

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 (14名)

【人事異動】

金谷和至教授が定年退職後、宇宙史研究センター(朝永センター)特命教授として着任した(2020年4月1日)。

浅野侑磨博士が数理物質系助教に着任した(2021年3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と密接な連携のもと、格子QCDの大型シミュレーション研究を推進している。2016年秋からJCAHPC(最先端共同HPC基盤施設:筑波大学と東京大学両機関の教職員が中心となり設計するスーパーコンピュータシステムを設置し、最先端の大規模高性能計算基盤を構築・運営するための組織)においてOakforest-PACS(略称「OFP」:ピーク演算性能25PFLOPSの超並列クラスタ計算機、HPC(High Performance Computing)向けとしては「富岳」に次ぐ性能を有する)が稼働を開始した。昨年度に引き続き、本年度も筑波大学を中心としたPACS Collaborationに基づく共同研究体制のもと、OFPを用いた大型プロジェクト研究を推進した。これと並行して、有限温度・有限密度QCDの研究、テンソルネットワーク(TN)形式に基づく格子ゲージ理論・スピンモデルの研究、標準理論を超える物理の探求など、活発な研究活動を行った。さらに、格子QCD配位やその他のデータを共有する為のデータグリッドILDG/JLDGの構築・整備を推進した。

国内の計算科学全体の動向として、2015年度で終了したHPCI戦略プログラムの後継として、「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題」に関するアプリケーション開発・研究開発が始まった。9つの重点課題が設定され、9番目の課題である「宇宙の基本法則と進化の解明」が素粒子物理・原子核物理・宇宙物理分野が対象とする基礎科学的研究課題である。その活動は、<http://www.jicfus.jp/jp>に詳しい。また、重点課題と並行して、2016年度から4つの萌芽的課題が設定され、1番目の課題である「基礎科学のフロンティア - 極限への挑戦」は基礎科学における分野横断的な研究課題であり、本グループも分担機関として参加している。重点

課題・萌芽的課題ともに2019年度末で終了した。ポスト「京」の名称は正式に「富岳」と決定し、2020年度から重点課題・萌芽的課題の成果創出フェーズである成果創出加速プログラムが3年間実施される。また、それと並行して2020年度は「富岳」の早期利用課題の募集が行われ、2021年度以降には一般利用が開始される予定である。

超弦理論グループは弦の場の理論、行列模型、ゲージ重力対応という3つの関連するテーマを中心として研究を進めている。量子化された幾何、NS5 ブレーン、行列模型における部分的閉じ込め、非臨界次元の弦の理論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、2020年度は新型コロナウイルス COVID-19 の世界的な感染拡大により、ほぼすべての国際会議や国内学会・研究会がオンライン開催あるいは中止となった。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 Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション

2016年秋に JCAHPC において Oakforest-PACS(OFP) が導入され、稼働を開始した。OFP はピーク演算性能が 25PFlops であり、HPC 向けとしては「富岳」に次ぐ性能を有する。昨年度に引き続き、本年度も PACS Collaboration に基づく共同研究体制のもと、OFP を用いて物理点における 2+1 フレーバー QCD の大規模シミュレーションを推進した。また、「富岳」の早期利用課題制度を利用して「富岳」向けのプログラムの最適化を行い、「富岳」を用いた本格計算の準備が整った。

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”テラーメイド”であると評されている。これは、目的とする物理量計算に応じて、適当と思われる物理パラメータ(クォーク質量や空間体積など)を選んでシミュレーションすることを意味している。この場合、例えば、同じゲージ配位を用いた計算であっても、ある物理量に対しては良く実験値と合うが、他の物理量に関しては実験値を再現しないということが起こりうる。OFP を用いたプロジェクトでは、複数の格子間隔において物理点直上で $(10\text{fm})^3$ 超の大空間体積を持つシミュレーションを行うことによって、上記2つの課題を克服した計算を実現する。

ゲージ配位は異なる格子間隔 3 点 ($a=0.085\text{fm}, 0.065\text{fm}, 0.045\text{fm}$) 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。2019年度までに(格子間隔,格子サイズ)=(0.085fm,128⁴)、(0.065fm,160⁴)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)=(0.045fm,256⁴)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128⁴と160⁴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

賀数研究員と山崎は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。

図1に示すように、本研究で得られた $|V_{us}|$ (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、標準理論から予測される値(灰色帯)と無矛盾な結果になった(論文1)。2020年度には、この計算よりも格子間隔を小さくした計算を実行し、以前の結果と一致する中間結果(赤四角)を得た。この結果には一部の系統誤差の見積りが含まれていないため、誤差が以前の結果よりも小さくなっている。

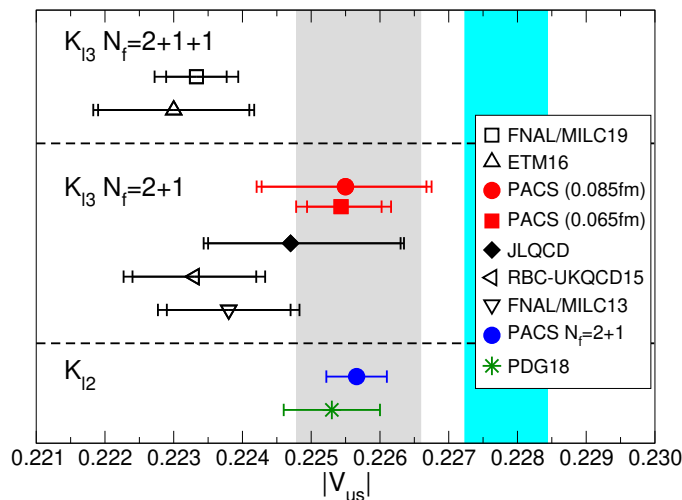


図1: $|V_{us}|$ の比較。灰色帯と水色帯はCKM行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

これらの結果は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)とも一致しており、標準模型を超える物理のシグナルに対しては否定的な結論を示唆している。しかし、近年の標準模型の予測では図中の灰色帯を超えた大きな $|V_{us}|$ が報告(水色帯)されており、標準理論を超える物理の検証を行うために、さらに精密な計算結果を得る必要がある。今後は、有限格子間隔起因の系統誤差を取り除くために、異なる格子間隔で得られた結果を用いて連続極限

への外挿を実行する計画である。また、さらに小さな格子間隔のゲージ配位が今年度中に生成される予定であるため、そのゲージ配位を用いた計算も予定している。

(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なわれてきたが、非常に良い精度で測定されている実験値を再現できていなかった。

藏増、山崎は、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 塚本夏基氏、辻竜太郎氏とともに、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 年度は格子間隔 $a = 0.065\text{fm}$ 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 3) に加え核子構造関数に関する物理量に対する繰り込み計算を実行した。

また、現実的クォーク質量直上での形状因子計算結果 (論文 4) で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、異なる格子間隔を用いた計算による有限格子間隔系統誤差の調査を行っている。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も行っている。

(4) 格子 QCD によるクォークを自由度とした原子核の直接構成

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

一方、現実よりも重い π 中間子を用いた他グループ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。

(5) 格子 QCD による相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いた散乱振幅

散乱長は、粒子間の相互作用を特徴づける基本的な物理量である。これまで散乱長は、相互作用範囲外の Bethe-Salpeter 波動関数から導出された有限体積法により計算されてきた。京都大学 滑川特任助教と山崎は 2 パイ中間子系において、相互作用範囲内の Bethe-Salpeter 波動関数を用いて散乱振幅を決定した。得られた散乱振幅から散乱長を計算し、既存の手法で求められた結果との一致を確認した。加えて、半オフシェル散乱振幅計算に世界で初めて成功した。さらに散乱振幅のパイ中間子質量依存性を調べ、演算子依存性や虚時間依存性などの散乱振幅の性質や、相互作用領域外に設定した境界上の波動関数から散乱位相差が得られることを議論した (論文 5)。

(6) 改良 Wilson 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

ビッグバン直後の宇宙初期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。これは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なっている。2020 年度も、QCD の相構造やクォーク物質の熱力学的諸性質の研究を推進した。クォーク物質の相構造や熱力学特性を引き出すために、有限温度・有限密度格子 QCD を研究し、またそのための技術開発を進めた。

(6-1) 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くりこみと混合を非摂動的に決定するという、複雑なくりこ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、元の場の量を $\sqrt{8t}$ 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、連続極限のくりこ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、数値的なくりこみに加えて、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り、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、くりこ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。

この研究を発展させ、現実のクォーク質量 (物理点) での研究、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、及び、SFtX 法の更なる改

良に向けた研究を推進している。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。2020年度には、以下の研究成果が得られた。

SFtX法の改良

SFtX法では、格子上で測った $t > 0$ でのフローさせた演算子の結果を、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。ここで、 $t/a^2 \sim 0$ 領域は格子化誤差が大きいので、それを避けながら2重外挿する必要がある。従って、格子が粗い、もしくは格子化誤差が大きい演算子の場合には、外挿に必要な線形領域が不明確になる可能性がある。これらの場合にSFtX法を応用するためには、なんらかの改善が要求される。論文6では、マッチング係数におけるくりこみスケールと摂動高次項の効果を研究した。

マッチング係数とは、フローさせた演算子と求めるくりこまれた物理量とを結びつける係数である。SFtX法では、物理量を、格子上で測った $t > 0$ でのフローさせた演算子にマッチング係数を掛けたものを組み合わせてあらし、その2重外挿を実行する。マッチング係数は、QCDを含む漸近自由な理論では、 t が大きくなれば摂動計算することができる。SFtX法では、摂動であらかじめわかっている t 依存性をマッチング係数に取り込むことで、 $t \rightarrow 0$ 外挿が滑らかになるように改良している。実際、我々の u, d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCDの研究(格子間隔 0.07fm)では、マッチング係数のおかげで、 $t \rightarrow 0$ 外挿を数値的に可能とする線形領域が実現した。他方、現実のクォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCDの研究(格子間隔 0.09fm)や、 u, d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCDで格子間隔を粗くした研究において、いくつかの物理量に関して、 $t \rightarrow 0$ 外挿を行うための線形領域が十分明確ではなくなるという現象を経験した。

マッチング係数を摂動計算するときのくりこみスケール μ は、摂動展開が破綻しない限り、どんな値を取っても良く、 $t \rightarrow 0$ 極限の最終的な物理量は μ のとりかたに依存しないはずである。通常 μ としては、フローさせた演算子の自然なスケールの一つである、フローによる smearing スケール $\mu_d = 1/\sqrt{8t}$ が採用されてきた。上に述べたように、 μ_d と同程度ならば、原理的にどんな μ をとっても良いはずである。しかし実際は、摂動展開を有限次で切っているため、摂動展開の質は、 μ をどう取るかで影響を受ける。特に、SFtX法で $t \rightarrow 0$ 外挿を実行する上で、どこまで大きな t を利用できるかは実用上重要である。 $\mu_d = 1/\sqrt{8t}$ の形から分かるように、 t を大きくすると赤外領域に近づき、マッチング係数の摂動計算が破綻する。

論文6では、Harlanderらが最近の摂動の高次計算で提案した $\mu_0 = 1/\sqrt{2e^{\gamma_E} t}$ (γ_E はオイラー数)の効果を調べた。数値的には $\mu_0 \simeq 1.5\mu_d$ なので、 μ_0 スケールは、摂動領域をより大きな t まで拡大し、 t が大きな領域で $t \rightarrow 0$ 外挿のシグナルを改善してくれる可能性がある。

図2に、 u, d クォークが現実より重い $N_f = 2 + 1$ QCDにおけるエントロピー密度(左図)と ud クォークのカイラル感受率(右図)の $t \rightarrow 0$ 外挿を示す。

緑が μ_d スケール、青が μ_0 スケールの結果である。 $t \rightarrow 0$ 極限の結果はどちらもコンシステントだが、 μ_0 スケールにより線形シグナルが改善されていることがわかる。現実のクォーク質量での $N_f = 2 + 1$ QCD での試験研究で、 μ_d スケールでは $t \rightarrow 0$ 外挿が不定な場合でも、 μ_0 スケールにより線形シグナルが劇的に改善され、SFtX 法の安定性と適用範囲が大きく改善されることを確認した。

論文 6 では、マッチング係数における 2 ループ項の効果や、2 ループ計算で使われた運動方程式の影響も研究したが、我々の研究している $N_f = 2 + 1$ QCD では SFtX 法の改良には大きくは寄与しないらしいことがわかったので、ここでは省略する。

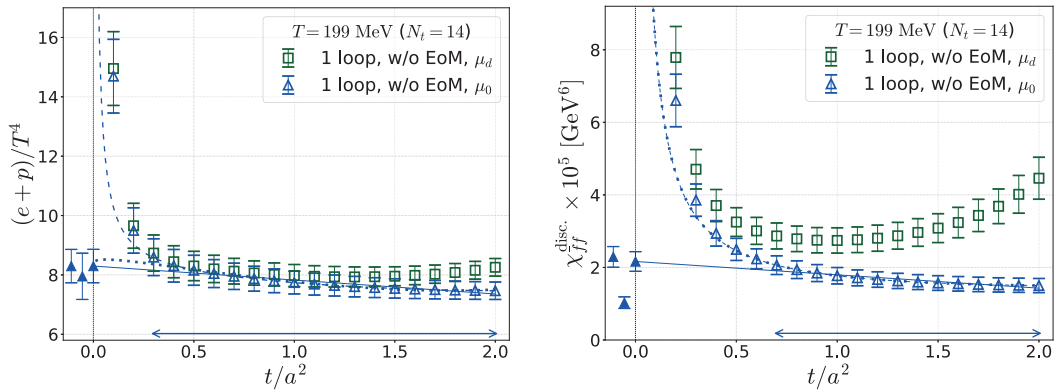


図 2: マッチング係数におけるくりこみスケールの効果。ud クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD でのエントロピー密度 (左図) と ud クォークのカイラル感受率 (右図)。横軸はフロー時間で、直線 (点線、ダッシュ線) は、 μ_0 スケールを用いた $t \rightarrow 0$ 線形外挿 (非線形外挿、linear+log 外挿) で、下の矢印がフィット領域。 $t \sim 0$ 近傍のシンボルは、右から、線形外挿、非線形外挿、linear+log 外挿によるエントロピー密度 (左図) と ud クォークのカイラル感受率 (右図) の外挿結果。(論文 6)

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

論文 8 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。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。

論文 8 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、図3の右図に示したように、潜熱の結果に空間体積依存性確認されるので、より大きな空間体積での追試が望まれる。

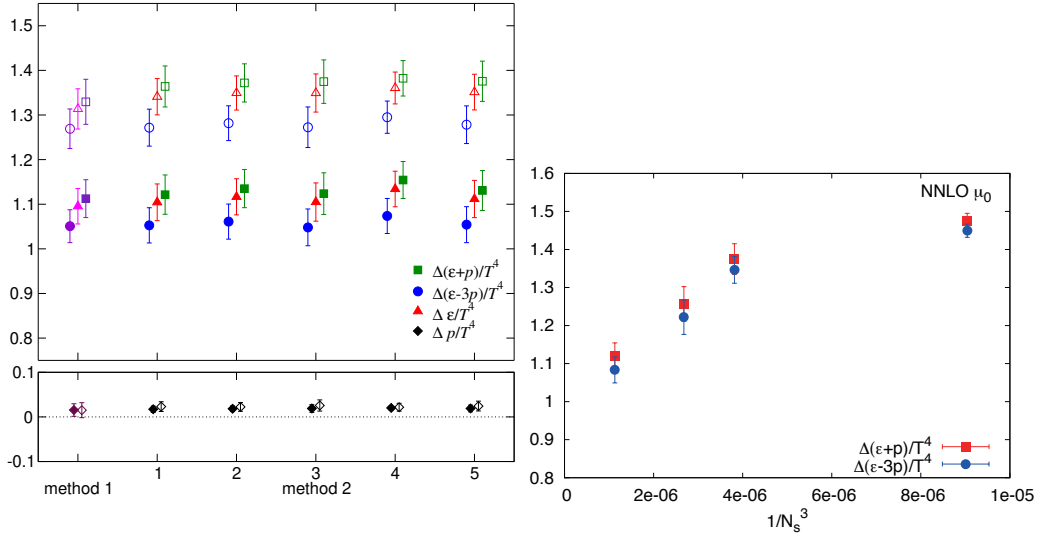


図3: クエンチ近似 QCD の潜熱と圧力ギャップに関して $a \rightarrow 0$ と $t \rightarrow 0$ の2重外挿を行った最終結果。左図: $t \rightarrow 0$ を先に実行する”method 1”と $a \rightarrow 0$ を先に実行する ”method 2” の結果の比較 (method 2では、さらに $t \rightarrow 0$ 外挿のフィット・レンジをいくつか比較)。filled symbols はアスペクト比 $N_s/N_t = 8$ 、open symbols は $N_s/N_t = 6$ に相当する空間体積での結果。右図: $N_t = 12$ 格子における潜熱の空間体積依存性。method 1 による結果。(論文8)

SFtX法を用いた物理点有限温度 (2+1)-flavor QCD の研究

これらの研究を発展させ、クォーク質量を現実のクォーク質量 (物理点) に調整した $N_f = 2 + 1$ QCD の熱力学研究を推進している。ゼロ温度配位として PACS-CS Collaboration が生成したものを活用し、それと同じ格子間隔 $a \simeq 0.09\text{fm}$ で有限温度シミュレーションを実行している。物理点の配位生成には大きな計算が要求されるので、様々な計算機資源を動員して系統的な大規模シミュレーションを系統的に遂行している。この物理点シミュレーションでも、上で紹介した SFtX 法の改良が重要な役割を果たすと期待される。

これまでに得た様々な物理量の挙動から、 $T \simeq 122\text{--}146$ MeV が相転移温度近傍の臨界領域にあることが示唆されるが、まだ統計が十分ではなく、明確な結論を得るためには $T \leq 146$ MeV の低温領域で更なる統計が必要である。我々の Wilson 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。現在そのための低温領域の配位生成を集中的に進めており、その中間結果を各種会議で報告した（国際会議 6, 国内会議 4,12,13,17,18,20）。

その他

SFtX 法でエネルギー運動量テンソルそのものが計算できるようになったことにより、その非対角要素や二点相関関数も直接評価可能となった。そこから、輸送係数など、クォーク物質の様々な熱力学特性を引き出す試みを進めている。（国内会議 2）

また、SFtX 法を 2 点関数に拡大して、カイラル感受率の connected 部分と $U(1)_A$ 感受率の評価を行った。u,d クォークが重い $N_f = 2 + 1$ QCD では、カイラル感受率の disconnected 部分と違って、connected 部分や全カイラル感受率は QCD 相転移にそれほど敏感では無いことがわかった。これは u,d クォークが重いことによる影響と考えられるので、u,d クォークを物理点まで軽くした $N_f = 2 + 1$ QCD でも検証する必要がある。また、 $U(1)_A$ 感受率の結果から、QCD 相転移温度では $U(1)_A$ 対称性がまだ回復していないことを示唆する中間結果を得た。（国内会議 5,22）

(6-2) SFtX 法による ゼロ温度カイラル物理量の研究

SFtX 法により、通常の方法では格子化に伴う対称性の破れのために評価が難しい物理量も直接非摂動的に評価できる可能性が拓かれた。有限温度の物理量だけでなく、ゼロ温度物理量にも、格子による非摂動的評価が望まれる物理量は多く存在する。

谷口、鈴木遊、金谷は、九州大学 鈴木博教授と共同で、SFtX 法のゼロ温度物理量への応用として、B 中間子バグパラメータ B_K を SFtX 法で計算するために必要なマッチング係数の摂動計算を行った。 B_K は、CP 対称性の破れを $K_0-\bar{K}_0$ 振動実験から抽出する上で鍵となる量で、その非摂動的評価は極めて重要であるが、格子上のカイラル対称性の破れのために通常の方法では複雑なくりこみと混合の解消が要求される。我々は、SFtX 法をクォーク 4 点関数の評価に拡張して、 B_K などの評価に必要なマッチング係数を計算した。（論文 7）

(7) Wilson 型クォークを用いた 2+1 フレーバー有限温度 QCD における臨界終線の研究

有限温度 QCD の相構造はクォークの質量やフレーバー数に応じて多様に変化すると予想されており、特に二次相転移となる臨界終点、あるいはこれが連なった臨界終線の位置を決定することが非常に重要である。実際、特に 3 フレーバーの場合について臨界終点の位置を決定するため、格子 QCD に基づく様々な計算が行われてきた。しかしながら、これまでの研究から臨界終点の位置は格子化誤差の影響を強く受けることが分かってきており、異なるフェルミオン作用を用いた計算結果の間で一貫性のある結果が未だに得られていないなど多くの課題が存在し、より信頼できる連続極限の結果を得ることが求められている。

大野と藏増は、金沢大の武田真滋准教授及び理化学研究所の中村宜文研究員とともに、(2+1) フレーバー QCD の臨界終点の位置を、 $O(a)$ 改良された Wilson

クォーク作用を用いた格子 QCD シミュレーションにより調べた。本年度はまず、時間方向格子サイズ (N_T) を 6 に固定し、以前の研究で調べた SU(3) 対称点の近傍からより広いパラメータ領域へと計算を拡張した (論文 9)。その結果、図 4 に示すような臨界終線を得た。ただし $N_T=8$ 及び 10 の結果は、SU(3) 対称点における N_T 依存性をもとに $N_T=6$ の結果を外挿したものである。現在、より正確な結果を得るため、 $N_T=8$ の計算を遂行中である。

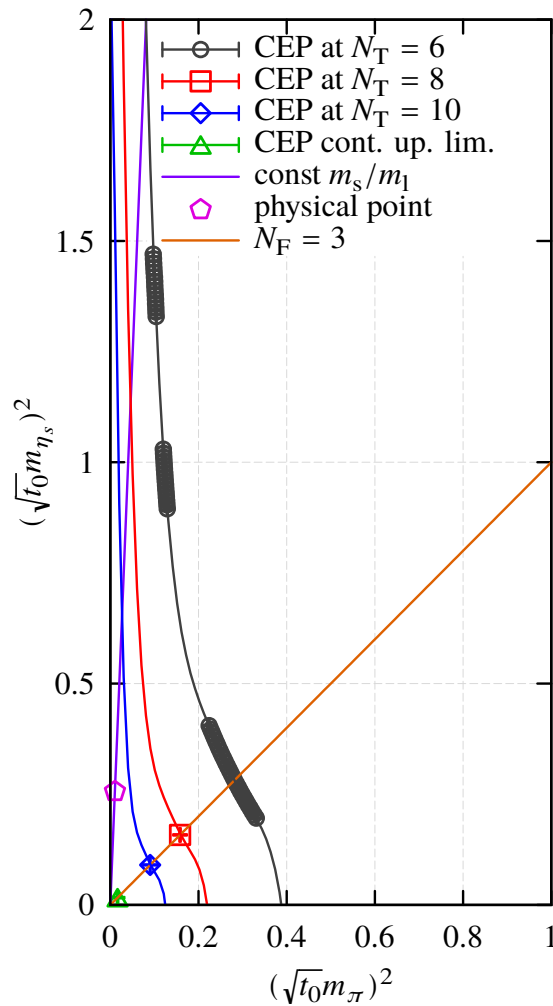


図 4: 2+1 フレーバー QCD における臨界終線。

(8) Highly improved staggered quark を用いた有限温度・密度 QCD の研究

有限温度・密度 QCD の相構造について調べることは、強い相互作用する物質の高温・高密度媒質中での性質を理解する上で非常に重要であり、QCD 臨界点の探索等を目的として理論・実験両方の側面から様々な研究が行われている。

大野は、独国 Bielefeld 大の Frithjof Karsch 教授を中心とする HotQCD Collaboration に参加し、highly improved staggered quark 作用を用いた (2+1)-flavor 格子 QCD シミュレーションにより、有限温度・密度 QCD の相構造に関する研

究を行った（論文10）。本研究ではクォーク化学ポテンシャルに対する Taylor 展開を用いて有限密度の効果を取り入れる手法を採用し、化学ポテンシャルの 8 次のオーダーまで展開係数の計算を行った。これによりバリオン数揺らぎについて 6 次のキュムラントまで計算することが可能となった。また、この結果を STAR 実験で得られた陽子数揺らぎについてのキュムラントの結果と比較したところ、3 次及び 4 次のキュムラント（歪度及び尖度）に関して、実験結果は若干大きいもののほぼ我々の計算結果と同様の振る舞いをする事が分かった（図 5）。このことから、クォーク・グルーオン・プラズマが再びハドロンに冷え固まる温度（freeze-out 温度）は QCD のクロスオーバーが起こる温度（pseudo-critical 温度）の近傍にあり、恐らくより低いところにあると予想された。さらに、5 次及び 6 次のキュムラントについても同様の比較を行ったが、我々の計算結果から実験結果と同様の振る舞いを得ることはできなかった。その理由としては、Taylor 展開のより高次の効果を取り入れる必要があることが考えられる。

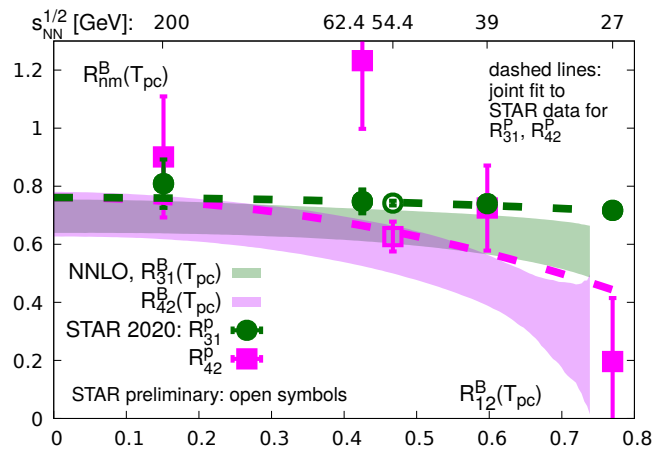


図 5: バリオン数揺らぎのキュムラントの格子 QCD 計算結果と陽子数揺らぎのキュムラントの STAR 実験結果の比較。

(9) クォークコニウムスペクトル関数の研究

チャームやボトムクォークといった重いクォークとその反クォークの束縛状態であるクォークコニウムのスペクトル関数は、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おり、理論的にその性質を調べることは、重イオン衝突実験の結果を理解する上で非常に重要である。しかしながら、格子 QCD に基づく第一原理計算で直接得られる量は相関関数であり、相関関数からスペクトル関数を計算することは ill-posed な問題で、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コニウム相関関数を計算し、これを撰

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。これまでの計算ではまず輸送ピークの存在しない擬スカラーチャンネルのスペクトル関数を計算を行い、そしてこれを輸送ピークを持つベクターチャンネルのスペクトル関数へと拡張した。今年度はさらにベクターチャンネルの相関関数に含まれる輸送の凡その寄与を見積り、チャームクォークに対する抗力係数がボトムクォークのそれよりも大きいという予想を得た（論文12）。

(10) テンソルネットワーク形式に基づく格子ゲージ理論の研究

格子 QCD 計算では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の u 、 d 、 s クォーク質量上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。その一方で、解決すべき長年の課題がそのまま残されていることも事実である。最も重要な課題は、フェルミオン系を扱う際の負符号問題および複素作用を持つ系のシミュレーションである。これらは、軽いクォークのダイナミクス、Strong CP 問題、有限密度 QCD、格子 SUSY の研究において避けて通れない問題である。われわれは、近年物性物理分野で提案されたテンソルネットワーク形式に基づく分配関数の数値計算手法を格子ゲージ理論へ応用し、モンテカルロ法に起因する負符号問題および複素作用問題を解決し、これまでの格子 QCD 計算が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。なお、本研究課題は、ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題における4つの萌芽的課題のうち、1番目の課題である「基礎科学のフロンティア – 極限への挑戦」に含まれており、本グループも分担機関として参加し、テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用に取り組んできた。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、藏増と理研計算科学研究機構（現理研計算科学研究センター）の清水特別研究員は、テンソル繰り込み群をグラスマン数も扱えるように拡張し（グラスマンテンソル繰り込み群）、世界で初めてフェルミオン入りのゲージ理論への応用に成功した。具体的には、グラスマンテンソル繰り込み群を用いて、 θ 項が有る場合と無い場合の1フレーバーの2次元格子 Schwinger モデル（2次元格子 QED）における相構造を調べた（論文発表済）。この研究により、グラスマンテンソル繰り込み群が、現在の格子 QCD 計算が抱える負符号問題や複素作用問題を解決していることを示すことに成功した。今後は、最終目標である4次元 QCD への応用に向け、(i) 非可換ゲージ理論への拡張、(ii) 高次元モデルへの応用、(iii) 物理量計算のための手法開発、(iv) 興味深い低次元素粒子論モデルへの応用、という4つの課題に取り組む。

2020年度における課題(i)~(iv)のうち、特に課題(ii)において大きな進展があった。一般的に、テンソル繰り込み群はモデルの次元が上がるにつれて計算コストが増大する。そのため、これまでテンソル繰り込み群の主な応用例は2次元モデルに限られており、4次元モデルへの適用例は、2019年にわれわれが行った4次元イジングモデルの計算のみであった（論文発表済）。われわれは、まず Anisotropic TRG (ATRG) コードを並列化し、4次元有限密度複素

スカラー理論における Silver Blaze 現象の確認に成功した。図 6(左) は粒子数密度 $\langle n \rangle$ の化学ポテンシャル μ 依存性を 4次元体積を変化させながらプロットしたものである。 $\langle n \rangle$ はある化学ポテンシャル μ_c の値までゼロのままであるが、 $\mu_c \approx 0.65$ を越えると突然増加し始めることがわかる (Silver Blaze 現象)。なお、平均場近似では $\mu_c^{\text{MF}} \approx 0.7$ と予想されている。このモデルは複素作用問題の典型例であり、テンソル繰り込み群が複素作用問題・符号問題を解決していることがわかる (論文 13)。このモデルは、複素 Langevin 法や Lefschetz-thimble 法でも計算されているが、いずれも $O(10^4)$ 程度の格子体積でしか成功しておらず、ゼロ温度・熱力学極限とは程遠い。4次元有限密度複素スカラー理論の計算に成功した後、われわれは並列版 ATRG コードをグラスマン数化し、4次元有限密度 Nambu–Jona-Lasinio モデルの極低温・高密度領域におけるカイラル相転移を調べた。図 6(右) はオーダーパラメータであるカイラル凝縮 $\langle \bar{\chi}\chi \rangle$ の化学ポテンシャル μ 依存性を表している。 $\mu \approx 3.0$ において $\langle \bar{\chi}\chi \rangle$ の有限の値からゼロへの不連続な変化が確認できるため、カイラル対称性の回復が一次相転移で起きていることがわかる (論文 14)。

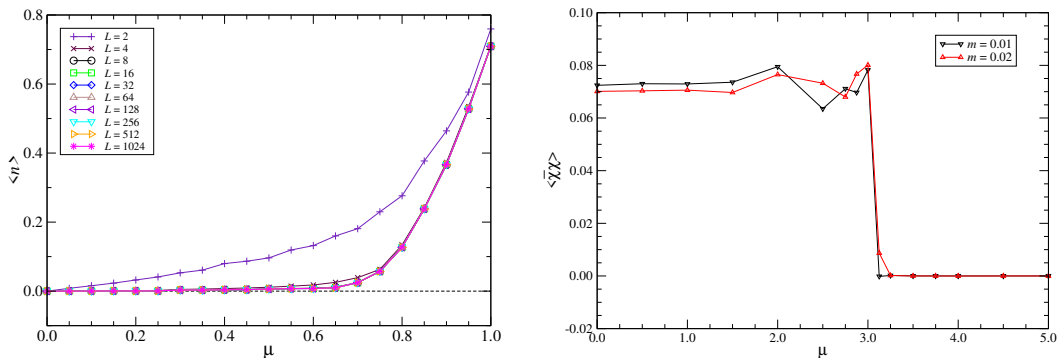


図 6: (左)4次元有限密度複素スカラー理論における粒子数密度 $\langle n \rangle$ の化学ポテンシャル μ 依存性。(右)4次元有限密度 Nambu–Jona-Lasinio モデルにおけるカイラル凝縮 $\langle \bar{\chi}\chi \rangle$ の化学ポテンシャル μ 依存性。 m はフェルミオンの質量を表す。

(11) 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。2020 年度はフレー

パー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。

(12) 有限サイズスケーリングによるコンフォーマル対称性の検証の研究

コンフォーマル対称性は、素粒子標準模型を超える理論の構築に重要な働きをする、と考えられており、場の理論の非摂動的定式化である格子場理論とその数値シミュレーションによって、多フレーバQCDなどのコンフォーマル理論の候補が調べられている。数値シミュレーションは有限サイズの格子で行われるので、コンフォーマル対称性は厳密には成り立たず、格子サイズの有限性に起因する相構造が現れる。この『有限のIR cutoffを持つコンフォーマル理論の相構造』の研究は、この10年ほどの間に大きく進展し、繰り込み群の帰結である『格子サイズに対する相関関数のスケールリング則』を調べて理論が(体積無限大で)コンフォーマル対称性を持つ(赤外固定点が存在すること)か否かを判別できる様になってきた。

これらの一連の研究は、素粒子物理にとって興味深い、多フレーバQCDに対して行われたものであるが、同様な議論が、別の(遙かに簡単な)系でも成り立つことが示されれば、上述の論理構造に穴がないことの傍証となる。この目的で、吉江と三好は、2次元Ising場理論のコンフォーマル対称性を有限体積スケールリングに基づき調べた。2次元Isingモデルは、相関距離無限大のCritical Surface上では、コンフォーマル対称性を持つ場の理論が実現している、と考えられている。実際、隣接相互作用のみを持つIsingモデルはOnsagerのcritical pointでコンフォーマル対称性を持つことが解析的に示されている。我々は、まず、critical point上でいくつかの格子サイズでの相関関数を数値的に求め、期待されるスケールリング則が成り立っていることを確かめた。最近接と次に近接するスピン間の相互作用を含むIsingモデルでcritical pointの知られている幾つかを選んで、同様な計算を行い、近接作用の場合と同様のスケールリング則が成り立っていることを示したが、critical surface上の赤外固定点の位置に関する情報は、統計不足の為、得られなかった。これらの結果は、三好の修士論文に纏めている。Critical Surface上の有限サイズスケールリングの方法は、繰り込み群のbeta関数(繰り込み群のフロー)やgamma関数を決める方法を含んでおり、コンフォーマル理論の研究手段として有用なものになり得る。その方向での研究を計画中である。

(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、計算素粒子物理研究者の為のデータグリッドであり、国内7拠点でSINET5 VPNで結んだネットワークにより、拠点のファイルサーバを統合した単一のファイルシステムを運用している。JLDGは、研究者が研究グループ内で日々のデータを共有する、複数のスパコンでデータ生成・解析を分担する、基礎データをILDG (International Data Grid)の枠組みで世界の研究者に公開する、等に利用されている。本学計算科学研究センターが代表を務める、拠点代表やユーザー代表から構成されるJLDG管

理者グループが運用の一切を行っている。2008年に実運用を開始して以来12年経過した現在、国内の複数の大きな研究グループが研究インフラとして使用している。JLDGは実用システムとして、数年前から一定の完成の域に達しており、今年度もシステムの増強・安定運用を主眼に活動を行った。

日常のメンテナンス・ユーザ対応以外の主な活動は、以下の通りである。

- (a) 新拠点設置：『理化学研究所計算科学研究センター (RCCS)』拠点の立ち上げ完了。HPCI最大の計算資源である富岳のクライアントでJLDGファイルシステムをマウントし、データ転送を並列に行えるようになった。
- (b) 筑波大CCS拠点のスーパーコンピュータcygnusにJLDGクライアント機能を導入する計画が完了した。JLDGファイルシステムをcygnusフロントエンドでマウント利用可能である。
- (c) 格子QCDアンサンブルのDOI登録の枠組みが完成し、PACS-CS Collaboration提供の6アンサンブルにDOIが付与された。
- (d) 管理用サーバのOSをEOLを迎えたCentOS6から、CentOS7/8へ更新した。
- (e) 筑波大キャンパスネットワークのセキュリティゾーン化の一環として、センターより提供された『外部レベル相当ネットワーク』の一つのサブネットへの機器移転を行った。その最、センターの運用するファイアウォールシステムに登録するファイアウォールルールを検討し、システムのセキュリティレベル向上を図った。

【2】 超弦理論

(石橋 延幸、伊敷 吾郎、浅野 侑磨、毛利 健司)

(1) 行列模型における量子化された幾何について

行列模型はM理論や弦理論の非摂動的定式化を与えると予想されている。行列模型はその名の通り、有限サイズの行列を自由度とした模型であるが、行列サイズが無限大になる極限において、広がった時空における弦や膜のダイナミクスを記述していると期待されている。弦理論における弦やD-braneといった物体の幾何学は、行列模型において行列の様々な配位により記述されると考えられており、この幾何と行列の関係は、行列正則化という名で知られている。

伊敷と大学院生の足立、菅野は、ダブリン高等研究所（アイルランド）の松本高興研究員とともに行列正則化についての研究を行った。伊敷らは行列正則化を与える数学的手法の一つである「Berezin-Toeplitz量子化」に注目し、その一般化を得ることに成功した（論文17）。従来の行列正則化では、スカラー場の量子化のみが対象であったが、この一般化された枠組みでは電荷をもったスカラー場やテンソル場への適用が可能となった。本研究ではさらに、それらの場に作用するラプラス演算子の量子化の方法も提案された。

(2) 行列模型における NS5 ブレーンの記述について

弦理論には弦だけではなく、D-brane や NS5-brane と呼ばれる多次元に広がった物体が含まれていることが知られている。弦や D-brane については、それらを記述する方法が（少なくとも低エネルギー領域では）知られているが、NS5-brane についてはまだ記述法が確立しておらず、弦理論の理解に向けてこれを理解することが重要な課題となっている。

先行研究により、NS5-brane が BMN 行列模型と呼ばれる模型を用いて記述できるのではないかと予想されていた。伊敷、浅野と大学院生の渡辺は、ダブリン高等研究所（アイルランド）の松本高興研究員とともにこの予想の数値的検証を行った。その結果、行列模型の物理量が理論に含まれるパラメータに対して予想された通りに振る舞うことが示された。この結果は先行研究の予想が正しいことを強く支持している。

(3) 行列模型における部分的閉じ込め

部分的閉じ込めは、ラージ N ゲージ理論での非閉じ込め相転移の際に中間のエネルギースケールに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、双対な重力理論に現れるブラックホール時空の転移現象と関連することが予想され、超弦理論や重力の量子的な性質の解明に寄与できる可能性がある。渡辺は、サリー大学の花田政範研究員や OIST の船井正太郎博士、Jena 大学の Bergner 研究員らと共に gauged-Gaussian 行列模型や Yang-Mills 行列模型の Monte Carlo 計算を通して相転移温度近傍の解析を行った。これらの模型では解析的な計算や先行研究により、Polyakov line phase の分布関数やエネルギー等の物理量の解析から部分的閉じ込めが起きていることがわかっているが、行列場の成分の意味でも前述のような二相共存が起こっているかは明らかになっていなかった。また、Yang-Mills 行列模型は相互作用を含む模型のため、弱結合領域を超えても部分的閉じ込めが起こるかも非自明な問題であった。今回の研究（論文 20）では、エルミートな行列場の独立自由度から分布関数を定義し、その振る舞いから部分的閉じ込めと解釈できる二相共存現象が起きていることを数値的に示した。

スカラー行列場の独立な自由度の意味で二相共存が起きていると、閉じ込め領域と非閉じ込め領域での自由度の分布関数 $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$, $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ は一意に決まっており、全体としての分布関数はそれらと適当な重み付け和で記述できることを意味している。ここでの重みは (非) 閉じ込め領域にいるように振る舞う自由度の個数 (以降 M, M' で表す) によって決まるはずであり、Polyakov loop の値によって読み取ることができる。以上のアイデアに基づいて Yang-Mills 行列模型のスカラー場の配位を数値的に解析して得られた、それぞれの領域での分布関数が図 7 である。解析の都合上、異なる重み M, M' で共存している 2 つの分布関数を比較することで $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ と $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ へ分離しているが、その (M, M') の組み合わせに依らず分布関数が一意に得られている。また図 8 を見るとわかるように、この閉じ込め/非閉じ込め領域に分離できた分布関数はお互い異なる関数形をしており、統計誤差よりも大きいことがわかる。同様の結果が

gauged-Gaussian 行列模型での解析や、Yang-Mills 行列模型の配位を異なる手法で生成した場合についても得ることができた。

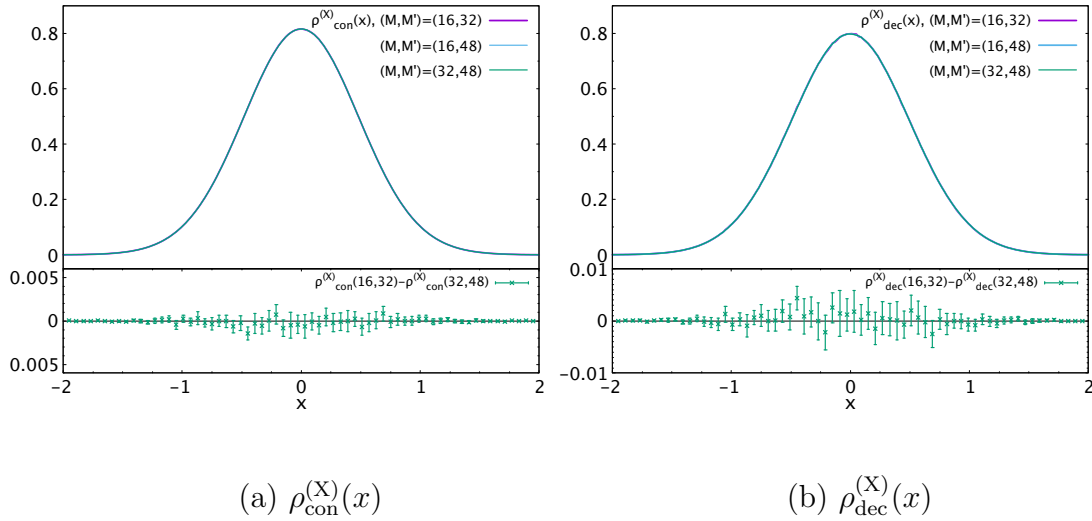


図 7: Yang-Mills 行列模型を $N = 64$, $L = 24$, かつ $T = 0.885$ で数値計算して得られた行列スカラー場 X の独立な自由度の分布関数。 $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ と $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$ はそれぞれ閉じ込め/非閉じ込め領域での分布関数を示す。

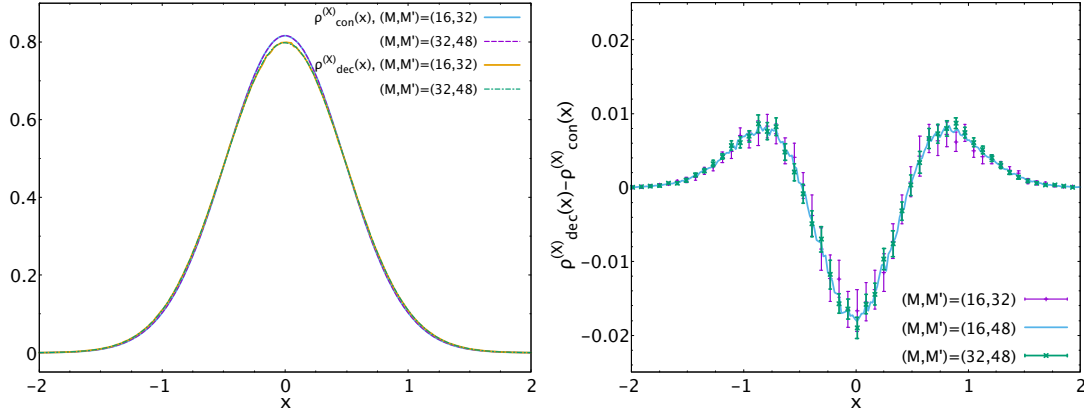
(4) 非臨界次元の弦の場の理論

非臨界次元の弦の理論は、行列模型を用いて厳密に解くことができる。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。

JT gravity に対応する非臨界弦理論の極限は、非臨界弦理論として解釈するのが難しい極限であり、どのように記述したらよいかという問題が多く研究者を悩ませてきた。石橋は、非臨界次元の弦についてこれまで知られている弦の場の理論を用いて、JT gravity に対応する極限がどのように記述されるかを調べた。確率過程量子化に基づいた弦の場の理論の定式化を整備し、JT gravity に対応する極限を記述するにはどうしたらいいかを明らかにした。

〈論文〉

1. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié for PACS Collaboration, K_{I3} form factors in $N_f = 2 + 1$ QCD at physical point on large volume, PoS(LATTICE2019) (2020) 186, pp.1-7.
2. J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshié for PACS Collaboration, K_{I3}



(a) 分布の比較

(b) 分布の差

図 8: 図 7 に示した各領域での分布関数 $\rho_{\text{dec}}^{(X)}(x)$, $\rho_{\text{con}}^{(X)}(x)$ の比較。 $N = 64$, $L = 24$, かつ $T = 0.885$ での Yang–Mills 行列模型の行列スカラー場 X の配位を用いて計算した。(a) 両者の分布は僅かではあるが、異なる分布をしていることがわかる。(b) 両者の分布の差は分布関数の統計誤差よりも明らかに大きい。

form factors at the physical point on $(10.9 \text{ fm})^3$ volume, Phys. Rev. D 101, No. 9 (2020) ref. 094504, pp.1-16.

3. Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Nucleon isovector couplings from 2+1 flavor lattice QCD at the physical point, PoS(LATTICE2019) (2020) 132, pp.1-7.
4. Eigo Shintani, Ken-Ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Takeshi Yamazaki for PACS Collaboration, Erratum: Nucleon form factors and root-mean-square radii on a $(10.8 \text{ fm})^4$ lattice at the physical point, Phys. Rev. D 102, (2020) ref. 019902, pp.1-17.
5. Takeshi Yamazaki, Yusuke Namekawa, Two-pion scattering amplitude from Bethe-Salpeter wave function at the interaction boundary, PoS(LATTICE2019) (2020) 032, pp.1-7.
6. Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda (WHOT-QCD Collaboration), $N_f = 2 + 1$ QCD thermodynamics with gradient flow using two-loop matching coefficients, Phys. Rev. D 102, No.1, ref.014510, pp.1-25 (2020).
7. Asobu Suzuki, Yusuke Taniguchi, Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Four quark operators for kaon bag parameter with gradient flow, Phys. Rev. D 102, No.3, ref.034508, pp.1-13 (2020).

8. Mizuki Shirogane, Shinji Ejiri, Ryo Iwami, Kazuyuki Kanaya, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Yusuke Taniguchi, 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, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2021, ref.013B08, pp.1-26 (2021).
9. Y. Nakamura, Y. Kuramashi, H. Ohno and S. Takeda, Critical endpoint in the continuum limit and critical endline at $N_T=6$ of the finite temperature phase transition of QCD with clover fermions, *Proceeding of Science (Lattice 2019)* 053.
10. A. Bazavov, D. Bollweg, H.-T. Ding, P. Enns, J. Goswami, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, R. Larsen, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, and P. Steinbrecher (HotQCD Collaboration), Skewness, kurtosis, and the fifth and sixth order cumulants of net baryon-number distributions from lattice QCD confront high-statistics STAR data, *Phys. Rev. D* 101, no. 7 (2020) ref. 074502.
11. Heng-Tong Ding, Prasad Hegde, Olaf Kaczmarek, Frithjof Karsch, Anirban Lahiri, Sheng-Tai Li, Swagato Mukherjee, Hiroshi Ohno, Peter Petreczky, Christian Schmidt, and Patrick Steinbrecher (HotQCD collaboration), The chiral phase transition temperature in (2+1)-flavor QCD, 18th International Conference on Hadron Spectroscopy and Structure, pp.672-677.
12. A.-L. Lorenz, H.-T. Ding, O. Kaczmarek, H. Ohno, H. Sandmeyer, and H.-T. Shu, Thermal modifications of quarkonia and heavy quark diffusion from a comparison of continuum-extrapolated lattice results to perturbative QCD, *Proceeding of Science (Lattice 2019)* 207.
13. S. Akiyama, D. Kadoh, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, Tensor renormalization group approach to four-dimensional complex ϕ^4 theory at finite density, *JHEP* 2009 (2020) 177.
14. S. Akiyama, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu–Jona-Lasinio model with tensor renormalization group, *JHEP* 2101 (2021) 121.
15. S. Akiyama, Y. Kuramashi, and Y. Yoshimura, Phase transition of four-dimensional lattice ϕ^4 theory with tensor renormalization group, arXiv:2101.06953.
16. S. Akiyama and Y. Kuramashi, Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model, arXiv:2105.00372.
17. H. Adachi, G. Ishiki, S. Kanno and T. Matsumoto, Laplacians on Fuzzy Riemann Surfaces, arXiv:2103.09967 [hep-th]

18. H. Adachi, G. Ishiki, K. Saito and T. Matsumoto, Matrix regularization for Riemann surfaces with magnetic fluxes, Phys. Rev. D 101 (2020) 10, 106009 [arXiv:2002.02993 [hep-th]]
19. G. Ishiki and T. Matsumoto, Diffeomorphisms and approximate invariants on fuzzy sphere, PoS CORFU2019 (2020) 193.
20. H. Watanabe, G. Bergner, N. Bodendorfer, S. S. Funai, M. Hanada, E. Rinaldi, A. Schäfer, and P. Vranas, Partial deconfinement at strong coupling on the lattice, JHEP 02 (2021) 004 [arXiv:2005.04103 [hep-th]].

〈学位論文〉

[博士論文]

1. 馬場 惇
「Measurement of Chiral Susceptibility in Lattice QCD with Wilson Fermion using Gradient Flow」

[修士論文]

1. 石井 雄太
「ターゲット空間分割によるエンタングルメント・エントロピーの定式化」
2. 井元 航希
「テンソル繰り込み群を用いた $O(3)$ 非線形シグマモデルの解析」
3. 新津 優弘
「開弦場の運動方程式の厳密解」
4. 三好 拓己
「有限体積スケーリングによる 2次元イジング場理論のコンフォーマル対称性の検証」
5. 吉川 浩史
「行列模型を用いた M 理論のローレンツ共変な定式化」

〈研究成果発表（講演）〉

[国際会議]

1. Nobuyuki Ishibashi, 「SFT for noncritical strings revisited」, (招待講演)
Workshop on fundamental aspects of string theory (ICTP-SAIFR, Sao Paulo, Brazil (online), June 1-12 2020)

2. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, and T. Yamazaki, 「Nucleon structure at physical point from 2+1 flavor Lattice QCD」 ,
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (Online, Aug. 4-7, 2020).
3. S. Akiyama, D. Kadoh, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura, 「Tensor renormalization group approach to four-dimensional complex ϕ^4 theory at finite density」 ,
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (Online, Aug. 4-7, 2020).
4. Hiromasa Watanabe, 「Partial deconfinement for some bosonic matrix models」 ,
Asia-Pacific Symposium for Lattice Field Theory (APLAT2020) (Online, Aug. 4-7, 2020).
5. H. Ohno, 「In - medium properties of heavy quarks on the lattice」 (招待講演),
Extreme Nonequilibrium QCD (Online, Oct. 5-9, 2020).
6. Kazuyuki Kanaya, 「Thermodynamic observables in (2 + 1)-flavor QCD applying the gradient-flow method」 ,
CCS 12th international symposium 2020 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (CCS, Tsukuba, Japan (online), Oct. 6, 2020).
7. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」 ,
Strings and Fields 2020 (Online, Nov. 16-20, 2020).
8. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, and T. Yamazaki, 「Nucleon structure with 2+1 flavor lattice QCD at physical quark mass」 ,
International School for Strangeness Nuclear Physics(SNP school 2020) (J-PARC, Tokai, Dec. 2-5, 2020).
9. Shinichiro Akiyama, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu–Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」 ,
KEK Theory Workshop 2020 (Online, Dec. 15-18, 2020).
10. Hiromasa Watanabe, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」 ,
KEK Theory Workshop 2020 (Online, Dec. 15-18, 2020)
11. Shinichiro Akiyama, 「Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu–Jona-Lasinio model with tensor renormalization group」 ,

YITP workshop Quantum Computing for quantum field theories (Online, Jan. 5-8, 2021).

[国内学会、研究会]

1. 金谷和至, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the SFtX method based on the gradient flow」, 理化学研究所計算科学研究センター (R-CCS) セミナー (理化学研究所, 神戸市, 兵庫県 (online), 2020年5月20日).
2. 谷口裕介, 金谷和至 (Y. Taniguchi, K. Kanaya, A. Baba, S. Ejiri, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda), 「物理的なクォーク質量におけるエネルギー運動量テンソルの研究」, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (JHPCN) 第12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 品川区, 東京都 (online), 2020年7月9日).
3. 鈴木博 (Hiroshi Suzuki, Kazuyuki Kanaya, Yusuke Taniguchi, Shinji Ejiri, Takashi Umeda, Masakiyo Kitazawa), 「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12回拠点シンポジウム (THE GRAND HALL, 品川区, 東京都 (online), 2020年7月9日).
4. 金谷和至, 「Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f = 2 + 1QCD$ 」, 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 2020年8月24日-26日).
5. 馬場惇, 「SFtX法を用いたカイラル感受率の測定」, 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 2020年8月24日-26日).
6. 秋山進一郎, 「テンソル繰り込み群による4次元有限密度複素スカラー場の理論の研究」, 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 2020年8月24日-26日).
7. 渡辺展正, 「Partial deconfinement for some bosonic matrix models」, 熱場の量子論とその応用2020 (TFQT 2020) (KEK, Tsukuba, Japan (online), 2020年8月24日-26日).
8. 秋山進一郎, 「テンソル繰り込み群による4次元有限密度複素スカラー場の理論の研究」, 素粒子若手オンライン研究会2020 (Online, 2020年8月26日-28日).
9. 渡辺展正, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」, 素粒子若手オンライン研究会2020 (Online, 2020年8月26日-28日).

10. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄吾, 山崎剛, 「物理点 $2+1$ フレーバー格子 QCD による核子構造研究」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
11. 馬場惇, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木遊, 鈴木博, 谷口裕介, 「SFtX 法を用いたカイラル感受率の測定」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
12. 金谷和至, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 「Improvement of the SFtX method based on the gradient flow in the study of finite temperature $N_f = 2 + 1$ QCD」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
13. 鈴木博, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木遊, 谷口裕介, 馬場惇, 「Small Flow time eXpansion (SFtX) 法による $2 + 1$ フレーバー QCD の熱力学」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
14. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 山下巧, 吉村友佑, 「テンソル繰り込み群による $3+1$ 次元有限密度 Nambu–Jona-Lasinio 模型の研究」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
15. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 松本高興, 「ベクトルスピノル場を用いたテンソル場の行列正則化」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
16. H. Watanabe, G. Bergner, N. Bodendorfer, S. S. Funai, M. Hanada, E. Rinaldi, A. Schäfer, P. Vranas, and M. Knaggs, 「Partial Deconfinement at Strong Coupling on the Lattice」, 日本物理学会 2020 年秋季大会 (筑波大学, つくば市, 茨城県 (online), 2020 年 9 月 14 日-17 日).
17. 谷口裕介, 金谷和至, 「勾配流法を用いたクォーク・グルオンプラズマの物性的研究」, 第 7 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, 品川区, 東京都 (online), 2020 年 10 月 30 日).
18. 鈴木博, 金谷和至, 谷口裕介, 江尻信司, 梅田貴士, 北沢正清, 馬場惇, 「ウィルソンフェルミオンに基づいた有限温度量子色力学の研究」,

第7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, 品川区, 東京都 (online), 2020年10月30日).

19. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄吾, 山崎剛, 「格子場の理論に基づく核子構造研究」(招待講演), 日本のスピン物理学の展望 (島根 (online), 2021年2月23-24日).
20. 金谷和至, 「Gradient flow に基づく SFtX 法による物理点 QCD の熱力学特性の研究」, 大阪大学サイバーメディアセンター 2020年度公募型利用制度成果報告会 (大阪大学吹田キャンパス, 茨木市, 大阪府 (online), 2021年3月10日).
21. 辻竜太郎, 青木保道, 石川健一, 藏増嘉伸, 佐々木勝一, 新谷栄吾, 山崎剛, 「核子内クォークの担う運動量及びヘリシティ割合の物理点格子 QCD 計算」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).
22. 馬場惇, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木遊, 鈴木博, 谷口裕介, 「SFtX 法を用いた Wilson fermion の下でのカイラル感受率の測定」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).
23. 江尻信司, 白銀瑞樹, 石見涼, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 梅田貴士, 「Small flow-time expansion 法による SU(3) 格子ゲージ理論の一次相転移点における潜熱と圧力差」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).
24. 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 吉村友佑, 「4次元 ϕ^4 理論のテンソル繰り込み群による解析」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).
25. 足立宏幸, 伊敷吾郎, 菅野聡, 松本高興, 「ファジー空間上のラプラス演算子」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).
26. 渡辺展正, 「Partial deconfinement of matrix model with fundamental matters」, 日本物理学会第76回年次大会 (Online, 2021年3月12日-15日).

〈受賞〉

1. 秋山 進一郎, 日本物理学会学生優秀発表賞 (素粒子論領域) 「テンソル繰り込み群による 3+1次元有限密度 Nambu–Jona-Lasinio 模型の研究」, 2020年9月

〈国際会議・研究会の実施〉

1. 渡辺展正, 「素粒子若手オンライン研究会」世話人
オンライン開催 (2020年8月26日 - 28日)
参加登録者数: 241人 (うち学生 161人、スタッフ・PD 80人)
世話人: 奥村傑、阿部慶彦、藤原素子、渡辺展正

〈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、日本物理学会誌編集委員長
6. 石橋延幸、日本物理学会理事
7. 石橋延幸、PTEP 編集委員