

3 各研究部門の報告

1. 素粒子物理研究部門

1. メンバー

教授	藏増 嘉伸、青木 慎也（客員研究員）、金谷 和至（共同研究員）
准教授	石塚 成人、谷口 裕介、吉江 友照、根村 英克、山崎 剛（共同研究員）
助教	大野 浩史（国際テニュアトラック）
研究員	浮田 尚哉、齋藤 華、佐々木 健志、滑川 裕介、山下 巧、吉村 友佑
学生	大学院生 8 名、学類生 5 名

2. 概要

当部門では、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。当部門の研究者の大半が参加する主要プロジェクトであった HPCI 戦略プログラム分野 5 研究開発課題 1 「格子 QCD による物理点でのバリオン間相互作用の決定」は、2015 年度で終了した。2016 年秋からは、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、「京」を超える国内最高性能システム）が稼働を開始した。本年度は、筑波大学を中心とした PACS Collaboration を組織し、OFP を用いた新たなプロジェクト研究を開始した。これと並行して、有限温度・有限密度 QCD の研究、 $K \rightarrow \pi\pi$ 崩壊におけるハドロン行列要素計算、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、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・研究開発が始まっている。現在 9 つの重点課題が設定されており、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・宇宙物理分野を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、当部門も分担機関として参加している。

3. 研究成果

【1】 PACS Collaboration による Oakforest-PACS を用いた大規模シミュレーション(蔵増、石塚、谷口、山崎、吉江、浮田、滑川)

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、「京」コンピュータを抜いて現在日本最速のスーパーコンピュータである。本年度は、筑波大学を中心とした PACS Collaboration を組織し、OFP を用いた新たなプロジェクト研究を開始した。

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。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。

2016 年度前半は、OFP での大規模計算へ向けて主に Wilson クォーク作用における改良係数の決定と物理点のチューニングを行った。秋以降に OFP の試験運用が開始されたことに合わせて、格子カットオフ=2.33GeV で $(10\text{fm})^3$ 超の空間体積を持つ 2+1 フレーバー QCD のゲージ配位生成を開始した。物理量の本格計算は 2017 年度以降になる見込みである。

【2】 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)

蔵増、山崎は理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長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、近似を排した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) よりもかなり重いものを用いていた。この成果を踏まえ、「京」で生成された 96^4 格子サイズのゲージ配位を用いた物理点近傍での軽原子核束縛エネルギー計算を行なっている。現段階では統計的に有意な結果は得られていないが、今後統計誤差を小さくするために計算を継続している。

また、これまでの計算に含まれる可能性のある励起状態からの系統誤差について、重いクォーク質量を用いて調査を行った（論文 B-3）。図 1 には、指数型演算子とウォール型演算子を用いて計算した、有効核子質量の二倍 ($2m_{\text{eff}}$) と有効二核子エネルギー (E_{eff}) を示した。異なる演算子の結果は、小さな虚時間の領域では異なる値を取るが、それぞれの結果が虚時間に依らなくなる領域では一致している。この結果から、異なる演算子から求められた結果は一致すること、つまり励起状態の系統誤差は、 $2m_{\text{eff}}$ と E_{eff} の両方が虚時間に依らなくなる領域まで精度良く計算できれば十分抑えられることを示した。これまでの計算で用いた演算子は図の指数型演算子に対応するため、相対的に小さな虚時間領域から励起状態の系統誤差が抑えられた結果が得られていたと考えられる。

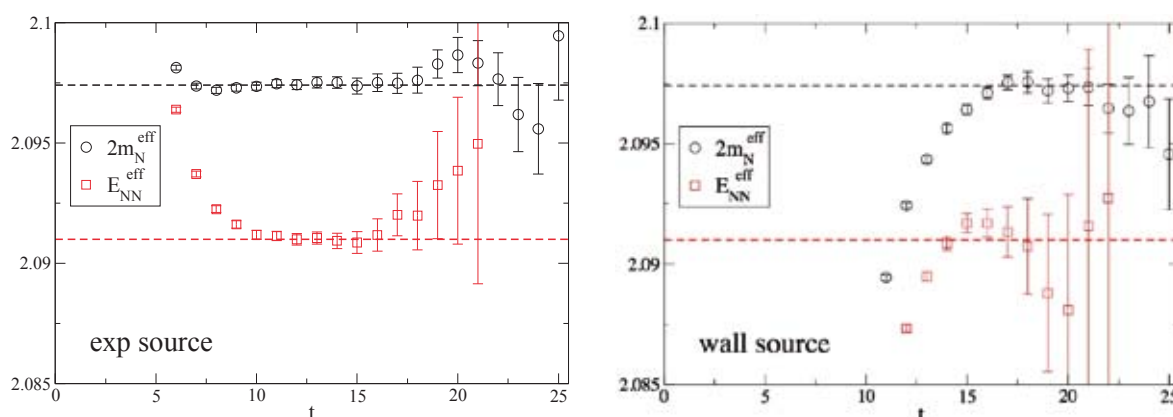


図 1：指数型演算子（左）とウォール型演算子（右）を用いた有効核子質量の二倍 ($2m_{\text{eff}}$) と有効二核子エネルギー (E_{eff})。横軸は虚時間。破線は指数型演算子から得られた値を示す。

【3】 格子QCDを用いた核子構造研究（藏増、山崎）

陽子と中性子（核子）はクォークの束縛状態であり、その構造を詳細に調べるためには、強い相互作用の第一原理計算である格子 QCD を用いた計算が必要である。これまでに格子 QCD を用いて、核子構造に関する核子形状因子の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い。この実験値との不一致の主な原因は、計算に用いられたクォーク質量が現実のものよりも大きいためであると考えられている。

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、理研計算科学研究機構（AICS）宇川副機構長とともに、PACS Collaboration において、この原因を取り除いた計算である、現実のクォーク質量に極めて近いパラメータ（ π 中間子質量 145MeV）での核子形状因子計算を行なった（論文 B-1）。図 2 は 200 配位での Dirac 核子形状因子の結果である。クォーク質量が大きなこれまでの計算結果とは異なり、特に小さな運動量移行の領域で実験値に良く一致した結果が得られている。当初の目標であった 200 配位の計算が終了したので、今後軸性カレントに関する形状因子の解析などを行い、必要なデータを揃え、論文としてまとめる予定である。

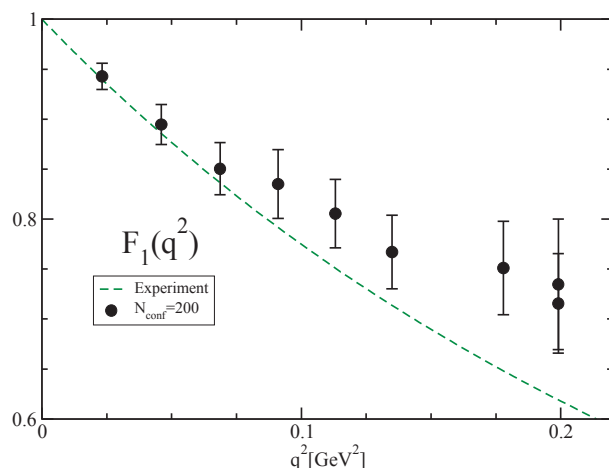


図 2 : Dirac 核子形状因子。横軸は運動量移行、破線は実験値を表す。

【4】 格子 QCD を用いた π 中間子形状因子の計算 (山崎)

山崎は、大学院生 (博士後期課程 1 年) 賀数とともに、PACS Collaboration において、現実的なクォーク質量での π 中間子電磁形状因子の計算を行った。この形状因子からは π 中間子の平均二乗荷電半径を見積もることができ、 π 中間子の構造を解明するためには、非常に重要な物理量である。しかし、これまでの多くの π 中間子電磁形状因子の計算では、現実よりも大きなクォーク質量を用いていたため、実験値を再現できていなかった。現実的なクォーク質量を用いた本計算から、実験値を再現する形状因子の結果が得られた (論文 B-2)。さらに、この結果にカイラル摂動論の公式を使った解析を行い、平均二乗荷電半径も見積もった。今後、系統誤差の見積もりなどを行った後、研究成果を論文としてまとめる予定である。

【5】 チャームクォーク系の研究 (滑川)

滑川は、京コンピュータにて生成されたゲージ配位を用いて、チャームクォーク系のシミュレーションを行った。Smearing と呼ばれるゲージ場の平滑化操作により、特に繰り込み因子の誤差が大きく削減されることを確認できた。この結果、 η 。崩壊定数及びチャームクォーク質量を高精度で計算することが可能になった。他方、チャーモニウムの超微細構造では、有限格子間隔誤差が 10% 程度と予想に反して大きいことが判明した。格子間隔がゼロの連続極限值を求める必要性が定量的に明らかとなった。

【6】 有限温度・有限密度 QCD の研究 (WHOT-QCD Collaboration : 金谷、谷口)

有限温度・有限密度 QCD の相構造と、高温高密度相における QGP (Quark Gluon Plasma) の性質の精密な理解は、初期宇宙の物質進化や物質創成メカニズムの解明への重要なステップだが、終状態に数千個以上の粒子を含む複雑な重イオン衝突実験データから QGP 生成の明確な証

拠とその熱力学特性を引き出すためには、格子QCDによるQCD第一原理からの理論計算が不可欠である。格子QCDの大規模シミュレーションによる有限温度・有限密度QCDの研究を行い、相構造の解明とクォーク物質の熱力学的性質の計算を遂行し、またそのための計算手法開発を進めた。

(1) 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、谷口らは、有限温度・有限密度 QCD 相構造とクォーク物質の熱力学的諸性質を、ウィルソン型格子クォークを用いた格子 QCD シミュレーションにより導くことを目的として、新潟大学江尻信司准教授、広島大学梅田貴士准教授、九州大学鈴木博教授、大阪大学北沢正清助教らとの共同研究を引き続き推進した。2016 年度は、グラジエントフロー法を応用した研究を大きく進展させた。また、多重点再重み付け法とヒストグラム法を使った手法開発も進め、その応用として、QCD のグルオン部分である SU(3) ゲージ理論で 1 次相転移点における潜熱の研究や、 $N_f=2$ (2 フレーバー) QCD のカイラル相転移転近傍のスケーリングの研究を行った。並行して、次の段階の研究にむけて、改良 Wilson クォークによる $N_f=2+1$ QCD の物理点における有限温度配位生成を進めた。

(2) Gradient flowを用いた有限温度 (2+1)-flavor QCDの研究

グラジエントフロー法に基づく鈴木法によるエネルギー運動量テンソルと状態方程式の計算を、動的クォークを含むQCDで初めて実行した。その為に、改良ウィルソン型クォーク作用による $N_f=2+1$ QCDシミュレーションを遂行した。最終的には現実のクォーク質量による評価を目指しているが、第一段階の研究として、計算時間を抑えるために、sクォーク質量は現実の値に近いがu、dクォークは現実より重い場合 ($m_\pi/m_\rho \approx 0.74$) を扱い、格子間隔が $a \approx 0.07\text{fm}$ の1つだけの固定格子間隔法による計算を実行した。我々の研究により、状態方程式の評価が動的クォークを含む場合でも精度良く遂行可能であることが示された。図3に状態方程式の結果を示す。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上でT-積分法を用いて評価した先行研究の結果である。 $T < 300\text{MeV}$ ($N_t > 8$, N_t は温度軸方向の格子点の数)で従来の方法による結果をよく再現することが示された。他方、この格子間隔では、 N_t が8程度より小さいと ($T > 300\text{MeV}$)、 $0(aT)$ の格子化誤差が大きく、両者が一致しなくなることもみとれる。グラジエントフロー法による評価は、従来の方法で必要であった、非摂動的ベータ関数の評価などが不要で、全体的計算コストを大きく抑えられる可能性がある。この結果は、計算コストの高い物理点での評価を推進する上で、グラジエントフロー法が大きな役割を担うことを示唆している (論文B-9, A-4)。

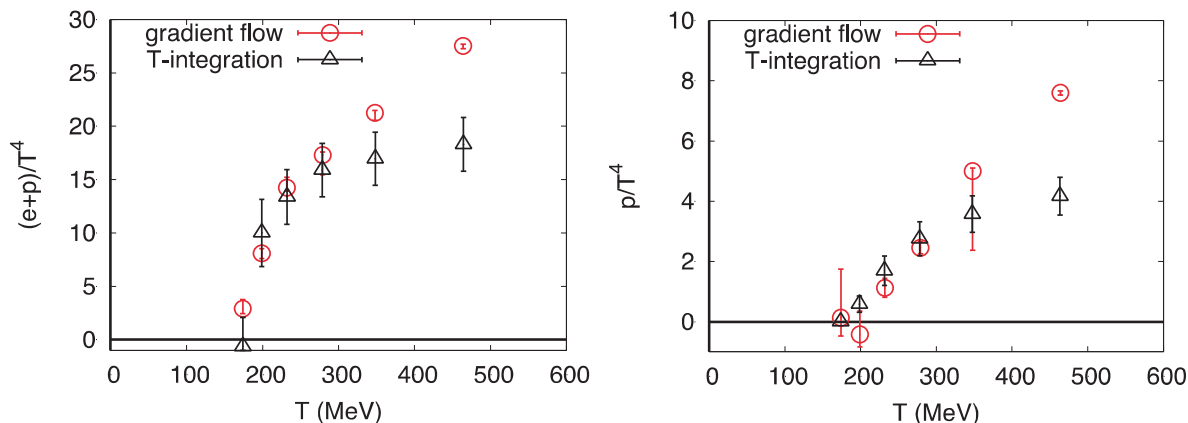


図3：グラジエントフロー法による有限温度(2+1)-flavor QCDの状態方程式の研究。左図：エントロピー密度 $\varepsilon + p$ 。右図：圧力 p 。赤丸がグラジエントフロー法による評価の結果で、黒三角は、同じ配位上でT-積分法を用いて評価した先行研究の結果。横軸は温度 T （論文A-4）。

さらに、同じ有限温度配位を用いて、グラジエントフロー法を用いたカイラル凝縮と位相感受率の評価も行った。格子QCDではこれらの物理量に複雑なくりこみが要求されるが、鈴木法を用いればくりこまれた量を直接評価可能となり、計算コストを大きく抑えられる可能性がある。図4の左図にカイラル感受率の結果を示す。我々は、カイラル感受率がクロスオーバー温度 $T \sim 190$ MeV でピークを示すことを示した。また、 s クォークよりも、軽い u, d クォークのカイラル感受率の方がより強い特異性を示しており、これも理論的期待と一致する。格子上でカイラル対称性を陽に壊してしまうウィルソン型クォークでこれらが示されたのは初めてである。

さらに、位相電荷と位相感受率の評価も実行した。位相感受率はアクシオン質量と関係しており、アクシオンが冷たい暗黒物質の候補となるかを判定する上で、その温度依存性が重要な情報となる。位相感受率には、ゲージ場を用いた定義による評価とクォークを用いた定義による評価の2種類の計算方法がある。両者は連続理論では一致すべきであるが、格子上では、カイラル対称性などの破れにより、しばしば大きなズレを示し、結果の信頼性に問題を投げかけている。鈴木法を用いればこれらの量も物理的評価を直接行うことができると期待される。図4の右図に我々の位相感受率の結果を示す。赤丸はゲージ場を用いた定義の結果で、黒三角はクォークを用いた定義の結果である。両者の一致が格子上で直接示されたのは初めてである。赤と黒の曲線は高温側でかつ $N_t > 8$ を満たす3点を T の冪関数でフィットした結果で、希薄インスタントンガス模型 (DIGA) から予想される冪をよく再現することを示した (論文B-10, A-3)。

これらはまだ格子間隔1点だけの結果であり、今後異なる格子間隔で同様の計算を行い、連続極限を取る必要がある。また、物理点での研究も同時に推進する計画である。

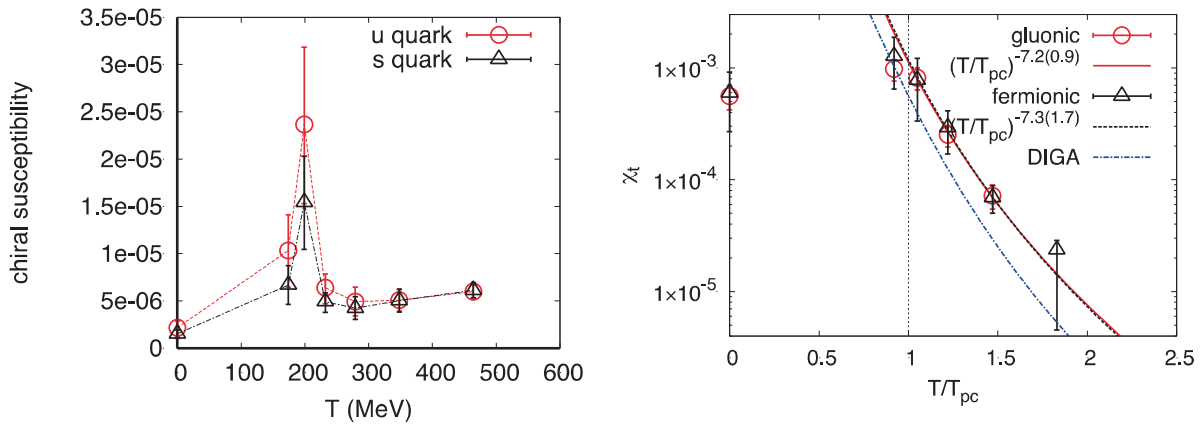


図4：グラジエントフロー法による(2+1)-flavor QCDの熱力学特性の研究。左図：カイラル感受率。赤丸は u, d クォークのカイラル感受率で、黒三角は s クォークのカイラル感受率（論文A-4）。右図：位相感受率。赤丸はゲージ場を用いた定義による評価の結果で、黒三角はクォークを用いた定義による評価の結果（論文A-3）。

(3) SU(3)ゲージ理論の潜熱

QCDでクォークを取り除いたSU(3)ゲージ理論は、低温の閉じ込め相と高温の非閉じ込め相との間が弱い1次相転移であることが知られている。有限密度QCDでも1次相転移が現れることが理論的に予想されており、その位置や性質をシミュレーションで効率良く評価する手法の開発は重要である。我々は、これまで、多重点再重み付け法とヒストグラム法を組み合わせ、1次相転移やその端点の簡便な検出方法の開発を進めてきた。この研究では、SU(3)ゲージ理論の1次相転移点での潜熱を研究した。

状態方程式(エネルギー密度と圧力)を評価する方法として、この論文では「微分法」を採用した。相転移点はポリアコフープ感受率の極大点として定義できるが、多重点再重み付け法を使って、非等方結合定数空間(β_s, β_t)におけるポリアコフープ感受率(図5の左図を参照)を計算することにより、感受率の極大線の傾きから、微分法に必要な非等方係数の評価を実行した。次に、シミュレーションヒストリーを高温相と低温相に分離し、状態方程式の2相間の差として潜熱の評価を行った。同じ評価を2種類の空間体積と、 $N_t=6, 8, 12$ の3種類の格子間隔で実行し、空間体積依存性を確認しつつ、連続極限外挿を実行した。調べた格子間隔の範囲では、体積依存性は小さく、図5右図のように連続極限外挿を行って、 $\Delta \epsilon / T^4 = 0.75(17)$ と $\Delta(\epsilon - 3p) / T^4 = 0.623(56)$ を得た。圧力のギャップは、期待どおり、誤差の範囲でゼロと矛盾しない(論文A-2, B-7)。

これらの研究と並行して、次の段階の研究にむけて、改良Wilsonクォークによる $N_f=2+1$ QCDの物理点における有限温度配位生成を進めた。また、有限温度・有限密度QCDにおけるスケーリングの試験研究も進めた。

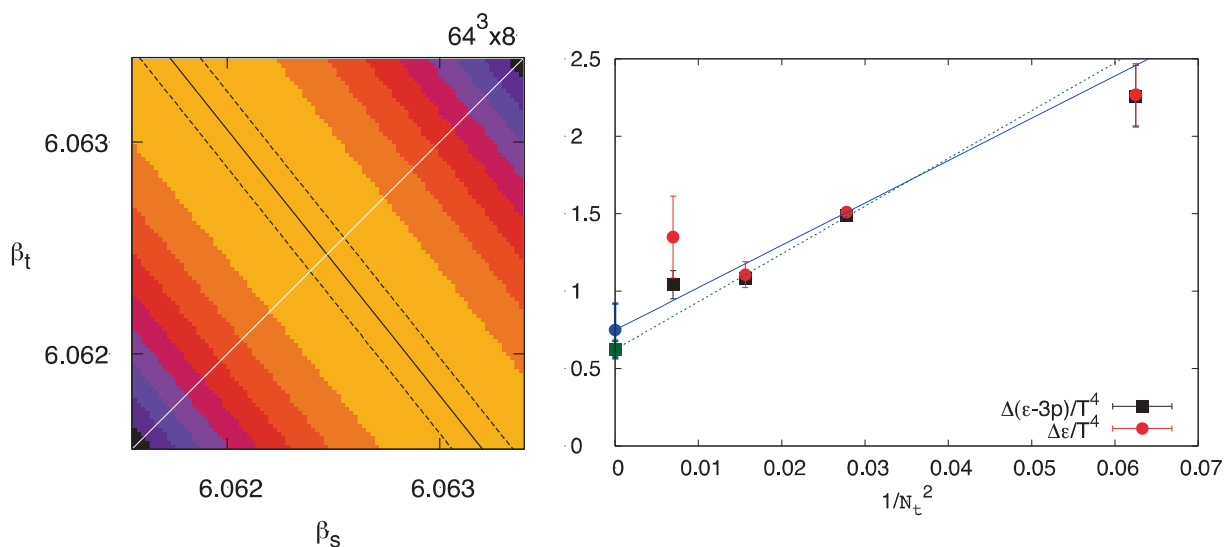


図5：SU(3)ゲージ理論における潜熱の研究。左図：ポリアコフープ感受率の (β_s, β_t) 依存性。等高線図で、明るい色ほど感受率が大きい。 $64^3 \times 8$ 格子の結果。右図：潜熱の連続極限外挿（論文A-2）。

【7】 有限バリオン化学ポテンシャルでの QCD 状態方程式の計算（大野）

QCD の状態方程式は、強い相互作用をする物質の熱平衡状態の性質を特徴づける最も基本的なものである。現在、米国 Brookhaven 国立研究所の RHIC 加速器では、QCD 臨界点を見つけることを目的として Beam Energy Scan 実験が行われており、実験結果を理解する上で、有限バリオン化学ポテンシャルでの状態方程式が必要となる。

大野は、Frithjof Karsch 氏を中心とする BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration に参加し、2+1 フレーバーの Highly Improved Staggered Quark 作用を用いた格子 QCD シミュレーションを行い、Taylor 展開法により有限バリオン化学ポテンシャルでの QCD 状態方程式を計算した（図6）。この際、Taylor 展開の6次のオーダーまで計算し、その結果を4次のオーダーまでの計算結果と比較することで、展開の打ち切り誤差を調べた。その結果、温度の2倍程度の化学ポテンシャルまで打ち切り誤差が十分小さいことを示した。また、温度-化学ポテンシャル平面における、圧力、エネルギー及び、エントロピー一定線を計算し、クロスオーバー線や実験結果から求められた freeze-out パラメータとの比較を行った。更に、QCD 臨界点の位置を見積もり、調べることができたパラメータ領域には存在しないことを示唆する結果を得た（論文 A-6）。

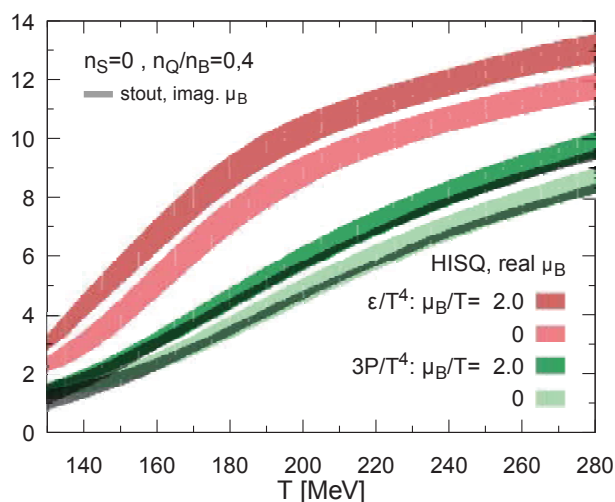


図 6: ストレンジネス中性条件下での、バリオン化学ポテンシャル $\mu_B/T=0$ 及び 2 におけるエネルギー密度 (上 2 つ) 及び圧力 (下 2 つ)。他のグループにより計算された、異なるフェルミオン作用及び、計算方法に基づく圧力の結果も暗色の線で示す。

【8】 3 フレーバー有限温度 QCD における臨界終点 (蔵増)

温度 T とクォーク化学ポテンシャル μ を関数とする QCD の相図を確定させることは、格子 QCD シミュレーションにおける最大の目標の一つである。蔵増は、理研計算科学研究機構 (AICS) の宇川副機構長、中村研究員、金沢大学武田助教および米国アルゴンヌ国立研究所の Jin 研究員らとの共同研究のもと、0(a) 改良を施した Wilson-Clover クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いて、 T 、 μ 、クォーク質量 m_q のパラメータ空間における 3 フレーバー QCD の臨界終線の決定に取り組んできた。先ず、最初のステップとして 2015 年に $\mu=0$ (密度ゼロ) における 3 フレーバー QCD における臨界終点における π 中間子質量 ($m_{\pi,E}$) を決定した (論文発表済)。我々が用いた方法は、尖度 (kurtosis) 交叉法と呼ばれる有限サイズスケリング解析手法の一種であり、一次相転移領域における物理量分布の尖度とクロスオーバー側の対応物が、異なる空間体積依存性を持つ性質を利用している。本研究において、世界で初めて 3 フレーバー QCD における臨界終点の決定に成功した。その後、 $m_{\pi,E}$ の精度向上を目指し、更に細かい格子間隔で計算を行った。図 7 は、 $m_{\pi,E}$ を $1/NT^2$ (NT は「時間方向」の格子サイズ) の関数としてプロットしたものである。格子間隔が小さくなるにつれて ($1/NT^2 \rightarrow 0$)、 $m_{\pi,E}$ が加速度的に小さくなっていることが見て取れる。これは、連続極限において $m_{\pi,E}$ の値が非常に小さい、あるいはゼロになる可能性を示唆しているが、従来の理論的予想とは異なっており、大変興味深い。現在、更に細かい格子間隔の計算を実行し、連続極限における $m_{\pi,E}$ の値がゼロになる可能性の検証に取り組んでいる。

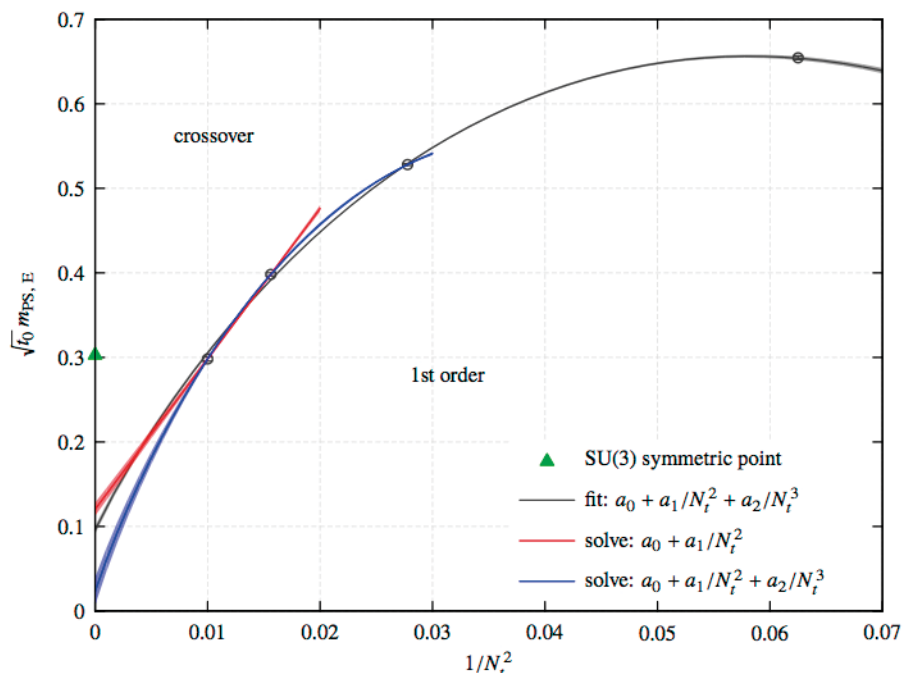


図 7 : $m_{\pi, E}$ の格子間隔依存性。横軸は $1/N_t^2$ (N_t は「時間方向」の格子サイズ)。

【9】 QCD のカイラル相転移の数値的研究 (吉江)

QCD のクォーク・グルーオン相 (高温相) の性質や、高温相からハドロン相 (低温相) への相転移の性質の解明は、初期宇宙の進化に係わる重要な課題である。今日まで多くの研究が行われてきているが、この有限温度相転移の次数についてさえ、結論が得られていない。

WMFQCD Collaboration (岩崎(筑波)、石川(広島)、中山(Kavli IPMU)、吉江) は、QCD のカイラル相転移 (クォーク質量ゼロの有限温度相転移) を調べる、従前の手法と異なる新しい手法を提案し、フレーバ数 2 の QCD に対する数値シミュレーションを行い、2 次相転移を強く示唆する結果を得た (論文 A-9)。

新手法では、まず、相転移の次数が 2 次であると仮定し、繰り込み群に基づき、『中間子伝搬関数のスケーリング則』

$$G(\tau; g(N), N) = \left(\frac{N'}{N} \right)^{-2\gamma} G(\tau; g(N'), N')$$

を導出する。G はクォーク質量ゼロの中間子伝搬関数で、格子サイズが異なる 2 つの伝搬関数 (時間方向の格子サイズ N, N') を比較したものである。 τ は格子サイズで規格化した時間スライス $\tau = nt/N, n' t/N'$ 、 $g(N), g(N')$ は、そのサイズの格子でのカイラル相転移結合定数であり、 β 関数で関係付けられ、 γ は異常質量次元である。基本的な考え方は、我々が多フレーバ QCD の赤外固定点を同定するのに用いたものと同じである。このスケーリング則から、有効質量 $m(\tau) = -\partial_\tau G(\tau)$ のスケーリング則

$$m(\tau; g(N), N) = m(\tau; g(N'), N')$$

が導かれる。つまり、有効質量は、格子サイズで規格化した時間スライスの関数としてみると、格子サイズには依存しない。同様のスケーリング則は、空間方向の伝搬関数についても成り立つ。

繰り込み群 (RG) 改良したゲージ作用と Wilson フェルミオン作用を用いた格子 QCD のシミュレーションを 3 つの格子サイズ $16^3 \times 8$, $24^3 \times 12$, $32^3 \times 16$ で行い、(空間方向の) 有効質量を規格化した距離の関数としてプロットすると、格子サイズに依らないユニバーサルな曲線に乗っている事がわかった。この事は、相転移が 2 次であることを示唆している。さらに、得られた曲線は、我々が提唱し、数年間調べてきた『有限の IR cutoff を持つコンフォーマル理論』のコンフォーマル領域での伝搬関数の特徴である、巾変形 Yukawa 型関数となっている事も示された。これは、有限の時空内の QCD には、コンフォーマル領域が存在することの傍証である。

【10】 有限密度 QCD の研究 (谷口)

谷口と大学院生 (博士後期課程 2 年) 鈴木は、カノニカル法を用いた有限密度 QCD の研究を行った。有限密度格子 QCD には複素作用の問題があり、単純なモンテカルロ計算は不可能である。この複素作用の問題を避ける方法として、カノニカル分配関数の導出を主なターゲットとするカノニカル法が有力視されている。カノニカル法を用いると確かに有限密度 QCD が数値計算可能となり、具体的な熱力学量としてカノニカル分配関数を求められるようになる。ところが、物理的には実かつ正定値となるべきカノニカル分配関数が複素数になってしまうという形で符号問題が現れることがわかってきた。これはカノニカル法が克服すべき問題であるが、位相それ自体の性質についてはあまりよく知られていない。そこで鈴木と谷口は、以下の 2 つの点を目標に研究を行った。

(a) カノニカル分配関数の位相の温度依存性と粒子数依存性の調査

(b) 位相が現れるメカニズムとその対策

高温側の結果では位相は 0 と等しく問題はないことがわかるが、低温側の結果では位相は $\pi/2$ を超えており符号問題が強く現れていることが示唆される。また、位相がバリオン数 N_b におおよそ比例して大きくなっていることが確かめられた。この位相を減らすため、そのもっとも素朴な方法として統計数を上げた計算を試みた。統計が少ない場合は位相が激しく現れるが、統計を上げた場合は $\pi/2$ を超えない領域もあることが見て取れる。この結果から、統計を上げることによってバリオン数が少ない領域ではある程度位相を抑えることができるということがわかった (論文 A-7, B-12, 13, 14)。

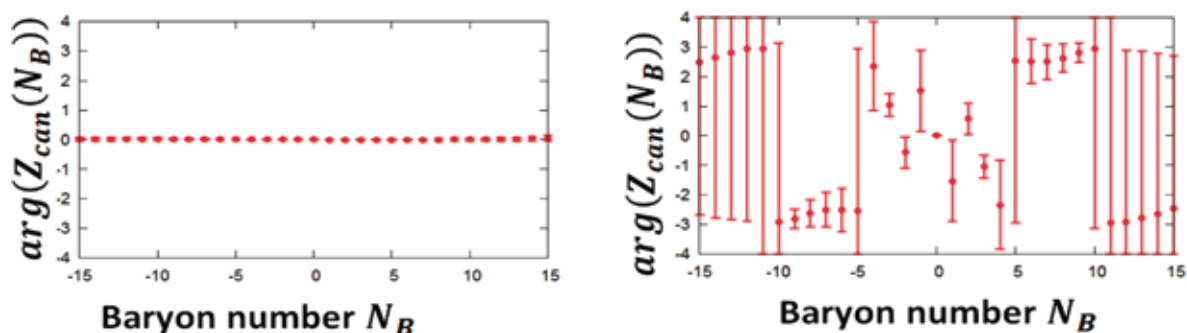


図 8：高温 $T=1.68T_c$ （左）と低温 $T=0.81T_c$ （右）における分配関数の位相。高温側では、結果は 0 と等価で位相は十分制御されている。低温側では、位相が $\pi/2$ を超えてしまう。カノニカル分配関数は実で正になるべき量である。

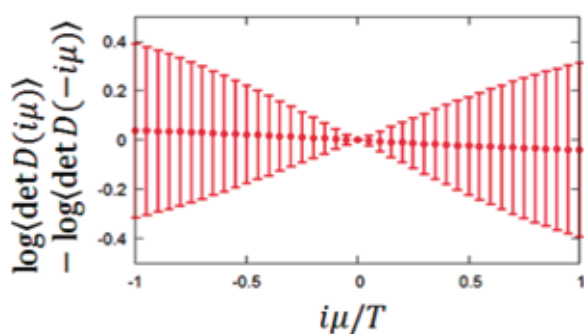


図 9： $\langle \det D(i\mu) \rangle$ と $\langle \det D(-i\mu) \rangle$ の対数同士の差をとった。図は低温 $T=0.81T_c$ での結果。これは 0 になるべき量であるが、モンテカルロ計算においては破れている。

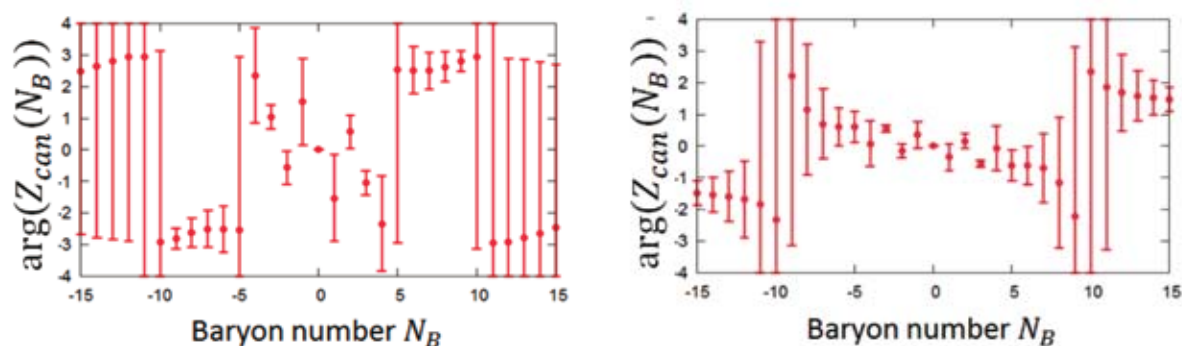


図 10：低温 $T=0.81T_c$ で配位数 100（左）と 900（右）で計算を行った結果。

【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（藏増、吉村）

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、当部門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いる。

2014 年、蔵増と理研計算科学研究機構 (AICS) 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、という 3 つの課題に取り組む必要がある。2016 年度に於いて特に進展があった研究は、グラスマン高次テンソル繰り込み群の開発である。高次テンソル繰り込み群は、高次元 (3 次元以上) モデルに応用可能なアルゴリズムとして考案された方法であるが (テンソル繰り込み群は 2 次元モデル限定)、これまでその対象はボゾン系のみに限られていた。しかしながら、素粒子物理において興味深いモデルはフェルミオンを含んでおり、グラスマン数を扱えるようにすることは必須要件である。蔵増と吉村は、高次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、アルゴリズムの正しさと数値精度を確かめるために、3 次元自由 Wilson フェルミオン系の自由エネルギー計算を行った。図 11 は、 128^3 格子サイズにおける自由エネルギーの解析解との相対誤差の絶対値 δ を Wilson フェルミオンの質量パラメータの関数 m としてプロットしたものである。 D_{cut} はグラスマン高次テンソル繰り込み群において計算精度をコントロールするパラメータであり、原理的に D_{cut} が大きいほど数値精度が向上する。図 11 では、 $D_{\text{cut}}=6, 10, 14$ の結果が示してあるが、いずれも現在の標準的なクラスター計算機 (演算加速機構なし) において 1 ノード・日で計算可能なレベルの計算コストである。 $m \geq 0$ の範囲において相対誤差 1%未満の精度を達成できており、アルゴリズムの正しさと高精度計算の可能性を確認することができた。なお、現在はフェルミオンの Green 関数を計算するための手法開発に取り組んでいる。

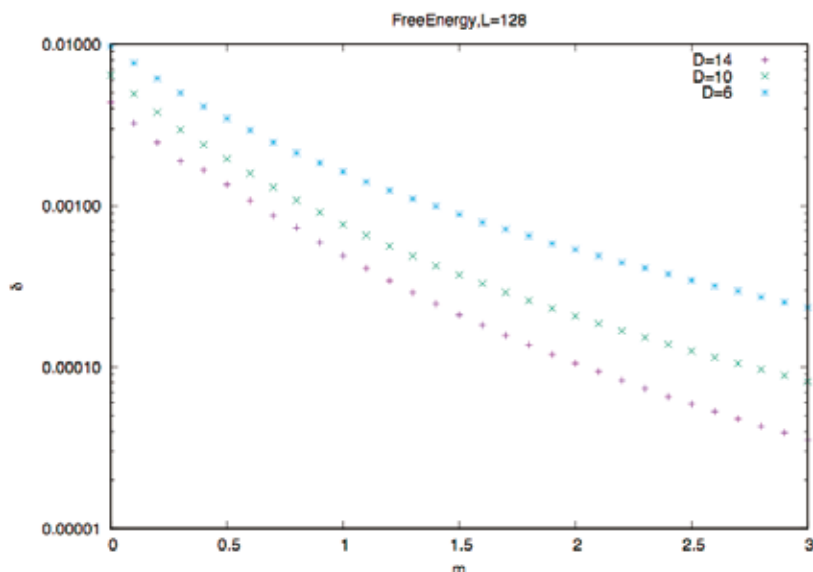


図 11: 128^3 格子サイズにおける 3 次元自由 Wilson フェルミオン系の自由エネルギー計算。横軸は Wilson フェルミオンの質量パラメータ。

【12】 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、名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 (KMI) を中心とした LatKMI Collaboration の研究者、名古屋大学山脇幸一名誉教授、KEK 青木保道特任准教授らと共に、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否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事を示した。今年度は、これまでに行った計算よりも、大きな体積、軽いフェルミオン質量のデータを加え、さらに核子や a_0 中間子などの様々なハドロンについて解析を行った。その結果、これまでの研究で見えていた近似的共形対称性らしき性質が様々なハドロンでも見えることを示した (論文 A-8)。

【13】 Gradient flow を用いた Kaon B パラメーターの計算 (谷口)

Kaon B パラメーター B_K は K 中間子の K_0 - K_0 -bar 混合に対する QCD の寄与を抽出した量であり、QCD の非摂動的な効果が主として効いてくる量であるため格子上の数値計算による測定が必須となる量である。この B_K を Wilson fermion を用いて計算しようとする、カイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合に邪魔されて精度の良い測定が困難となる事情があった。このカイラル対称性の破れからくる余計な演算子混合の問題に対する解決策として、

gradient flow を用いる方法が有力視されている。Gradient flow は一種のくりこみ変換であり、あらゆる演算子に対して非常に簡単に変換を実行することができる。Gradient flow の優れた美点として flow を課した演算子には紫外発散が現れないという点が挙げられる。そのため格子上のいかなる対称性の破れにも悩まされることなく、連続極限を単純な操作として取ることができるようになるのである。Gradient flow を課した演算子は繰り込まれた演算子を含む有限な量となっているのであるが、鈴木と谷口は研究の第一歩として gradient flow を課した 4 fermi 演算子から、高エネルギー物理学で一般的に用いられる MS-bar scheme で繰り込まれた演算子を取り出すための変換係数の計算を行なった。

【14】 スパースモデリングを用いた格子 QCD データの解析 (山崎)

山崎は、大学院生 (博士前期課程 2 年) 佐久間とともに、近年、画像処理、機械学習の分野を中心に様々な分野で応用され始めた、スパースモデリングを格子 QCD データ解析に応用するための基礎研究を行った。格子 QCD で計算されるハドロン 2 点相関関数は、様々な状態の指数関数の和として表せる。励起状態を解析するには、この指数関数の和から特定の状態の寄与を取り出さなくてはならないため、数値的に不安定になりやすく、解析が非常に難しい。この解析にスパースモデリングを用いる試験的解析を行い、指数関数の個数を固定しないスパースモデリングの解析では、データから指数関数の数を決めることができ、その解析から得られた質量などの結果は、事前にデータに最適な個数に指数関数を固定した解析結果と一致することを示した。スパースモデリングの解析は、うまく機能する場合もあるが、そうでない場合もあるため、格子 QCD の解析に応用するには様々な課題が残されており、今後も研究が必要である。 □

【15】 格子 QCD 研究用データグリッド JLDG/ILDG の運用 (吉江)

JLDG (Japan Lattice Data Grid) は、国内の計算素粒子物理研究グループが日々の研究データを管理・共有する為のデータグリッドである。主システムは、国内の主要な格子 QCD 研究拠点 7 箇所に設置したファイルサーバを国立情報学研究所が提供する SINET VPN で接続し、グリッドファイルシステムソフトウェア Gfarm で束ねたファイルシステムである。どの拠点からアクセスしても同一のファイルシステムが見えるので、「ある拠点のスパコンで生成したデータ (格子 QCD 配位など) を JLDG に投入・蓄積し、別拠点で読み出して、その拠点のスパコンで再解析 (物理量の計算) をおこなう」といったデータ共有を、容易におこなう事ができる。また、サブシステムとして、HPCI 共用ストレージとの連携システムと ILDG (International Lattice Data Grid) との接続システムを備えている。JLDG の運用は、各拠点の代表者、研究グループの代表者、システム開発者、管理運用支援の委託先の業者の担当

者、をメンバーとする JLDG チームが行っており、筑波大学からは、建部（高性能計算システム研究部門）、天笠（計算情報学研究部門）と山崎、吉江が参加している。

JLDG は 2005 年に開発を開始し、2007 年に運用を開始した。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、一定の完成の域に達しており、数年前から、システムの改良や新機能の実装よりも、システムの増強・安定運用に主眼が移ってきている。図 12 に、現在のシステム状況と、ディスク使用量の推移を示した。

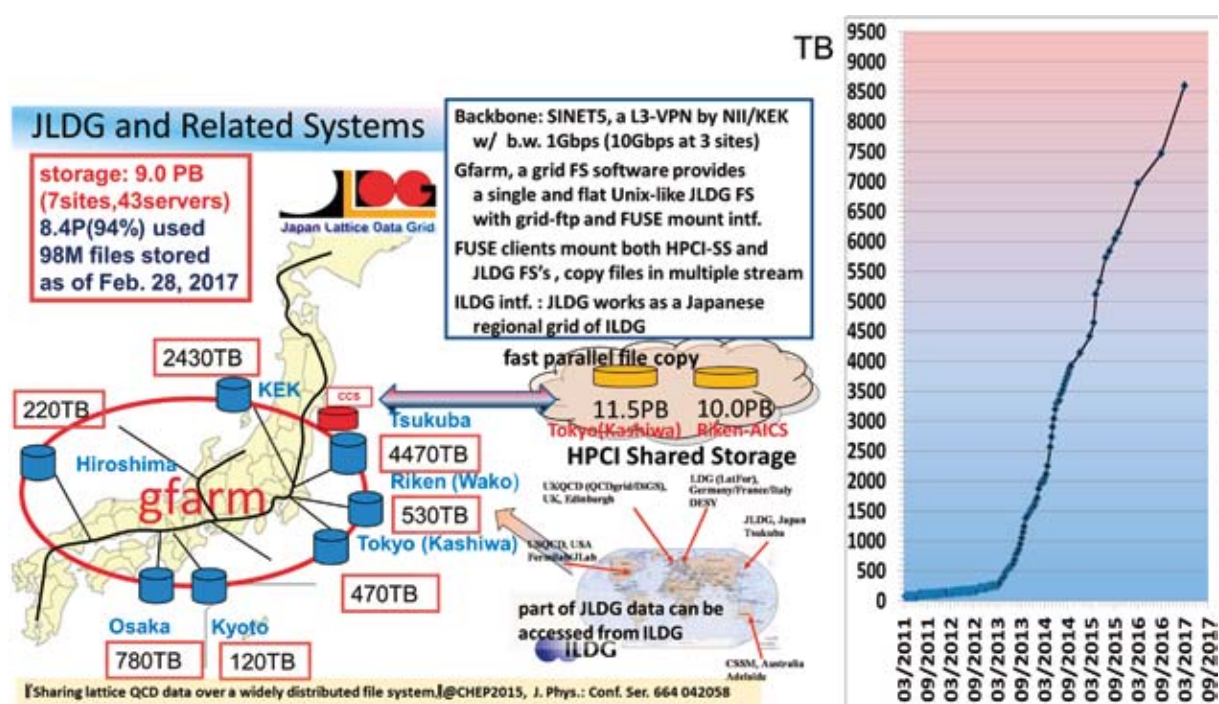


図 12 : JLDG のシステム状況とディスク使用量の推移。

今年度は、以下のシステム増強と安定運用の為の活動をおこなった。

- ファイルサーバの増強:前年度 39 サーバ 7.5PB から 43 サーバ 9.0PB へ
- 体制変更 (HPCI 戦略分野終了、名古屋大学拠点廃止)に伴う作業
- ソフトウェア更新 (gfarm2 回、zabbix1 回、HPCI-SS 連携方式改良)
- 管理機器更新
 - 管理サーバ 7 台を仮想化して 2 台の物理ホストに集約
 - 古い OS を一掃し、バックアップも容易になった。
- データ化け対応
 - 大容量のファイルシステムでは、種々の理由により、ユーザーや管理者が気づかぬまま、データが化ける (silent data corruption) 可能性がある。JLDG では、フ

ファイル作成時に on-the-fly で md5sum を計算し、データベースに登録したり照合する機能を導入している。

- 今年度は、さらに、ファイル作成直後（6 時間後）に再度読み出し検証する仕組みを導入した。
- 0(20)ファイルのデータ化けを検出し、不正ファイルを削除した。全てのケースで、正しい複製がありユーザーへの影響はなかった。
- 公開アンサンブルへの DOI 登録
 - ILDG は 5 つの地域グリッドを、『格子 QCD 配位の国際規模での共有』を目的として相互運用する仕組みであり、JLDG は ILDG の日本の地域グリッドである。ILDG には、「公開されている格子 QCD 配位アンサンブルの利用状況を把握する仕組みが無い」事が問題であった。論文の引用・被引用の記録とは別に、データの引用・被引用関係の記録を蓄積する目的で、ILDG に公開する QCD アンサンブルに DOI (Digital Object Identifier) 登録を行う事が提案され、米国地域グリッドでは、実施済である。
 - JLDG では、天笠、松古 (KEK)、吉江が中心となって、DOI 登録の体制面の検討と各関係機関との調整を行って、DOI 登録は JICFuS (計算基礎科学連携拠点) の活動として位置付けること、筑波大計算科学研究センターが、DOI 登録機関の会員となり、実際の登録業務とデータへのアクセスを保証する仕組みに責任を持つこととなった。
 - 今年度は、DOI 登録に必要なソフトウェア回りの開発 (登録フォーム、ILDG QCDml ensemble xml と補足情報からの landing page の生成) を行なった。また、登録の規約や手続き (登録作業のフロー) についても検討を行い、JICFuS で検討する叩き台がほぼ完成した。

【16】 格子 QCD 共通コード開発 (金谷、谷口、根村、浮田、滑川)

昨年度に引き続き、格子 QCD 共通コード Bridge++の開発を進めた。格子 QCD 共通コード Bridge++は、QCD を含む格子ゲージ理論シミュレーションのための汎用コードセットである。様々な格子作用やアルゴリズムを適用可能で、ノート PC から超並列計算機まで幅広いアーキテクチャに対応している。2012 年 7 月に Bridge++ ver. 1.0.0 を公開して以降、継続してコードの改善、拡張を行っている (<http://bridge.kek.jp/Lattice-code/>)。素粒子理論グループからは、金谷、滑川、根村、谷口、浮田が参加している。

本年度は、ライブラリ化向けコード構造への変更、パラメータのコンテナ化、ヘッダー相対化といったシステム面での強化が図られた。また、ゲージ場テンソル追加、中間子系演算子追加など物理量測定を機能拡張した。これらの変更を含めた Bridge++ ver. 1.4.0 へのメジャーアップデートが 2017 年 3 月に実施された。その後も、コードの細かい改定、改良が進め

られている。最新版は ver. 1.4.1 である。また、共通コードを使用した研究論文が、今年度新たに 10 本追加された。通算 23 本の論文が共通コードを元に発表されている。

4. 教育

【1】 学位論文

[修士論文]

1. 佐久間弘基「スパースモデリングを用いた格子 QCD における相関関数の解析」

【2】 集中講義

1. 藏増嘉伸、神戸大学システム情報学研究科客員教授（2016年4月～2016年9月）
「計算科学特論」（集中講義）を担当。

5. 受賞、外部資金、知的財産権等

【1】 受賞

【2】 外部資金

1. 青木慎也（代表）、一般受託研究、平成26年度採択、『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』重点課題9：「宇宙の基本法則と進化の解明」、240,000千円
2. 金谷和至（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「有限温度・有限密度クォーク物質の物性と相構造」、900千円
3. 藏増嘉伸（分担）、一般受託研究、平成28年度採択、『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』萌芽的課題1：「基礎科学のフロンティア－極限への挑戦（基礎科学の挑戦－複合・マルチスケール問題を通じた極限の探求）」、16,900千円
4. 藏増嘉伸（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「テンソルネットワーク形式による格子ゲージ理論の研究」、4,800千円
5. 石塚成人（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(B)、平成27年度採択、「格子QCDによるK中間子崩壊の直接的CP非保存パラメータの決定」、3,500千円
6. 山崎剛（代表）、科学研究費補助金・若手研究(A)、平成28年度採択、「量子色力学を基にした原子核構造の解明へ向けた基礎研究」、3,600千円

7. 浮田尚哉（代表）、科学研究費補助金、挑戦的萌芽研究、平成28年度採択、「格子数値計算による超対称性の自発的破れの解明」、1,000千円
8. 滑川裕介（代表）、科学研究費補助金・基盤研究(C)、平成27年度採択、「格子量子色力学による新たなハドロン存在形態の解明」、910千円

【3】 知的財産権（種別、氏名、課題名、年月日）

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. Y. Kuramashi, N. Nakamura, S. Takeda, and A. Ukawa, “Critical endline of the finite temperature phase transition for 2+1 flavor QCD around the SU(3)- flavor symmetric point”, Phys. Rev. D94 (2016) ref. 114507.
2. M. Shirogane, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, “Latent heat at the first order phase transition point of SU(3) gauge theory”, Phys. Rev. D 94, No.1 (2016) ref.014506.
3. Y. Taniguchi, K. Kanaya, H. Suzuki, and T. Umeda, “Topological susceptibility in finite temperature (2+1)-flavor QCD using gradient flow”, Phys. Rev. D 95, No.5 (2017) ref.054502.
4. Y. Taniguchi, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, and N. Wakabayashi (WHOT-QCD Collaboration), “Exploring $N_f=2+1$ QCD thermodynamics from gradient flow”, arXiv:1609.01417[hep-lat].
5. F. Karsch, A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, E. Laermann, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, P. Steinbrecher, and M. Wagner, “Conserved Charge Fluctuations from Lattice QCD and the Beam Energy Scan”, Nucl. Phys. A 956 (2016) ref. 352.
6. A. Bazavov, H.-T. Ding, P. Hegde, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Y. Maezawa, Swagato Mukherjee, H. Ohno, P. Petreczky, H. Sandmeyer, P. Steinbrecher, C. Schmidt, S. Sharma, W. Soeldner, and M. Wagner, “The QCD Equation of State to $O(\mu_B^6)$ from Lattice QCD”, Phys. Rev. D 95, No. 5 (2017) ref. 054504.
7. A. Nakamura, S. Oka, and Y. Taniguchi, “QCD phase transition at real chemical potential with canonical approach”, Journal of High Energy Physics, 2016(2), 1-19.
8. Y. Aoki, T. Aoyama, Ed Bennett, M. Kurachi, T. Maskawa, K. Miura, K. Nagai, H. Ohki, E. Rinaldi, A. Shibata, K. Yamawaki, and T. Yamazaki (LatKMI Collaboration),

“Light flavor-singlet scalars and walking signals in $N_f=8$ QCD on the lattice” ,
arXiv:1610.07011.

9. K.-I. Ishikawa, Y. Iwasaki, Yu Nakayama, and T. Yoshié, “RG scaling relations at chiral phase transition in two-flavor QCD” , arXiv:1704.03134 [hep-lat].

B) 査読無し論文

1. PACS Collaboration: K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, N. Tsukamoto, S. Sasaki, T. Yamazaki, and A. Ukawa, “Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 158.
2. PACS Collaboration: J. Kakazu, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié, “Electromagnetic pion form factor near physical point in $N_f=2+1$ lattice QCD” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 160.
3. PACS Collaboration: T. Yamazaki, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa, “Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 108.
4. S. Takeda, X.-Y. Jin, Y. Kuramashi, N. Nakamura, and A. Ukawa, “Update on $N_f=3$ finite temperature QCD phase structure with Wilson-Clover fermion action” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 384.
5. T. Boku, K.-I. Ishikawa, Y. Kuramashi, L. Meadows, M. D ‘Mello, M. Troute, and R. Vemuri, “A performance evaluation of CCS QCD Benchmark on the COMA (Intel® Xeon Phi™, KNC) system” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 261.
6. S. Motoki, S. Aoki, T. Aoyama, K. Kanaya, H. Matsufuru, T. Miyamoto, Y. Namekawa, H. Nemura, Y. Taniguchi, S. Ueda, and N. Ukita, “Lattice QCD code Bridge++ on arithmetic accelerators” , Proceeding of Science (LATTICE 2015) 040.
7. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, and K. Kanaya, “Towards the QCD equation of state at the physical point using Wilson fermion” , Proceeding of Science (LATTICE 2015) 209.
8. S. Ejiri, R. Iwami, M. Shirogane, N. Wakabayashi, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, and T. Umeda, “Determination of latent heat at the finite temperature phase transition of SU(3) gauge theory” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 058.
9. K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, and N. Wakabayashi, “Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow” , Proceeding of Science (LATTICE 2016) 063.

10. Y. Taniguchi, S. Ejiri, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, R. Iwami, and N. Wakabayashi, “Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow”, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 064.
11. T. Umeda, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, H. Ohno, A. Uji, N. Wakabayashi, and S. Yoshida, “ $O(4)$ scaling analysis in two-flavor QCD at finite temperature and density with improved Wilson quarks”, Proceeding of Science (LATTICE 2016) 376.
12. A. Nakamura, S. Oka, and Y. Taniguchi, “Study of high density phase transition in lattice QCD with canonical approach”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 165.
13. A. Nakamura, S. Oka, A. Suzuki, and Y. Taniguchi, “Calculation of high-order cumulants with canonical ensemble method in lattice QCD”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 168.
14. R. Fuluda, A. Nakamura, S. Oka, S. Sakai, A. Suzuki, and Y. Taniguchi, “Beating the sign problem in finite density lattice QCD”, Proceeding of Science (LATTICE 2015) 208.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. Y. Kuramashi, 「Tensor Network Scheme for Lattice Gauge Theories」, Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminars 2016 - (Niigata University, Niigata, Japan, September 26-28, 2016).
2. H. Ohno, 「A stochastic method to reconstruct spectral functions and its application to quarkonium spectral functions」, Advances in transport and response properties of strongly interacting systems (ECT*, Trento, Italy, May 2-6, 2016).
3. H. Ohno, 「Quarkonia at $T \neq 0$ and Heavy Quark Diffusion from Lattice QCD」, RHIC & AGS Annual Users' Meeting 2016 (BNL, NY, USA, June 7-10, 2016).
4. H. Ohno (BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration), 「The QCD Equation of State at non-vanishing chemical potential from Lattice QCD」, QCD in Finite Temperature and Heavy-Ion Collisions, (BNL, NY, USA, February 13-15, 2017).
5. T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「Light nuclei and nucleon form factors from $N_f=2+1$ lattice QCD」, CCS-LBNL Collaborative Workshop 2016 (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Japan, May 12-13, 2016).
6. T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「Direct calculation of light nucleus from lattice QCD」, Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminar 2016 - (Niigata, Japan, September 26-28, 2016).

7. T. Yamazaki for PACS Collaboration, 「Direct calculation of light nucleus from lattice QCD」, First Tsukuba-CCS-RIKEN joint workshop on microscopic theories of nuclear structure and dynamics (RIKEN/Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, Japan, December 14-16, 2016).
8. K. Kanaya, 「Thermodynamics in (2+1)-flavor QCD with gradient flow method」, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata Univ., Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016).
9. Y. Taniguchi, 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」, Phase structure of lattice field theories, Japanese-German Seminar 2016 (Niigata, Japan, Sept. 26-28, 2016).

B) 一般講演

1. Y. Kuramashi, 「Nucleon form factors near the physical point in 2+1 flavor QCD」, 34th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
2. K. Kanaya, 「Recent results of particle physics simulations at Tsukuba」, Collaboration workshop between Tsukuba and Edinburgh universities (Univ. Edinburgh, Edinburgh, UK, June 16-17, 2016).
3. K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, and N. Wakabayashi, 「Equation of state in (2+1)-flavor QCD with gradient flow」, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
4. Y. Taniguchi, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, Hiroshi Suzuki, Takashi Umeda, and Naoki Wakabayashi, 「Temperature dependence of topological susceptibility using gradient flow」, The XXXIV International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2016) (Univ. Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
5. K. Kanaya, S. Ejiri, R. Iwami, M. Kitazawa, H. Suzuki, Y. Taniguchi, T. Umeda, and N. Wakabayashi, 「Topological susceptibility in finite-temperature (2+1)-flavor QCD with gradient flow」, The 14th International workshop on QCD in extreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016)
6. Y. Taniguchi, S. Ejiri, R. Iwami, K. Kanaya, M. Kitazawa, H. Suzuki, T. Umeda, and N. Wakabayashi, 「QCD energy momentum tensor at finite temperature using gradient

- flow] , The 14th International workshop on QCD in eXtreme conditions (XQCD 2016) (Plymouth Univ., Plymouth, UK, Aug. 1-3, 2016).
7. H. Ohno, 「Stochastic reconstruction of charmonium spectral functions at finite temperature」 , 34th International Symposium on Lattice Field Theory (University of Southampton, Southampton, UK, July 24-30, 2016).
 8. H. Ohno, 「Charmonium and bottomonium spectral functions and the heavy quark diffusion coefficient from lattice QCD」 , 38th International Conference on High Energy Physics (Sheraton Grand Hotel, Chicago, USA, August 3-10, 2016).
 9. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions at finite temperature with stochastic reconstruction methods」 , Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminar 2016 - (Niigata University " Tokimate" , Niigata, Japan, September 26-28, 2016).
 10. H. Ohno (BNL-Bielefeld-CCNU Collaboration), 「The QCD Equation of State at $\mu_B \neq 0$ from Lattice QCD」 , 7th Workshop of the APS Topical Group on Hadronic Physics (Marriott Wardman Park Hotel, Washington DC, USA, February 1-3, 2017).
 11. H. Ohno, 「Quarkonium spectral functions and heavy quark diffusion of charm and bottom quarks from lattice QCD at finite temperature」 , The XXVI international conference on ultrarelativistic heavy-ion collisions (Hyatt Regency Chicago, Chicago, USA, February 5-11, 2017).
 12. A. Suzuki, 「Complex phase problem in the canonical approach」 Phase structure of lattice field theories Japanese-German Seminar 2016 (Niigata University, 26-28 September, 2016).
 13. T. Yamazaki, K. Ishikawa, Y. Kuramashi, and A. Ukawa for PACS Collaboration, 「Systematic study of operator dependence in nucleus calculation at large quark mass」 , The 34th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2016) (University of Southampton, UK, July 24-30, 2016).
 14. J. Kakazu, K. I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration, 「Electromagnetic pion form factor near physical point in $N_f=2+1$ Lattice QCD」 , The 34th International Symposium on lattice field theory (Lattice 2016) (University of Southampton, UK, July 24-30, 2016).
 15. J. Kakazu, K. I. Ishikawa, N. Ishizuka, Y. Kuramashi, Y. Nakamura, Y. Namekawa, Y. Taniguchi, N. Ukita, T. Yamazaki, and T. Yoshié for PACS Collaboration, 「Electromagnetic pion form factor near physical point in $N_f=2+1$ Lattice QCD」 ,

Phase structure of lattice field theories - Japanese-German Seminar 2016 - (Niigata, Japan, September 26-28, 2016).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 藏増嘉伸, 「テンソルネットワーク法の素粒子物理学への応用」, ポスト「京」萌芽的課題「基礎科学の挑戦 - 複合・マルチスケール問題を通じた極限の探求」キックオフミーティング (東北大学, 仙台, 2016年9月9日).
2. 山崎 剛, 「格子 QCD を用いた原子核直接計算」, 第8回学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出シンポジウム (筑波大学, つくば, 2016年10月17-18日).

B) その他の発表

1. 金谷和至, 「Gradient flow 法で探る $N_f=2+1$ QCD 熱力学」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光, 2016年8月22日-24日).
2. 金谷和至, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 北沢正清, 鈴木博, 谷口裕介, 若林直輝, 「Gradient flow による $(2+1)$ -flavor QCD 状態方程式」, 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 2016年9月20-24日).
3. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝, 「Gradient flow で探る topological susceptibility の温度依存性」, 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 2016年9月20-24日).
4. 谷口裕介, 石見涼, 梅田貴士, 江尻信司, 金谷和至, 北沢正清, 鈴木博, 若林直輝, 「Gradient flow を課したら中間子相関関数はどうなる?」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017年3月17日-20日).
5. 大野浩史, 「Stochastic 法を用いたクォークoniumスペクトル関数の解析」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光, 2016年8月22日-24日).
6. 大野浩史, 「Stochastic 法を用いたクォークoniumスペクトル関数の研究」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017年3月17日-20日).
7. 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純, 「カノニカル法における符号問題の研究」, 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 2016年9月20-24日).
8. 鈴木遊, 谷口裕介, 「Gradient Flow を用いた K 中間子の B パラメータの計算」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017年3月17日-20日).

9. 鈴木遊, 岡将太郎, 谷口裕介, 中村純, 「カノニカル法における分配関数の位相の研究」, 理研シンポジウム・iTHES 研究会「熱場の量子論とその応用」(理化学研究所, 和光, 2016 年 8 月 22 日-24 日).
10. 賀数淳平, 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, 山崎剛, 吉江友照 for PACS Collaboration, 「格子 QCD によるパイオンの形状因子の研究」, 2016 年度原子核三者若手夏の学校 (黒姫ライジングサンホテル, 長野, 2016 年 7 月 31 日-8 月 5 日).
11. 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 宇川彰 for PACS Collaboration, 「重いクォークを用いた軽原子核直接計算の系統的研究」, 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 2016 年 9 月 20-24 日).
12. 賀数淳平, 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, 山崎剛, 吉江友照 for PACS Collaboration, 「 $N_f=2+1$ 格子 QCD による物理点質量近傍での π 中間子形状因子の研究」, 日本物理学会秋季大会 (宮崎大学木花キャンパス, 宮崎, 2016 年 9 月 20-24 日).
13. 山崎剛, 佐々木勝一, 藏増嘉伸, 石川健一, 浮田尚哉, 「格子 QCD を用いた原子核構造計算へ向けた基礎研究」, 第 3 回「京」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (コクヨホール, 東京, 2016 年 10 月 21 日).
14. 山崎剛, 石川健一, 藏増嘉伸, 宇川彰 for PACS Collaboration, 「大きなクォーク質量での軽原子核直接計算の演算子依存性の研究」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017 年 3 月 17 日-20 日).
15. 賀数淳平, 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, 山崎剛, 吉江友照 for PACS Collaboration, 「Strange mass reweighting を考慮した物理点質量近傍での格子 QCD による π 中間子形状因子の研究」, 日本物理学会第 72 回年次大会 (大阪大学豊中キャンパス, 大阪, 2017 年 3 月 17 日-20 日).
16. 吉江友照, 「HEPnet-J/sc 報告」, 2016 年度 HEPnet-J ユーザー会 (新潟大学, 新潟, 2017 年 3 月 27-28 日).

(4) 著書、解説記事等

7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

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機構 (AICS)
<http://www.aics.riken.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> □

8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 筑波大学計算科学研究センター主催,
Advanced Summer School on Lattice Gauge Theories,
2016 年 9 月 12-14 日, 筑波大学計算科学研究センター, つくば.
2. 日本物理学会第 72 回年次大会シンポジウム(世話人:川島直輝・藏増嘉伸),
テンソルネットワーク法とその可能性,
2017 年 3 月 18 日, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪.

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. 吉江友照、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

11. その他