

I. 素粒子理論グループ

教授 石橋 延幸、藏増 嘉伸

准教授 伊敷 吾郎、石塚 成人、山崎 剛

助教 秋山 進一郎、浅野 侑磨、大野 浩史、毛利 健司

特令教授 金谷 和至

研究員 浮田 尚哉、新谷 栄悟、崔在敦、蕭禾、吉江 友照

大学院生 (10名)

【人事異動】

崔在敦博士が計算科学研究センター研究員として着任した(2024年5月1日)。

蕭禾博士が計算科学研究センター研究員として着任した(2024年9月2日)。

新谷栄悟博士が計算科学研究センター非常勤研究員を退職した(2024年11月30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(CCS)と密接な連携のもと、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(【1】(1)~(4))。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80PFLOPSのピーク演算性能を持つ大規模GPUクラスター)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(【1】(11))、機械学習の格子QCD計算への応用(【1】(8),(9),(10))、有限温度・有限密度QCDの研究(【1】(5)~(7))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(【1】(12))を推進した。

超弦理論グループは行列模型、ゲージ重力対応、弦の場の理論という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。Minkowski型行列模型の研究、Strebel differentialを用いた弦の場の理論の構築、行列模型における5ブレーン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

(藏増嘉伸、石塚成人、山崎剛、秋山進一郎、大野浩史、金谷和至、浮田尚哉、崔在敦、蕭禾、吉江友照)

(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

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”テラレーメイド”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 ($a \approx 0.08\text{fm}, 0.06\text{fm}, 0.04\text{fm}$) 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

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($K_{l3} N_f = 2+1+1$, $N_f = 2+1$)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(論文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。

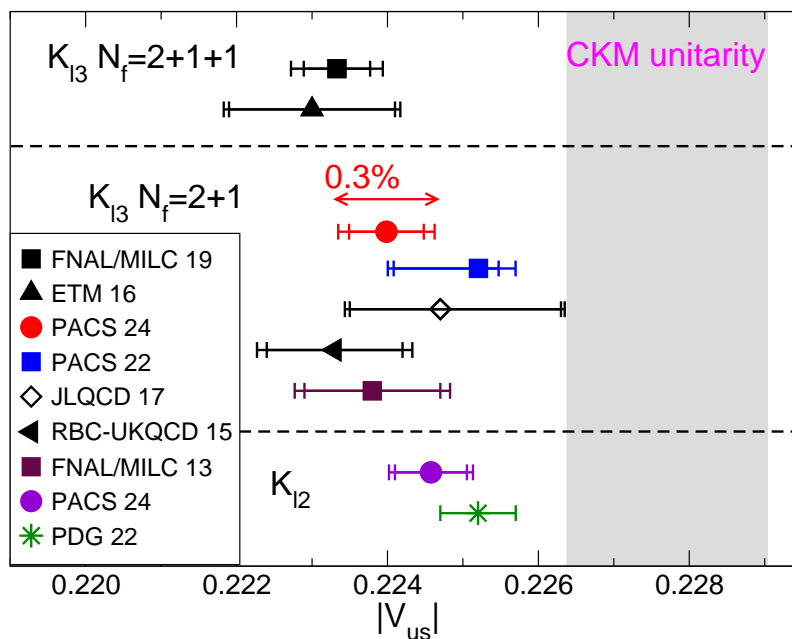


図1: $|V_{us}|$ の比較。赤丸印は我々の最新の結果(論文1,2)、青四角印は我々の2020年の結果。灰色帯はCKM行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

(3) 格子QCDを用いた核子構造研究

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。

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、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 $a = 0.065, 0.042\text{fm}$ での形状因子計算を行っている（論文 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（論文 7）。

(4) 中間子電磁的形状因子の直接微分計算法の開発研究

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、電磁的形状因子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（論文 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 $\langle r_{\pi}^2 \rangle$ 、荷電 K 中間子荷電半径 $\langle r_{K^+}^2 \rangle$ 、中性 K 中間子荷電半径 $\langle r_{K^0}^2 \rangle$ を精密決定した（論文 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。

(5) クォークが重い QCD の臨界クォーク質量

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リングの研究である。臨界スケー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

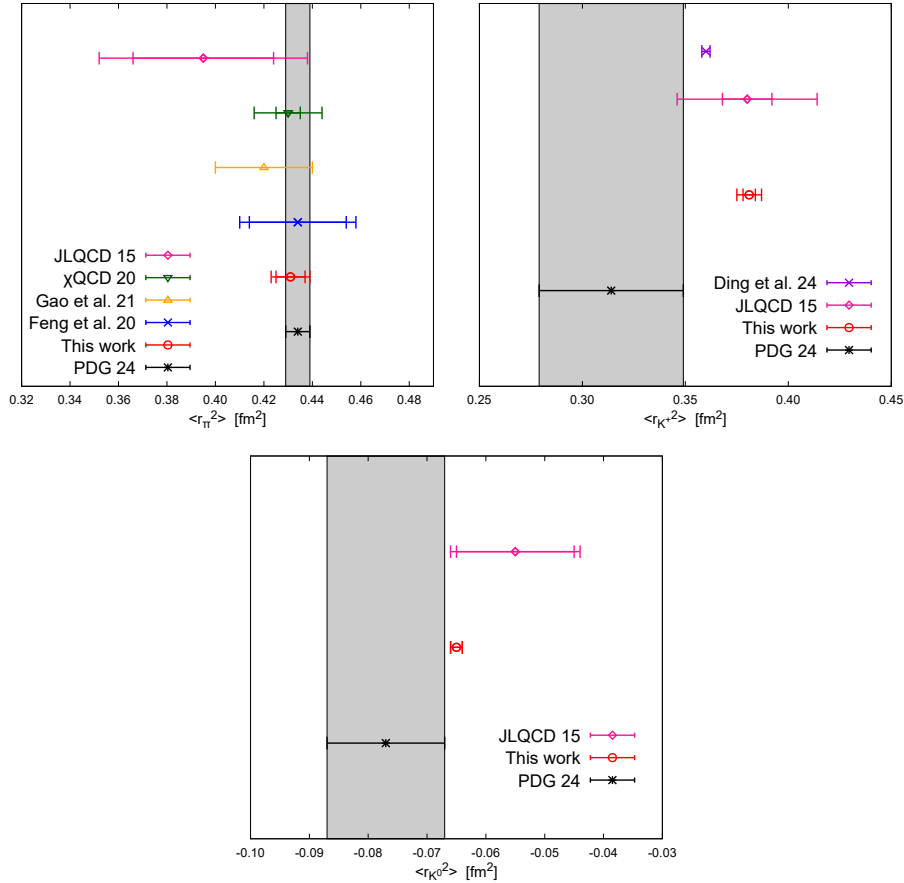


図 2: 荷電 π 中間子荷電半径 $\langle r_\pi^2 \rangle$ 、荷電 K 中間子荷電半径 $\langle r_{K^+}^2 \rangle$ 、中性 K 中間子荷電半径 $\langle r_{K^0}^2 \rangle$ の実験値とこれまでの格子 QCD 計算結果との比較。赤丸が我々の結果。灰色帯と黒星印が実験値。それ以外がこれまでの格子 QCD 計算結果。

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 $L = N_s a$ は、臨界温度 $T = 1/(N_t a) = T_C$ 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 (論文 11)。 $LT \geq 10$ の大格子で臨界スケーリングが実現し、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、論文 12, 15 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。論文 15 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。論文 13 では、これらを有限密度に拡張した研究を報告した。

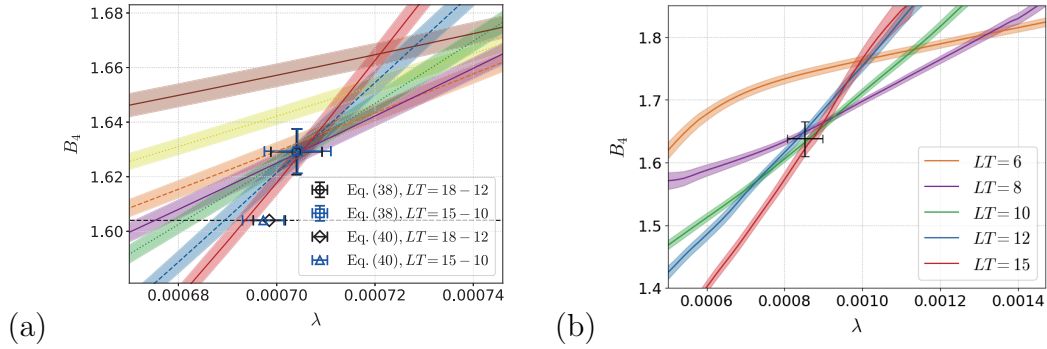


図 3: クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における Binder キュムラントの空間サイズとクォーク質量への依存性。(a) : $N_t = 6$ 格子の最終結果 (論文 11)。(b) : $N_t = 8$ 格子の中間結果 (論文 15)。

(6) Lee-Yang ゼロの臨界スケーリングの研究

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_{nm} 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_{nm} 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論文 14

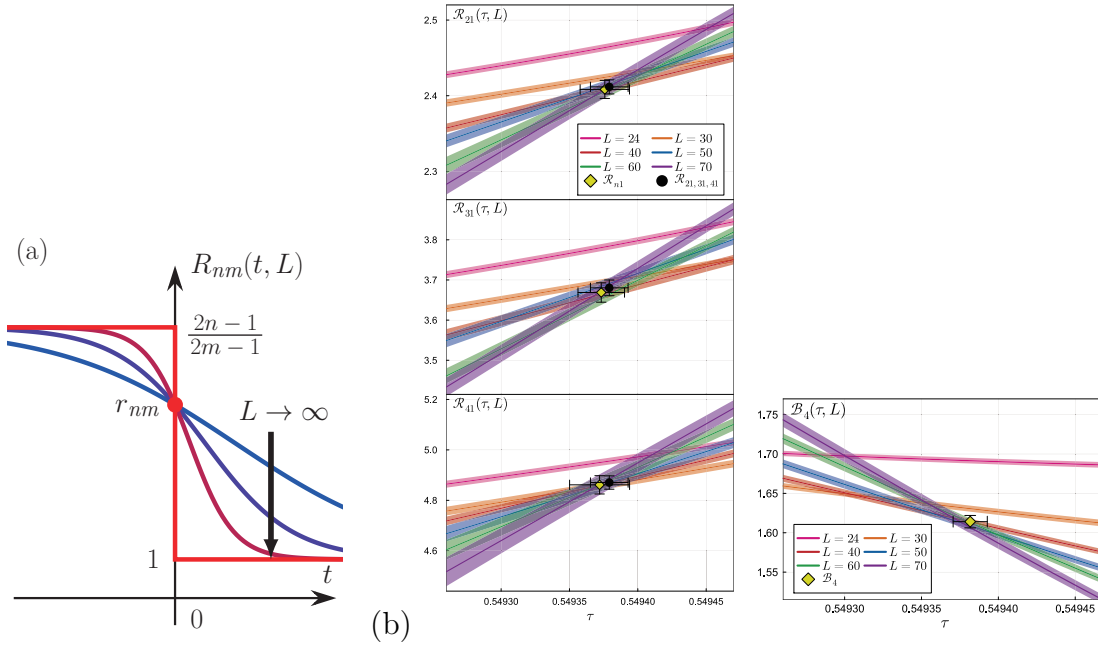


図 4: (a) : Ising 模型における Lee-Yang ゼロ比 R_{nm} の臨界点近傍における換算温度 t とシステムサイズ L 依存性。 $L \rightarrow \infty$ で赤線の階段関数に漸近する。(b) : Potts 模型における Lee-Yang ゼロ比 (左) と Binder キュムラント (右) のシミュレーション結果。(論文 14)

は、Physical Review Letters の Editor's Suggestion に選定された。論文 16, 17 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。

(7) スパーズモデリングを用いたクォークoniumスペクトル関数の推定

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。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。

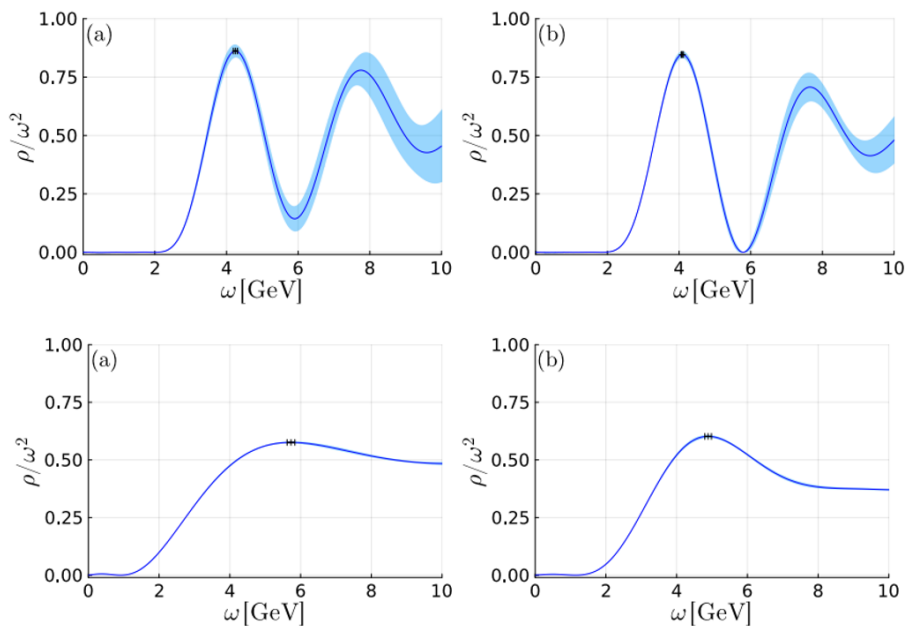


図 5: スパースモデリングにより得られたチャーモニウムのスペクトル関数。上段は臨界温度より下、下段は臨界温度より上の結果を表す。また、左列は擬スカラーチャンネル、右列はベクターチャンネルの結果を表す。

(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

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 $\text{tr}D^l$ ($l < k$) 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 (論文 19) にもまとめた。

(9) ゲージ同変なトランスフォーマーの開発

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

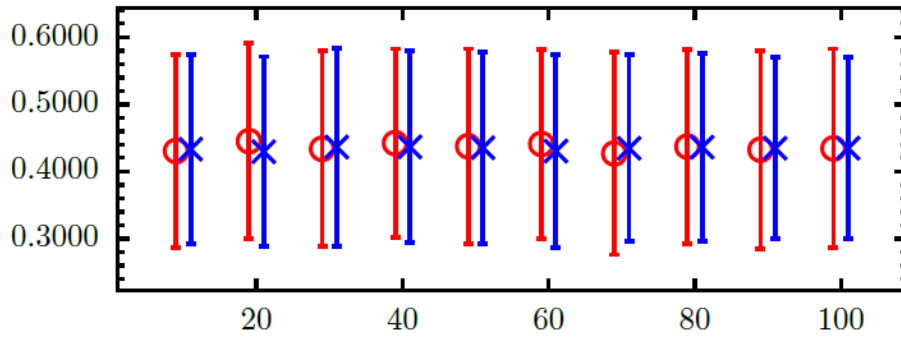


図 6: 機械学習によるカイラル凝縮の尖度の推定値 (赤) と実際の計算結果 (青) の比較。横軸は学習に用いたデータの割合を示す。

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レ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 (論文 20) にもまとめた。

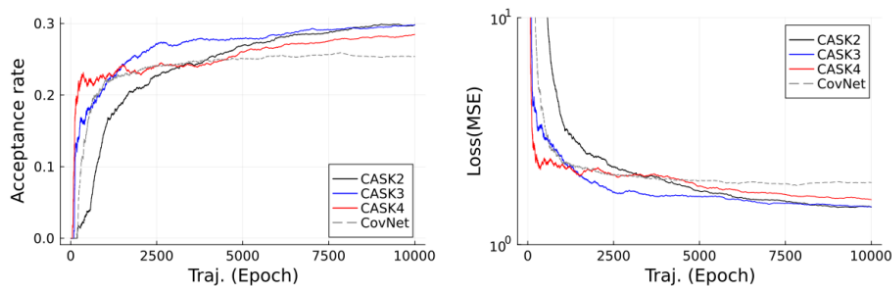


図 7: CASK を用いたモデルと従来のモデルの比較。左はハイブリッドモンテカルロ法の受容率、右は誤差関数の学習時間依存性を表す。

(10) 機械学習を用いたゲージ固定の高速化

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、様々な長さを持つ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。

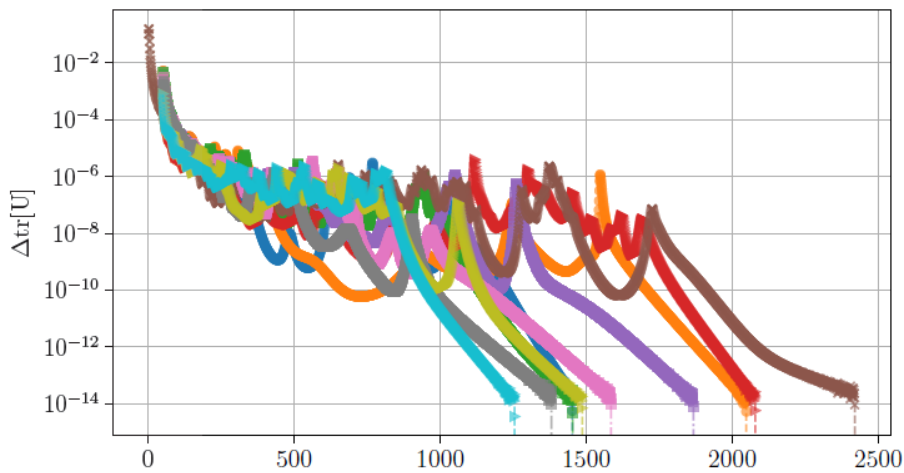


図 8: 様々な機械学習モデルと従来法 (茶色) におけるゲージ固定の収束性の比較。横軸はゲージ変換の反復回数。

(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

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（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。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。藏増と秋山は 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ル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リング次元 $x_1(L)$ 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ル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な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（論文 21, 23）として出版され、国際

会議（国際発表 13, 26, 34）、国内学会（国内発表 45）での発表を行なった。

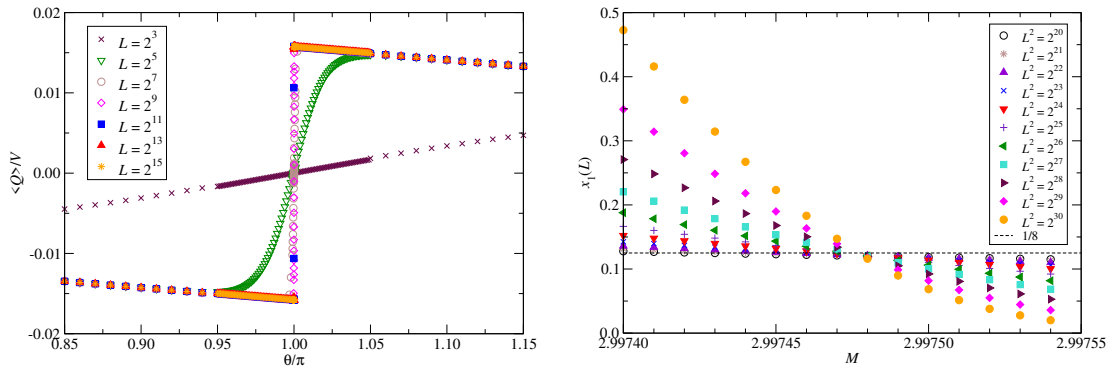


図 9: (左) Higgs 質量無限大極限におけるトポロジカルチャージ密度の θ 依存性。(右) 臨界終点近傍におけるスケリング次元 $x_1(L)$ のシステムサイズ依存性（論文 21）。

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 O(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、学術論文（論文 22）として出版され、国際会議（国際発表 14）においても発表を行った。

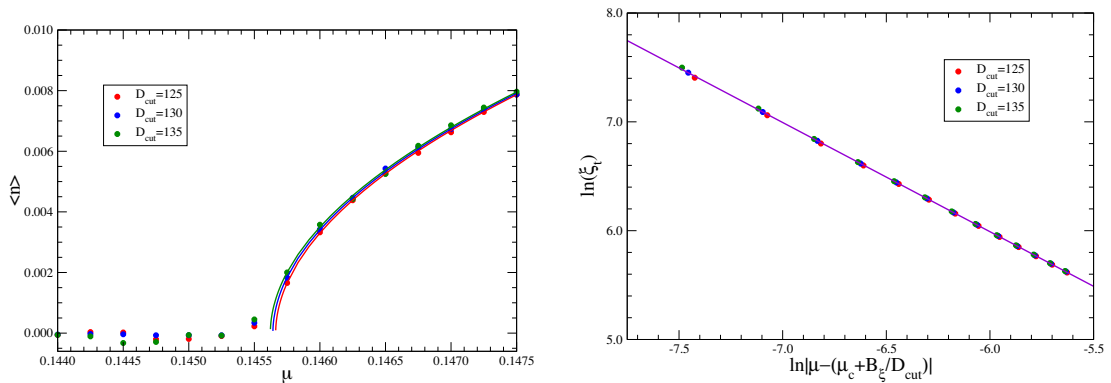


図 10: (左) 粒子数密度の μ 依存性。 D_{cut} はボンド次元を表す。(右) 時間方向の相関長の μ 依存性（論文 22）。

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 (Fig. 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 (論文 26) として出版され、国内学会 (国内発表 15) においても発表を行った。

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、ダイクォーク凝縮、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 (論文 27) 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 (論文 29)。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 (国際発表 16, 32, 35) および国内学会 (国内発表 17, 46) 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 模型の数値研究にも取り組んだ。この模型は、QCD の Toy Model 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

を用いて模型を格子上に定式化した。この模型に対しては、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 (Fig. 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 (国際発表 15) および国内学会 (国内発表 16) 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 (論文 28)。

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 (論文 25)。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。

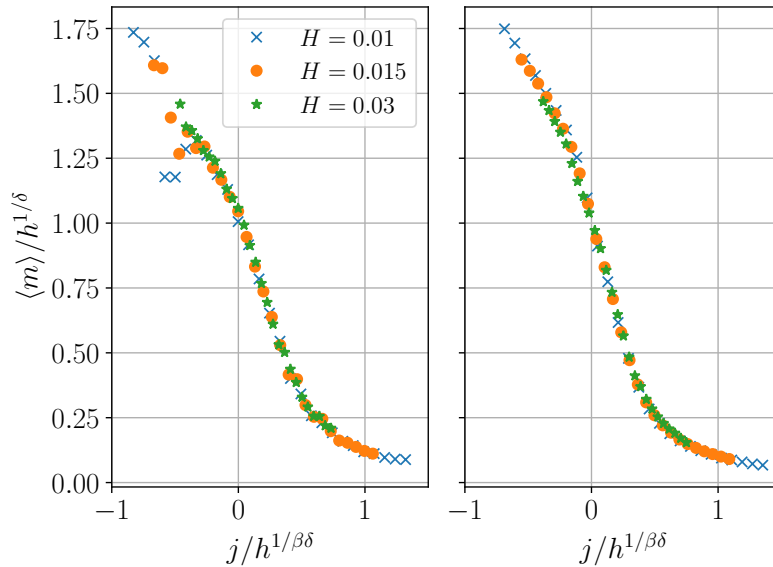


図 11: 3次元 SU(2) プリンシパルカイラル模型の磁化のスケーリング。(左) Triad TRG 法による結果。(右) ATRG 法による結果。

(12) 格子 QCD 研究用データグリッド ILDG/JLDG の運用

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、各拠点に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

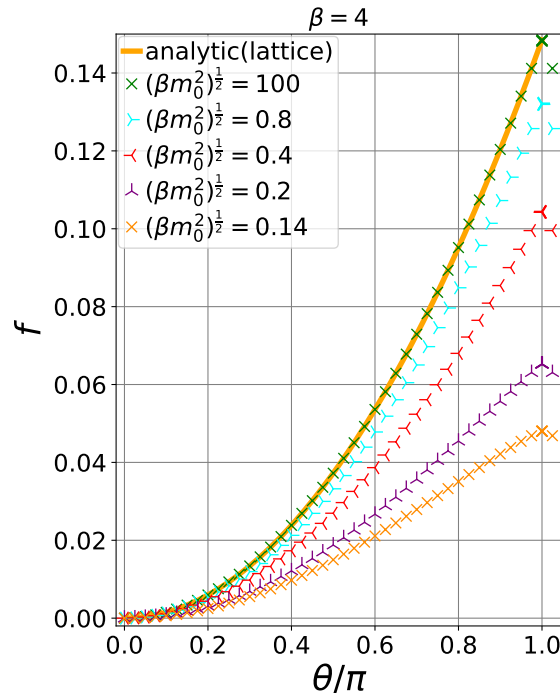


図 12: Schwinger 模型の自由エネルギーの θ 依存性。

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蔵増、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。

【2】 超弦理論

(石橋延幸、伊敷吾郎、浅野侑磨、毛利健司)

(1) Minkowski 型行列模型の研究

超弦理論の非摂動的な定式化として提案されている行列模型では、時空が予め定義されていない理論から行列の自由度を通して時空が創発されると期待されている。そのような行列模型として時間をも含まない0次元の理論が提案されているが、行列同士の結合の仕方が時間を含まない Euclid 型か含んでいる Minkowski 型かについての不定性がある。その内、微妙さがなく扱いやすい Euclid 型の方が長らく研究されてきたが、我々が知覚している4次元時空が創発されるには Minkowski 型になっている必要があることが強く示唆されている。しかし、Minkowski 型行列模型の経路積分は、正則化の選び方に関する問題や、激しい符号問題による数値的解析の困難などの課題を抱えている。

浅野は Minkowski 型行列模型の経路積分がどうあるべきかを明らかにするため、すでに確立されている超弦の摂動論の経路積分が Minkowski 型でどのように定式化されているか見直し、それを正則化することで Minkowski 型の行列模型を得た(論文 30)。この研究により、Minkowski 型の超弦の摂動論は因果律的な性質が自然に入っていることが明らかにされ、それに類する性質を引き継ぐ行列模型の形も明らかになった。

これとは別に、浅野は KEK の西村淳教授と学生の Worapat Piensuk 氏、山森直幸氏、Ashutosh Tripathi 氏、Chien-Yu Cho 氏と共に、あるタイプの Minkowski 型行列模型を解析的・数値的両側面から研究した。この研究では、Minkowski 型の行列模型に特有の Lorentz 対称性に由来する発散に着目し、そのような発散が除去された経路積分の定式化を提案した(論文 31)。さらに、行列の個数 D が大きい場合の近似的な式を計算し、Lorentz 対称性に由来する発散が物理量の期待値に与える影響を明らかにした。

(2) Strebel differential を用いた弦の場の理論の構築

弦理論の世界面は、数学でリーマン面と呼ばれる面で記述できる。従って、弦理論の研究においてリーマン面とその形を表すモジュライ空間を具体的に記述する方法が必要不可欠である。数学においては、リーマン面のモジュライ空間をリーマン面上で定義される Strebel differential と呼ばれる2次微分を用いて記述する方法が便利に使われている。Strebel differential を用いると、ほぼ

すべてのリーマン面のモジュライ空間を簡単な方法で記述することができる。また、AdS/CFT 対応の弱結合極限において、Strebel differential が重要な役割を果たすのではないかという指摘がある。一方、これまで弦理論の研究において Strebel differential が用いられることはあったが、その有効性をすべて利用するようなアプローチは取られてこなかった。

石橋は、Strebel differential を用いた弦の場の理論を構築した (論文 32)。この理論は、フォッカー・プランク形式と呼ばれる定式化を用いており、単純な3点相互作用しか含んでおらず、非常に扱いやすい形になっている。この弦の場の理論を用いて、AdS/CFT 対応について研究することが将来の課題である。

(3) 行列正則化の研究

行列模型は M 理論や超弦理論の非摂動的な正則化を与えると予想されている。この予想において、弦や D ブレーンの形状をはじめとする弦理論の幾何学的情報は、行列模型における行列の配位を用いて記述できると考えられている。そのような記述を与える具体的な方法として、行列正則化と呼ばれるものが知られていたが、この方法は非常に限られた状況においてのみ有効となるものであった。伊敷と大学院生の菅野はこの問題について昨年度から引き続き研究を行い、弦理論において重要となるゲージ場や物質場に対する、統一的な行列正則化の方法を得た。この方法は幾何学の量子化の一種である Berezin-Toeplitz 量子化と呼ばれる方法を、ベクトル束の接続や切断に適用できるように拡張したものである。菅野はこの研究で得られた結果を博士論文にまとめた。

(4) 行列模型における 5 ブレーン

M 理論には、高次元のオブジェクトである M ブレーンが存在することが知られている。この中でも特に空間 5 次元のオブジェクトである M5 ブレーンは謎が多く、M5 ブレーンが複数枚あった場合のブレーン上の理論を記述する作用さえも分かっていない。一方で、M 理論の非摂動的な定式化として提案されている行列模型では、M ブレーンは古典解によって実現される。特に M5 ブレーン上の理論は、行列模型のある古典解周りの理論の適切な極限に対応することが分かっている。

浅野と伊敷は大学院生の吉田とともに、昨年度に引き続き M5 ブレーン上の理論の研究に着手し、特に M5 ブレーンが 1 枚しかない場合の理論のある特別なセクターにおける運動方程式の解をより一般の形で導いた。この解は、対応する行列模型のセクターの摂動に対応すると考えられる。その対応関係を明らかにすることで、複数枚の M5 ブレーンを記述する理論を、行列模型を用いて解明できると期待される。

(5) 複素 Langevin 法を用いた高密度 QCD の研究

有限密度での QCD は宇宙初期に存在していたと考えられるクォークグルーオンプラズマ相や中性子星内部で実現すると予想されているカラー超伝導相など、多彩な相構造を有していると考えられ、広範な物理分野で強い興味を持たれている。有限密度は符号問題が現れてしまうため、従来のモンテカルロ法では非

常に困難な領域であったが、近年発展した様々な数値的手法によりこの困難が克服されてきている。

浅野は昨年度に引き続き、KEKの西村淳教授、松古栄夫講師、三浦光太郎研究員、徳山工業高専の伊藤祐太助教、静岡大学の土屋麻人教授、福山大学の滑川裕介准教授、理化学研究所の横田猛研究員、QunaSysの筒井翔一郎研究員らとともに、符号問題を克服する数値的手法の一つである複素 Langevin 法で高密度領域の QCD を研究した。特に、カラー超伝導相転移の数値的実証は、秩序変数を精度良く測定することの困難さにより、いまだ実現されていない。これに対して、理論に新たな自由度を導入することでより測定しやすい秩序変数を定義したところ、秩序変数の応答が改善されたことが確認された。一連のシミュレーションは継続して実行中であり、データをためることでカラー超伝導相転移の実現を検証している。

〈論文〉

1. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, “ $|V_{us}|$ 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.
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.
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.
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.
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.
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.

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.
8. 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.
9. Fathiyya Izzatun Az-zahra, Shinji Takeda, Takeshi Yamazaki, “Spectroscopy using tensor renormalization group method”, PoS(LATTICE2024) (2024) 356, pp.1-9.
10. 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.
11. Ryo Ashikawa, Masakiyo Kitazawa, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, “High-precision analysis of the critical point in heavy-quark QCD at $N_t=6$,” Phys. Rev. D 110, No.7 (2024) ref. 074508, pp.1-13.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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

18. 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.
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," PoS(LATTICE2024) (2025) 033, pp.1-9.
20. A. Tomiya, H. Ohno and Y. Nagai, "CASK: A Gauge Covariant Transformer for Lattice Gauge Theory," PoS(LATTICE2024) (2025) 030, pp.1-10.
21. 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.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. S. Akiyama, Y. Meurice, R. Sakai, "Tensor renormalization group for fermions", Journal of Physics: Condensed Matter 36 (2024) ref. 343002 (招待有り).
26. 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.
27. 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.
28. 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.
29. 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.

30. Y. Asano, “Quantisation of type IIB superstring theory and the matrix model”, JHEP 10 (2024) 082.
31. Y. Asano, J. Nishimura, W. Piensuk, N. Yamamori, “Defining the type IIB matrix model without breaking Lorentz symmetry”, Phys. Rev. Lett. 134, No. 4 (2025) ref. 041603, pp.1-6.
32. N. Ishibashi, “Strebel Differentials and String Field Theory”, PTEP 2024 No. 7, ref. 073B02 (2024).

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 菅野 聡
「Generalization of quantization and its application to matrix model for string theory」
2. 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」
3. 羅 梟
「Tensor renormalization group approach to quantum field theories with continuous internal degree of freedom」

[修士論文]

1. 大館 杏土嶺
「位相的弦理論の摂動的及び非摂動的解析」
2. 加藤 瑠和
「重力子三点振幅の計算と局所化」
3. 村山 祐明
「行列模型と重力理論の対応について」

〈非常勤講師・集中講義〉

1. 石橋延幸, 「素粒子物理学特論 B」, 奈良女子大学 (2024 年 11 月 6 日-8 日).
2. 秋山 進一郎, 集中講義「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).

〈研究成果発表〉

[国際会議・研究会]

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 Universität Bochum, Bochum, Germany, Sep. 5, 2024).
19. S. Akiyama, 「Tensor network toward the lattice QCD」 (招待講演), Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22) (University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, Sep. 23–27, 2024).
20. 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-Universität Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
21. 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-Universität Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
22. 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).
23. 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).
24. 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).
25. 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-Universität Mainz, Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).

26. 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 Mainz, Germany, Sep. 25–27, 2024).
27. 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).
28. 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).
29. K. Kanaya, R. Ashikawa, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Sugawara, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow」 ,
CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
30. 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」 ,
CCS 16th international symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, Oct. 7–8, 2024).
31. 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).
32. 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).

33. H. Ohno, 「Machine learning applications to Lattice QCD」 ,
Tsukuba/LBNL Collaboration Meeting, (Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, Nov. 7–8, 2024).
34. 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).
35. 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).
36. 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).
37. N. Ishibashi, 「Strebel differentials and string field theory」 (招待講演),
International workshop on string field theory and related aspects (Mar. 17–28, 2025 Old SISSA building, Trieste, Italy).

[国内学会・研究会]

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. 浅野侑磨, 「Quantum equivalence between the Polyakov, Schild and Nambu-Goto-type formulations in superstring theory」 ,
場の理論と弦理論 2024 (基礎物理学研究所, 京都, 2024年8月5–9日).
3. 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」 (招待講演),
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).
4. 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).

5. 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).
6. 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).
7. 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, 「 $N_f = 2 + 1, 2 + 1 + 1$ 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).
8. 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, 「 $N_f = 2 + 1$ 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).
9. 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).
10. 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).
11. 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).
12. 北澤正清, 和田辰也, 金谷和至, 「臨界点近傍でのスケーリング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).
13. 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).

14. 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).
15. 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).
16. 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, 「Grassmann Tensor Renormalization Group for $N_f=2$ 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).
17. 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).
18. 石橋延幸, 「Strebel differentials and string field theory」,
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).
19. 浅野侑磨, 西村淳, Worapat Piensuk, 山森直幸, 「ローレンツ対称性を保つ IKKT 行列模型の新しい正則化とその必要性」,
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).
20. 三浦光太郎, 浅野侑磨, 伊藤祐太, 松古栄夫, 滑川裕介, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一郎, 横田猛, 「複素ランジュバン法を用いた有限密度格子QCDにおけるカラー超伝導の研究」,
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).
21. 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).
22. 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).

23. 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).
24. 石橋延幸, 「Mirzakhani-McShane identity and String field theory」,
奈良女子大セミナー (奈良女子大, 奈良, 2024 年 11 月 8 日).
25. 石橋延幸, 「Mirzakhani-McShane identity and String field theory」,
信州大学コロキウム (信州大学, 長野, 2024 年 11 月 12 日).
26. 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).
27. 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).
28. 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」(招待講演),
「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).
29. 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).
30. 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).
31. 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).
32. 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」(招待講演),
Natural Science Forum (国際基督教大学, 2025 年 2 月 17 日).

33. 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).
34. 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).
35. 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).
36. 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).
37. 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」 (招待講演),
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).
38. 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).
39. 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).
40. 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).
41. 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).
42. 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).

43. 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).
44. 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).
45. 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).
46. 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).
47. 三浦光太郎, 浅野侑磨, 伊藤祐太, 松古栄夫, 滑川裕介, 西村淳, 土屋麻人, 筒井翔一朗, 横田猛, 「複素ランジュバン法を用いた高密度格子 QCD に基づくカラー超伝導の研究」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).
48. Yuhma Asano, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Naoyuki Yamamori, 「Lefschetz thimble Hybrid Monte Carlo simulations of type IIB matrix model with the Lorentz-invariant mass term」, 日本物理学会 2025 年春季大会, (online, 2025 年 3 月 18 日-21 日).

〈受賞〉

1. 佐藤航平, 日本物理学会学生優秀発表賞, 2024 年 9 月.
2. 菅野聡, 数理物質科学研究学群長賞 (2024 年度博士論文).

〈国際会議・研究会の実施〉

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, 東京 (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)
登録者数: 635
世話人: 大野浩史 (筑波大), 柏浩司 (福岡工業大), 富谷昭夫 (東京女子大), 二
村保徳 (筑波大)
ウェブページ: <https://akio-tomiya.github.io/lectures4mlphys/>
Youtube チャンネル: <https://www.youtube.com/@lectures4mlphys>

2. 大野浩史, 藏増嘉伸, 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
参加登録人数: 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, 2024年9月25日-27日
参加登録人数: 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), 藏増嘉伸 (筑波大), 武田真滋 (金沢大)
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, 東京 (ハイブリッド), 2024年11月24日
参加者数 (内対面参加): 178 (24)
世話人: 大野浩史 (筑波大), 富谷昭夫 (東京女子大)
ウェブページ: <https://akio-tomiya.github.io/nobel2024/>
Youtube チャンネル: 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, 東京 (ハイブリッド), 2024年12月14日
参加者数 (内対面参加): 181 (38)
世話人: 大野周平 (横浜市立大, 理化学研究所), 富谷昭 (東京女子大), 永井佑紀 (東京大), 大野浩史 (筑波大)
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
参加登録人数: 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 (140)

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), 水上渉 (大阪大)

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

Youtube チャンネル: <https://www.youtube.com/channel/UC7zQqYdH0qH4FPriutRAvQ>

〈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 (JICFuS)
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. 「富岳」成果加速創出プログラム
「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」
<https://www-het.ph.tsukuba.ac.jp/latticeqcd.ai/latticeqcd.ai/>
3. 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/>
4. International Lattice Data Grid (ILDG)
<https://hpc.desy.de/ildg/>
5. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<https://www.jldg.org/>
6. 藏増嘉伸、ILDG board member
7. 石橋延幸、PTEP 執行編集委員
8. 石橋延幸、PTEP 編集委員
9. 石橋延幸、物理学会刊行委員会副委員長
10. 石橋延幸、物理学会英文誌刊行に関するワーキンググループ
11. 石橋延幸、素粒子メダル選考委員
12. 山崎剛、計算科学ロードマップ執筆者

13. 大野浩史、International Lattice Data Grid Middleware Working Group member
14. 大野浩史、Japan Lattice Data Grid 管理グループ代表