

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、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照

助教 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、吉村 友佑

大学院生 (12名)

【人事異動】

吉村友佑博士が金沢大学数物科学系研究員として転出した(2021年9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と密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。昨年度に引き続き、本年度も筑波大学を中心としたPACS Collaborationに基づく共同研究体制のもと、「富岳」の一般利用やOakforest-PACS(OFP)の学際共同利用を用いた大型プロジェクト研究を推進した。OFPは2016年秋からJCAHPC(最先端共同HPC基盤施設:筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織)において運用され、HPC(High Performance Computing)向けとしては「富岳」に次ぐ性能を有していたが、2021年度末で稼働を停止した。今後は、OFPの後継機が設置されるまでの間、「富岳」とともに、JCAHPCにおいて新たに運用を開始したWisteria(「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する)を用いてプロジェクトを継続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の構築・整備を推進した。

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。一般化された行列正則化の構成、行列模型における重力理論と宇宙論的重力解、BFSS/BMN行列模型の数値計算、flag stateを用いた弦の場の理論の摂動的真空解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、2021年度も新型コロナウイルスCOVID-19の世界的な感染拡大が継続し、大半の国際会議や国内学会・研究会がオンライン開催となった。また、日々の研究

活動においてもオンラインでの議論・会議が強く推奨されるなど、研究遂行に大きな制約が生じた。

【1】 格子場の理論

(藏増 嘉伸、石塚 成人、谷口 裕介、山崎 剛、吉江 友照、浮田 尚哉、新谷 栄悟)

(1) PACS Collaboration による「富岳」および OFP を用いた大規模シミュレーション

昨年度に引き続き、本年度も PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、「富岳」の一般利用や OFP の学際共同利用を用いて物理点における 2+1 フレーバー QCD の大規模シミュレーションを推進した。「富岳」向けのプログラム最適化は、昨年度の早期利用課題制度を利用して既に完了している。

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」や OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で $(10\text{fm})^3$ 超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記 2つの課題を克服した計算を実現する。

ゲージ配位は異なる格子間隔 3 点 ($a=0.085\text{fm}, 0.063\text{fm}, 0.043\text{fm}$) 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。既に (格子間隔, 格子サイズ) = $(0.085\text{fm}, 128^4)$ 、 $(0.063\text{fm}, 160^4)$ のゲージ配位生成は完了しており、現在は (格子間隔, 格子サイズ) = $(0.043\text{fm}, 256^4)$ での物理点シミュレーションに注力している。また、並行してこれまで生成した格子サイズ 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 において現実的クォーク質量での 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 の水色帯)。

2020 年度までの格子間隔 0.085fm の計算から得られた $|V_{us}|$ (中抜き赤丸) は、これまでの多くの計算結果 (K_{l3} $N_f = 2 + 1 + 1$, $N_f = 2 + 1$) と異なり、K 中間子レプトニック崩壊から決定される $|V_{us}|$ (青丸、緑星) と一致する結果であった。しかし、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、2021 年度は格子間隔 0.063fm の計算を重点的に行い、2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)。有限格子間隔に起因する系統誤差の一部は取り除くことができたが、2つの格子間隔のみの結果からでは、格子間隔依存性を精密に決定することが難しく、結果にはまだ大きな不定性が残っている。今後、さらに小さな格子間隔のゲージ配位を用いた計算によりこの不定性を小さくし、標準理論を超える物理の検証を行っていく。

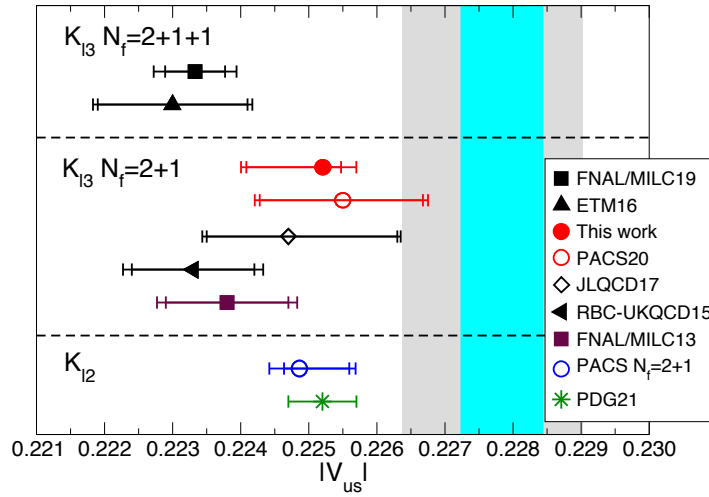


図 1: $|V_{us}|$ の比較。赤印が我々の結果。水色帯と灰色帯は CKM 行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測で、色の違いは用いた $|V_{ud}|$ の違い。

(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、核子構造に関係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 年度は格子間隔 $a = 0.063\text{fm}$ での形状因子計算を進めるとともに、核子スカラー電荷と核子テンソル電荷（論文 [2]）に加え核子構造関数に関する物理量計算（論文 [3]）を実行した。

また、これまでとは異なる観点から計算を実行するため、新しい荷電半径計算方法の開発研究を行い、荷電半径などの形状因子の運動量移行微分で定義される物理量を、形状因子のフィットを介さずに、直接計算する方法の試験計算を行った（論文 [4]）。

(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 年に形状因子の微分を直接計算する方法が提案された。この方法を詳しく調べた結果、無視できない有限体積効果が含まれる場合があることを確認し、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た。さらに、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機能することを確認した。

(5) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

蔵増、山崎は宇川名誉教授との共同研究により、2010 年世界で初めて格子 QCD によるヘリウム原子核の構成に成功し、そののち 2 核子系の束縛状態である重陽子の構成にも成功した。これらの計算は、計算コストを抑えるためにクエンチ近似かつ重いクォーク質量を用いた試験的なものであった。その後、広島大学 石川健一准教授を共同研究者に加え、真空偏極効果を取り入れた 2+1 フレーバー QCD シミュレーションを行い、試験的計算より現実世界に近い状況でのヘリウム原子核および 2 核子系の束縛エネルギー計算に成功した。この計算は π 中間子質量 0.5GeV と 0.3GeV のクォーク質量を用いたものであり、物理点 (π 中間子質量 0.14GeV に相当) よりも重い質量を用いていた。この成果を踏まえ、京コンピュータで生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた現実に近い π 中間子質量 0.146GeV での軽原子核束縛エネルギー計算を進めている。この計算は統計誤差を抑えることが非常に難しく、ヘリウム原子核については有意な結果は得られていないが、重陽子については現状で実験値から予測された値を再現する結果が見え始めている。

一方、現実よりも重い π 中間子を用いた他グルーブの計算からは束縛状態を観測できないという問題が報告されている。この計算には 2 体核子散乱を考慮した計算になってはいるが、束縛エネルギー計算で問題となるのは核子励起状

態散乱の寄与と考えられる。今後、この状態を考慮した計算方法を開発し、束縛エネルギーに含まれる、それら状態の系統誤差を見積もる予定である。

(6) 改良 Wilson 型クォークを用いた格子 QCD シミュレーションによる
有限温度・有限密度 QCD の研究

ビッグバン直後に実現したと考えられるクォーク・グルオン・プラズマ状態から通常のハドロン物質への相転移前後のクォーク物質の様々な熱力学的性質は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明において重要である。本質的に非摂動的な問題であり、格子 QCD による QCD 第一原理からの大規模シミュレーションが不可欠である。谷口、金谷らは、改良 Wilson 型格子クォークを用いた有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究を行っており、QCD の相構造やクォーク物質の熱力学特性を引き出すために、2021 年度も、有限温度・有限密度格子 QCD の研究と、そのための技術開発を進めた。

Gradient flow に基づく SFtX 法を用いた有限温度 QCD の研究

有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究の多くは、計算量が少ないスタガード型格子クォークを用いて行われているが、連続極限で QCD を再現することが証明されていないという本質的問題を孕んでいる。我々は、理論的基礎が確立している Wilson 型格子クォークを用いて QCD 相転移近傍の温度でクォーク物質がどのような熱力学特性を示すかの大規模シミュレーション研究を推進している。Wilson 型クォークは、連続極限の正しさが保証されている反面、有限の格子上ではカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に関して格子化誤差が大きく、それを取り除いて物理量を計算するために膨大な計算資源が要求されるという困難があった。また、並進対称性に伴う保存カレントとして定義されるエネルギー運動量テンソルは系の力学特性を調べる上で基本的な観測量だが（例えば、対角成分はエネルギー密度や圧力などの情報を含み、2 点相関関数から様々な粘性率が導かれる）、格子上では連続な並進対称性が陽に壊されているため、従来の方法では、5 種類の演算子の非自明な繰り込みと混合を非摂動的に決定するという、複雑な繰り込み操作を行わなければ意味のある評価が出来なかった。

谷口、金谷らは、九州大学 鈴木博教授、大阪大学 北澤正清助教、新潟大学 江尻信司准教授、広島大学 梅田貴士准教授らと、Gradient flow (勾配流) に基づいて鈴木博らにより開発された **SFtX 法** (small flow-time expansion method) を応用して、これらの課題を克服した大きなブレークスルーを目指している。Gradient flow とは、仮想的な時間パラメータ t (flow-time) を導入して、作用の勾配で与えられる発展方程式 (フロー方程式) により場の量を変形させる理論的手法である。この発展方程式は一種の拡散方程式になっており、 $t > 0$ までフローさせた結果は、元場の量を $\sqrt{8t}$ の物理的領域で平準化 (smear) させたものと解釈することができる。さらに、フローさせた場で作る演算子が紫外発散も同一点特異性も持たないという目覚ましい特性を持っていることが、Lüscher と Weisz により証明された。

SFtX 法は、Gradient flow のこの有限性を活用して、連続極限の繰り込まれた

物理量に対応する量を格子上で評価する一般的な計算方法である。連続理論で何らかの物理量を非摂動論的に評価しようとする、通常は、その物理量を格子理論で定義し、格子上で評価された値を連続極限まで外挿 ($a \rightarrow 0$) するが、数値的な繰り込みに加えて、格子上で重要な対称性が壊されている場合にはそれによる不要な演算子との混合を数値的に除去する必要がある、十分な精度を出すためにはしばしば重い計算となる。SFtX 法では、フローさせた演算子が有限であることを利用して、対応する演算子を格子上で計算することにより、繰り込み操作や混合の除去無しに直接評価する。ただし、フローさせた演算子は求める物理量そのものではないので、格子の結果を、連続極限 ($a \rightarrow 0$) とフロー時間ゼロ極限 ($t \rightarrow 0$) に 2 重外挿する。

SFtX はどんな物理量にも使うことができるので、格子化で並進対称性が陽に壊されるためにこれまで扱いが難しかったエネルギー運動量テンソルの格子計算に、最初に応用された。我々は、SFtX 法が並進対称性の破れだけでなく、Wilson 型クォークによるカイラルの破れの困難にも有効であることに着目し、 $2+1$ フレーバーの動的なクォークを含む現実的 QCD に SFtX 法を応用した一連の研究を推進している。

我々は、動的クォークを含む QCD への応用の第一段階として、2016-2017 年度に u,d クォークが現実よりやや重い場合の $N_f = 2+1$ QCD の研究を実行した。エネルギー運動量テンソルの対角成分から計算した状態方程式が、従来の方法による結果を良く再現することを示し、さらに、カイラル感受率の disconnected 部分がクロスオーバー温度でピークを示すことを Wilson 型クォークとして初めて示した。また、位相感受率を、グルオンを用いた定義式と、それを、連続理論のカイラル関係式を用いてクォークを用いて表し直した評価式の両方で計算し、有限の格子間隔でも両者が極めてよく一致することを示した。通常の計算方法でスタガード型クォークを用いた研究では、ここでシミュレーションした程度の格子間隔では両者は 2 桁も違っており、SFtX 法が物理的に信頼できる結果を得る上で極めて有用であることをあらわしている。

この、クォークが現実よりやや重い場合の QCD の研究を発展させ、現実のクォーク質量 (物理点) での $N_f = 2+1$ QCD の熱力学研究や、u,d クォークが重い場合に格子間隔を変えたシミュレーションなどを進めている。その過程で、格子が粗い場合などには SFtX 法をさらに改良する必要があることが判明したので、マッチング係数の繰り込みスケール依存性などを研究し、繰り込みスケールを適切に選ぶことで SFtX 法を大きく改善できることを示した。

SFtX 法を用いた物理点 (2+1)-flavor QCD の熱力学研究

上記の改良を取り入れた物理点 $N_f = 2+1$ QCD の有限温度シミュレーションを、格子間隔 $a = 0.08995(40)$ fm の場合に集中して推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間の大きな削減ができたが、物理点や格子間隔が細かい格子の配位生成には膨大な計算が要求され、様々な計算機資源を動員して大規模シミュレーションを系統的に遂行している。

約 120-300 MeV の温度範囲でエネルギー運動量テンソルやカイラル感受率の測定を進め、昨年度までの測定から、相転移温度が 150 MeV 以下であること

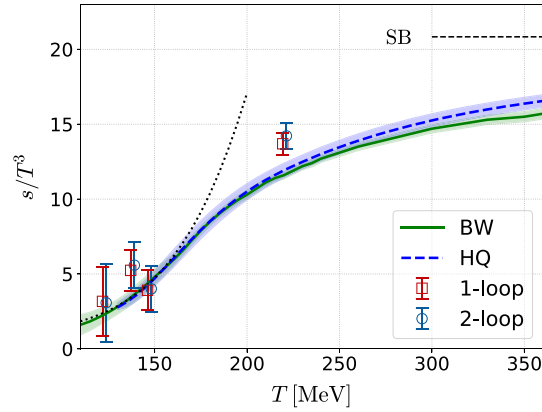


図 2: SFtX 法を用いた物理点 $N_f = 2 + 1$ QCD の有限温度シミュレーション。低温領域 ($T = 122, 137$ MeV) の統計を改善したエントロピー密度。Budapest-Wuppertal Collaboration と HotQCD Collaboration による、先行結果（通常の方法を採用し、スタガード型クォークを用いている）との比較（学会発表 [27] で示した中間結果）。この後に統計はさらに改善されている。

を示唆する中間結果を得た。ただし、相転移温度近傍や低温領域での統計量は十分なものでは無かったので、2021 年度には、相転移温度の下限を確定するために、相転移温度近傍や低温領域の統計を大きく増強するシミュレーションを、HPCI や CCS 学際共同利用などの計算機資源を投入して推進した。その解析を現在進めている（図 2、学会発表 [27]）。

我々の Wilson 型クォークによる相転移温度は、スタガード型クォークによる先行結果より低い可能性があるが、相転移温度の精密な評価は実験的・現象論的にも重要である。

(7) クエンチ QCD の潜熱と SFtX 法における 2 重外挿の順序依存性の研究

クォークが重い極限に相当する SU(3) ゲージ理論の潜熱を研究し、SFtX 法の様々な手法による結果が連続極限で一致することを示すことにより数値的方法論としての正しさと実用性を確認した（論文 [6]）。

昨年度に発表した論文 M. Shirogane, et al., “Latent heat and pressure gap at the first order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method,” Prog. Theor. Exp. Phys. 2021, 013B08 (2021), DOI:10.1093/ptep/ptaa184 では、SFtX 法を応用して、クエンチ QCD (SU(3) Yang-Mills 理論) の有限温度 1 次相転移点における潜熱と圧力ギャップ Δp を研究した。SFtX 法の様々な手法による結果が連続極限で一致することが確認され、SFtX 法の正しさと実用性が示された。2020 年度はコロナ禍により格子場の理論国際会議が中止されたが、代替となる成果発表（国際会議 [5]）およびそのプロシーディングス（論文 [6]）が公表されている。

1 次相転移点では、共存する 2 相の動的平衡から $\Delta p = 0$ となるはずで、その数値的確認は結果の信頼性の良い指標とされてきた。また、クエンチ QCD で

は様々な格子間隔を系統的に計算できるので、上で議論した、 $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の2重外挿における極限操作の順番の問題を試験した。SFtX法における $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の2重外挿では、格子化誤差が大きい $t/a^2 \sim 0$ 領域のデータを取り除いて外挿する必要がある。そして、この $t/a^2 \sim 0$ 領域の格子化誤差が正しく取り除かれているならば、2つの外挿の順序によらず同じ結果が得られると期待される。

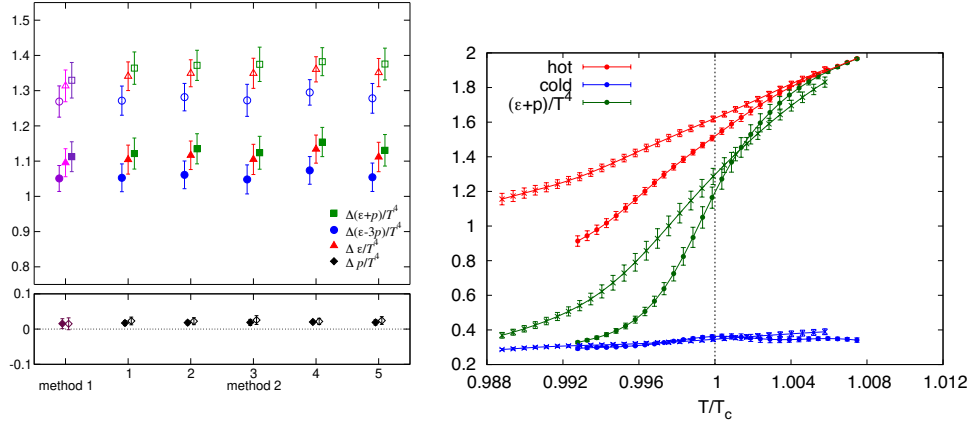


図 3: クエンチ近似 QCD の潜熱と圧力ギャップに関して $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の2重外挿を行った最終結果。左図: $t \rightarrow 0$ を先に実行する”method 1”と $a \rightarrow 0$ を先に実行する ”method 2” の結果の比較 (method 2 では、さらに $t \rightarrow 0$ 外挿のフィット・レンジをいくつか比較)。filled symbols はアスペクト比 $N_s/N_t = 8$ 、open symbols は $N_s/N_t = 6$ に相当する空間体積での結果。右図: $N_t = 8$ 格子におけるエントロピー密度のヒステリシス。空間体積が小さい $N_s/N_t = 6$ 格子 (細いシンボル) と空間体積が大きい $N_s/N_t = 8$ 格子 (太いシンボル) の比較 (論文 [6])。

論文 [6] では、3つの格子間隔 ($N_t = 8, 12, 16$ に対応する $a = 1/(N_t T_c)$)、2つの空間体積 ($N_s/N_t = 6, 8$ に対応する $V = (N_s a)^3 = (N_s/N_t)^3/T_c^3$) でクエンチ QCD シミュレーションを実行し、我々が開発した再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせた手法を使って臨界点 $T = T_c$ に調整した。そして、臨界点直上で、SFtX法を使って臨界点における潜熱と Δp を測定した。

図 3 の左図に、 μ_0 スケールを使った潜熱と圧力ギャップ Δp の結果を示す。この図から、(a) $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の極限操作の順番を変えても結果が一致すること、および、(b) Δp がゼロとコンシステントであることが確認される。これにより、連続極限における潜熱を精密で信頼性が高く測定することに成功した。同時に、潜熱の結果に空間体積依存性が確認されるので、より大きな空間体積での追試が望まれる。図 3 の右図に示したように、高温相で有限体積効果が大きく出ていることがわかった。

(8) クォークが重い QCD の臨界クォーク質量

クォークが重い極限の QCD は、有限温度相転移が1次なので、クォーク質量を無限大から下げていくと、有限温度相転移は連続的なクロスオーバーに変化

する。両者の境界である臨界点の研究は、クォーク質量が軽い領域における臨界点研究の雛形として興味を持たれている。

臨界点における臨界スケーリングの研究

我々は、クォークが重い場合の2+1フレーバー QCD の臨界点を、再重み付け法と SFtX 法で研究して、臨界スケーリングが従来採用されているより大きな空間体積で実現することを示した。

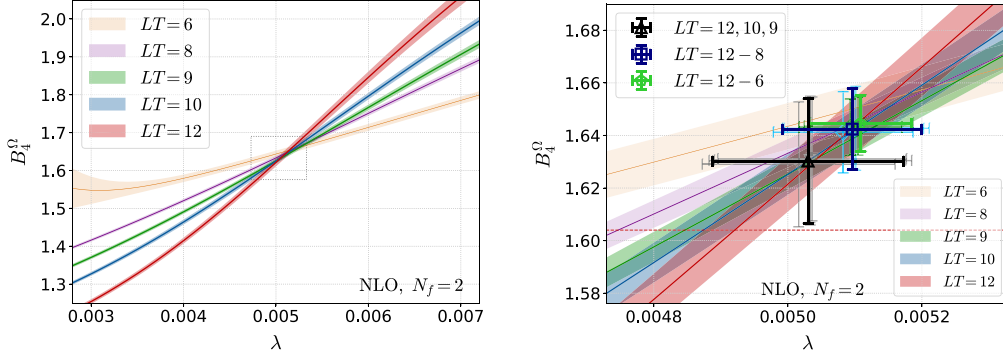


図 4: クォークが重い場合の2+1フレーバー QCD における、臨界点近傍の Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $\lambda = 64N_c N_f \kappa^4$ はクォーク質量をコントロールするホッピング・パラメータ κ の関数で、クォークが軽くなると大きくなる。 $LT = N_s/N_t$ は格子のアスペクト比で、温度がほぼ一定の場合は、格子の空間サイズ L に比例する。右図は、左図の交点周辺を拡大したもの（論文 [8]）。

図 4 に、ポリアコフ・ループに関する Binder cumulant の結果を示す。横軸はクォーク質量をコントロールするパラメータで、 $LT = N_s/N_t$ は系の空間体積に対応するパラメータである。期待する臨界スケーリングが実現していれば、Binder cumulant は臨界点で系の空間体積によらず一定値になるはずである。図 4 より、 $LT = N_s/N_t$ が十分大きければ、臨界スケーリングが高い精度で実現することがわかる。また、臨界スケーリングを用いることにより、熱力学極限における臨界点の値を高精度で測定することも可能になった（論文 [8]）。

ホッピング・パラメータ展開の収束性の研究

前記の研究では、クォークが重い場合の効率の良いシミュレーション方法として、ホッピング・パラメータ展開を用いた。QCD の臨界点の決定に関するホッピング・パラメータ展開の有効性を確認するために、論文 [7] では、臨界点の近傍におけるホッピング・パラメータ展開の高次項の効果と収束性を研究した。さらにホッピング・パラメータ展開の十分な高次までをとりいれたシミュレーションを実現する手法を開発した。

まず、ホッピング・パラメータ展開の収束性が最も悪い、リンク変数（ゲージ場）がすべて単位行列の場合に展開項を 100 次項まで準解析的に計算し、ホッピング・パラメータ κ に関する収束半径を、ダランベールとコーシー・アダマールの 2 種類の収束判定方法で評価した。その結果、図 5 の左図に示したように、展開次数 n を大きくした極限で、クォーク質量がゼロの場合に相当す

る $\kappa = 1/8$ に収束することを示した。同時に、ホッピング・パラメータ展開を有限次で止めた場合の誤差評価を行い、低次のホッピング・パラメータ展開を用いた上記の臨界点の評価は、 $N_t = 4$ の格子までは十分信頼できることを確認した。また、 $N_t = 6$ 以上の格子では、ホッピング・パラメータ展開のより高次の項まで取り入れる必要があることを示した。

この結果を受けて、ホッピング・パラメータ展開の高次項の効果を取り入れる方法を研究した。 $32^3 \times 6$ および $32^3 \times 8$ 格子でシミュレーションを実行し、 $n = 20$ までの展開項を評価した。図5の中央図と右図に、 $32^3 \times 8$ 格子の臨界点近傍のシミュレーションで実測された、12次と20次のポリアコフ・ループ項と最低次のポリアコフ・ループ項 ($\text{Re}\Omega$) の分布を示す。すべての場合に、ポリアコフ・ループ項は、十分な高次まで、最低次項と強い線形の相関があることが確認される。最低次項のみを取り入れたモンテカルロ・シミュレーションは高い効率で実行できるので、ここで実測した比例係数を使って最低次項の係数を調整することにより、ホッピング・パラメータ展開の20次までの効果を有効的に取り入れたモンテカルロ・シミュレーションが、フルQCDシミュレーションよりも遥かに低コストで実行可能である (図5、論文 [7])。

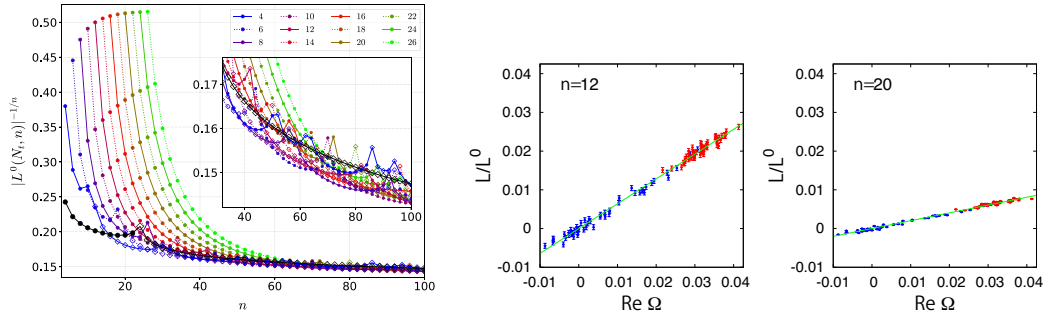


図 5: クォークが重い QCD におけるホッピング・パラメータ展開の収束性と改良手法の研究。左図: 収束性が最も悪い、リンク変数がすべて単位行列の場合に、コーシー・アダマールの収束半径を展開次数 n の関数として示したもの。黒はホッピング・パラメータ展開におけるウィルソン・ループ項で、色付きのシンボルはポリアコフ・ループ項を、様々な N_t について表したもの。図中の図は、 $n = 32-100$ の領域の拡大図。中央図・右図: $32^3 \times 8$ 格子で実測された、12 次と 20 次のポリアコフ・ループ項と最低次のポリアコフ・ループ項 ($\text{Re}\Omega$) の分布。縦軸は、リンク変数がすべて単位行列の場合の値で規格化している。青は $\beta = 6.0320$ 、赤は $\beta = 6.0660$ で、いずれも臨界点近傍 (論文 [7])。

(9) 2+1 および 4 フレーバー QCD の臨界終点の探索

QCD の有限温度相転移の次数は、クォークのフレーバー数及び質量に依存して変化すると考えられている。例えば 3 フレーバーの場合、クォーク質量が 0 の極限では 1 次相転移になると予想され、質量を大きくしていくと 2 次相転移となる点を経てクロスオーバーになると予想されている。この 1 次相転移が終わり 2 次相転移となる点を臨界終点と呼び、その位置を特定することは、QCD

の相構造を理解する上で非常に重要である。しかしながら、格子 QCD 計算に基づく先行研究により、臨界終点の位置はフェルミオン作用の種類や連続極限の取り方に強く依存するという結果が得られており、最終的な結論は未だ得られてない。このことは、臨界終点の位置が格子化誤差の影響を強く受けることを示唆しており、フェルミオン作用依存性のより詳細な理解と、より正確な連続極限への計算が求められている。

大野と藏増は、理化学研究所の中村宜文氏と金沢大学の武田真滋准教授らと共に、格子 QCD に基づく数値計算により、2+1 および 4 フレーバー QCD における臨界終点（線）の探索を行った。本年度の研究成果としては、まず、 $O(a)$ 改良された Wilson 型フェルミオン作用を用いた 2+1 フレーバー QCD の計算について、これまでよりも格子間隔の小さい、時間方向格子サイズ $N_t = 8$ での計算を進めた。その結果、1 次相転移を示すいくつかのパラメータを特定することができた。次に、4 フレーバー QCD の計算では、 $O(a)$ 改良された Wilson 型フェルミオン作用を用いた $N_t = 10$ の計算を推進し、臨界終点の位置を特定することができた（図 6）。これらの結果は、国際会議「Lattice 2021」等で発表した。さらに、4 フレーバー QCD の計算では、フェルミオン作用依存性を調査するため、スタaggered 作用を用いた計算も開始し、 $N_t = 4$ および 6 についての結果を得ることができた。また、本研究室博士前期課程所属の羅梟氏は、この計算結果を修士論文にまとめ、学位を取得した。

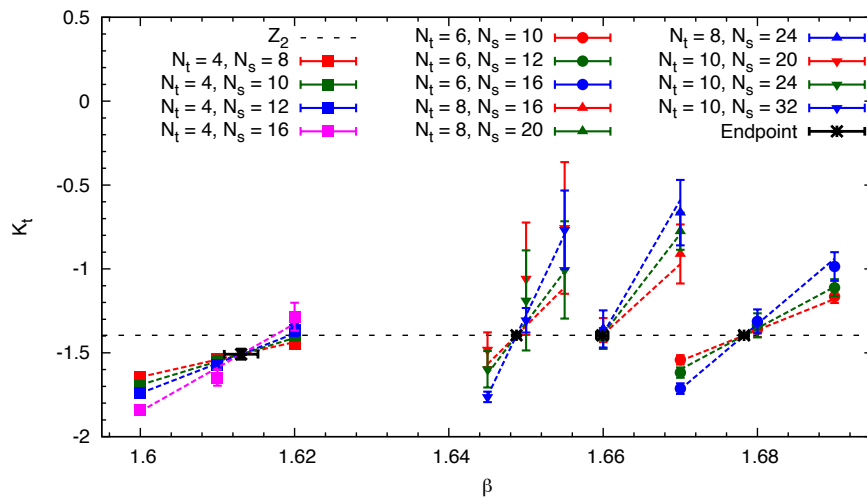


図 6: Wilson 型フェルミオンを用いた 4 フレーバー QCD における臨界終点。

(10) クォーコニウムスペクトル関数の研究

クォーコニウムは、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。

大野は、中国華中師範大の Heng-Tong Ding 教授、独国 Bielefeld 大の Olaf Kaczmarek 博士らとともに、クエンチ近似を用いた大規模な格子 QCD シミュレーションにより、連続極限におけるクォークonium相関関数を計算し、これを摂動論的モデルにフィットすることでクォークoniumスペクトル関数を計算した(論文[10])。本研究では、以前の研究で行った擬スカラーチャネルに対する計算を拡張子、輸送ピークを持つベクターチャネルのスペクトル関数を計算した。その結果、チャーモニウムのスペクトル関数については相転移温度以上で束縛状態に対応するピークが無くても格子 QCD のデータを説明できるのに対し、ボトモニウムについては少なくとも調べた温度の範囲では束縛状態のピークが必要であることが分かった。また、輸送ピークについての解析から重クォーク拡散係数も推定し、先行研究との比較を行った(図7)。

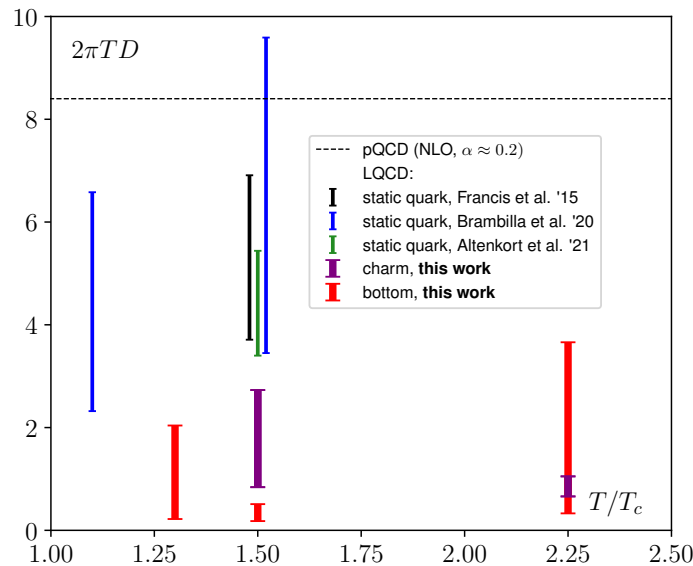


図 7: 重クォーク拡散係数の推定値。

(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。なお、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における萌芽的課題「基礎科学のフロンティア－極限への挑戦」の一つとして、本グループが分担機関として参画し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用に取り組んできた。萌芽的課題は 2019 年度末で終了したが、2020 年度以降は科学研究費基盤 (A) を新たな資金として研究の発展を図っている。

2014 年、蔵増と理研計算科学研究機構（現理研計算科学研究センター）の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し（グラスマンテンソル繰り込み群）、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 θ 項が有る場合と無い場合の 1 フレーバーの 2 次元格子 Schwinger モデル（2 次元格子 QED）における相構造を調べた（論文発表済）。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である 4 次元 QCD への応用に向け、(i) 非可換ゲージ理論への拡張、(ii) 高次元モデルへの応用、(iii) 物理量計算のための手法開発、(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 つの課題に取り組む。

2021 年度は、上記課題 (i)～(v) のうち、特に課題 (v) に関して以下に述べるような大きな進展があった。その前に、まず、2020 年度の重要な成果として、われわれは TRG 法を用いて 4 次元有限密度南部 Jona-Lasinio (NJL) モデルの極低温高密度領域における一次相転移の実証に成功した（論文発表済）。このモデルは符号問題を内包しているため、従来のモンテカルロ法では解析が困難であったが、TRG 法により世界で初めて一次相転移の存在を明らかにした。この研究は有限密度 QCD の相転移解析へ向けての重要なマイルストーンであるが、もう一つの重要な意義も存在する。実は、素粒子物理学における NJL モデルは物性物理学における Hubbard モデルとほぼ同じ形の経路積分表式で表されるため、NJL モデルにおける TRG 法の成功により、TRG 法による Hubbard モデルの相構造解析への道が開かれた。Hubbard モデルは強相関電子系の単純化されたモデルであり、金属-絶縁体転移や高温超伝導などの理論的本質を含んでいると考えられているが、符号問題のために数値的解析が困難なことが知られている。2021 年度は、まず、(1+1) 次元 Hubbard モデルにおける金属-絶縁体転移の計

算を行い、Bethe 仮設に基づいて理論的に予想されている臨界化学ポテンシャルの値を再現することに成功した(論文[12])。その後、(2+1)次元 Hubbard モデルの金属-絶縁体転移の計算を行い、(2+1)次元でも(1+1)次元の場合と同様に、有限のクーロンポテンシャル $U(>0)$ において、金属-絶縁体転移が起きることを示した(論文[13])。図8(左)は、 $D_{\text{cut}} = 80$ で $U = 8$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものである。 $\mu = U/2 = 4$ が half-filling 状態であるが、 $2 \lesssim \mu \lesssim 6$ の領域において $\langle n \rangle = 1$ の plateau が形成されていることから、絶縁体状態であることがわかる。また、 $\mu \lesssim -4$ 、 $\mu \gtrsim 12$ も絶縁体状態であることが見てとれる。格子サイズは $(N_\sigma, N_\tau) = (2^{12}, 2^{24})$, $(2^8, 2^{20})$ の2種類であるが、格子間隔 $(a, \epsilon) = (1, 10^{-4})$ を用いて物理的スケールに変換すれば $(L, \beta = 1/T) = (4096, 1677.7216)$, $(256, 104.8576)$ となり大体積で極低温であることがわかる。両者の結果が一致していることから、熱力学極限かつゼロ温度の結果と見做すことができる。図8(右)は、 $6.0 \leq \mu \leq 8.0$ の領域において μ の刻み幅を細かくし、電子密度 $\langle n \rangle$ の $D_{\text{cut}} (= D)$ 依存性を調べたものであるが、ほとんど D_{cut} 依存性がないことがわかる。曲線は μ と $D_{\text{cut}} (= D)$ に関する global fit を表しており、これにより $D_{\text{cut}} = \infty$ における臨界化学ポテンシャル μ_c を決定することができる。他のクーロンポテンシャル $U = 80$, 2でも同様の計算を行い、いずれの場合も $\mu_c > U/2$ で金属-絶縁体転移が起きていることが示された。

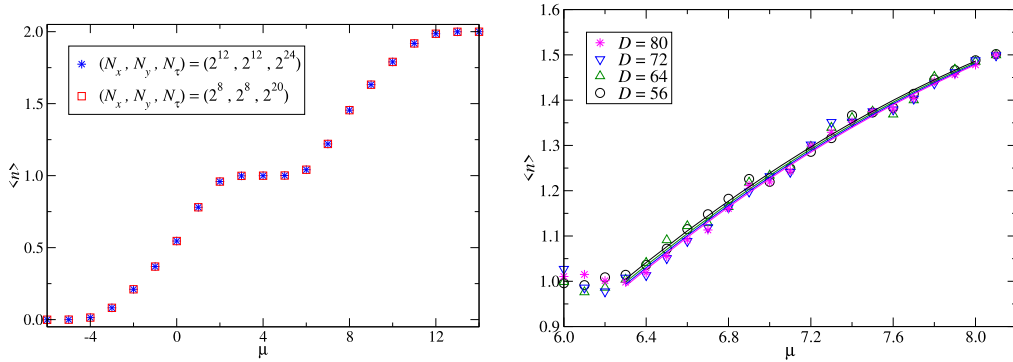


図 8: (左) $U = 8$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたもの。 $D_{\text{cut}} = 80$ で格子サイズは $(N_\sigma = N_{x/y}, N_\tau) = (2^{12}, 2^{24})$ (青) と $(2^8, 2^{20})$ (赤) の2種類。(右) $6.0 \leq \mu \leq 8.0$ の領域において左図よりも μ の解像度を上げて電子密度 $\langle n \rangle$ を計算した結果。曲線は μ と $D_{\text{cut}} (= D)$ に関する global fit の結果を表す(論文[13])。

(12) 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

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。2021 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 フレーバー理論の比較及び、8 フレーバー理論から得られるSパラメータ計算を行った。

(13) 格子 QCD 研究用データグリッド ILDG/JLDG の運用

JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の主要な計算素粒子物理研究8 拠点に分散配置されたファイルサーバを NII SINET6 VPN で結び、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねた分散ファイルシステムであり、複数拠点のスパコンを用いた研究を推進する国内の主要な研究グループが、膨大な研究データの統一的管理・共有の為にストレージシステムとして、利用している。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。

JLDG は、2008 年に実運用を開始して以来14 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に作業に主軸を移している。2021 年度は、日常のメンテナンス・ユーザ対応・システム障害対応等の日常業務以外に、本学計算科学研究センターに設置している JLDG 管理システムのセキュリティ向上作業を実施した。具体的には、

- 管理サーバ専用ネットワーク構築と計算科学研究センター独自の Firewall 導入及びセキュリティイベント監視(外部委託)(本学のネットワークのセキュリティゾーン化の一部として実施)
- アクセス元 IP・オープンポート制限強化(サーバ毎に、必要最小限)
- 管理サーバ間通信用プライベートネットワーク新設
- プロキシ・リバースプロキシの利用
- 脆弱性対応: 学術情報メディアセンター実施の検査への対応と管理グループ独自の検査(サーバ新設、設定の大きな変更時)の実施
- OS・ソフトウェアの更新: CentOS6,8 の EOS 対策
- JLDG グリッド証明書用 CA/RA 再構築と、全ユーザの証明書更新
- 仮想組織管理、システム監視(Zabbix), gfarm MDS 更新

である。一つ一つは、特別なセキュリティ向上策ではないが、管理機器の機能と保守作業に支障が生じないという条件の下で、高いセキュリティレベルを実現できたと考えている。

ILDG (International Lattice Data Grid) は、JLDG を含む同種の 5 つの地域レベルのデータグリッドを、QCD の基礎データに限って世界の研究者が相互に利用する目的で相互運用する為のプロジェクトである。2007 年に運用を開始し、世界の研究者に利用されてきたが、2016 年頃から運用の継続が困難になった。ベースとして利用しているミドルウェアの更新にあわせたシステムソフトウェアの更新に困難が生じたこと、基礎データ公開の為の準備作業のコストが高いこと、利用登録手順が複雑であること、などが理由である。これらの困難を解消し、ILDG プロジェクトを再活性化する為、ILDG の 2 つのワーキンググループ世話人の呼びかけで、国際ミーティングが開催され、ILDG の最高意思決定機関である ILDG board ミーティングの開催準備を行った。ILDG プロジェクトには、物理学域からは、藏増が ILDG board 日本代表として、吉江が Metadata ワーキンググループ世話人として参加している。2022 年 4 月 14 日に開催された board meeting にて、ワーキンググループが提案した方針が承認され、プロジェクトの再活性化への作業が開始された。

【2】超弦理論

(1) 一般化された行列正則化の構成

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るが、この方法は非常に限られた状況においてのみしかこれまで理解されていなかった。特に、弦や D ブレーンの上には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った。伊敷と大学院生の足立、菅野は Dublin 高等研究所（アイルランド）の松本高興研究員とともにこの問題について研究を行い、行列正則化の一般化を得ることに成功した。一般化された行列正則化ではスカラー場のみならず、様々なテンソル場や、さらにそれらに作用するラプラシアンも行列を用いて記述できるようになった(論文 [16], [17])。この結果により、行列模型と弦理論のより深い関係が得られると期待される。

(2) 行列模型における重力理論と宇宙論的重力解

これまで知られている摂動的に定式化された超弦理論には重力が無矛盾に含まれていることが知られているが、超弦理論を非摂動的に定式化すると予想されている行列模型においては、重力を満足のいく形で記述することが難しく、行列模型を出発点とした重力理論の実現は長年研究されてきた重要課題の一つである。

この問題を解決するために行列模型から重力理論を導出するフレームワークはいくつか提案されている。そのうちのひとつとして $SO(4,2)$ 対称性を備えた 4 次元の重力理論を導くものがあり、この重力理論では天文学的長さスケールで変

形重力になることが近年示された。浅野はウィーン大学の Harold Steinacker 研究主幹と共同でこの重力理論を研究し、静的で球対称な一般解を導いた (論文 [18])。特に、得られた一般解にはワームホール的な重力解も含まれており、興味深い物理が内包されていることが分かった。

(3) BFSS/BMN 行列模型の数値計算

BFSS 行列模型やその 1 パラメータ変形である BMN 行列模型は 0+1 次元の超対称 Yang-Mills 理論であり、ゲージ/重力対応を通じて IIA 型超重力理論との双対関係が予想されている。この文脈において、有限温度系の行列模型が格子モンテカルロ計算により数値的に解析されてきたが、従来では非閉じ込め相が精力的に調査され、ゲージ/重力対応の正当性を示す結果が得られてきた。渡辺は、ドイツ Regensburg 大学の Norbert Bodendorfer 研究員やイギリス Surrey 大学の花田政範研究員をはじめとした Monte Carlo String/M-theory Collaboration (MCSMC) のグループでの数値計算により、これまで数値的に確認されてこなかった閉じ込め相が出現することを発見した (論文 [19])。この閉じ込め相の存在は、前述のゲージ/重力対応に加え、超弦理論の背後に存在する非摂動的定式化として予言されている M 理論と行列模型との間の関係性 (BFSS 予想) に基づいて考察することで、行列模型が M 理論を記述するパラメータ領域に到達した可能性を示唆している。今後さらに行列サイズを上げた数値解析を実施して閉じ込め相の性質を調べた際に、M 理論の物理現象を真に捉えているかを判定する方向性についても同論文で提案した。

(4) 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実現が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 KEK の西村淳教授、松古栄夫助教、金児隆志准教授、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、理化学研究所の筒井翔一郎研究員、横田猛研究員らとともに、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。この数値的手法が適用できるパラメータ領域にはある程度制限があることが分かっているが、本年度における研究の進展により、スタッガード型フェルミオンと Wilson 型フェルミオンそれぞれにおける適用可能範囲がより詳細に解明された (論文 [20])。また、カラー超伝導の相転移温度の理論的及び数値的決定にも進展があり (論文 [21], [22])、カラー超伝導相の存在の実証に向けた研究が着実に進行している。

(5) 行列模型と NS5 ブレーンについての研究

弦理論は弦や D ブレーンの他に、NS5 ブレーンと呼ばれる物体を含んでいることが知られている。弦や D ブレーンはその記述法が比較的良好に理解されて

いるが、NS5 ブレーンに対してはほとんど理解がなされていない。特に、NS5 ブレーンがどのような自由度を持つのかや、どのような作用によって記述されるのか、といった基本的な部分すら理解されていないのが現状である。この問題に対して、弦理論の定式化の一つとされる行列模型を用いてアプローチしようという試みがある。行列模型には当然 NS5 ブレーンも含まれているはずであるが、先行研究により、上述の BMN 行列模型には NS5 ブレーンを記述する極限が存在することが予想されていた。伊敷、浅野、渡辺は松本研究員とともに、この行列模型の数値解析を行い、ある物理量の値が提案されている極限の下で有限値に収束することを確かめた。これは NS5 ブレーンを記述する極限が本当に存在することの強い証拠を与えている。

(6) 基本スカラー場を含む模型の部分閉じ込めの研究

部分閉じ込めは、ラージ N ゲージ理論での非閉じ込め相転移の過程で閉じ込め領域と非閉じ込め領域が共存する二相共存現象として発見された。この現象は、ゲージ/重力対応を通じて、重力理論におけるブラックホールの生成/蒸発現象と双対だと予想されている。これまで弱結合な理論の解析的計算や行列模型の数値計算の研究により、部分閉じ込めを引き起こす系を具体的に構成し、その性質を明らかにする方法論の確立が進められてきた。渡辺は、これまで部分閉じ込めが起こる簡単な系として解析されてきた Gaussian 行列模型に N_f 個の基本スカラー場を導入した自由場の模型を解析的・数值的に調べた。そして、カノニカル分布で熱力学的に安定な相として部分閉じ込めが実現する系であることを示し、その性質を調査した。今後さらに相互作用項を加えた非自明な設定に格上げし、模型の相構造の解明と相互作用の存在に寄らずに部分閉じ込めが中間相で発生するかを検証する。

(7) flag state を用いた弦の場の理論の摂動的真空解

弦の場の理論は、弦理論に含まれる無限個の粒子の作用・運動方程式を比較的簡単な形に書くことができ、弦理論の非摂動的な定式化として期待されている。最近、Witten 型の弦の場の理論において、flag state と呼ばれる状態を用いてかなり一般的な運動方程式の解を求める方法が提案された。

安藤は、この flag state を用いた真空解について調べ、通常の真空解とは異なる性質を持つことを指摘した。

(8) Kaku 模型における古典解

弦の場の理論には様々な定式化が知られており、最近それら相互の関係がホモトピー代数の手法を用いて議論されている。特に、Erler と松永は Witten 型の弦の場の理論と光円錐型の弦の場の理論の間の関係を、それらの間をつなぐ Kaku 模型と呼ばれる理論を用いて明らかにした。

安藤は Kaku 模型を調べ、その古典運動方程式の解が Witten 型の弦の場の理論の運動方程式の解から求めることができることを示した。

(9) 弦の場の理論と JT gravity

最近、非臨界次元の弦の理論のある極限が JT gravity と呼ばれる 2 次元の重力理論で記述できることがわかってきた。JT gravity は AdS/CFT との関係から最近非常に活発に議論されている。

石橋は、JT gravity と非臨界弦を記述する行列模型との間の関係を調べ、JT gravity の確率過程量子化を用いた定式化を導き出した。

〈論文〉

1. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration, PoS(LATTICE2021) (2022) 563, pp.1-9, in press.
2. Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks, SPIN2021, pp.1-5, in press.
3. Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses, PoS(LATTICE2021) (2022) 504, pp.1-9, in press.
4. Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Calculation of derivative of nucleon form factors in $N_f = 2 + 1$ lattice QCD at $M_\pi = 138$ MeV on a $(5.5 \text{ fm})^3$ volume, Phys. Rev. D 104 (2021) No.7, ref.074514, pp.1-20.
5. 青木保道, 青山龍美, Ed Bennett, 倉知昌史, 益川敏英, 三浦光太郎, 長井敬一, 大木洋, Enrico Rinaldi, 柴田章博, 山脇幸一, 山崎剛, 「素粒子質量起源の理論探索」, HPCI Research Report (2021) 6, pp.44-50.
6. Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa, Hidekatsu Nemura, and Yusuke Taniguchi, General purpose lattice QCD code set Bridge++ 2.0 for high performance computing, J. Phys.: Conf. Ser. 2207 (2022) ref.012053, pp.1-6.
7. Naoki Wakabayashi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, and Masakiyo Kitazawa, Scope and convergence of the hopping parameter expansion in finite temperature QCD with heavy quarks around the critical point, Prog. Theor. Exp. Phys. 2022 (2022) ref.033B05, pp.1-27 (2022).

8. Atsushi Kiyohara, Masakiyo Kitazawa, Shinji Ejiri, and Kazuyuki Kanaya, Finite-size scaling around the critical point in the heavy quark region of QCD, *Phys. Rev. D* 104 (2021) No.11, ref.1144509, pp.1-17.
9. Kazuyuki Kanaya, Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method, *PoS (LATTICE 2021)* (2022) 064, pp.1-9.
10. H.-T. Ding, O. Kaczmarek, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer and H.-T. Shu, Charm and beauty in the deconfined plasma from quenched lattice QCD *Phys. Rev. D* 104 (2021) No.11, ref.114508.
11. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and Y. Yoshimura, Phase transition of four-dimensional lattice ϕ^4 theory with tensor renormalization group, *Phys. Rev. D* 104 (2021) No.3, ref.034507.
12. S. Akiyama and Y. Kuramashi, Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model, *Phys. Rev. D* 104 (2021) No.1, ref.014504.
13. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and T. Yamashita, Metal insulator transition in the (2+1)-dimensional Hubbard model with the tensor renormalization group, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 (2022) No.2, ref.023I01.
14. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and Y. Yoshimura, Quantum Field Theories with Tensor Renormalization Group, *arXiv:2111.04240[hep-lat]*.
15. S. Akiyama and Y. Kuramashi, Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z_2 gauge-Higgs model at finite density, *JHEP* 2205 (2022) 102.
16. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, Matrix regularization for tensor fields, *arXiv:2110.15544 [hep-th]*.
17. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, Laplacians on Fuzzy Riemann Surfaces, *Phys. Rev. D* 103 (2021) No.2, ref.126003 [*arXiv:2110.15544 [hep-th]*].
18. Y. Asano and H. C. Steinacker, Spherically symmetric solutions of higher-spin gravity in the IKKT matrix model, *arXiv:2112.08204 [hep-th]*.
19. G. Bergner, N. Bodendorfer, M. Hanada, S. Pateloudis, E. Rinaldi, A. Schäfer, P. Vranas and H. Watanabe, Confinement/deconfinement transition in the D0-brane matrix model – A signature of M-theory?, *arXiv:2110.01312 [hep-th]*.

20. Y. Namekawa, Y. Asano, Y. Ito, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Nishimura, A. Tsuchiya, S. Tsutsui and T. Yokota, Flavor number dependence of QCD at finite density by the complex Langevin method, PoS (Lattice 2021) in press.
21. T. Yokota, Y. Asano, Y. Ito, H. Matsufuru, Y. Namekawa, J. Nishimura, A. Tsuchiya and S. Tsutsui, Perturbative predictions for color superconductivity on the lattice, PoS (Lattice 2021) in press.
22. S. Tsutsui, Y. Asano, Y. Ito, H. Matsufuru, Y. Namekawa, J. Nishimura, A. Tsuchiya and T. Yokota, Color superconductivity in a small box: a complex Langevin study, PoS (Lattice 2021) in press.

〈著書・総説等〉

1. 藏増嘉伸
「テンソルネットワークと場の理論」 数理科学 2022 年 2 月号 サイエンス社

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 秋山 進一郎
「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」
2. 渡辺 展正
「Two-Phase Coexistence of Colors at Large N 」

[修士論文]

1. 菅野 聡
「行列模型と非可換幾何学」
2. 佐藤 航平
「格子 QCD による形状因子の計算法に関する基礎研究と π 中間子荷電半径の計算」
3. 藤本 和馬
「行列模型の符号問題について」
4. 羅 梟
「Naive staggered fermion 及び plaquette gauge action を用いた 4 flavor QCD の有限温度相転移に関する研究」

〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. H.-T. Shu, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, R. Larsen, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer and S. Mukherjee 「Quarkonia and heavy quark diffusion in the hot gluonic medium」 ,
The 19th International Conference on Strangeness in Quark Matter (SQM 2021) (Online, May 17-22, 2021).
2. Y. Kuramashi, 「Application of tensor renormalization group to Nambu – Jona-Lasinio model and Hubbard model」 (招待講演) ,
International Workshop on Tensor Networks in Many Body and Lattice Field (Tsung-Dao Lee Institute, Shanghai Jiao Tong University, China (online), July 26-30 2021).
3. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshie for PACS Collaboration, 「Calculation of kaon semileptonic form factor with the PACS10 configuration」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
4. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「The lower moments of nucleon structure functions in lattice QCD with physical quark masses」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
5. Kazuyuki Kanaya, Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, and Takashi Umeda, 「Latent heat and pressure gap at the first-order deconfining phase transition of SU(3) Yang-Mills theory using the small flow-time expansion method」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
6. H. Ohno, Y. Kuramashi , Y. Nakamura and S. Takeda, 「Critical endpoints in (2+1)- and 4-flavor QCD with Wilson-Clover fermions」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
7. Y. Kuramashi, S. Akiyama, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).

8. S. Akiyama and Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model」 ,
The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (Massachusetts Institute of Technology, MA, USA (online), July 26-30, 2021).
9. H.-T. Shu, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, R. Larsen, A. L. Lorenz, H. Ohno, H. Sandmeyer and S. Mukherjee 「Quarkonia and heavy quark diffusion in the hot gluonic medium」 ,
A Virtual Tribute to Quark Confinement and the Hadron Spectrum 2021 (Online, Aug. 2-6, 2021).
10. Satoshi Kanno, 「Various Generalization of Matrix Regularization」 ,
Strings and Fields (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Aug. 23-27, 2021)
11. Masakiyo Kitazawa, 「Critical points in strongly-interacting media」 ,
Tsukuba Global Science Week (TGSW2021) (Univ. of Tsukuba, Tsukuba (online), Sep. 6-11, 2021).
12. Kazuyuki Kanaya, S.Ejiri, R.Iwami, M.Kitazawa, M.Shirogane, H.Suzuki, Y.Taniguchi, T.Umeda, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient-flow」 ,
CCS 13th international symposium 2021 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba, Japan (online), Oct. 8, 2021)
13. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki 「Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks」 ,
The 24th International Spin Symposium (Matsue, Shimane (online) Oct. 18-22, 2021).
14. Masakiyo Kitazawa, 「Stress-energy-momentum tensor on the lattice」 ,
YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).
15. Shinji Ejiri, 「Phase structure of QCD in the heavy quark region」 ,
YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).
16. S. Takeda, Y. Kuramashi, H. Ohno, Y. Nakamura, 「Study of QCD critical end-point using Wilson-type fermions」 (招待講演),
YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).
17. S. Akiyama, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu – Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」 ,

YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto (online), Oct. 25-29, 2021).

18. Masakiyo Kitazawa, 「From lattice to observables」 ,
The 8th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2021) (Inha University, Korea (online), Nov. 5-9, 2021).
19. Y. Kuramashi, 「Application of tensor renormalization group to Quantum Field Theories」 (招待講演) ,
DWQ@25: The event marks the passage of twenty-five years since the first numerical simulations with Domain Wall Quarks (DWQ) (Brookhaven National Laboratory, NY, USA (online), Dec. 13-17 2021).
20. Masakiyo Kitazawa, 「Gravitational form factors from lattice QCD」 , GPDs and related topics at J-PARC (KEK, Tsukuba (online), Dec. 22, 2021)
21. S. Akiyama, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」 (招待講演) ,
Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 (Online, Jan. 17-21 2022).
22. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki 「High-precision calculation of nucleon structure using HPC」 ,
The 4th R-CCS International Symposium The Supercomputer Fugaku: Simulation, Big data and AI supporting Society 5.0 (Online, February 7-8, 2022).
23. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions from lattice QCD」 ,
2022 CCS-EPCC Workshop (CCS, Tsukuba (online), Mar. 30-31, 2022).

[国内学会、研究会]

1. 鈴木博, 「有限温度量子色力学のダイナミクス」 ,
学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第13回拠点シンポジウム (Online, 2021年7月8日-9日).
2. 北沢正清, 江尻信司, 金谷和至, 柳原良亮, 白銀瑞樹, 若林直輝, 「格子量子色力学に基づく初期宇宙の諸性質の精密数値解析」 ,
学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第13回拠点シンポジウム (Online, 2021年7月8日-9日).
3. 佐藤航平, 「格子QCDによるBSMの探索とモデルに依存しない手法による形状因子の直接微分計算」 ,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021年8月6日-10日).
4. 渡辺展正, 「モンテカルロ計算のすすめ」 ,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021年8月6日-10日).

5. 渡辺展正, 「基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込め」,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021 年 8 月 6 日-10 日).
6. 安藤雄史, 「flag 状態を用いた摂動的真空解」,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021 年 8 月 6 日-10 日).
7. 菅野聡, 「BT 量子化による弦理論の記述」,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021 年 8 月 6 日-10 日).
8. 須田友也, 「Witten 型ボソン開弦の場の理論におけるタキオン凝縮」,
原子核三者若手 夏の学校 2021 (Online, 2021 年 8 月 6 日-10 日).
9. Asobu Suzuki, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, 「Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow」,
KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(KEK, つくば (online), 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日).
10. 秋山進一郎 「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model」,
KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(KEK, つくば (online), 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日).
11. 渡辺展正, 「基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込め」,
KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」(KEK, つくば (online), 2021 年 8 月 30 日-9 月 1 日).
12. 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄悟 for PACS Collaboration, 「物理点近傍での 2+1 フレーバー QCD による核子形状因子の直接微分計算」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
13. 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, 「核子軸性電荷及びテンソル、スカラー荷の物理点格子 QCD 計算」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
14. 北沢正清, 清原淳史, 江尻信司, 金谷和至, 「重クォーク領域の臨界点周辺における有限サイズスケーリングの精密測定」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
15. 鈴木遊, 谷口裕介, 鈴木博, 金谷和至, 「Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).

16. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 「テンソル繰り込み群による 1+1 次元 Hubbard 模型の研究」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
17. 渡辺展正, 「基本スカラー場を含む行列模型における部分閉じ込めの数値的解析」,
日本物理学会 2021 年秋季大会 (素核宇) (神戸大学, 神戸 (online), 2021 年 9 月 14 日-17 日).
18. 山崎剛, 藏増嘉伸, 中村宜文, 石川健一, 浮田尚哉, 渡辺展正, 「2+1 フレーバー格子 QCD master field を用いた標準理論を超える物理の探索」,
第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
19. 山崎剛, 藏増嘉伸, 浮田尚哉, 新谷栄悟, 滑川裕介, 「master field 格子 QCD による標準理論を超える物理の探索」,
第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
20. 谷口裕介, 金谷和至, 「勾配流法を用いた $N_f=2+1$ QCD のエネルギー運動量テンソルの研究」,
第 8 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題 成果報告会 (THE GRAND HALL, 東京都品川区 (online), 2021 年 10 月 28-29 日).
21. 渡辺展正, 「ラージ N ゲージ理論の部分閉じ込め」(招待講演),
宇宙史研究センター 2021 年度第 2 回成果報告会 (筑波大学, つくば (online), 2021 年 11 月 26 日).
22. 菅野聡, 「Berezin-Toeplitz 量子化による行列正則化の一般化」,
Poisson 幾何とその周辺 21 (Online, 2021 年 12 月 4-5 日).
23. 藏増嘉伸 「Physics explored by master-field simulation in lattice QCD」(招待講演),
日本物理学会第 77 回年次大会シンポジウム 「Challenges and opportunities in large-scale lattice QCD computations and target physics」(岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
24. 山崎剛, 石川健一, 石塚成人, 藏増嘉伸, 中村宜文, 滑川裕介, 谷口裕介, 浮田尚哉, 吉江友照 for PACS Collaboration 「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 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
25. 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, 「物理点格子 QCD による核子構造の計算」,

日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).

26. 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 若林直輝, 「重クォーク領域における臨界点決定のためのホッピングパラメタ展開の収束性」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
27. 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 谷口裕介, 鈴木博, 梅田貴士, 「SFtX 法による $N_f=2+1$ フレーバー QCD の熱力学量」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
28. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 山下巧, 「Metal-insulator transition in (2+1)-dimensional Hubbard model with tensor renormalization group」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
29. 浅野侑磨, 伊敷吾郎, 松本高興, 渡辺展正, 「BMN 行列模型における NS5 ブレーン極限の数値解析」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
30. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 菅野聡, 「曲がった Fuzzy 空間における Seiberg-Witten 写像」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
31. 安藤雄史, 「Kaku 模型における古典解」,
日本物理学会第 77 回年次大会 (岡山大学-岡山理科大学, 岡山 (online), 2022 年 3 月 15 日-19 日).
32. 秋山進一郎, 「Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories」(招待講演),
量子多体計算のフロンティア (大阪大学, 大阪 (online), 2022 年 3 月 28 日-29 日).

〈受賞〉

1. 秋山進一郎, 筑波大学学長表彰
2022 年 3 月
2. 秋山進一郎, 学術振興会特別研究員 (DC2) 採用, 研究課題名: 「符号問題がある 3+1 次元物理系のテンソル繰り込み群による数値的研究」 課題番号: 21J11226

3. 渡辺展正, 筑波大学大学院数理物質科学研究科 研究科長賞 (2021 年度博士論文)
4. 渡辺展正, KEK 理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」, ポスター賞, 2021 年 9 月
5. 渡辺展正, 学術振興会特別研究員 (DC2) 採用, 研究課題名:「行列模型から探るホログラフィー原理と非閉じ込め相転移」課題番号: 21J13014
6. 足立宏幸, 学術振興会特別研究員 (DC1) 採用, 研究課題名:「ローレンツ共変性が明白な M 理論の行列模型の解析」課題番号: 1152990
7. 安藤雄史, 筑波大学数理物質科学研究群 数理フェローシップ採用
8. 菅野聡, 令和 3 年度つくばスカラーシップ採用
9. 菅野聡, 令和 3 年度物理学学位プログラムリーダー賞

〈国際会議・研究会の実施〉

〈国内外の共同組織への参加および顕著な学会の委員活動〉

1. 計算基礎科学連携拠点
<http://www.jicfus.jp/jp/>
2. 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS)
<https://www.r-ccs.riken.jp/jp/>
3. International Lattice Data Grid (ILDG)
<http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
4. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
<http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>
5. 石橋延幸、PTEP 編集委員
6. 山崎剛、計算科学ロードマップ執筆者
7. 渡辺展正, 計算科学ロードマップ 改訂作業協力