

3 各研究部門の報告

I. 素粒子物理研究部門

1. メンバー

教授	藏増 嘉伸、金谷 和至（学内共同研究員、数理解物質系特命教授）
准教授	石塚 成人、谷口 裕介、吉江 友照、 山崎 剛（学内共同研究員、数理解物質系）
助教	大野 浩史
研究員	浮田 尚哉、新谷 栄悟、吉村 友佑
学生	大学院生 5 名、学類生 6 名

2022 年 7 月 22 日、谷口裕介准教授が病氣療養中のところ永眠いたしました。生前は、活発な研究活動や熱心な学生指導で部門をもり立てていただきました。在りし日の元気な姿を偲びつつ、謹んでご冥福をお祈りしたいと思います。

2. 概要

当部門では、数理解物質系との密接な連携のもと、格子 QCD の大型シミュレーション研究を推進している。2021 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大型プロジェクト研究を推進した。2023 年度以降は、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）を中心に、プロジェクトを継続していく予定である。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)の後継機が 2024 年度中に導入される計画であり、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 の構築・整備を推進した。

なお、2022 年度は新型コロナウイルス COVID-19 の感染予防に注意しながら、少しずつ国際会議や国内学会・研究会が対面あるいはハイブリッド形式の開催へと移行した。また、日々

の大学活動においても対面での授業が推奨されるなど、ポストコロナ時代への歩みが進んでいる。

3. 研究成果

[1] PACS Collaboration による「富岳」および Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション（藏増、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田、新谷）

2021 年度に引き続き、2022 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 JCAHPC の Wisteria-Odyssey 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。

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。

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、今年度は(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がほぼ完了した。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（藏増、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田、新谷）

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の水色帯)。

我々の2020年度までの格子間隔0.085fmの計算から得られた $|V_{us}|$ (塗りつぶし赤四角)は、これまでの多くの計算結果(K_{l3} : $N_f=2+1+1$, $N_f=2+1$)より若干大きく、 K 中間子レプトニック崩壊から決定される $|V_{us}|$ (青丸、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、2021年度から格子間隔0.065fmの計算を重点的に行い(研究論文[A]-2, [B]-4, 10)、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。

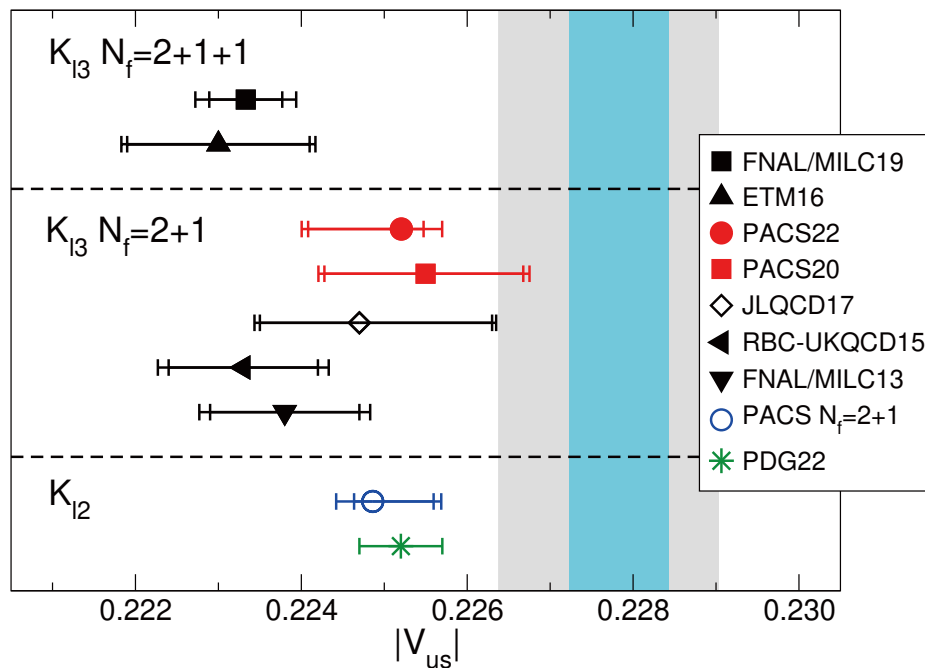


図1: $|V_{us}|$ の比較。赤丸印は我々の最新の結果(研究論文[A]-2)、赤四角印は我々の2020年の結果。水色帯と灰色帯はCKM行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測で、色の違いは用いた $|V_{ud}|$ の違い。灰色帯と水色帯はCKM行列のユニタリー性から求まる標準理論の予測。

[3] 現格子 QCD を用いた核子構造研究(蔵増、山崎、新谷)

陽子と中性子(核子)はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD

を用いて、核子構造に関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進める(研究論文[B]-3)とともに、核子スカラー電荷と核子テンソル電荷(研究論文[A]-1, [B]-1, 2)に加え核子構造関数に関する物理量計算を実行した。

[4] 中間子電磁的形状因子の直接微分計算法の開発研究 (山崎)

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、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この方法が機能することを確認した(研究論文[B]-6)。

[5] 有限体積効果を抑えた格子 QCD+QED 計算方法 (山崎)

近年の格子 QCD 計算では、強い相互作用に加え電磁気相互作用を取り入れた計算も実行されるようになった。しかし、このような計算には大きな有限体積効果が現れることが知られている。この電磁気相互作用に起因する有限体積効果を抑制する方法が近年提案され、実際の格子 QCD 計算により実験値を再現する荷電パイ中間子と中性パイ中間子質量差が計算された。大学院生福地、佐藤と、山崎は、この新しい方法を物理的なモデルを仮定したデータに適用し、単純に積分を有限和で置き換えた計算と比較し、有限体積効果が抑えられていることを確認した。また、この方法で本来は現れないと考えられるパラメータ依存性が小さいながら残る可能性を指摘し、その原因の考察も行った。

[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（金谷、谷口）

ビッグバン直後に実現したクォーク・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。また、それを地上で実現させる高エネルギー重イオン衝突実験も精力的に推進されている。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。

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。

[6-1] クォークが重い QCD の臨界クォーク質量

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。

先行研究ではアスペクト比 $LT=N_s/N_t$ (温度 T がほぼ一定のとき、空間サイズ L に比例する) で 4~7 の領域が研究されたが、臨界点の位置などについて、格子間隔依存性だけでなく、空間サイズ依存性も大きいことがわかっている。連続極限を議論するためには、まず空間サイズ無限大(熱力学極限)への外挿が必要である。そのための最も有力な方法は、Binder cumulant を用いた臨界スケーリングである。そこで、金谷は、新潟大学江尻信司准教授、大阪大学北澤正清助教(現：京都大学基礎物理学研究所講師)、九州大学鈴木博教授らと、大きな空間サイズでの臨界スケーリング研究を開始した。大格子で高統計を実現するために、重いクォークの効果ホッピングパラメータ展開(HPE)で取り入れた。

我々は、昨年度の研究(A. Kiyohara, M. Kitazawa, S. Ejiri, K. Kanaya, Phys. Rev. D104, 1144509 (2021))で、 $N_t=4$ 格子でアスペクト比 12 までの臨界スケーリングを研究した。図 2 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ある。Binder cumulant は最低次の有限空間サイズ効果を打ち消すように作られており、有限空間サイズ効果が最低次で表されるくらい小さければ、Binder cumulant は臨界点で系の空間サイズによらず一定値になるはずである。図より、空間サイズ依存性を取り除くためにはアスペクト比 9 以上が要求されることがわかった。また、交点の位置から、熱力学極限における臨界点を先行研究よりはるかに高い精度で決定することも可能になった。

並行して、昨年度の論文(N. Wakabayashi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, Prog. Theor. Exp. Phys. 2022, 033B05 (2022))で HPE の信頼性を研究し、 $N_t=4$ の臨界点近傍までなら上記研究で採用した低次の HPE で十分だが、連続極限に向けて N_t を大きくすると、より高次まで取り入れる必要があることを示した。さらに、計算時間をほとんど増やすことなく HPE の高次までの効果を有効的に取り入れる手法も開発した。

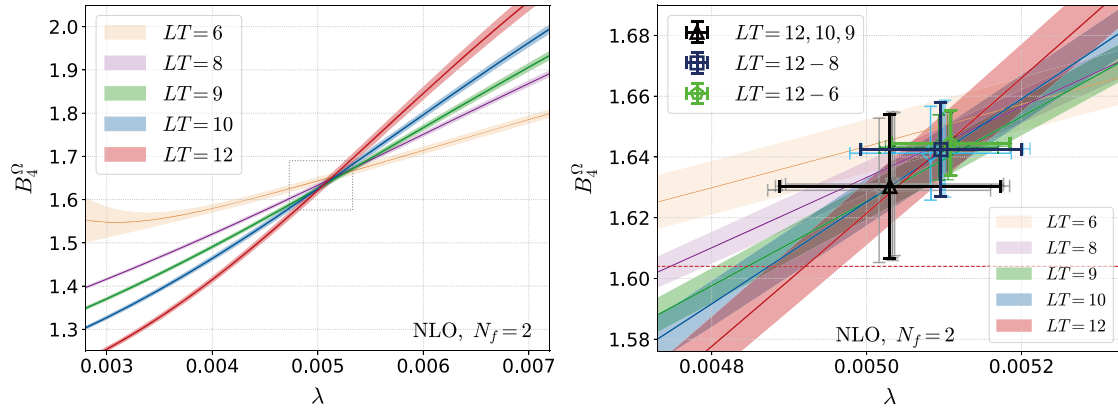


図 2: クォークが重い場合の 2+1 フレーバーQCD における、Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $N_t=4$ 格子の結果。 $\lambda=64N_c N_t \kappa^4$ はクォーク質量をコントロールするホッピング・パラメータ κ の関数で、クォークが軽くなると大きくなる。 $LT=N_s/N_t$ は格子のアスペクト比で、温度がほぼ一定の場合は、格子の空間サイズ L に比例する。右図は、左図の交点周辺を拡大したもの(A. Kiyohara et al., Phys. Rev. D104, 1144509 (2021))。

[6-2] $N_t=6$ 格子による研究

現在、上記 $N_t=4$ の研究を拡大し、我々で開発した HPE の高次までの効果を有効的に取り入れる手法を応用して、より連続極限に近い $N_t=6$ 格子、 $N_t=8$ 格子のシミュレーションを進めている。中間結果を国際会議等で発表した(研究論文[B]-5)。

図 3 に、 $N_t=4$ の図 2 に対応する $N_t=6$ の中間結果を示す。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。その原因として、空間サイズが小さい格子では、オーダーパラメータの分布が、クォークが重い極限における $Z(3)$ スピンの性質を残しており、それが $Z(2)$ 臨界スケーリングからのずれをもたらしていることが考えられる。他方、アスペクト比 10 以上の大きな空間サイズの結果は、誤差の範囲内で一致しているが、空間サイズとともに多少左に移動する傾向も示している。これは、オーダーパラメータにエネルギー変数がいくらか混入していることに由来している可能性がある。これらを解明するために、より精密な解析を進めている。

並行して、 $N_t=8$ のシミュレーションも行っている。 $N_t=4,6$ の結果と合わせて、連続極限に向けての傾向がまた、我々の手法は容易に有限密度の場合に拡張できるので、その方向にも研究を展開している。

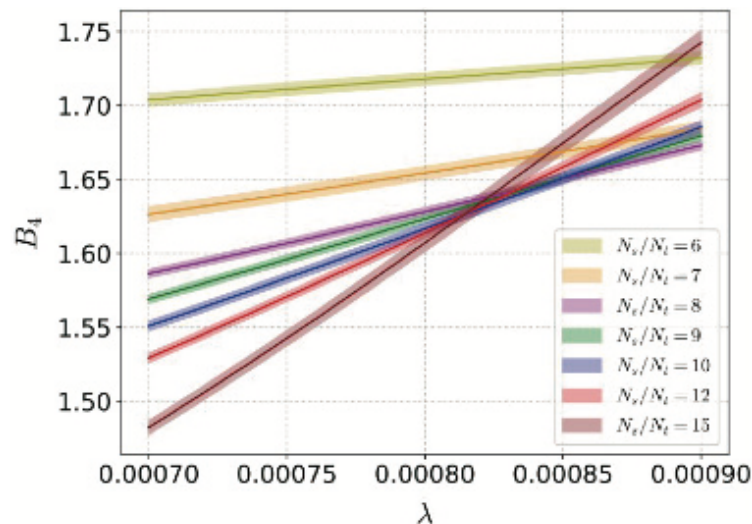


図 3: クォークが重い場合の 2+1 フレーバー QCD における、Binder cumulant のクォーク質量依存性。 $N_t=6$ 格子による結果 (国内学会 26)。

[6-3] Gradient flow に基づく SFtX 法を用いた有限温度 QCD の研究

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い。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基本的な物理量だが、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解消しなければ意味のある評価が出来なかった。

谷口、金谷は、九州大学鈴木博教授、大阪大学北澤正清助教(現：京都大学基礎物理学研究所講師)、新潟大学江尻信司准教授、梅田貴士准教授らと、Gradient flow(勾配流)に基づく SFtX 法(small flow-time expansion method)を応用して、これらの課題を克服した研究を推進している。

Gradient flow は、仮想的な時間パラメータを導入して、場の量を変形させる理論的手法で、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。鈴木博らが開発した 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、くりこみ操作や混合の除去無しに、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直接評価する。SFtX は、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、有用であることが示された。

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にも有効であることに着目し、2+1 フレーバーの動的な Wilson 型クォークを含む QCD に SFtX 法を応用した一連の研究を推進している。その第一段階として、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、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。我々はさらに、マッチング係数のくりこみスケールを適切に選ぶことで SFtX 法における外挿の安定性を大きく改善できることを示した。

[6-4] 物理点(2+1)-flavor QCD の熱力学

u, d クォークが現実よりやや重い場合に SFtX 法が有力であることを受けて、現実のクォーク質量(物理点)における $N_f=2+1$ 有限温度 QCD の研究を、SFtX 法を使って推進している。SFtX 法により、物理量の観測に関しては計算時間を大きく削減できているが、クォークが軽い物理点での配位生成には膨大な計算が要求され、大規模シミュレーションを系統的に遂行する必要がある。

物理点研究の第一段階として、まず、格子間隔 $a=0.08995(40)\text{fm}$ の場合に集中して研究している。PACS-CS Collaboration のゼロ温度物理点配位を利用した固定格子間隔法で、122–544 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た。2022 年度までに有限温度配位についてはある程度統計が蓄積され、相転移温度が 150 MeV 以下であることを示唆する中間結果を得た。この相転移温度は、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。

しかし、この解析の結果、熱力学量のくりこみで必要なゼロ温度配位の統計が不十分である可能性も示唆された。これは、SFtX 法で測定する物理量が空間的に広がっていることに対応して、自己相関時間が長くなってしまったためと思われる。そこで、2022 年度には、PACS-CS 配位に加えて、ゼロ温度配位生成を開始した。自己相関時間が長いことが確認されたため、現在もシミュレーションを継続している。

[7] 2+1 および 4 フレーバーQCD の臨界終点の探索（蔵増、大野）

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。

大野と蔵増は、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。2022 年度の研究成果としては、まず、O(a)改良されたウィルソン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、時間方向格子サイズ $N_t=8$ での計算を、複数の空間体積で進めた。その結果、1 次相転移点に対応するパラメータの範囲を絞り込むことができた。次に、4 フレーバーQCD の計算では、O(a)改良されたウィルソン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。そして、この $N_t=10$ の結果と、これまで得られた $N_t=4, 6, 8$ の結果を用いて、臨界温度(図 4 左)および臨界擬スカラー中間子質量(図 4 右)に対する連続極限への外挿を行った。その結果、連続極限における 4 フレーバーQCD の臨界温度は、3 フレーバーQCD のものと非常に近いことが分かった。一方、連続極限における 4 フレーバーQCD の臨界擬スカラー中間子質量は、3 フレーバーのものよりも大きいことが分かった。ただし、臨界温度の連続極限への収束性は非常によい一方で、臨界擬スカラー中間子質量については格子間隔依存性が大きく、より信頼できる連続極限の結果を得るためには、より小さい格子間隔でのシミュレーションが必要であることが示唆された。

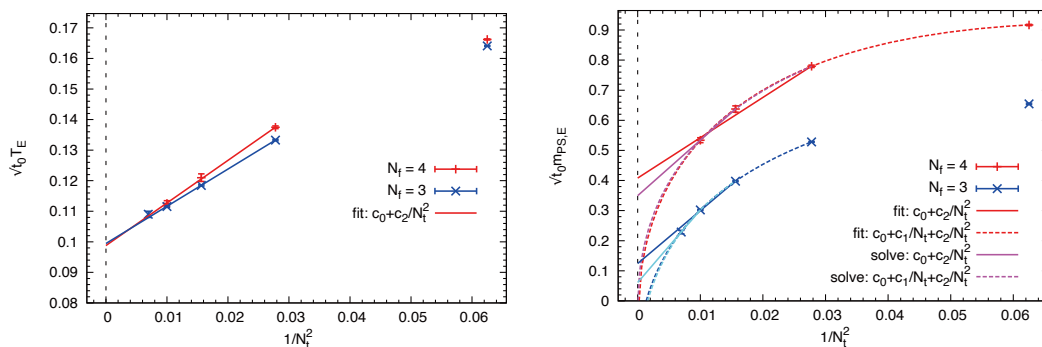


図 4: (左)3 フレーバーおよび 4 フレーバーQCD の臨界温度とその連続極限。(右)3 フレーバーおよび 4 フレーバーQCD の臨界擬スカラー中間子質量とその連続極限。

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

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

大野は、大阪国際工科専門職大の富谷助教と気象大学校の高橋講師とともに、スパースモデリングを用いたクォークoniumスペクトル関数の推定法の開発を開始した。2022 年度は、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調べた。そして得られた結果をもとに、改良や調整すべき点について議論した。今後は、テストデータを用いた改良・調整に目途が付き次第、実際のクォークoniumのデータに対する解析に移る予定である。

[9] 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（蔵増）

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、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、(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。

2022 年度は、上記課題(i)~(v)のうち、特に課題(i)に関連して大きな進展があった。われわれは、テンソル繰り込み群を用いて(3+1)次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルの臨界終点の決定に成功した。図 5(左)は、(3+1)次元 Z_2 ゲージヒッグスモデルの $\mu=1$ (μ は化学ポテンシャルを表す)において、リンク変数の期待値 $\langle L \rangle$ をパラメータ β (逆ゲージ結合定数)と η (ゲージ不変なスピン-スピン結合定数)の関数としてプロットしたものである。 $\langle L \rangle$ の跳びは一次相転移を表しているが、その跳びが消失する点が臨界終点となる。図 5(右)は、臨界終点を決定するために、リンク変数の期待値の跳び $\Delta\langle L \rangle$ をパラメータ β と η の関数として fit し、 $\Delta\langle L \rangle=0$ となる臨界終点 $(\beta_c, \eta_c)=(0.3053(2), 0.1595(3))$ を外挿で求めたものである。同様の計算を $\mu=0, 2$ でも実行し、それぞれの臨界終点を決定することに成功した。また、ベンチマークテストとして(2+1)次元のゼロ密度の Z_2 ゲージヒッグスモデルの臨界終点を計算し、他の計算手法で得られた高精度結果との一致を確認した。本研究は、テンソル繰り込み群を 4 次元ゲージ理論に適用した最初の成功例であり、将来の有限密度 QCD の相構造解析に向けた重要な布石となる成果である。

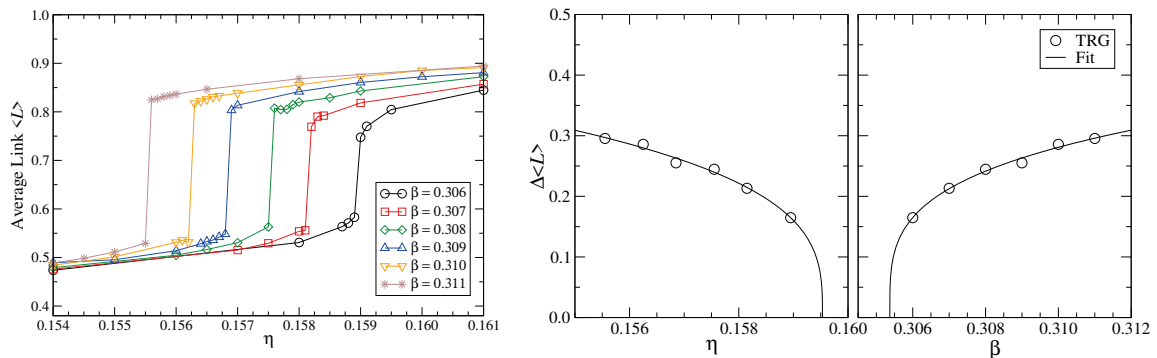


図 5: (左) $\mu=1$ におけるリンク変数の期待値 $\langle L \rangle$ を $0.306 \leq \beta \leq 0.311$ の範囲で η の関数としてプロットしたもの。 $D_{\text{cut}}=48$ で格子サイズは $V=32^4$ 。(右) リンク変数の期待値の跳び $\Delta \langle L \rangle$ をパラメータ β と η の関数として fit したもの(研究論文[A]-3)。

[10] 素粒子標準模型を超えた理論の探索 (山崎)

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。2022 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検討、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。

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

JLDG(Japan Lattice Data Grid)は、国内の格子 QCD 及び関連分野の研究者・研究グループが、QCD 配位等の貴重なデータを大域的かつ効率的に共有し、研究の促進と計算資源の有効活用を図る事を目的に構築されたデータグリッドである。現在 JLDG には、国内の主要な 8 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 VPN 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 2022 年 6 月より、吉江に代わり大野が務めることとなった。

JLDG は、2008 年に実運用を開始して以来 15 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。2022 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。

- 管理サーバの更新：CentOS6, 8 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。
- Pegasus におけるクライアント機能導入作業：2023 年 1 月から運用が開始された筑波大 CCS 拠点の新スパコン Pegasus に、JLDG クライアント機能を導入するための作業を開始した。
- 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、格子 QCD 研究に関する国際会議「Lattice 2022」において plenary talk を行った他、同会議でワークショップを開催した。これにより、ILDG の再活性化を周知すると共に、今後の ILDG のあり方についての議論を深めた。なお、この活動は、吉江が著者の一人となっている会議録(研究論文[B]-8)にまとめられた。

4. 教育

[修士論文]

1. 福地 幸太

「有限体積効果を抑えたハドロン質量の QCD+QED 計算手法」

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

受賞

1. 第 9 回成果報告会における HPCI 利用研究課題優秀成果賞、山崎剛(代表)、藏増嘉伸、石塚成人、浮田尚哉、新谷栄悟、他 4 名「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」 2022 年 10 月

2. 第9回成果報告会における HPCI 利用研究課題優秀成果賞、藏増嘉伸(代表)、秋山進一郎、吉村友佑「テンソルネットワーク法を用いた素粒子物理学の研究」2022 年 10 月

外部資金

1. 藏増嘉伸(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(A)、令和2年度採択、「テンソルネットワーク法による計算物理学の新展開」、11,900 千円
2. 大野浩史(分担)、科学研究費補助金・学術変革領域研究(A)(計画)、令和4年度採択、「計算物理学と機械学習の融合」、11,200 千円
3. 金谷和至(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(C)、令和4年度採択、「グラジエントフローによる QCD 有限温度相転移の研究」、800 千円
4. 山崎剛(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成31年度採択、「強い相互作用の第一原理計算による軽ハドロン形状因子の総合理解」、3,800 千円
5. 浮田尚哉(代表)、科学研究費補助金・基盤研究(C)、令和2年度採択、「機械学習を取り入れた格子 QCD による超精密物理量測定のための計算手法の開発と実践」、900 千円
6. 新谷栄悟(代表)、科学研究費補助金・新学術領域研究(公募)、令和3年度採択、「陽子寿命の理論予想に関わる行列要素の格子 QCD 計算」、900 千円

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Natsuki Tsukamoto, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “Nucleon isovector couplings in $N_f=2+1$ lattice QCD at the physical point”, Phys. Rev. D 106 (2022) No.9, ref.094505, pp.1-25.
2. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yamazaki, T. Yoshié, “K13 form factors at the physical point: Toward the continuum limit”, Phys. Rev. D 106 (2022) No.9, ref.094501, pp.1-25.
3. S. Akiyama and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z2 gauge-Higgs model at finite density”, JHEP 2205 (2022) ref.102, pp.1-20.
4. X. Luo and Y. Kuramashi, “Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional SU(2) principal chiral model at finite density”, Phys. Rev. D 107 (2023) No.9, ref.094509, pp.1-7.

B) 査読無し論文

1. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “Nucleon isovector tensor charge from lattice QCD with physical light quarks”, JPS Conference Proceedings 37 (2022) ref.020202, pp.1-5.
2. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical point”, EPJ Web of Conferences 274 (2022) ref.06009, pp.1-8.
3. PACS Collaboration: Ryutaro Tsuji, Yasumichi Aoki, Ken-ichi Ishikawa, Yoshinobu Kuramashi, Shoichi Sasaki, Eigo Shintani, and Takeshi Yamazaki, “Towards the continuum limit of nucleon form factors at the physical point using lattice QCD”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.127, pp.1-9.
4. PACS Collaboration: T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yoshié, “Momentum transfer dependence of kaon semileptonic form factor on $(10 \text{ fm})^4$ at the physical point”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.425, pp.1-9.
5. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, and Naoki Wakabayashi, “Phase structure and critical point in heavy-quark QCD”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.177, pp.1-9.
6. PACS Collaboration: Kohei Sato, Hiromasa Watanabe, Takeshi Yamazaki, “Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.122, pp.1-9.
7. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, and Yusuke Namekawa, “Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.284, pp.1-9.
8. F. Karsch, H. Simma, and T. Yoshié, “The International Lattice Data Grid -- towards FAIR data”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.244, pp.1-16.
9. G. Bali, R. Bignell, A. Francis, S. Gottlieb, R. Gupta, I. Kanamori, B. Kostrzewa, A. Kotov, Y. Kuramashi, R. Mawhinney, C. Schmidt, W. Söldner, and P. Sun, “Lattice gauge ensembles and data management”, Proceedings of Science (LATTICE2022) (2023) ref.203, pp.1-23.
10. PACS Collaboration: T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, and T. Yoshié, “Kaon semileptonic form factors at the

physical quark masses on large volumes in $N_f=2+1$ lattice QCD”, Journal of Physics: Conference Series 2446 (2023) 1, ref.012007, pp.1-5.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. T. Yamazaki, 「Challenges and progress in multi-nucleon calculations with Lattice QCD」, Next-Generation Computing for Low-Energy Nuclear Physics: from Machine Learning to Quantum Computing (IQuS, University of Washington, Seattle, USA, Aug. 15-19, 2022).
2. T. Yamazaki, 「PACS10 project」, Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (R-CCS, Riken, Kobe, Feb. 15-17, 2023).

B) 一般講演

1. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「Nucleon scalar and tensor couplings from lattice QCD at the physical point」, XVth Quark Confinement and the Hadron Spectrum (University of Stavanger, Norway, Aug. 1-6, 2022).
2. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, 「Phase structure and critical point in heavyquark QCD at finite temperature」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).
3. Hideo Matsufuru, Issaku Kanamori, Kazuyuki Hideo Matsufuru, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Tatsumi Aoyama, Yusuke Namekawa, 「Bridge++ 2.0: Benchmark results on supercomputer Fugaku」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).
4. Y. Kuramashi for PACS Collaboration, 「Gauge Ensembles from PACS Collaboration」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).
5. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yoshié for PACS Collaboration, 「Momentum transfer dependence of kaon semileptonic form factor on $(10 \text{ fm})^4$ at the physical point」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).
6. K. Sato, H. Watanabe, T. Yamazaki, 「Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).

7. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「Towards the continuum limit of nucleon form factors at the physical point using lattice QCD」, The 39th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2022) (Bonn, Germany, Aug. 8-13, 2022).
8. Kazuyuki Kanaya, Ryo Ashikawa, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, and Naoki Wakabayashi, 「Critical point in heavy-quark QCD at finite temperature」, Tsukuba Global Science Week (TGSW2022) (Univ. of Tsukuba, Tsukuba, Japan (online), Sep. 27, 2022).
9. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, 「Thermodynamics of 2+1 flavor QCD with the gradient flow」 (ポスター発表), The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 13-14, 2022).
10. H. Nemura, Y. Akahoshi, T. Aoyama, I. Kanamori, K. Kanaya, H. Matsufuru, Y. Namekawa, 「Implementation of Lattice QCD common code to large scale parallel supercomputer with manycore and GPU architecture」 (ポスター発表), The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 13-14, 2022).
11. T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, N. Ukita, H. Watanabe, 「Search for physics beyond the standard model from 2+1 Flavor Lattice QCD with the physical quark masses」 (ポスター発表), The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 13-14, 2022).
12. K. Sato, H. Watanabe, K. Sato, H. Watanabe, T. Yamazaki, 「Calculation of the pion charge radius from an improved model-independent method」 (ポスター発表), The 30th Anniversary Symposium of the Center for Computational Sciences at the University of Tsukuba: 14th international symposium 2022 on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, Oct. 13-14, 2022).

13. Masakiyo Kitazawa, Ashikawa Ryo, Shinji Ejiri, Kazuyuki Kanaya, Hiroshi Suzuki, Naoki Wakabayashi, 「Lattice study of the critical point in heavy quark QCD」, Workshop on Critical Point and Onset of Deconfinement (CPOD2022) (Switzerland (online), Nov. 22-Dec. 2, 2022).
14. Tatsumi Aoyama, Issaku Kanamori, Kazuyuki Kanaya, Hideo Matsufuru, Yusuke Namekawa and Keigo Nitadori, 「Benchmark result of Lattice QCD code set Bridge++ 2.0 on Fugaku」, The 5th R-CCS International Symposium "Fugaku and Beyond: Simulation, BigData and AI in the Exascale Era" (R-CCS, RIKEN, Kobe, Japan (hybrid), Feb. 6-7, 2023).
15. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「Precision computation of nucleon structure from lattice QCD with all-mode-averaging」 (ポスター発表), The 5th R-CCS International Symposium "Fugaku and Beyond: Simulation, BigData and AI in the Exascale Era" (R-CCS, RIKEN, Kobe, Japan (hybrid), Feb. 6-7, 2023).
16. R. Tsuji, Y. Aoki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, S. Sasaki, E. Shintani, T. Yamazaki, 「Precision computation of nucleon scalar and tensor couplings at the physical point」 (ポスター発表), Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (R-CCS, Riken, Kobe, Feb. 15-17, 2023).
17. X. Luo and Y. Kuramashi, 「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional SU(2) principal chiral model at finite density」 (ポスター発表), Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (R-CCS, Riken, Kobe, Feb. 15-17, 2023).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 山崎剛, 藏増嘉伸, 石塚成人, 浮田尚哉, 新谷栄悟, 石川健一, 滑川裕介, 中村宜文, 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9回 HPCI システム利用研究課題成果報告会(Online, 2022 年 10 月 27 日-28 日).
2. 大野浩史, 「Japan Lattice Data Grid」, 第25回共同利用機関におけるセキュリティーワークショップ(滋賀医科大学, 大津(online), 2022 年 12 月 13 日).
3. 大野浩史, 「格子 QCD 計算でひも解く高エネルギー重イオン衝突の物理」, 日本物理学会 2023 年春季大会一般シンポジウム講演(Online, 2023 年 3 月 22-25 日).

B) その他の発表

1. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, 「改良されたモデルに依存しない方法による形状因子の計算」, 原子核三者若手夏の学校 2022(Online, 2022 年 8 月 6 日-9 日).

2. 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, 「格子 QCD を用いた K 中間子セミレプトニック崩壊位相積分計算」, 日本物理学会 2022 年秋季大会(岡山理科大学岡山キャンパス, 2022 年 9 月 6 日-8 日).
3. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, 「改良されたモデルに依存しない方法によるパイ中間子電荷半径計算」, 日本物理学会 2022 年秋季大会(岡山理科大学岡山キャンパス, 2022 年 9 月 6 日-8 日).
4. 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, 「核子形状因子の物理点格子 QCD 計算」, 日本物理学会 2022 年秋季大会(岡山理科大学岡山キャンパス, 2022 年 9 月 6 日-8 日).
5. 芦川涼, 北沢正清, 江尻信司, 金谷和至, 「重クォーク QCD 臨界点の $N_f=6$ における格子数値解析」, 日本物理学会 2022 年秋季大会(岡山理科大学岡山キャンパス, 2022 年 9 月 6 日-8 日).
6. 羅梟, 藏増嘉伸, 「テンソル繰り込み群の $SU(2) \times SU(2)$ principal chiral model への応用」, 日本物理学会 2022 年秋季大会(岡山理科大学岡山キャンパス, 2022 年 9 月 6 日-8 日).
7. 芦川涼, 北沢正清, 江尻信司, 金谷和至, 「重クォーク QCD 臨界点の格子数値解析: 微小格子間隔かつ大体積での解析」, 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2022 年 9 月 20 日-22 日).
8. 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有限密度格子 QCD の臨界点決定のためのホッピングパラメータ展開」, 熱場の量子論とその応用 2022 (TFQT 2022) (京都大学基礎物理学研究所, 京都, 2022 年 9 月 20 日-22 日).
9. Kazuyuki Kanaya, Shinji Ejiri, Masakiyo Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, 「Gradient flow による物理点 QCD の熱力学」, 第 9 回 HPCI システム利用研究課題成果報告会(Online, 2022 年 10 月 27 日-28 日).
10. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, 「改良されたモデルに依存しないパイ中間子電荷半径の解析」(ポスター発表), 計算物理春の学校 2023(沖縄県市町村自治会館, 沖縄, 2023 年 3 月 15 日).
11. 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 に基づく核子軸性形状因子の研究」, 日本物理学会 2023 年春季大会(Online, 2023 年 3 月 22-25 日).
12. 佐藤航平, 渡辺展正, 山崎剛, 「パイ中間子電荷半径のモデルに依存しない解析と系統誤差の評価」, 日本物理学会 2023 年春季大会(Online, 2023 年 3 月 22-25 日).

13. 芦川涼, 北沢正清, 江尻信司, 金谷和至, 「 $N_t=6$ における重クォーク QCD 臨界点の精密測定」, 日本物理学会 2023 年春季大会(Online, 2023 年 3 月 22-25 日).
14. 江尻信司, 芦川涼, 金谷和至, 北沢正清, 「有限温度格子 QCD の重クォーク領域での一次相転移の終点の化学ポテンシャル依存性」, 日本物理学会 2023 年春季大会(Online, 2023 年 3 月 22-25 日).

(4) 著書、解説記事等

1. 藏増嘉伸, 「テンソルネットワークがつなぐ素粒子物理学と物性物理学」, 数理科学 2023 年 1 月号, サイエンス社

7. 異分野間連携・産学官連携・国際連携・国際活動等

異分野間連携（センター内外）

1. 計算基礎科学連携拠点 <http://www.jicfus.jp/jp/>

国際連携・国際活動

1. International Lattice Data Grid (ILDG)
2. <http://ildg.sasr.edu.au/Plone>
3. Japan Lattice Data Grid (JLDG)
4. <http://www.jldg.org/jldg/>, <http://ws.jldg.org/QCDArchive/index.jsp>

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 「計算物理春の学校 2023」
沖縄県市町村自治会館, 那覇(ハイブリッド), 2023 年 3 月 13 日-15 日
参加国数: 5, 参加者数(内対面参加): 369 (155)
世話人: 大久保毅(東京大学), 大野浩史(筑波大学), 柏浩司(福岡工業大学), 川久保亮(QunaSys), 品岡寛(埼玉大学), 下川統久朗(OIST), 田中章詞(RIKEN AIP/iTHEMS), 富谷昭夫(大阪国際工科専門職大学 IPUT Osaka), 永井佑紀(JAEA), 二村保徳(筑波大学), 水上市(大阪大学), 和田健太郎(QunaSys)
ウェブページ: https://hohno0223.github.io/comp_phys_spring_school2023/
Youtube チャンネル: https://www.youtube.com/@comp_phys_spring_school2023
2. 「物理屋のための機械学習講義」
対面/オンライン開催, 2023 年 1 月 12 日・26 日(全 2 回)
登録者数: 191 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),
二村保徳(筑波大)

ウェブページ: <https://akio-tomiya.github.io/lectures4mlphys/>

Youtube チャンネル: <https://www.youtube.com/@lectures4mlphys>

9. 管理・運営

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

10. 社会貢献・国際貢献

1. 藏増嘉伸、ILDG board member
2. 大野浩史、JLDG 管理グループ代表(前任者: 吉江友照)