koutsou, Agostino Patella, Giovanni Pederiva, Christian Schmidt, Takeshi Yamazaki, Yi-Bo Yang, “Lattice gauge ensembles and data management”, PoS(LATTICE2024) (2025) 412, pp.1-20.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0412>
10. Masakiyo Kitazawa, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Hiroto Sugawara, “Critical point in heavy-quark region of QCD on fine lattices,” PoS(LATTICE 2023) (2024) 190, pp.1-7.
<https://doi.org/10.22323/1.453.0190>

11. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, “Chemical potential dependence of the endpoint of first-order phase transition in heavy-quark region of finite-temperature lattice QCD,” PoS(LATTICE 2023) (2024) 174, pp.1-7.
<https://doi.org/10.22323/1.453.0174>
12. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroto Sugawara, “Finite-temperature critical point of heavy-quark QCD on large lattices,” PoS(LATTICE 2024) (2025) 439, pp.1-9.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0439>
13. Tatsuya Wada, Masakiyo Kitazawa, Kazuyuki Kanaya, “Finite-size scaling of Lee-Yang zeros and its application to the 3-state Potts model and heavy-quark QCD,” PoS(LATTICE 2024) (2025) 167, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0167>
14. Masakiyo Kitazawa, Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, “Lee-Yang-zero ratios in heavy-quark QCD,” PoS(QCHSC 2024) (2025) pp.1-8, arXiv:hep-th:2503.22246.
15. J. Takahashi, H. Ohno and A. Tomiya, ”Sparse modeling study to extract spectral functions from lattice QCD data,” PoS(LATTICE2024) (2025) 032, pp.1-8.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0032>
16. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, ”Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression,” PoS(LATTICE2024) (2025) 033, pp.1-9.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0033>
17. A. Tomiya, H. Ohno and Y. Nagai, ”CASK: A Gauge Covariant Transformer for Lattice Gauge Theory,” PoS(LATTICE2024) (2025) 030, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0030>
18. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta=\pi$ with Lüscher’s admissibility condition”, PoS(LATTICE2024) (2025) 361, pp.1-10.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0361>
19. X. Luo and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional O(3) nonlinear sigma model with and without finite chemical potential”, PoS(LATTICE2024) (2025) 377, pp.1-11.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0377>

20. H. Kanno, S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, “Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor massive Schwinger model with a theta term”, PoS(LATTICE2024) (2025) 368, pp.1-9.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0368>
21. K. H. Pai, S. Akiyama, S. Todo, “Two-color lattice QCD in (1+1) dimensions with Grassmann tensor renormalization group”, PoS(LATTICE2024) (2025) 364, pp.1-9.
<https://doi.org/10.22323/1.466.0364>

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. S. Akiyama, 「Tensor network toward the lattice QCD」, Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22) (University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Sep. 23–27, 2024).

B) 一般講演

1. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita for PACS Collaboration, 「Update of kaon semileptonic form factor using $N_f = 2 + 1$ PACS10 configurations」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
2. T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「ILDG session: PACS Collaboration」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
3. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, 「Calculation of meson charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
4. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, K. Sato, S. Sasaki, E. Shintani, H. Watanabe, T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「Studies of nucleon isovector structures with the PACS10 superfine lattice」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
5. S. Sasaki, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, K. Sato, E. Shintani, H. Watanabe, T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「A proposal for removing πN -state contamination from the nucleon induced pseudoscalar form factor in lattice QCD」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).

6. Fathiyya Izzatun Az-zahra, Shinji Takeda, Takeshi Yamazaki, 「Spectroscopy using tensor renormalization group method」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
7. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa and Hiroto Sugawara for the WHOT-QCD collaboration, 「Finite-temperature critical point of heavy-quark QCD on large lattices」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
8. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, 「First-order phase transitions in the heavy quark region of lattice QCD at high temperatures and high densities」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
9. Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, 「Finite-size scaling of Lee-Yang zeros and its application to 3-state Potts model and heavy-quark QCD」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
10. J. Takahashi, H. Ohno and A. Tomiya, 「Sparse modeling study to extract spectral functions from lattice QCD data」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
11. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
12. A. Tomiya, H. Ohno and Y. Nagai, 「Gauge symmetric transformer for lattice gauge theory」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
13. S. Akiyama, Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta = \pi$ with Lüscher's admissibility condition」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
14. X. Luo, Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional O(3) nonlinear sigma model w/ and w/o finite chemical potential」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).

15. [H. Kanno](#), S. Akiyama, K. Murakami, S. Takeda, 「Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor massive Schwinger model with a theta term」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
16. [K. H. Pai](#), S. Akiyama, S. Todo, 「Grassmann bond-weighted tensor renormalization group approach to 1+1D two-color QCD with staggered fermions at finite density」, The 41st International Symposium on lattice field theory (Lattice 2024) (University of Liverpool, UK, July 28–August 3, 2024).
17. [Masakiyo Kitazawa](#), Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, 「Finite-size scaling of Lee-Yang zeros」, XVIth Quark Confinement and the Hadron Spectrum Conference (QCHSC 2024) (Cairns, Austraria, August 19–24, 2024).
18. S. Akiyama, 「Tensor networks connecting quantum and classical computations」, UT-RUB Joint Symposium ”Cutting Edge Research For Smart Societies” (Ruhr Universit“at Bochum, Bochum, Germany, Sep. 5, 2024).
19. Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, 「Calculation of $K\ell 3$ form factor at the physical point on large volume」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg-Universit“at Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
20. Kohei Sato for PACS Collaboration, 「Calculation of pion and kaon charge radii using model-independent method in the PACS10 configuration」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg-Universit“at Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
21. [Kazuyuki Kanaya](#), Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa and Hiroto Sugawara for the WHOT-QCD collaboration, 「Finite temperature critical point in heavy-quark QCD」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
22. [Masakiyo Kitazawa](#), Tatsuya Wada, Kazuyuki Kanaya, 「Lee-Yang-zero ratio for critical-point searches」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
23. [Shinji Ejiri](#), Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Masanari Koiida, 「Phase structure of finite temperature-density QCD in heavy quark regime by hopping parameter expansion」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg University Mainz, Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
24. [H. Ohno](#), B.J. Choi, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine learning estimation on the trace of inverse Dirac operator」, German Japanese Workshop 2024, (Johannes Gutenberg-Universit“at Mainz, Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).

25. S. Akiyama, Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta=\pi$ with Lüscher's admissibility condition」, German Japanese Workshop 2024 (Johannes Gutenberg-Universität at Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
26. Naoya Ukita for PACS Collaboration, 「Search for physics beyond the standard model from 2+1+1 Flavor Lattice QCD with the Physical Quark Masses」 (ポスター発表), CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
27. Kohei Sato for PACS Collaboration, 「Calculation of meson charge radius without fit ansatz」 (ポスター発表), CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
28. K. Kanaya, R. Ashikawa, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Sugawara, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow」 (ポスター発表), CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
29. H. Nemura, T. Aoyama, W.-L. Chen, I. Kanamori, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, K. Nitadori, 「Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture」 (ポスター発表), CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
30. S. Akiyama, Y. Kuramashi, X. Luo, Y. Yoshimura, 「Particle Physics with Tensor Network Scheme」 (ポスター発表), CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
31. K. H. Pai, S. Akiyama, S. Todo, 「Grassmann bond-weighted tensor renormalization group approach to 1+1D two-color QCD with staggered fermions at finite density」, Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2024 (HHIQCD2024) (YITP, Kyoto University, Kyoto, Japan, Oct. 14–Nov. 15, 2024).
32. H. Ohno, 「Machine learning applications to Lattice QCD」, Tsukuba/LBNL Collaboration Meeting, (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, Nov. 7–8, 2024).

33. S. Akiyama, Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta=\pi$ with Lüscher's admissibility condition」, KEK-THEORY Workshop 2024 (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 11–13, 2024).
34. K. H. Pai, S. Akiyama, S. Todo, 「Grassmann bond-weighted tensor renormalization group approach to 1+1D two-color QCD with staggered fermions at finite density」, KEK-THEORY Workshop 2024 (KEK, Tsukuba, Japan, Dec. 11–13, 2024).
35. Issaku Kanamoari, Tatsumi Aoyama, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Keigo Nitadori, and Hidekatsu Nemura (Bridge++ project), 「GPU Implementation of Lattice QCD code with OpenACC」, The 7th R-CCS International Symposium – Science beyond Fugaku: Classical, Quantum, and AI (Kobe International Conference Center, Kobe, Japan, Jan. 22–24, 2025).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 大野浩史, 「Japan Lattice Data Grid: 計算素粒子物理分野におけるデータ共有」, Gfarm シンポジウム 2024, (富士ソフトアキバプラザ, 東京, 2024年9月6日).
2. 山崎剛, 「超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発」, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024, (アーバンネット 神田カンファレンス, 東京, 2025年1月8日–10日).
3. 秋山進一郎, 「テンソルネットワークで切り拓く素粒子・原子核物理の新展開」, Natural Science Forum (国際基督教大学, 2025年2月17日).
4. 秋山進一郎, 「格子場の理論におけるテンソルネットワークと繰り込み群」, 計算物理春の学校 2025, (沖縄県市町村自治会館, 那覇, 2025年3月10日–14日).

B) その他の発表

1. 大野浩史, 「一素粒子理論研究者の歩み～大学院、海外ポスドク、テニユアトラック～」, 原子核三者若手夏の学校 2024 キャリアフォーラム, (2024年8月21日).
2. 和田辰也, 北沢正清, 金谷和至, 「Lee-Yang ゼロの有限サイズスケーリングと3状態ポッツ模型への応用」, 熱場の量子論とその応用 2024 (TFQT 2024), (京都大学基礎物理学研究所, 京都市, 京都, 2024年9月9日–11日).
3. 山崎剛, 「格子理論」, 格子上の場の理論夏の学校 2024, (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2024年9月9日–13日).
4. 大野浩史, 「有限温度」, 格子上の場の理論夏の学校 2024, (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2024年9月9日–13日).

5. 浮田尚哉, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 谷口裕介, 山崎剛 for PACS Collaboration, 「Nf=2+1, 2+1+1 PACS10 配位生成と基本物理量測定」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
6. 山崎剛, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉 for PACS Collaboration, 「Nf=2+1 PACS10 配位を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊形状因子計算」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
7. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛 for PACS Collaboration, 「PACS10 配位を用いたパイ中間子と K 中間子荷電半径の計算」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
8. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟, 山崎剛 for PACS Collaboration, 「物理点における核子構造の高精細格子 QCD 計算」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
9. Fathiyya Izzatun Az-zahra, 武田真滋, 山崎剛, 「Scattering Phase Shift by Tensor Renormalization Group Method」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
10. 北澤正清, 和田辰也, 金谷和至, 「臨界点近傍でのスケール関数の埋め込みにおける Lee-Yang ゼロの活用」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
11. 和田辰也, 金谷和至, 北澤正清, 「Lee-Yang ゼロを用いた重クォーク QCD 臨界点の精密解析」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
12. 高橋純一, 大野浩史, 富谷昭夫, 「スパースモデリングによる有限温度中間子スペクトル関数の計算」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
13. 秋山進一郎, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, 「テンソル繰り込み群による 3 次元 SU(2) プリンシパル・カイラル模型の相転移解析」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).
14. 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, 「Grassmann Tensor Renormalization Group for Nf=2 massive Schwinger model with a θ term」, 日本物理学会第 79 回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024 年 9 月 16 日-19 日).

15. K. H. Pai, 秋山進一郎, 藤堂眞治, 「Grassmann bond-weighted tensor renormalization group approach to 1+1D two-color QCD with staggered fermions at finite density」, 日本物理学会第79回年次大会, (北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 2024年9月16日-19日).
16. 崔在敦, 大野浩史, 住本尚之, 富谷昭夫, 「Machine Learning Estimation on the Trace of Inverse Dirac Operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」, 学術変革領域(A)「学習物理学の創成」R6年度領域会議, (東京大学本郷キャンパス小柴ホール, 東京, 2024年9月25日-27日).
17. 浮田尚哉 for PACS Collaboration, 「超大規模格子 QCD による新物理探索と次世代計算に向けた AI 技術開発」(ポスター発表), 第11回「富岳」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, 品川, 2024年10月24日-25日).
18. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 吉村友佑, 「テンソルネットワーク法を用いた素粒子物理学の研究」(ポスター発表), 第11回「富岳」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, 品川, 2024年10月24日-25日).
19. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」, Julia in Physics 2024, (東京大学浅野キャンパス情報基盤センター, 東京, 2024年12月14日).
20. 山崎剛, 「スーパーコンピュータと AI を使った新しい極微世界の探索」(ポスター発表), 第4回「富岳」成果創出加速プログラムシンポジウム「富岳百景」(オンライン, 2024年12月25日).
21. 浮田尚哉, 「Lattice QCD simulation in very large volumes」, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024, (アーバンネット神田カンファレンス, 東京, 2025年1月8日-10日).
22. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024, (アーバンネット神田カンファレンス, 東京, 2025年1月8日-10日).
23. A. Tomiya, H. Ohno and Y. Nagai, 「Gauge covariant Transformer」, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024, (アーバンネット神田カンファレンス, 東京, 2025年1月8日-10日).
24. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」(ポスター), 第4回「富岳」成果創出加速プログラム研究交流会, (富士ソフトアキバプラザ, 東京, 2025年2月21日).

25. 佐藤航平, 「計算機を用いた中間子荷電半径の精密計算」(ポスター発表), 博士後期課程学生支援プロジェクト(SPRING/BOOST) 採用者による研究発表会, (つくば国際会議場, 2025年3月7日).
26. 佐藤航平, 「格子 QCD が切り開く中間子荷電半径の高精度な決定」(ポスター発表), 計算物理春の学校 2025, (沖縄県市町村自治会館, 那覇, 2025年3月10日-14日).
27. B.J. Choi, H. Ohno, T. Sumimoto and A. Tomiya, 「Machine Learning Estimation on the trace of inverse Dirac operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression」(ポスター), 計算物理春の学校 2025, (沖縄県市町村自治会館, 那覇, 2025年3月10日-14日).
28. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛 for PACS Collaboration, 「PACS10/L128 配位上のパイ中間子と K 中間子荷電半径の結果」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
29. 長塚正人, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 辻竜太郎, 新谷栄悟, 山崎剛 for PACS Collaboration, 「Split-Even 法を用いた非連結ダイアグラム差の精度向上」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
30. Fathiyya Izzatun Az-zahra, 武田真滋, 山崎剛, 「Two-particle state wave function using tensor renormalization group」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
31. 和田辰也, 北澤正清, 金谷和至, 「Lee-Yang ゼロを用いた 3 次元イジング模型の臨界点の精密解析」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
32. 青山龍美, 金森逸作, 金谷和至, 松古栄夫, 滑川裕介, 根村英克, 似鳥啓吾 (Bridge++ project), 「汎用格子 QCD コード Bridge++ の GPU 版について」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
33. Benjamin J. Choi, Ho Hsiao, Hiroshi Ohno and Akio Tomiya, 「Machine Learning Approaches for Lattice Landau Gauge Fixing」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
34. Benjamin J. Choi, 大野浩史, 住本尚之, 富谷昭夫, 「勾配ブースティング決定木回帰分析を用いた逆ディラック演算子のトレースの機械学習的推定」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
35. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 「Tensor renormalization group study of (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta = \pi$ with Lüscher's admissibility condition」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
36. K. H. Pai, 秋山進一郎, 藤堂眞治, 「Tensor renormalization group study on the phase structure of infinite coupling two-color QCD with Wilson fermions in two dimensions」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).

(4) 著書、解説記事等

該当なし

7. 異分野間連携・産学官連携・国際連携・国際活動等

異分野間連携（センター内外）

1. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>,
3-[12]節参照
2. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>

産学官連携

なし

国際連携・国際活動

1. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
3-[12]節参照

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 大野浩史, 「物理屋のための機械学習講義」世話人
筑波大学東京キャンパス(ハイブリッド), 2024年4月25日, 5月20日, 6月17日,
7月12日, 2025年1月20日(全5回)
参加登録者数: 635人
世話人: 大野浩史(筑波大学), 柏浩司(福岡工業大学), 富谷昭夫(東京女子大学), 二
村保徳(筑波大学)
ウェブページ: <https://akio-tomiya.github.io/lectures4mlphys/>
Youtube channel: <https://www.youtube.com/@lectures4mlphys>
2. 大野浩史, 蔵増嘉伸, 山崎剛, 「格子場の理論夏の学校2024」世話人
筑波大学(ハイブリッド), 2024年9月9日-13日
参加登録者数: 280人
主催: 筑波大学計算科学研究センター

世話人：大野浩史(筑波大学)，藏増嘉伸(筑波大学)，富谷昭夫(東京女子大学)，山崎剛(筑波大学)

ウェブページ：<https://akio-tomiya.github.io/latticeschool2024/>

3. 山崎剛，「German Japanese Seminar 2024」世話人

マインツ大学(ドイツ)，2024年9月25日-27日

参加登録者数：32人，参加国数：3

主催：マインツ大学，筑波大学

世話人：Hartmut Wittig(マインツ大学)，山崎剛(筑波大学)

ウェブページ：<https://indico.zdv.uni-mainz.de/event/16/overview>

4. 秋山進一郎，藏増嘉伸，「Tensor Network 2024」世話人

石川県政記念しいのき迎賓館(ハイブリッド)，2024年11月15日-17日

参加登録者数：79人

世話人：秋山進一郎(筑波大学)，藏増嘉伸(筑波大学)，武田真滋(金沢大学)

ウェブページ：<https://akiyama-es.github.io/tn24.html>

5. 大野浩史，研究会「2024年ノーベル物理学賞、ノーベル化学賞、AIで自然科学はどう変わったのか、どう変わるのか」世話人

筑波大学東京キャンパス(ハイブリッド)，2024年11月24日

参加者数(内対面参加)：178人(24人)

世話人：大野浩史(筑波大学)，富谷昭夫(東京女子大学)

ウェブページ：<https://akio-tomiya.github.io/nobel2024/>

Youtube channel：https://www.youtube.com/@nobel_prize2024_AI

6. 大野浩史，「Julia in Physics 2024」世話人

東京大学浅野キャンパス情報基盤センター(ハイブリッド)，2024年12月14日

参加者数(内対面参加)：181人(38人)

世話人：大野浩史(筑波大学)，富谷昭夫(東京女子大学)，大野周平(横浜市立大，理化学研究所)，永井佑紀(東京大学)

ウェブページ：https://ohno.github.io/julia_in_physics_2024/

7. 山崎剛，「成果創出加速プログラム基礎科学5課題合同シンポジウム」世話人

アーバンネット神田カンファレンス(ハイブリッド)，2025年1月8日-10日

参加登録者数：81人

主催：計算基礎科学連携拠点，「富岳」成果創出加速プログラム基礎科学5課題

共催：筑波大学・計算科学研究センター，高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・理論センター

世話人：橋本省二(KEK)，大須賀健(筑波大学)，山崎剛(筑波大学)，堀田英之(名古屋大学)，山地洋平(物質材料研究機構)

ウェブページ：<https://kds.kek.jp/event/52621>

8. 大野浩史，「計算物理春の学校 2025」世話人

沖縄県市町村自治会館，那覇(ハイブリッド)，2025年3月10日-14日

参加者数(内対面参加)：296人(140人)

世話人：石田洋音(代表，埼玉大)，清水陽喜(東京大)，石井敬直(東京大)，関祐二(慶應大)，渡邊悠稀(東京大)，富田樹(埼玉大)，田耕健也(京都大)，北野鵬志(北海道大)，岡田夏希(埼玉大)，石田哲朗(神戸大)，服部竜大(東工大)，神原龍冬(北海道大)，大久保毅(東京大)，大野浩史(筑波大)，品岡寛(埼玉大)，下川統久朗(OIST)，富谷昭夫(東京女子大)，永井佑紀(東京大)，水上市(大阪大)

ウェブページ：<https://compphysschool.github.io/homepage2025/>

Youtube channel：<https://www.youtube.com/channel/UC7zQqYdH0qH4FPrhiutRAvQ>

9. 管理・運営

1. 藏増嘉伸：運営委員会委員、運営協議会委員、研究倫理委員会委員長、
2. 大野浩史：共同研究運用委員会委員
3. 藏増嘉伸：計算機システム運用委員会委員

10. 社会貢献・国際貢献

1. 藏増嘉伸：ILDG board member
2. 大野浩史：JLDG 管理グループ代表

11. その他

該当なし