

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

特命教授 金谷 和至

研究員 浮田 尚哉、新谷 栄悟、住本 尚之、吉江 友照

大学院生 (12名)

【人事異動】

住本尚之博士が計算科学研究センター研究員として着任した(2023年4月1日)。
吉江友照准教授が定年退職後、計算科学研究センター非常勤研究員として着任した(2023年4月1日)。

浮田尚哉博士が数理物質系研究員として着任した(2023年5月16日)。

秋山進一郎博士が計算科学研究センター助教に着任した(2023年6月1日)。

【研究活動】

素粒子理論グループにおいては、本年度も、格子場の理論と超弦理論の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。本年度から新たに採択された「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)を中心とした大型プロジェクト研究を遂行するとともに、昨年度に引き続き、「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年度1月に稼働開始予定であり、それまでの間はJCAHPCにおいて運用されているWisteria-Odyssey(「富岳」と同じアーキテクチャでOFPと同程度の演算性能を有し、学際共同利用プログラムに供されている)を積極的に活用していく予定である。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、有限温度・有限密度QCDの研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの運用・高度化を推進した。

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。ゲージ理論に対する行列正則化の研究、Strebel differential を用いた弦の場の理論の構築、タキオン真空解周りの閉弦振幅の計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。

なお、2023 年度は新型コロナウイルス COVID-19 の感染予防に注意を払いながらも、日々の研究活動や大学活動においてコロナ前の日常を取り戻したと言える状況であった。

【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、金谷和史、浮田尚哉、住本尚之、新谷栄悟、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、本年度から新たに採択された「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) によって、大きく進展した。

過去 30 年以上にわたり、格子 QCD は主にハドロン単体の諸性質解明を目指して来た。現在の世界的な状況においては、2 つの大きな問題点が存在する。まず、物理点直上でのシミュレーションが可能になったことは事実だが、実際には物理点のみで物理量の評価を行えるほどの精度を得るレベルには至っていない。次に、現在の格子 QCD シミュレーションに置ける物理量計算は” テーラーメイド” であると評されている。これは、目的とする物理量計算に応じて、適当と思われる物理パラメータ(クォーク質量や空間体積など)を選んでシミュレーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であっても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現しないということが起こりうる。「富岳」などの大型スーパーコンピュータを用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で $(10\text{fm})^3$ 超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記 2 つの課題を克服した計算を実現する。今年度は、2+1 フレーバー QCD における最大格子サイズ(格子間隔, 格子サイズ) = $(0.043\text{fm}, 256^4)$ のゲージ配位生成が終了し、2+1+1 フレーバー QCD のゲージ配位生成を推進した。

2+1+1 フレーバー QCD のゲージ配位は、2+1 フレーバーの場合と同様に、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。今年度の進捗状況は、最小格子サイズ 128^4 ($a \approx 0.08\text{fm}$) のゲージ配位生成が完了、中間格子サイズ 168^4 ($a \approx 0.06\text{fm}$) はゲージ配位生成中、最大格子サイズ

$256^4 (a \approx 0.04\text{fm})$ はパラメータ調整中という段階である。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 と 160^4 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 ($0.065\text{fm}, 0.085\text{fm}$) を使った計算から得られた $|V_{us}|$ (赤四角) (論文 2) 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)、3 つの格子間隔の計算結果から連続極限の $|V_{us}|$ を見積もった (塗りつぶし赤丸)。今後、この結果の系統誤差を見積もり研究結果を論文としてまとめる予定である。

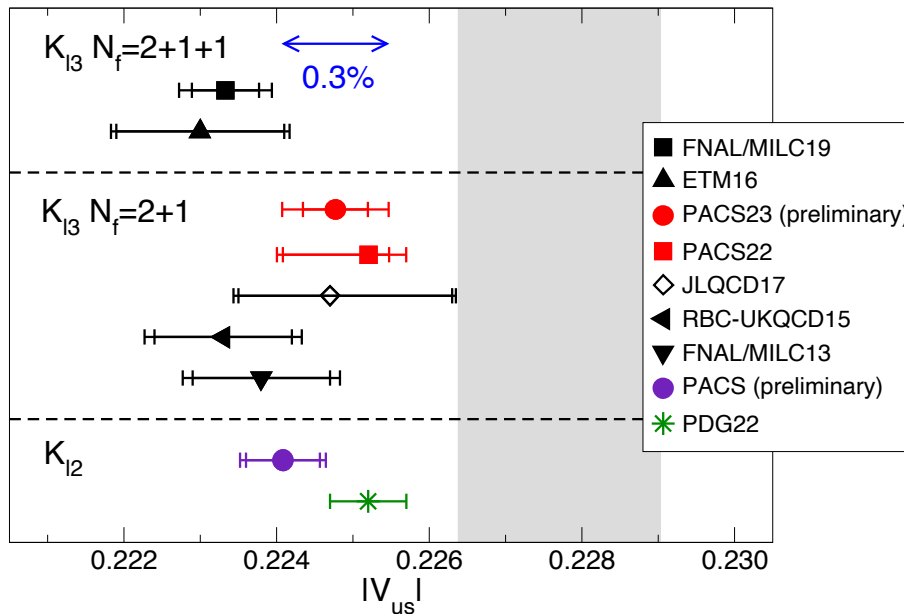


図 1: $|V_{us}|$ の比較。赤丸印は我々の最新の結果 (論文 1)、赤四角印は我々の 2020 年の結果。水色帯と灰色帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測で、色の違いは用いた $|V_{ud}|$ の違い。

(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、東北大学大学院生 辻竜太郎氏と共に、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、2021 年度から継続してきた格子間隔 $a = 0.065\text{fm}$ での形状因子計算を継続し、その研究成果を論文としてまとめた(論文 5, 6, 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

大学院生 佐藤と山崎は電磁的形状因子の原点の傾きで定義される荷電半径を格子 QCD 計算から直接計算する方法の開発研究を行った。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を詳しく調べた結果、無視できない大きさの有限体積効果が含まれる場合があることを確認した。その効果を抑制する改良された直接微分計算法を提案し、その方法を π 中間子質量 0.51GeV での格子 QCD 計算に適用し、実際の π 中間子荷電半径計算でこの方法が機能することを確認した(論文 3, 4)。今後はこれらの方法を現実的クォーク質量、大体積のゲージ配位を用いて中間子荷電半径の精密計算を実施していく。

(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・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と考えられている。従って、現在の宇宙を理解する上で、宇宙初期に実現したと考えられる QCD の有限温度・密度相転移の解明は重要である。金谷は、新潟大学 江尻信司准教授、京都大学基礎物理学研究所 北澤正清講師、九州大学 鈴木博教授らと、QCD の有限温度・密度相転移の性質を、格子 QCD シミュレーションにより研究した。

物理点 QCD の相転移はクロスオーバーであり、近傍の臨界点のスケールリングの影響を受けていると考えられている。臨界点は、クォーク質量が軽い側と重

い側の両方に存在するが、近年の格子 QCD 研究により、2+1 フレーバー QCD の軽い側の臨界点が 3 フレーバー QCD のカイラル極限 ($m_u = m_d = m_s = 0$) まで後退している可能性が高いことがわかって来た。従って、物理点のクロスオーバーに、重い側の臨界点も影響している可能性がある。クォークが重い極限の QCD は、クォークがデカップルして SU(3) Yang-Mills 理論となるが、その有限温度相転移は Z(3) 有効スピン系と同じユニバーサリティー・クラスに属する 1 次相転移である。クォーク質量を無限大から下げていくと、クォーク質量の逆数が Z(3) 有効スピン系に外部磁場として作用するため、この 1 次相転移はある臨界クォーク質量で連続的なクロスオーバーに変化する。この境界が、重い側の臨界点で、その近傍で Z(2) の臨界スケーリングが期待される。

金谷らは、昨年度までの研究で開発したホッピングパラメータ展開に基づく方法を採用して、大格子での高統計シミュレーションを遂行している。2022 年度までに実行した $N_t = 4$ 格子での臨界スケーリング研究を拡大して、2023 年度には、より連続極限に近づけた $N_t = 6$ での研究を遂行し、 $N_t = 8$ のシミュレーションも開始した。

図 2 に $N_t = 6$ 格子におけるポリアコフ・ループのビンダー・キュムラントの結果を示す。系の空間サイズはアスペクト比 $LT = N_s/N_t$ でコントロールする (臨界点探索では温度 $T = 1/(aN_t)$ が臨界温度近傍でほぼ一定なので、 LT は空間サイズ $L = aN_s$ に比例する。ここで N_s, N_t は空間方向, 温度軸方向の格子サイズで、 a は格子間隔)。臨界スケーリングが実現していれば、ビンダー・キュムラントは臨界点で空間サイズ依存性が無くなる。図から、アスペクト比 10 以上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できることがわかる。他方、アスペクト比 6, 7 の結果は $N_t = 4$ の場合より交点から大きくずれており、格子間隔が小さくなると空間サイズが小さい格子のデータがスケーリングからより大きく外れることがわかった。(論文 10)

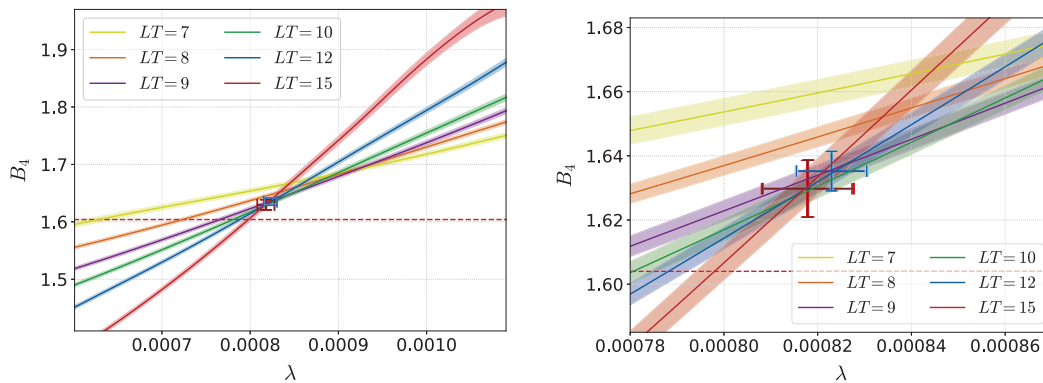


図 2: クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における、Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $N_t = 6$ 格子の結果。右図は、左図の交点 (相転移点) 付近の拡大図。(論文 10)

$N_t = 8$ の研究はまだ進行中だが、同様の中間結果を得ている。 N_t を増やして連続極限を議論する場合、ホッピングパラメータで表された臨界点 κ_c の変化

を、物理量の変化に翻訳する必要がある。そこで、 κ_c におけるゼロ温度での擬スカラーメソンと相転移温度の比 m_{PS}/T_c を計算したところ、 $N_t = 4, 6, 8$ でそれぞれ $m_{PS}/T_c = 16.30(3), 18.04(4), 17.2(2)$ という暫定的結果を得た（国内発表 20）。これによると N_t 依存性（格子間隔依存性）は小さいと思われるが、 N_t をさらに大きくして、より連続極限に近づけた場合にも検証する必要がある。

以上では、2 フレーバー QCD の場合における臨界点の結果について説明してきたが、ホッピングパラメータ展開に基づく我々の方法は、任意のフレーバー数で、またクォーク質量が縮退していない場合でも、臨界点を求めることができる。さらに、我々の方法は有限密度にも容易に拡張できることを昨年度の研究で示した。フル QCD では非常にコストがかかるクォーク行列式の複素位相の計算も、ホッピングパラメータ展開による方法では簡単に評価できる。

2 + 1 フレーバー QCD では、臨界点は (κ_{ud}, κ_s) 平面における一次相転移の境界線となる。 $N_t = 4, 6$ 格子でのデータを有限密度（クォークの化学ポテンシャル μ がゼロでない場合）に拡張して物理量を評価した結果、少なくとも我々が解析した N_t の重クォーク領域の臨界点付近までは符号問題が深刻ではなく、再重み付け法により有限密度での臨界点を評価できることが分かった。それにより、図 3 に示すように、重クォーク QCD の一次相転移領域が、密度が高くなるにつれて小さくなることを定量的に示した。（論文 11）

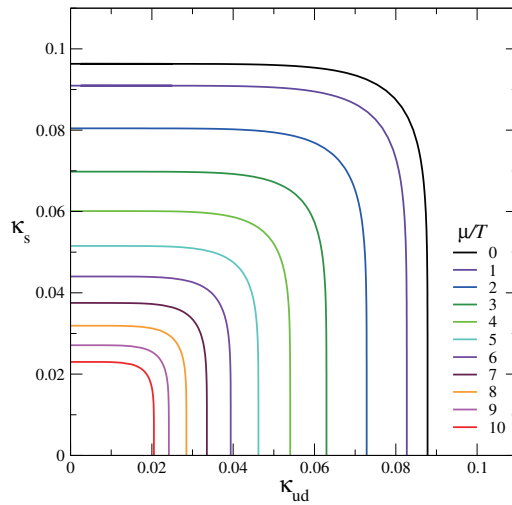


図 3: 2 + 1 フレーバー有限密度 QCD における 1 次相転移領域の境界線の μ/T 依存性。 $N_t = 6$ 格子での結果。（論文 11）

これらと並行して、物理点における QCD 相転移近傍の熱力学量を、グラジエント・フローに基づく SFtX 法（small flow-time expansion 法）により研究するプロジェクトも、引き続き推進している。

(6) 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、クォークコニウムは 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、クォークコニウムや重クォークの QGP 中での振る舞いを理論的に調べることが必要不可欠である。その際、クォークコニウム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コニウム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、クォークコニウム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、クォークコニウム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、大阪国際工科専門職大の富谷助教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コニウムスペクトル関数の推定に関する研究を推進した。2023 年度は昨年度に引き続き、手で与えたスペクトル関数から作成した様々な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。加えて、実際の格子 QCD 計算で得られた、臨界温度より低い温度におけるチャーモニウム相関関数のデータに対しても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。その結果、 J/ψ 粒子の質量付近で束縛状態を表すピーク構造を持ったスペクトル関数が得られることを確認した (図 4)。一方、最大エントロピー法を用いた先行研究と比較すると、幅の広いピークが得られることが分かった。この結果は、国際会議「Lattice 2023」や日本物理学会 2024 年春季大会等で発表し、「Lattice 2023」の会議録 (論文 12) にもまとめた。

(7) 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

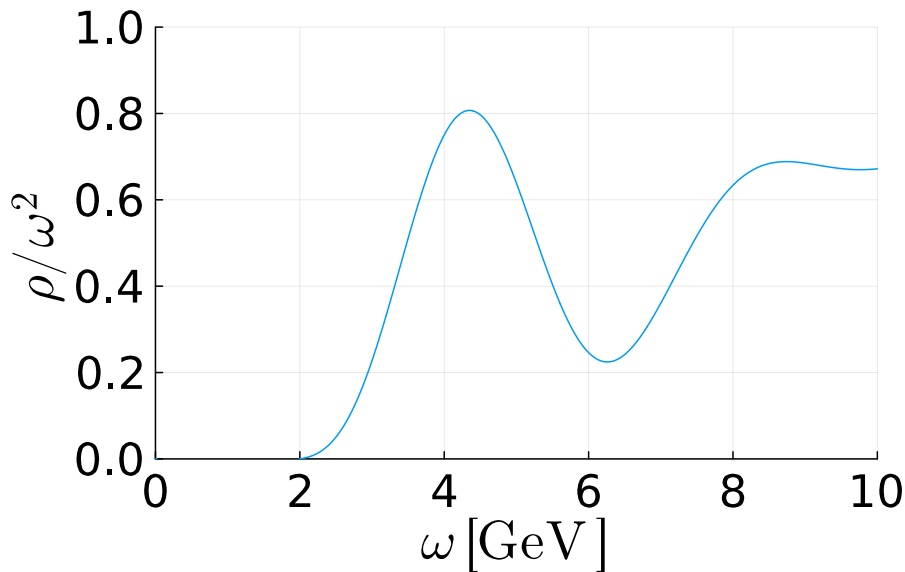


図 4: スパースモデリングにより得られたチャーモニウムのスペクトル関数。

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。

2023年度は、上記課題(i)~(v)のうち、課題(iv)に関連して新たな展開があった。エンタングルメント・エントロピーは、量子多体系の量子的なもつれを測る定量的な指標として重要な物理量であるにもかかわらず、モンテカルロ法で直接計算することは難しい。場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの直接計算のためには、TRG法において分配関数そのものが計算できる特性が本質的に重要である。蔵増と博士後期課程2年の羅は、新たな計算手法を用いて、(1+1)次元のO(3)非線形シグマモデルのエンタングルメント・エントロピーを計算し、場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの非摂動計算の実証に成功した。図5(左)は、エンタングルメント・エントロピーのサイズ依存性である。ここでは系全体の空間サイズを $2L$ とし、2つに分割された領域のサイズを各々 L として周期的境界条件を課している。結合定数 β が大きくなるほど相関長 ξ が長くなる（例えば $\beta = 1.4$ で $\xi = 6.9$ 、 $\beta = 1.7$ で $\xi = 34.6$ ）が、 L が ξ よりも大きくなるとエンタングルメント・エント

ロピーが一定になっており、理論的に期待される振る舞い $S_A(L) \sim (c/3) \ln(\xi)$ と一致している。われわれは更に β 依存性からセントラルチャージを計算し、 $c = 1.97(9)$ という値を得ている。図 5 (右) は、エンタングルメント・エントロピー ($n = 1$) と n 次 ($n \neq 1$) のレンニ・エントロピーとの比較である。まず、これまでのモンテカルロ計算では、エンタングルメント・エントロピーと 2 次のレンニ・エントロピーの値が近い ($S_A \approx S_A(2)$) ことが仮定されてきたが、実際には大きく異なることがわかる。また、 $n \geq 2$ のみのデータを使って $n = 1$ の正しい外挿値を得ることは難しいが、 $n = 1/2$ のデータも使った内挿によって $n = 1$ の推定値が改善されている。

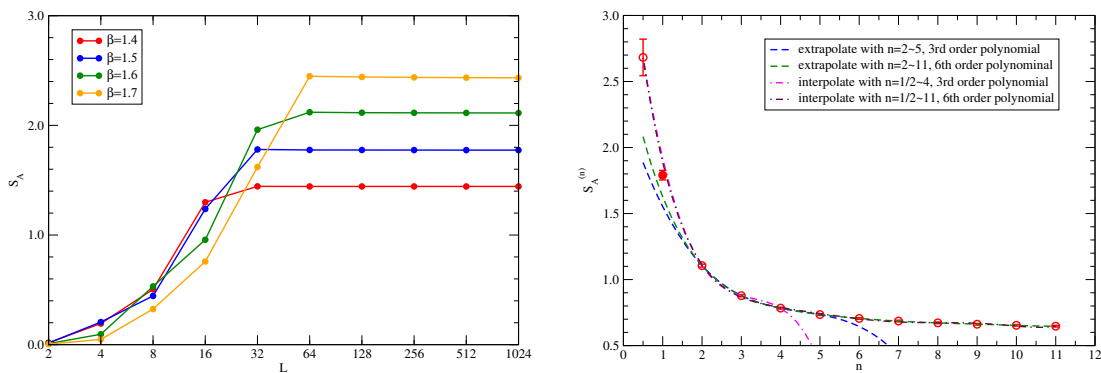


図 5: (左) エンタングルメント・エントロピーのサイズ依存性。 β は結合定数を表す。(右) エンタングルメント・エントロピー ($n = 1$) と n 次 ($n \neq 1$) のレンニ・エントロピーの n 依存性 (論文 14)。

本年度 6 月に秋山進一郎助教が本学 CCS に着任し、テンソルネットワーク法を用いた量子物理学の研究を活発に行っている。

まず、秋山は、フレーバー自由度を伴う格子フェルミオン系に対する新しい Grassmann テンソルネットワーク表現の構築に取り組んだ。フレーバー自由度を伴う格子理論では、素朴にテンソルネットワーク表現を構成すると、メモリコストがフレーバー数に関して指数関数的に増大する。この問題を解決するために、行列積分を応用しフレーバー数を仮想的な次元とみなすことで、経路積分の Grassmann テンソルネットワーク表現を多層化する手法を提案した。この手法では必要なメモリコストがフレーバー数に関して線型にしか増大しない。この手法を 2 フレーバーおよび 3 フレーバー Wilson フェルミオンからなる Gross-Neveu 模型に応用し、その経路積分がボンド次元 4 の多層テンソルネットワークとして厳密に表現できることを見出した。さらに、多層テンソルネットワーク表現の構造を保つような粗視化手法も考案した。この手法を用いることで、有限密度領域のゼロ温度極限で発現する Silver Blaze 現象を再現することができた (図 6)。特に、多層化しない 2 次元的なテンソルネットワーク表現を直接粗視化する場合と比べ、半分以下のメモリコストでゼロ温度極限の物理量を計算できることが明らかになった (論文 17, 国内発表 54)。

また、秋山は東京大学の藤堂眞治教授と同研究室 D2 の Ho Pai Kwok 氏と共に、2 カラー QCD に対する初期テンソルの圧縮手法を開発し、2 次元系への

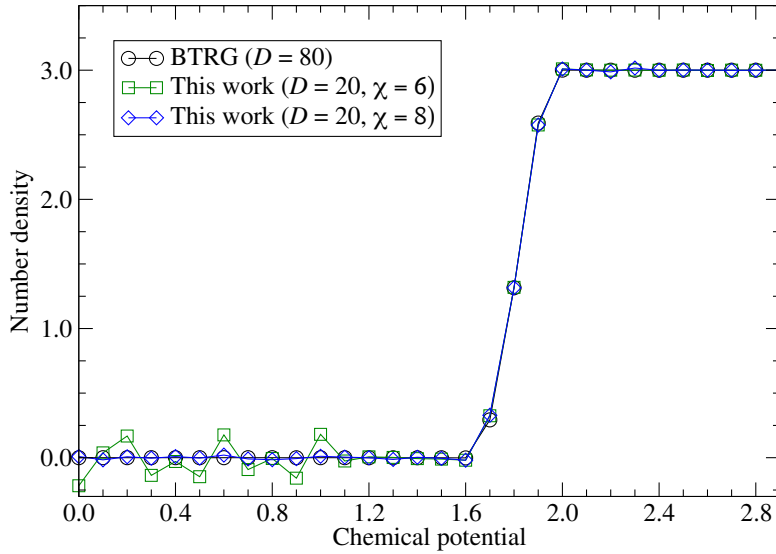


図 6: 3 フレーバー Gross-Neuve-Wilson 模型の粒子数密度。

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初期テンソルを構成し、ネットワークのすべてのボンドのサイズを特異値分解によって事前に削減する手法を提案した。本手法により、初期テンソルのサイズ（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。現在、圧縮されたテンソル表現に基づいて粒子数密度、フェルミオン凝縮、ダイクォーク凝縮を計算し、有限化学ポテンシャル、有限質量領域上での相構造を調べている。なお、本研究に関しては Ho Pai Kwok 氏が日本物理学会 2024 年春季大会にて研究発表を行なった（国内発表 53）。

さらに、秋山は、Jefferson lab の Raghav G. Jha 氏、Fermilab の Judah Unmuth-Yockey 氏と協力して、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) 対称性を明白に保った表現形式に基づく TRG 計算に取り組んだ。非可換自由度の効率的な離散化は、テンソルネットワークによる古典計算だけでなく、量子計算の文脈においても近年様々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の物理量に与える影響を調べ、有限打ち切り次数下でも離散化前のモデルと同じユニバーサリティクラスが実現していることを確認した（図 7）。さらに、Triad TRG と Anisotropic TRG (ATRG) の 2 種類のアルゴリズムを用いた数値解析を行った。その結果、ATRG の方が一点関数の計算を安定して行えることが分かった。今後、高次元向けの TRG アルゴリズムの改良を検討していく際の一つの指針となる知見が得られたと考えている。国際会議および

国際ワークショップで本研究成果の発表も行なった（論文 15, 国際発表 27, 9）。

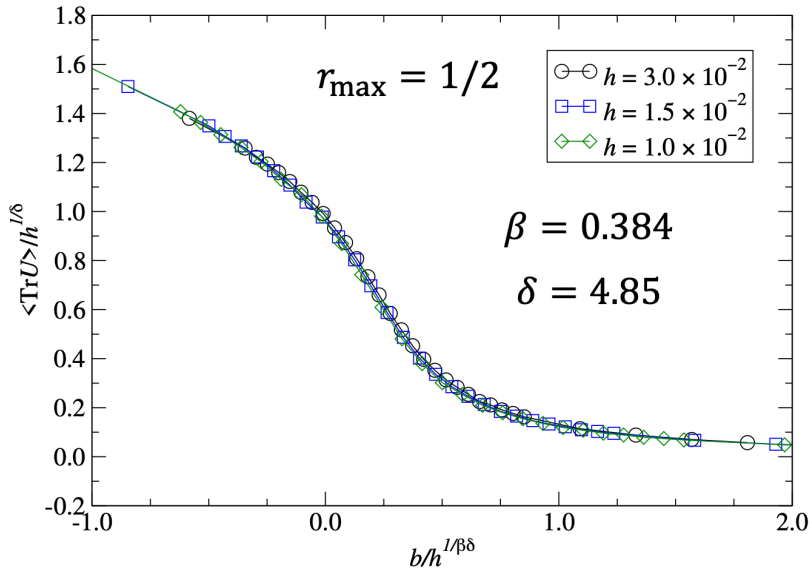


図 7: 3次元 SU(2) プリンシパルカイラル模型の磁化のスケーリング。

この他、秋山は格子フェルミオン系に対する bond-weighted TRG アルゴリズムの開発と応用も進め、国際会議等での成果発表と GitHub でのサンプルコードの公開も行った（論文 16, 国際発表 8, 国内発表 11）。また、開発したアルゴリズムに基づき、理研の菅野颯人氏、東工大の村上耕太郎氏、金沢大の武田真滋教授と共に、スタaggerドフェルミオンを用いた 2 フレーバー Schwinger 模型の研究を遂行した。スタaggerドフェルミオンを用いた Schwinger 模型の TRG 計算はすでに別のグループによる先行研究が存在するが、先行研究では世界線表現に基づくテンソルネットワーク表現が使われており、有限 θ 領域では熱力学極限の計算が極めて不安定になることが報告されていた。さらに、世界線表現では有限フェルミオン質量の導入が難しいというデメリットも存在した。そこで我々は、Grassmann テンソルネットワーク表現を用いることでこれらの問題を同時に解決することを試みた。その結果、 2π 周期性を明白に保ったまま、有限質量領域の熱力学極限計算に成功した。特に、摂動論が有効なフェルミオン質量の小さい領域と純 U(1) ゲージ理論に対応する重い質量領域の中間領域に着目し、トポロジカル電荷密度の振る舞いが質量によってどのように変化するのかを明らかにした。この成果は、菅野颯人氏が日本物理学会第 78 回年次大会にて報告し、現在論文を執筆中である（国内発表 23）。

(8) 素粒子標準模型を超えた理論の探索

ウォーキングテクニカラー模型は素粒子標準模型を超えた理論の有力な候補の一つである。この模型は、強結合ゲージ理論のダイナミクスにより、素粒子

標準模型では手で与えられていた電弱対称性の自発的破れの起源を説明できる可能性がある。しかし、この模型を構築するために必要な強結合ゲージ理論には、近似的共形対称性を持つなど、特殊な条件が課されている。山崎は名古屋大学 山脇幸一名誉教授や理研計算科学研究センター青木保道チームリーダーらと共に、LatKMI Collaboration において、格子ゲージ理論を用いた数値計算から、そのような条件を満たすゲージ理論が存在するかの探索を行っている。

これまでの4、8、12フレーバーSU(3)ゲージ理論の研究から、8フレーバー理論がそれら条件を満たす可能性があることを示唆した。2023年度はフレーバー1重項スカラー中間子及びフレーバー1重項擬スカラー中間子の質量について、4、8、12フレーバー理論の有効理論を用いた統一的な説明が可能かの調査、及び、8フレーバー理論で得られたSパラメータデータからカイラル摂動論低エネルギー定数の見積もりを行った。

(9) 格子QCD研究用データグリッドILDG/JLDGの運用

LDG (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から構成されるJLDG管理者グループが行なっており、本学物理学域からは、藏増、吉江、大野が参加している。なお、管理グループの代表は大野が務めている。

JLDGは、2008年に実運用を開始して以来16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。2023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。

- 広島拠点の停止に伴う作業を行った。
- ファイルサーバの使用率の偏りを解消するためのリバランス作業を実施した。
- HEPnet-J/scの運用体制変更に伴い、拠点間の新たな覚書の締結およびネットワーク構成の変更(L3ネットワークからL2ネットワークへ)を行った。
- 管理サーバの更新: CentOS7のサポート終了に対応するため、管理サーバのOSおよびソフトウェアの更新を行った。

- 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。2007 年の運用開始以降、世界の多くの研究者に利用されてきたが、近年は様々な要因により運用継続が困難となっていた。この状況を打破するため、2022 年初頭より定期的なミーティングを開く等、プロジェクトの再活性化への作業が開始された。これに関連して、JLDG では、技術的な問題から停止していた ILDG への QCD 配位の公開を簡易的に再開した。また、ILDG 全体の活動として特筆するものとして、ハンズオンワークショップの開催、国際会議「Lattice 2023」における plenary talk 及び lunch discussion の開催が挙げられる。

【2】 超弦理論

(石橋延幸、伊敷吾郎、浅野侑磨、毛利健司)

(1) ゲージ理論に対する行列正則化の研究

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な情報は、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。特に、D ブレーンの上にはゲージ場を始めとする様々な場が存在するが、従来の行列正則化はスカラー場という最も単純な場に対してのみ定義されたものであり、D ブレーン上の場に適用するためにはその適用範囲を広げる必要があった。伊敷と大学院生の菅野はこの問題を研究し、Seiberg-Witten 写像を応用することにより、ゲージ場に対しても適用できるような行列正則化の一般化を発見した。(論文 18)

(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。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 19) 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。この理論を超弦理論の場合に拡張すること、この弦の場の理論の古典解を研究することは将来の問題である。

(3) タキオン真空解周りの閉弦振幅の計算

弦理論において、タキオン真空と呼ばれる D ブレーンが一枚も存在しない配位で、弦がどのように振舞うのかについてこれまで多くの研究がなされてきた。摂動的に弦を考えた際には、開弦は常に何らかの D ブレーンに張り付いていることから、タキオン真空では閉弦だけの物理が得られるであろうと期待されている。弦の場の理論の分野において、Witten 型のボゾン開弦の場の理論を用いることでタキオン真空に対応する真空解が構成されており、実際に真空解の周りの理論を考えると、開弦の自由度が存在しないことも確認されている。しかし、Witten 型の理論は閉弦の場を含んでおらず、タキオン真空でどのようにして閉弦が出てくるのかは未解決であった。安藤は、Witten 型の理論と古典的には等価であることが示されている Kaku 理論に対して、摂動的な結果と矛盾することなく閉弦の場を結合させた理論を構成し、弦の散乱振幅を計算することで実際にタキオン真空では開弦の寄与しない純粋な閉弦だけの振幅が得られることを示した。(論文 20)

(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、M5 ブレーンを記述する理論を行列模型を用いて解明する研究に着手している。M5 ブレーン上の理論はブレーンが 1 枚の時のみ作用が分かっているため、その理論における超対称セクターの振る舞いを明らかにして行列模型と比較することで、任意枚数の M5 ブレーンの記述に迫れると期待している。今年度は M5 ブレーン上の理論の運動方程式の超対称な一般解を導き出した。今後は、行列模型との対応関係を明らかにすることで、それぞれの摂動論の比較などを行なっていく。

(5) 行列模型から D ブレーンの位置を読み取る方法

gauge/gravity duality において、超対称ゲージ理論 (行列模型) の配位に対応する D ブレーンの位置を理解することは重要なことである。超対称ゲージ理論 (行列模型) において同時対角化可能な場の対角成分が並行な D ブレーンの位置を表していることが Witten によって示されたが、強結合領域における D ブレーンの位置はいまだに完全な理解はない。花田氏は gauge/gravity duality の文脈でバルクの幾何学をゲージ理論のカラー自由度から読み取る手法を演算子形式で提案した。菅野はロンドン大学の花田政範研究員、慶應義塾大学の松

浦壮教授、京都大学基礎物理学研究所の渡辺展正研究員とともにこの手法を経路積分方式で実行するためには、注目する系の豊かな極小解の中から効率的に最小解を求める必要があることを提案した。また、拡張レプリカ交換モンテカルロ法を用いることで、上記の計算を行列模型を用いて数値的に実行することができることを toy model で示した。

(6) Lorentz 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。そのような機構で我々が知覚している 4 次元時空が創発されることを確認するために、計量の符号を Lorentz 型にした行列模型が研究されている。しかし、Lorentz 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 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、Lorentz 型行列模型を解析的・数値的両側面から研究した。特に、Lorentz 型の行列模型に特有の Lorentz 対称性由来する発散に着目し、行列模型の経路積分の新しい定式化を提案した。

(7) 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が持たれている。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、松古栄夫助教、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、京都大学の滑川裕介研究員、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証を目指す。

〈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, T. Yoshie for PACS Collaboration, “Momentum transfer dependence of kaon semileptonic form factor on $(10 \text{ fm})^4$ at the physical point”, PoS(LATTICE2022) (2023) 425, 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, “Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method”, PoS(LATTICE2022) (2023) 122, pp.1-10.
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. Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Towards the continuum limit of nucleon form factors at the physical point using lattice QCD”, PoS(LATTICE2022) (2023) 127, pp.1-9.
7. Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, “Nucleon form factors in $N_f=2+1$ lattice QCD at the physical point: finite lattice spacing effect on the root-mean-square radii”, Phys. Rev. D109, No.9 (2024) ref.094505, pp.1-44.
8. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, “Phase structure and critical point in heavy-quark QCD at finite temperature,” PoS(LATTICE 2022) (2023) 177, pp.1-9.
9. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, “Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku,” PoS(LATTICE 2022) (2023) 284, pp.1-10.
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.
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.

12. J. Takahashi, H. Ohno and A. Tomiya, “Sparse modeling approach to extract spectral functions with covariance of Euclidean-time correlators of lattice QCD”, PoS(LATTICE2023) (2024) 028, pp.1-7.
13. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Critical endpoint of (3+1)-dimensional finite density Z_3 gauge-Higgs model with tensor renormalization group”, JHEP 10 (2023) 077.
14. X. Luo and Y. Kuramashi, “Entanglement and Rényi entropies of (1+1)-dimensional $O(3)$ nonlinear sigma model with tensor renormalization group”, JHEP 03 (2024) 020.
15. S. Akiyama, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, “Tensor renormalization group study of 3D principal chiral model”, PoS(LATTICE2023) (2024) 355, pp.1-7.
16. S. Akiyama, “Implementation of bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group”, PoS(LATTICE2023) (2024) 370, pp.1-7.
17. S. Akiyama, “Matrix product decomposition for two- and three-flavor Wilson fermions: Benchmark results in the lattice Gross-Neveu model at finite density”, Phys. Rev. D108, No.3 (2023) ref.034514, pp.1-15.
18. H. Adachi, G. Ishiki and S. Kanno, “Matrix Regularization for Gauge Theories,” PTEP 2024, No.4, ref.043B01 (2024).
19. N. Ishibashi, “Strebel differentials and string field theory,” arXiv:2402.09641 [hep-th].
20. Y. Ando, “Closed string amplitudes around tachyon vacuum solution in Kaku theory,” arXiv:2310.14308 [hep-th].

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 安藤 雄史
「Berezin-Toeplitz quantization of vector bundles over Kähler manifolds」

[修士論文]

1. 貝瀬 義法
「Bootstrap 法による one matrix model の数値解析」
2. Choi Minjae
「ゲージ同変性を取り入れた機械学習による格子 QCD のディラック方程式への前処理」

〈研究成果発表〉

[国際会議・研究会]

1. H. Ohno, 「Lattice QCD studies on strong interaction matter under extreme conditions of temperature and/or density」, CCS LBNL Collaborative Workshop 2023 (CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, April 12–13, 2023).
2. Y. Asano, 「Thimble computation of the IKKT matrix model」 (招待講演), Numerical Methods in Theoretical Physics 2023 (APCTP, South Korea, July 10–14, 2023).
3. 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 $(10 \text{ fm})^4$ 」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
4. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, 「Comparison with model-independent and dependent analyses for pion charge radius」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
5. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「Discretization effects on nucleon root-mean-square radii from lattice QCD at the physical point」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
6. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, 「Chemical potential dependence of the endpoint of the first-order phase transition in the heavy-quark region of finite-temperature lattice QCD」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
7. Masakiyo Kitazawa, R. Ashikawa, S. Ejiri, K. Kanaya, 「Critical point in heavy-quark region of QCD on fine lattices」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
8. S. Akiyama, 「Bond-weighting method for the Grassmann tensor renormalization group」, The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).

9. J. Unmuth-Yockey, S. Akiyama, R. G. Jha, 「Tensor renormalization group study of 3D principal chiral model」 ,
The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
10. J. Takahashi, H. Ohno and A. Tomiya, 「Sparse modeling approach to extract spectral functions with covariance of Euclidean-time correlators of lattice QCD」 ,
The 40th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2023) (Fermi National Laboratory, USA, July 31–August 4, 2023).
11. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Hidekatsu Nemura, Keigo Nitadori, 「Multigrid Solver for Lattice QCD on GPU Machines」 ,
The 34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023) (Kobe International Conference Center, Kobe Port Island, Kobe, Japan, August 4–8, 2023).
12. Takeshi Yamazaki, 「Hadron form factors from PACS10 configurations」 (招待講演),
Lattice QCD and Probes of New Physics (McKibbin Conference Center, NM, USA, August 7–11, 2023).
13. Y. Asano, 「Perturbative superstring theory and the IKKT matrix model」 ,
Large-N Matrix Models and Emergent Geometry (ESI, Austria, Sep. 4–8, 2023).
14. Y. Asano, 「Perturbative superstring theory and the IKKT matrix model」 (招待講演),
Workshop on Noncommutative and Generalized Geometry in String theory, Gauge theory and Related Physical Models, CORFU2023 (Corfu, Greece, Sep. 18–25, 2023).
15. S. Akiyama, 「Tensor renormalization group approach to the four-dimensional lattice gauge theories」 (招待講演) ,
Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity (QIMG2023) 4th week: ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information (YITP, Kyoto, Japan, Sep. 25–29, 2023).
16. 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 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 2–3, 2023).

17. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, 「Systematic error of model-independent method for pion charge radius」 (ポスター発表), CCS 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 2–3, 2023).
18. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow」, CCS 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 2–3, 2023).
19. H. Nemura, T. Aoyama, 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 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 2–3, 2023).
20. S. Akiyama, Y. Kuramashi, Xiao Luo, Y. Yoshimura, 「Particle Physics with Tensor Network Scheme」 (ポスター発表), CCS 15th international symposium 2023 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 2–3, 2023).
21. S. Akiyama, 「Tensor network method for lattice field theory」 (招待講演), 2023 CCS-EPCC Workshop (CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, October 11–12, 2023).
22. Takeshi Yamazaki, 「Calculations using PACS10 configuration」, Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning (CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 23–25, 2023).
23. Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, 「How to directly calculate pion charge radius without fitting」 (招待講演), Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning (CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 23–25, 2023).
24. Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroto Sugawara, 「Phase structure of finite temperature and density lattice QCD in the heavy quark region」, Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning (CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 23–25, 2023).
25. Y. Ando, 「Relation between covariant and light-cone superstring field theory」, KEK Theory Workshop 2023 (KEK, Japan, Nov. 29–Dec. 1, 2023).

26. S. Akiyama, 「Tensor network approach for lattice field theories in particle physics」 (招待講演),
2024 KISTI-CCS Workshop (Yonsei University, Korea, Feb. 20, 2024).
27. S. Akiyama, R. G. Jha, J. Unmuth-Yockey, 「Tensor network formulation of the three-dimensional SU(2) principal chiral model」 (ポスター発表),
SQAI-NCTS Workshop on Tensor Network and Quantum Embedding (The University of Tokyo, Tokyo, Japan, March 25–29, 2024).

[国内学会・研究会]

1. 安藤雄史, 「Closed string amplitudes around tachyon vacuum solution in Kaku's bosonic string field theory」 (招待講演),
日本大学工学部素粒子論研究室コロキウム (Online, 2023年5月12日).
2. 秋山進一郎, 「Critical endpoint of (3+1)-dimensional finite density Z3 gauge-Higgs model with tensor renormalization group」 (招待講演),
宇宙史研究センター 2023年度第1回構成員会議・成果報告 (2023年6月27日).
3. 安藤雄史, 「弦の場の理論と最近の進展」 (招待講演),
宇宙史研究センター 2023年度第1回構成員会議・成果報告交流会 (筑波大学, 2023年6月27日).
4. 安藤雄史, 「Closed string amplitudes around tachyon vacuum solution in Kaku's bosonic string field theory」 (招待講演),
茨城大学素粒子論研究室セミナー (茨城大学, 2023年7月11日).
5. 安藤雄史, 「Open-closed string field theory using Kaku vertex」 (ポスター発表),
場の理論と弦理論 2023(京都大学基礎物理学研究所, 2023年8月4日–9日).
6. 菅野聡, 「スペクトラル三重項によるリーマン構造を保つ行列正則化」,
場の理論と弦理論 2023(京都大学、京都、2023年8月10日).
7. 大野浩史, 高橋純一, 富谷昭夫, 「Sparse modeling approach to extract spectral functions from Euclidean time correlators of lattice QCD」,
第二回 学術変革「学習物理学」 A02 班研究交流会 (東京大学石橋ホール, 東京, 2023年8月10日).
8. 菅野聡, 「スペクトラル三重項を用いた重力理論の行列正則化」,
原子核三者若手夏の学校 2023(国立オリンピック記念青少年総合センター, 2023年8月17日–21日).
9. 安藤雄史, 「場の理論とホモトピー代数」 (ポスター発表),
原子核三者若手夏の学校 2023(国立オリンピック記念青少年総合センター, 2023年8月17日–21日).

10. 菅原寛人, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 「 $N_t=8$ 格子 QCD 計算による重クォーク領域の QCD 臨界点近傍での有限体積スケールリング」, 熱場の量子論とその応用 2023 (TFQT 2023) (KEK, つくば市, 茨城, 2023 年 8 月 28 日-30 日).
11. 秋山進一郎, 「格子フェルミオン系に対するボンド重み付きテンソル繰り込み群」, 熱場の量子論とその応用 2023 (TFQT 2023) (KEK, つくば市, 茨城, 2023 年 8 月 28 日-30 日).
12. 菅野聡, 「レプリカ交換の手法を用いたアルゴリズムと行列幾何学」, 熱場の量子論とその応用 2023 (TFQT 2023) (KEK, つくば市, 茨城, 2023 年 8 月 28 日-30 日).
13. 伊敷吾郎, 「超弦理論と幾何学の量子化」, 幾何学シンポジウム (招待講演, 広島大学 (東広島キャンパス) , 2023 年 8 月 31 日-9 月 3 日)
14. 秋山進一郎, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional quantum fields on a lattice」 (招待講演) , 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2023 (筑波大学, 2023 年 9 月 11 日-14 日).
15. 菅野聡, 「Matrix regularization for gauge fields and Seiberg-Witten map」 , 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2023 (筑波大学, 2023 年 9 月 11 日-14 日).
16. 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, 吉江友照 for PACS Collaboration, 「PACS10 配位を用いたハドロンの質量スペクトル計算」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
17. 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, 吉江友照 for PACS Collaboration 「格子サイズ 256^4 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 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
18. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛 「パイ中間子荷電半径のモデル依存・非依存な解析と比較」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
19. 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 「連続極限を目指した核子形状因子の物理点格子 QCD 計算」,

- 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
20. 菅原寛人, 江尻信司, 北沢正清, 金谷和至, 「 $N_t=8$ 格子 QCD シミュレーションによる重クォーク領域の QCD 臨界点の測定」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 21. 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, 「Multi-grid solvers in general purpose lattice QCD code set Bridge++」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 22. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 「テンソル繰り込み群による (3+1) 次元有限密度 Z₃ ゲージ・Higgs 模型の臨界終点の決定」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 23. 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, 「テンソル繰り込み群による 2 フレーバー Schwinger 模型の数値計算」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 24. 伊敷吾郎, 菅野聡, 「Berezin-Toeplitz 量子化を用いたリーマン構造を保つ行列正則化」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 25. 石橋 延幸, 「The Fokker-Planck formalism for closed bosonic strings」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 26. 安藤雄史, 「Kaku 理論におけるタキオン真空解周りの閉弦振幅」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 27. 浅野侑磨, 西村淳, Worapat Piensuk, 山森直幸, 「Large D 極限におけるローレンツ型 IKKT 行列模型の解析」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).
 28. Yuhma Asano, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Naoyuki Yamamori, 「The phase diagram of the bosonic Lorentzian IKKT matrix model with the mass term」, 日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日–19 日).

29. Yuhma Asano, Chien-Yu Chou, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Ashutosh Tripathi, Naoyuki Yamamori, 「Lefschetz-thimble analysis of the Lorentzian IKKT matrix model around saddle-point configurations」,
日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
30. 藤井僚太, 安藤雄史, 国友浩, 吉中讓次郎, 「light-cone BRST charge から RNS BRST charge への相似変換の導出」,
日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
31. 安藤雄史, 藤井僚太, 國友浩, 吉中讓次郎, 「Witten 型超弦の場の理論から Kugo-Zwiebach 型超弦の場の理論への場の再定義」,
日本物理学会第 78 回年次大会 (東北大学, 仙台市, 宮城, 2023 年 9 月 16 日-19 日).
32. 大野浩史, 高橋純一, 富谷昭夫, 「スパースモデリングによる格子 QCD 相関関数からのスペクトル関数の推定」,
学術変革領域 (A) 「学習物理学の創成」 R5 年度領域会議 (東京大学小柴ホール, 東京, 2023 年 9 月 27 日).
33. 安藤雄史, 「Closed string amplitudes around tachyon vacuum solution in Kaku's bosonic string field theory」 (招待講演),
東京大学駒場素粒子論研究室セミナー (東京大学, 2023 年 10 月 5 日).
34. 山崎剛 「「富岳」、これからの利用と若手プロジェクト・リーダーによる先進アプリ課題への期待」 (招待講演, パネルディスカッション),
第 6 回 HPCI コンソーシアムシンポジウム (THE GRAND HALL, 品川, 2023 年 10 月 25-26 日).
35. 浮田尚哉 for PACS Collaboration 「Master field 格子 QCD を用いた標準理論を超える物理の探索」 (ポスター発表),
第 10 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, 2023 年 10 月 25 日-26 日).
36. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 吉村友佑, 「テンソルネットワーク法による Hubbard モデルの Mott 転移の研究」 (ポスター発表),
第 10 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, 2023 年 10 月 25 日-26 日).
37. 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および物性物理学の研究」 (ポスター発表),
第 10 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, 2023 年 10 月 25 日-26 日).

38. 秋山進一郎, 「Tensor network approach toward (3+1)-dimensional lattice field theories」,
Tensor Network 2023 (筑波大学 CCS, 2023 年 11 月 14 日–16 日).
39. 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」 (ポスター発表),
第 3 回「富岳」成果創出加速プログラムシンポジウム「富岳百景」 (Online, 2023 年 12 月 3 日).
40. 安藤雄史, 「Closed string amplitudes around tachyon vacuum solution in Kaku's bosonic string field theory」 (招待講演),
奈良女子大学駒場素粒子論研究室セミナー (奈良女子大学, 奈良, 2023 年 12 月 15 日)
41. 山崎剛 「『富岳』成果創出加速プログラム:プロジェクト紹介」 (招待講演),
「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2023 年 12 月 18 日–20 日).
42. 山崎剛 「大規模格子 QCD 計算による標準模型を超えた物理探索」,
「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム (筑波大学東京キャンパス, 東京, 2023 年 12 月 18 日–20 日).
43. 菅野聡, 「Seiberg-Witten 写像によるゲージ場の行列正則化とその応用」,
静岡大学セミナー (静岡大学, 静岡, 2024 年 1 月 23 日).
44. 菅野聡, 「行列正則化の一般化とその応用」,
富山大学セミナー (富山大学, 富山, 2024 年 1 月 29 日).
45. 菅野聡, 「リーマン構造の行列正則化」,
数理新人セミナー (名古屋大学, 名古屋, 2024 年 2 月 16 日).
46. 安藤雄史, 「Why do string field theorists passionately study homotopy algebra?」 (招待講演),
原子核と他分野研究の交差点 (大阪大学, 2024 年 3 月 8 日).
47. 菅野聡, 「行列模型からブレーンの形状の探索」,
原子核と他分野研究の交差点 (大阪大学, 大阪, 2024 年 3 月 8 日).
48. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, 「パイ中間子と K 中間子のモデルに依存しない荷電半径の計算」,
日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日–21 日).
49. 菅原寛人, 江尻信司, 北沢正清, 金谷和至, 「有限温度格子 QCD における重クォーク領域の臨界質量」,
日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日–21 日).

50. 江尻信司, 北沢正清, 金谷和至, 和田辰也, 「有限温度・密度格子 QCD の重クォーク領域の臨界点付近における Lee-Yang ゼロ解析」, 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
51. 高橋純一, 大野浩史, 富谷昭夫, 「有限温度における中間子相関関数の共分散を考慮したスパースモデリングによるスペクトル関数の計算」, 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
52. 藏増嘉伸, 「テンソルネットワーク法の量子場理論への応用」(招待講演), 日本物理学会 2024 年春季大会シンポジウム (Online, 2023 年 3 月 18 日-21 日).
53. Ho Pai Kwok, 秋山進一郎, 藤堂眞治, 「Grassmann Bond-weighted Tensor Renormalization Group Approach to Two-dimensional Two-color Staggered QCD」, 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
54. 秋山進一郎, 「行列積分を用いた多フレーバー格子フェルミオンの Grassmann テンソルネットワーク表現」, 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
55. 浅野侑磨, 西村淳, Worapat Piensuk, 山森直幸, 「1/D 展開法による N=2 ローレンツ型 IKKT 行列模型の解析的研究」 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
56. Yuhma Asano, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Naoyuki Yamamori, 「Non-perturbative study of superstring theory using bosonic IKKT matrix model with the mass term」 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).
57. Yuhma Asano, Chien-Yu Chou, Jun Nishimura, Worapat Piensuk, Ashutosh Tripathi, Naoyuki Yamamori, 「Lefschetz-thimble analysis of the Lorentzian IKKT matrix model around its classical solutions」 日本物理学会 2024 年春季大会 (Online, 2024 年 3 月 18 日-21 日).

〈受賞〉

1. 山崎剛, 藏増嘉伸, 浮田尚哉, 新谷栄悟, 他 4 名, 第 10 回成果報告会における HPCI 利用研究課題優秀成果賞, 「格子 QCD を用いた素粒子原子核物理の精密計算」, 2023 年 10 月
2. 山崎剛、筑波大学 2023 年度 BEST FACULTY MEMBER
3. 安藤雄史, 原子核三者若手夏の学校 2023, 優秀発表賞, 2023 年 8 月

4. 安藤雄史, 数理工物質科学研究学群長賞 (2023 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
ハイブリッド開催, 2023 年 5 月 9 日, 6 月 29 日, 11 月 21 日, 12 月 4 日, 2024 年
1 月 15 日, 1 月 22 日 (全 6 回)
参加登録者数: 530 人
世話人: 大野浩史 (筑波大), 柏浩司 (福岡工業大), 富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学), 二村保徳 (筑波大), 住本尚之 (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. 山崎剛, 「Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning」世話人
筑波大学計算科学研究センター (ハイブリッド), 2023 年 11 月 23 日-25 日
参加登録者数: 35 人, 参加国数: 5
主催: 「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」
世話人: 藏増嘉伸 (筑波大), 大野浩史 (筑波大), 富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学), 山崎剛 (筑波大)
ウェブページ: <https://www-het.ph.tsukuba.ac.jp/yamazaki/LQCD-ML2023/>
3. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 「Tensor Network 2023」世話人
筑波大学計算科学研究センター (ハイブリッド), 2023 年 11 月 14 日-16 日
参加登録者数: 124 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/tn23.html>
4. 山崎剛, 「成果創出加速プログラム基礎科学 4 課題合同シンポジウム」世話人
筑波大学東京キャンパス (ハイブリッド), 2023 年 12 月 18 日-20 日
参加登録者数: 75 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 4 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)
ウェブページ: <https://kds.kek.jp/event/48556/overview>
5. 大野浩史, 「計算物理春の学校 2024」世話人
沖縄県市町村自治会館, 那覇 (ハイブリッド), 2024 年 3 月 11 日-15 日
参加者数 (内対面参加): 251 人 (148 人)
世話人: 松永響 (東京大学), 関祐二 (慶應大学), 石田哲郎 (神戸大学), 石田洋音

(埼玉大学), 柏村周平 (東京大学), 玉城良仁 (琉球大学), 服部和希 (慶応大学), 服部竜大 (東京工業大学), 吉村健太 (東京工業大学), 大久保毅 (東京大学), 大野浩史 (筑波大学), 品岡寛 (埼玉大学), 下川統久朗 (OIST), 富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学), 永井佑紀 (JAEA), 水上渉 (大阪大学)

ウェブページ: <https://compphysspringschool2024.github.io/homepage2024/>

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. 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS)
<https://www.r-ccs.riken.jp/jp/>
3. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
4. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
5. 藏増嘉伸、ILDG board member
6. 石橋延幸、PTEP 執行編集委員
7. 石橋延幸、PTEP 編集委員
8. 石橋延幸、日本物理学会素粒子論領域代表
9. 山崎剛、計算科学ロードマップ執筆者
10. 大野浩史、日本物理学会素粒子論領域運営委員