

令和6年度高性能汎用計算機高度利用事業
「富岳」成果創出加速プログラム
「シミュレーションでせまる基礎科学：
量子新時代へのアプローチ」
成果報告書

令和7年5月30日
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

橋本省二

目次

1. 補助事業の目的.....	- 1 -
2. 令和6年度（報告年度）の実施内容.....	- 1 -
2-1. 当該年度（令和6年度）の事業実施計画.....	- 1 -
2-2. 実施内容（成果）.....	- 4 -
2-3. 活動（研究会の活動等）.....	- 12 -
2-4. 実施体制.....	- 13 -

補助事業の名称

「富岳」成果創出加速プログラム

シミュレーションでせまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ

体系的番号： JPMXP1020230411

1. 補助事業の目的

素粒子原子核から物性物理にわたる大規模連携により、「富岳」の計算能力を活用して基礎科学の重要課題にチャレンジする。エネルギースケールが大きく異なるこれらの分野には、強い相関をもつ量子多体系という共通性があり、量子状態を求める上での問題点も共有している。データ科学や高度な数学にもとづく新手法を武器に高温超伝導や高密度核物質の理解を進展させると同時に、将来の量子コンピュータに向けたアルゴリズム開発を加速させ、量子新時代へのステップとする。大規模実験プロジェクトとの連携により計算科学の成果を基礎科学全体に広げる取り組みも含め、「量子」がキーワードとなる基礎科学の新時代を拓く。

2. 令和6年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和6年度）の事業実施計画

令和6年度の事業実施内容は以下の通りである。事業項目は、応募申請書における「実施目的、概要」並びに「年次計画」に従う。

プロジェクトの総合推進

事業全体のとりまとめ、および各サブ課題間の連絡調整を実施する。

サブ課題 A 「原子核から高温超伝導にわたる量子多体計算」

[A1 強相関電子系] 令和5年度の研究により、銅酸化物高温超伝導体の理解が進んだほか、パイロクロア格子上的量子スピン系が量子スピン液体的な挙動を示すことが明らかになった。令和6年度は、量子スピン液体発現における次元遡減と電子分数化の機構および実験への帰結を調べるほか、量子スピン液体と高温超伝導の関係性を明らかにするために、ハーフフィリングのハバード模型に対する励起状態レベルスペクトロスコピーを実行し、励起構造の観点から両者の関係性に迫る。同時に、手法開発にも取り組み、強相関量子多体系の長時間ダイナミクスを計算する手法を開発する。また、人工ニューラルネットワークを用いた量子多体ソルバーを改良し、原子核分野・素粒子分野への拡張も図る。

[A2 原子核構造] モンテカルロ殻模型法、準粒子真空殻模型法などを用いた大規模殻模型計算を実行し、中性子過剰核の核構造を研究する。令和5年度に検証した相互作用を用い、中性子過剰核などの構造計算をすすめ、元素合成過程に重要な核種や、バリウム・ジルコニウム同位体周辺核に現れると期待される八重極相関などの特異な核構造の計算をおこなう。並行して、軽い核の芯を仮定しない殻模型計算によって、いくつかの核種の β 崩壊およびニュートリノレス二重ベータ崩壊核行列要素の計算を進める。

[A3 量子多体問題ベンチマーク] 令和5年度は、量子多体問題に対して異なるアプローチ間の性能比較ができるような“規格”となる物理量（エネルギーと規格化されたエネルギーの分散）を選定し、その物理量に関するベンチマーク結果を掲載することができるデータベースのプラットフォームを公開した。令和6年度は、改良した人工ニューラルネットワーク手法を用いて、量子スピン模型・ハバード模型に対する世界最高レベルの量子多体計算を遂行し、そこで得られた結果をデータベースに追加する。これは将来の量子コンピュータ開発に際しての量子超越の規準を与える。

サブ課題B「量子色力学のMCMCシミュレーションと素粒子実験」

[B1 B中間子崩壊] これまでの $B \rightarrow D^* l \nu$ 崩壊の研究において支配的な系統誤差を与えていた連続極限への外挿を制御して実験との比較検証を高精度化するため、格子カットオフが7.2GeVの格子配位データの生成を開始する。また、既に生成した格子カットオフが2.5-4.6 GeVの配位データ上で、 $D_s \rightarrow X_{ss} l \nu$ に加えて $D_s \rightarrow X_{sd} l \nu$ 包括的崩壊の崩壊率を計算する。前年度に引き続いて、異なるセットアップでの有限体積効果などの系統誤差を評価する手法を確立する。

[B2 エキゾチック] 純粋テトラクォーク状態 T_{cc} や核子-クォークコニウム状態に対応するハドロン間相互作用ポテンシャルについて、HAL QCD法に基づいた格子QCD第一原理計算を行う。主に「富岳」成果創出加速プログラムで生成した物理点直上格子QCD配位を用いた計算を継続し、統計数を増大させ、散乱振幅決定の高精度化を行う。これらの系では、従来あまり考慮されてこなかった2パイオン交換力の重要性が我々の研究で明らかになりつつあり、その系統的解明を目指してパイオン質量を変えた計算も行い相互作用の質量依存性を調べる。また重クォークを含むバリオン間力の計算・解析を開始する。得られた結果を用いてLHC等の加速器実験との連携を進める。

[B3 有限温度] 格子QCDシミュレーションに用いるカイラル対称性をもつフェルミオンとして、これまでに実績があるメビウス・ドメインウォール・フェルミオン(DWF)定式化を用いる。有限温度(擬)相転移直上、および周辺で物理パラメタ(アップ・ダウンおよびストレンジ・クォーク質量)を物理点直上に取って温度だけを変化させるシミュレーションを行うためのパラメタは、前課題『素粒子から元素』の研究成果を用いて決められる。2+1フレーバーDWFシミュレーション用に精密にチューニングされたパラメタによる計算を「富岳」で実行し、相転移の有無、(擬)相転移温度、重イオン衝突実験の現象論で重要になるクォーク数密度の揺らぎ、トポロジカル荷電の感受率等の熱力学的諸量を求める。この際必要になる、体積スケールと格子間隔依存性から連続極限へのスケールリングのための計算を3年間かけて実行する。2年目は細かい格子(時間方向の格子点数 $N_t=16$)の空間時間サイズ比 $R=N_s/N_t=3$ について、温度を6点程度とり、(擬)相転移近傍の小体積物理点シミュレーションを実行、結果の解析を行う。

[B4 自己学習モンテカルロ] 自己学習モンテカルロ法の利用を目指し、ドメインウォールフェルミオンに対し、ゲージ共変ニューラルネットワーク等の効率の良い適用を実装する。

サブ課題C「革新的手法による負符号問題をもつ系の第一原理計算」

[C1 シンプル] 世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法を用いて次の2つの研究を遂行する。(1)ハバード模型: 令和5年度は、空間サイズ 4×4 の格子に対し、トロッター数はまだ小さいものの、符号問題が厳しいパラメタでも世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法を用いて配位を「自由度の3乗以下」の計算時間で生成できることを確認した。ただし、フェルミオン行列のゼロモードを起源とする数値的不安定性は

解消しきれていない。これを踏まえ、令和6年度は空間サイズ 8×8 以上の格子でも安定的な数値計算ができるようアルゴリズムをさらに改良し、研究課題期間内に空間サイズ 12×12 の格子上で高精度の結果が得られるようにする。(2) 複素スカラー場の実時間ダイナミクス: 令和5年度は世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法を複素スカラー場に適用し、計算コストを従来のレフシェッツ・シングル法の「自由度の3乗」から「自由度の1乗」まで減少できることを確認した。これに基づき令和6年度は、シュウィンガー・ケルディッシュ形式を用いた実時間相関関数の計算法を確立し、実時間相関関数から直接読み取った輸送係数を線形応答など他の手法で得られた輸送係数と比較する。

[C2 複素ランジュバン] 低温高密度 QCD に関しては、格子サイズ $8^3 \times 128$ における計算を、ゲージ結合定数を小さくして化学ポテンシャルを変えながら行い、カラー超伝導のシグナルである diquark 凝縮が起こる領域を探索する。また超弦理論に関しては、複素ランジュバン法が機能させるために導入したパラメタを小さくした計算を行列サイズ 128、256 で行い、今年度確認できた3次元の膨張が起こるかどうか検証する。

サブ課題D「富岳による量子計算シミュレーション」

[D1 万能 QS] スーパーコンピュータ「富岳」やその他大規模並列計算機で動作する状態ベクトル法による量子計算シミュレータ braket の開発とその応用研究を進める。令和5年度は、従来の MPI 並列化手法と我々が最近提案したより多くのメモリを使用できる並列化手法のそれぞれについて、アダマールゲートを各量子ビットに作用させる量子回路を主な対象としてパフォーマンス測定と比較を行った。令和6年度はさらなるパフォーマンス測定(単精度浮動小数点数などを用いた場合や、異なる量子回路を用いた場合など)を進める。また、量子スピン系のダイナミクス研究を行うための機能拡張を行い、量子コンピュータ実機との比較も想定して、実機と同様の量子ビット配列でのシミュレーションを行う。

[D2 特定 QS] 「富岳」を念頭に並列計算環境におけるテンソルネットワーク法の開発を推進する。令和5年度は、行列積状態に対する並列化 time-evolving block decimation (pTEBD) 法を用いた量子計算シミュレータを実装した。令和6年度は、より量子エンタングルメントを効率的に扱える Projected entangled pair state (PEPS) 法を用いた量子計算シミュレーションを「富岳」に実装する。IBM社の量子コンピュータ実機で採用されている2次元的な量子ビット配列に適した量子計算シミュレーションを実現し、[D1 万能 QS]で開発される状態ベクトル法の結果と比較することで、pTEBD法及びPEPS法に基づく量子計算シミュレーションの計算精度を確認する。

[D3 量子古典ハイブリッド] [D1]および[D2]で開発した量子計算シミュレーションを元に、量子-古典ハイブリッド計算に対するシミュレーション法を開発する。量子断熱アルゴリズム及びその一般型である Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)を実装し、スピン $1/2$ 反強磁性ハイゼンベルグ模型の基底状態計算などへの応用を行う。

[D4 量子アルゴリズム] [D1~D3]で開発した量子計算シミュレーションおよび量子-古典ハイブリッド計算シミュレーションを活用し、Kicked Ising model などに対する量子ダイナミクス計算を実施し、量子コンピュータ実機で得られる結果と比較し、変分量子アルゴリズムのスケラビリティを検証する。

広報普及

本課題で得られた成果は、学術論文を通じて発表することを基本とする。それと前後して、関連する国際

会議等で積極的に発表する。目立った成果については、各機関でのプレスリリースも検討する。プレスリリースは計算基礎科学連携拠点のホームページにも掲載する。同ホームページには、研究内容をわかりやすくつたえる「月刊 JICFuS」等の記事を掲載する。HPC-Phys 勉強会を通じてアプリケーションの普及などを行う。

2-2. 実施内容（成果）

サブ課題 A「原子核から高温超伝導にわたる量子多体計算」

[A1 強相関電子系]

量子スピン液体発現における次元低減と電子分数化の機構および実験への帰結を調べるために、第一原理ハミルトニアンに対するスピンの動的構造因子の計算が「富岳」で進行している。現実物質の第一原理ハミルトニアンの基底状態のペア積波動関数の部分が d 波超伝導の波動関数でよく表されることが分かっており、動的構造因子に見られる励起構造も電子スピンの分数化や次元低減が示唆され、精査している。

ハーフフィリングのハバード模型の相互作用が大きい領域 $U/t=24$ に対して、 12×12 の正方格子を用いた計算を行い、量子スピン液体と同様のシングレット励起・トリプレット励起の準位レベル交差が見られることを確かめた。より大きなサイズの計算も「富岳」で進行中である。

強相関量子多体系の長時間ダイナミクスを効率よく計算する手法の一つとして、短時間の高精度の時間発展データを使って、10 倍程度までの長時間の時間発展を汎用的に高精度で予測する方法を、動的モード分解を利用して開発し、強相関電子系でしばしばみられる冪的減衰のような困難な時間発展を予測することに成功した。成果は Phys. Rev. Research から出版された。

人工ニューラルネットワークを用いた量子多体ソルバーは、従来隠れ変数としてイジング変数のような古典変数を用いるものがほとんどであったが、隠れ変数を量子化した全く新しいアルゴリズムを提案し、成果は J. Phys. Soc. Jpn. から出版され、JPS hot topic として選定された。機械学習アルゴリズムの抱えるブラックボックス化という問題を、自然の構造をアルゴリズムに取り入れてホワイトボックス化を図って回避し、同時に高精度化や「富岳」等を用いた大規模計算を容易にする道への提案としてさらなる検討やアプリケーション開発が進んでいる。

量子多体系を機械学習を用いて解く方法の総説を「富岳」の活用の現状も含めて執筆し、J. Phys. Soc. Jpn からレビューとして出版された。また、サイエンス社より「量子多体物理と人工ニューラルネットワーク」（野村悠祐・吉岡信行著）が刊行された。

[A2 原子核構造]

ジルコニウム同位体周辺核で有効相互作用の構築を完了し、球形核であるジルコニウム 90 から四重極変形核であるジルコニウム 100、非軸対称変形核であるジルコニウム 110 までの多様な変形状態を再現した。この有効相互作用は、周辺のクリプトン、ストロンチウム、モリブデン、ルテニウム同位体もカバーしており、ジルコニウムと比べて緩やかな形状相転移を記述できることを示した。また、ジルコニウム原子核で顕著にみられる八重極相関状態の解析を進め、八重極変形を示唆するバンド構造を構築した。

中性子過剰なバリウム同位体でも、八重極変形の影響が顕著になることが期待されている。本研究では、八重極相関を取り入れた広い模型空間を扱い、バリウム 138 からバリウム 150 までの殻模型計算を行った。現象論的な八重極相互作用によって、特徴的なネガティブパリティ状態のエネルギーが系統的に実験

値に近づくことを確かめた。

エルビウム 166 周辺の核種について研究を進め、準粒子真空殻模型法による計算結果に基づく非軸対称変形核の回転についての論文を投稿し、*The European Physical Journal A* 誌への掲載が決定した。従来の描像では非軸対称振動と考えられていた状態がこの計算では非軸対称変形核の回転状態に対応しており、振動状態はどのように現れるかを調べるために更なる計算と分析をおこなった。また、中性子数 50 の中性子過剰核について、大規模殻模型計算をすすめ、ニッケル 78 の形の共存現象の記述に成功するとともに、中性子過剰領域における励起スペクトルの予言をおこなった。

モンテカルロ殻模型による軽い核の第一原理計算については、Daejeon16 二体相互作用を用いて調和振動子 7 主殻を模型空間にとり計算した波動関数を用いて、ヘリウム 6 からベリリウム 6、ベリリウム 10 から炭素 10、ベリリウム 12 から炭素 12 の 3 通りの遷移についてニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素を計算した。これまで行った他の軽い核のエネルギーなどの計算と同様、核行列要素についても 100 基底ほどで収束した値が得られた。また、模型空間の大きさについて収束した結果を得られているか確認するために調和振動子 4-6 主殻の計算もおこなった。ヘリウム 6 からベリリウム 6、ベリリウム 10 から炭素 10 の 2 通りの遷移では収束した結果が得られたが、ベリリウム 12 から炭素 12 の遷移については、収束した結果が得られず、調和振動子 8 主殻以上のさらに大きな模型空間での計算が必要であることがわかった。さらに、核行列要素における短距離項の寄与を検証するために、長距離項のガモフ・テラー項、フェルミ項、テンソル項と短距離項に分けて核行列要素を計算した。短距離項については 6 種類のパラメタセットを用いて計算を行った。収束した値が得られたヘリウム 6 からベリリウム 6、ベリリウム 10 から炭素 10 の 2 通りの遷移については、短距離項が長距離項の 2-5 割程度の大きさを持つことがわかった。そのため、より精密な信頼性のある核行列要素を得るために、従来、あまり考慮されてこなかった短距離項の寄与について、今後、さらなる検証を行う必要があることがわかった。また、並行してカイラル有効場理論によって導出された Chiral 1.8/2.0(EM) と呼ばれる核力を用いた同様の第一原理計算をおこない、窒素 12 とホウ素 12 のベータ崩壊のガモフ・テラー遷移行列要素などを計算し、物理量の模型空間に対する収束性を議論した。[A2 原子核構造]の計算は、すべて「富岳」を用いて行った。

[A3 量子多体問題ベンチマーク]

量子多体問題に対して異なるアプローチ間の性能比較ができるような“規格”となる物理量（エネルギーと規格化されたエネルギーの分散）のデータベースに対し、パイロクロア格子上の量子スピン模型に対して「富岳」で計算した量子多体計算の結果に関するデータを修正した。

量子多体系の基底状態の近似的な波動関数のエネルギー分散が、エネルギーの真の値からのずれの大きさに比例するという性質をサブ課題 A1, A3 の参加者の一人が 20 年以上前に指摘していたが、この性質が対象とする系や次元、格子構造、ソルバーに依らず、概ね普遍的な比例係数を持った線形関係として満たされていることを、8 か国 33 名の国際共同研究によるデータ収集の解析で明らかにし、この成果は Science から出版され、プレスリリースも行なった。明らかになった比例関係は与えられた系の厳密な基底状態が分からなくても、量子多体ソルバーを適用して得られる近似的な波動関数の精度を計算容易なエネルギー分散から推定することを可能にし、多数の格子多体系の中で、どんな系がチャレンジとしてこれから挑戦する価値があるかというランク付けを可能にした。その結果、古典コンピュータでのソルバー開発や、将来の量子コンピュータの挑戦課題として物性物理分野からは強相関遍歴電子系とフラストレートした量子スピン系がリストアップされ、「富岳」による挑戦の指針も与えた。

サブ課題 B 「量子色力学の MCMC シミュレーションと素粒子実験」

[B1 B 中間子崩壊]

標準理論の不定パラメタである小林・益川行列要素を決定して標準理論の検証を進めるため、終状態のハドロンを指定するエクスクルーシブ崩壊と指定しないインクルーシブ崩壊の格子 QCD 研究を推進した。エクスクルーシブ崩壊については、エクスクルーシブ崩壊とインクルーシブ崩壊から決定した値がずれている小林・益川行列要素 $|V_{cb}|$ に着目し、その決定を与える $B \rightarrow D^* 1 \nu$ 崩壊の形状因子を計算した。特に、実験との整合性を強固に検証し、 $|V_{cb}|$ を高精度で決定するため、シミュレーションを高い運動量反跳へと拡張した計算を「富岳」で実行した。この結果は、我が国が主導する国際協力実験 SuperKEKB/Belle II がもたらす実験データと併せて $|V_{cb}|$ を決定するための基礎的な理論データとなる。

一方、エクスクルーシブ崩壊との矛盾の解決に向けて、インクルーシブ崩壊を格子シミュレーションによって研究する手法の確立を進めた。特に、クォーク質量や格子間隔についての外挿を制御しやすい D_s 中間子を題材にとり、もっとも非自明な系統誤差である有限体積効果を評価する方法を考案し、その予言とシミュレーション結果の比較検証を行った。

[B2 エキゾチック]

核子-クォークonium (チャーモニウム) 間相互作用、 $D-D^*$ 間相互作用 (T_{cc} 状態)、核子- D bar 間相互作用 (およびそのフレーバーパートナーである核子-K 間相互作用) など、重クォークが関わる様々なハドロン間相互作用について、HAL QCD 法に基づいた格子 QCD 第一原理計算を開始/継続した。主に「富岳」成果創出加速プログラムで生成した物理点直上格子 QCD 配位を用いた計算を行ったが、一部の相互作用については物理点近傍においても計算・解析を行った。理論計算の結果と LHC-ALICE におけるフェムトスコピー実験などとの比較を可能にするために、得られた相互作用に基づくフェムトスコピー研究も進めた。計算においては「富岳」コデザイン開発の成果である QWS (QCD Wide SIMD) Library に基づいて最適化されたコードを用い、「富岳」576 ノードで並列化効率 80~82%、演算効率 10% を達成している。

これらの結果のうち、核子-チャーモニウム間相互作用の計算においては、 $N-J/\psi$ ($J=3/2$)、 $N-J/\psi$ ($J=1/2$)、 $N-\eta_c$ ($J=1/2$) 間の相互作用について物理点近傍 ($m_\pi=146\text{MeV}$) における大規模計算を「富岳」を用いて行った。その結果、どのチャンネルにおいても、相互作用が全相対距離領域において引力であること、また遠距離では 2 パイオン交換力が重要な役割を果たしている可能性を指摘した (図 1)。なお、この 2 パイオン交換力のより定量的な同定に向けた新たな研究も開始した。

さらに、得られた相互作用ポテンシャルに基づき、核子-チャーモニウム間の散乱パラメタ (散乱長、有効距離) を決定した。得られた散乱長の結果は、従来、核子に対する J/ψ 光生成実験データを vector meson

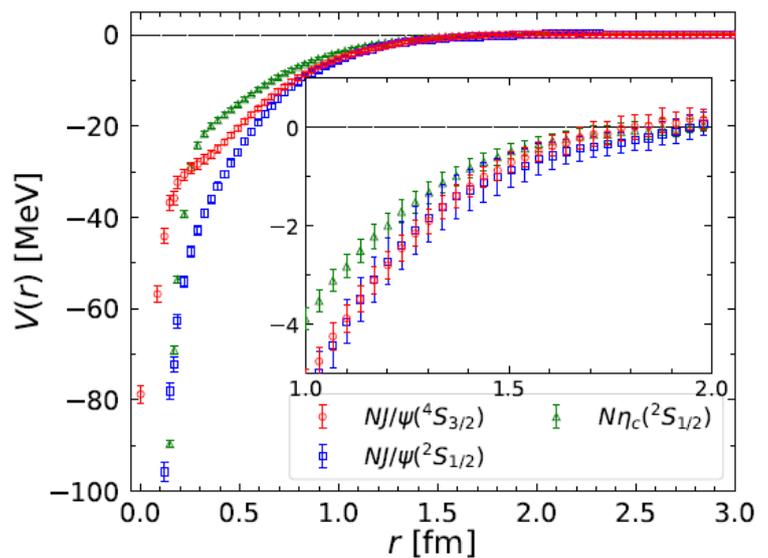


図 1. 格子 QCD で計算された核子-チャーモニウム間相互作用ポテンシャル

dominance を仮定して得られていた散乱長の値に比べ、桁で大きいものとなっており、格子 QCD による第一原理計算の重要性を示す結果ともなっている。これらの結果は文献[1]として出版された。

[1] Y. Lyu, T. Doi, T. Hatsuda and T. Sugiura, Phys. Lett. B 860, 139178 (2025).

[B3 有限温度]

QCD の有限温度(擬)相転を特徴付けるカイラル対称性とその自発的破れを正しく扱うため、カイラル対称性を高度に保つメビウス・ドメインウォール・フェルミオン(DWF)定式化を用いた研究を継続して行なっている。この定式化はカイラル対称性が厳密なオーバーラップフェルミオンへの架け橋としての有限温度相転移研究や、当プログラムでも行われている B 中間子崩壊の解析でも実績がある。また、この研究に直結する、現実より u, d クォークがやや重い設定での相転移探索研究は「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションで探る基礎科学:素粒子の基本法則から元素の生成まで」(以下、『素粒子から元素』)で成功を収めており、ここではその『素粒子から元素』で得られた物理一定線の情報と種々のシミュレーションパラメタのチューニングを継承して研究を進めている。これらの知見を総動員し、ud クォーク平均質量と s クォーク質量を物理点直上に置いた数値計算を遂行する事により、現実世界とほぼ同じ常況での QCD 相転移の有無、(擬)相転移温度、トポロジカル荷電の感受率等が求められ、さらに、得られた QCD 配位を用いて、重イオン衝突実験の現象論で重要になるクォーク数密度の揺らぎなど熱力学的諸量の研究に発展させる事が可能となる。この際必要になる、体積スケーリングと格子間隔依存性から連続極限へのスケーリングのための計算を課題実施期間である 3 年間をかけて実行している。

ここで行う 2+1 フレーバーQCD のシミュレーションは、軽い 2 フレーバー(u, d クォーク)の平均質量 m_{ud} と、重い 1 フレーバー(s クォーク)の質量 m_s 、さらにゲージ結合 β の計 3 つの格子パラメタで決まる。ゲージ結合は主に格子間隔 $a = a(\beta)$ を制御し、ひいては、時間方向の格子サイズ N_t の逆数で与えられる温度 $T = 1/(aN_t)$ を制御する。温度を変化させる際に温度以外の物理量を一定に保つため、ゼロ温度シミュレーションにより物理量一定を実現する格子クォーク質量をゲージ結合の関数として予め求めておく必要がある(Line of Constant Physics: LCP): $m_{ud}(\beta)$, $m_s(\beta)$ 。これらは『素粒子から元素』で既存、及び追加実行したゼロ温度シミュレーションの解析により、当課題で用いる β 領域で精密に求められている。DWF のカイラル対称性の若干の破れ m_{res} は、『素粒子から元素』の有限温度シミュレーションデータを用いた実測で β の関数としてパラメトライズされており ($m_{res}(\beta)$)、この補正を行った、正しい LCP シミュレーションを実行した。

今年度は細かい格子(時間方向の格子点数 $N_t=16$)の空間時間サイズ比 $R=N_s/N_t=3$ について、温度を 5 点とり、(擬)相転移近傍のシミュレーションを実行、結果の解析を行った。以下にここで得られた結果の一例を示す。

図 2 は QCD のトポロジカル電荷の感受率を温度の関数としてプロットしたものである。図中、大きめのシンボルは当研究の結果 (配位生成と解析のすべてが「富岳」を用いて得られたもの) で、粗い格子 (Nt=12) では二つの空間体積 (R=3: $36^3 \times 12$ ○, R=4: $48^3 \times 12$ □) があり、体積依存性は無視できることが分かる。今年度生成した細かい格子 (Nt=16; R=3: $48^3 \times 16$ ◇) の解析結果は粗い格子より若干小さい値を示している。その他のシンボルは現時点までで最も精度の高い既出版結果 - Budapest-Wuppertal 共同研究 (2016) の staggered fermion によるもので、同じ格子間隔の結果は同じ色で示してある。彼らの連続極限は “BW: continuum” であり、それが真の連続極限であるならば、カイラルフェルミオンの

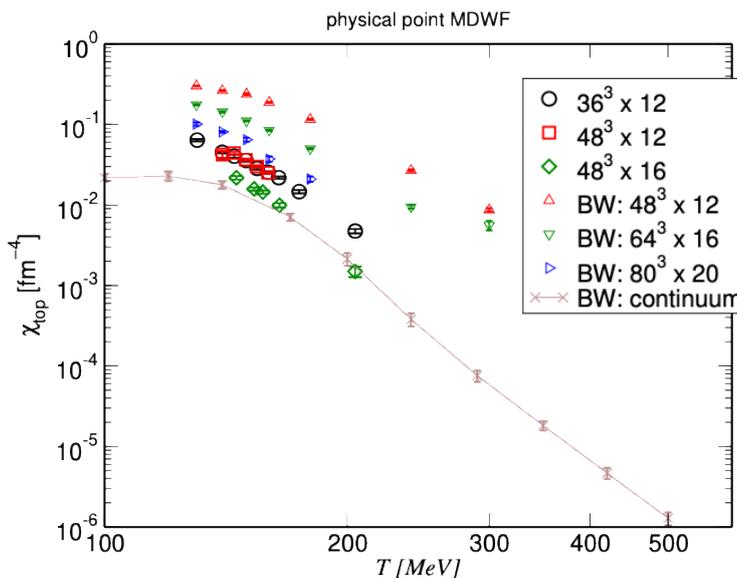


図 2. トポロジカル電荷の感受率

我々の結果は、格子間隔依存性が遥かに小さく、我々の細かい格子の結果は既に連続極限近傍にあることを示唆している。今後統計量の増大、および、細かい格子の体積依存性の確認を経て、連続極限の結果の推定を目指す。この物理量は暗黒物質の有力候補である QCD アクシオンの可能性を探る上で必要不可欠であるものの、我々と類似のカイラルフェルミオンを用いた TWQCD (2022) の結果は、BW と全く異なる値を示し、大きな混乱が生じている。次年度まとめられる我々の結果がこの状況に一石を投じることになると期待される。

[B4 自己学習モンテカルロ]

自己学習モンテカルロ法の利用を目指してドメインウォールフェルミオンに対してのゲージ共変ニューラルネットワークの実装のため、JuliaQCD にメビウスドメインウォールフェルミオンを実装した。

サブ課題 C 「革新的手法による負符号問題をもつ系の第一原理計算」

[C1 シンプル]

「富岳」を用いて以下の研究開発を行った。

・複素スカラー場理論：

計算コストスケールが $96 \times 96 \times 96 \times 96$ 格子まで体積の 1 乗となることを示し、 $8 \times 8 \times 8 \times 8$ 格子において物理量が他の計算手法と整合的であることを確認した。また、有限温度における実時間相関関数の計算コードを完成させ、空間サイズ $4 \times 4 \times 4$ (虚時間方向 2 サイト + 実時間方向 12 サイト) まで計算が破綻せずに物理量が計算できることを確認した。

・ハバード模型：

空間サイズ 6×6 格子および 8×8 格子上で、パラメタ (温度、化学ポテンシャル) を変えながら、物理量を世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法で計算し、他の代表的モンテカルロ計算手法である ALF (Algorithms for lattice fermions) と比較した。符号問題が厳しくないパラメタ領域において両者は等しい結果を与えるが、符号問題が厳しいパラメタ領域においては、ALF では符号問題に起因する大き

な統計誤差のために物理量が予言できなくなる一方で、世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法では符号問題の解消により統計誤差は小さく抑えられ、物理量も他の非モンテカルロ的手法による予測と整合的であることを確認した。また、ボソン化の手法を工夫することで、計算コストを体積の2乗にできることが分かった(空間サイズ 12x12、虚時間方向 20 サイズまで確認)。

[C2 複素ランジュバン]

低温高密度 QCD に関しては、従来のモンテカルロ法に替わり、複素ランジュバン法を適用して符号問題を克服するとともに、カラー超伝導をゲージ不変に扱うために新たに考案した diquark source term 法に基づき計算を遂行した。研究の過程で、diquark source term がランジュバン時間にしてオーダー1の長い自己相関をもつことが確認されたため、これを取り除くために、diquark rescaling 法による auto-correlation の抑制を考案した。その結果、格子サイズ $8^3 \times 128$ の計算において、カラー超伝導のシグナルと考えられる

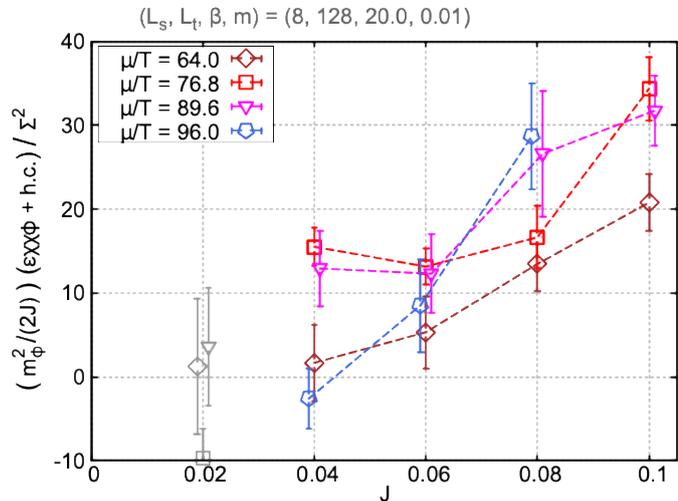


図 3. 格子サイズ $8^3 \times 128$ における計算

source term の非線形応答を捉えることに成功した。図 3 は適切に規格化された diquark source term に対する応答を、source term への結合定数(J)の関数としてプロットしたものである。データ点の色は、温度(T)で規格化された化学ポテンシャル(μ)の別を表し、物質(quark)密度と比例する。先行して行われたギャップ方程式の結果によれば、 $\mu/T=64$ (茶色)及び96(青)がノーマル相、 $\mu/T=76.8$ (赤)及び89.6(マゼンタ)がカラー超伝導との相境界に対応する。興味深いことに、相境界に対応するデータ点(赤/マゼンタ)では、結合定数Jを減少させても、応答が残る傾向が見られる。これはカラー超伝導の発現による非線形応答と期待される。(なお灰色のデータ点は、 $J = 0.02$ ではどの μ/T においても応答が消えてしまうことを示唆するが、これは有限体積効果による artifact と考えられる。)このようにカラー超伝導の兆候が掴めた為、当初計画していた「小さなゲージ結合定数(有効的に大きな体積)における計算」よりも、カラー超伝導の兆候が見られる parameter 領域の詳細な探索を優先させることとした。なお、 $\mu/T=64, 76.8, 96$ での計算には「富岳」を利用した。

超弦理論に関しては、令和6年度の研究の過程で、模型がもつローレンツ対称性により配位がローレンツブーストされ、解析が困難になるという問題が明らかになった。この課題を克服するため、ローレンツ対称性をあらかじめ「ゲージ固定」した形で模型を定義しなおし、これに基づいて解析を行った。このような経緯があったため、当初計画していた $N=256$ での計算を行わず、まずはこれまでと同じ行列サイズ $N=96, 128$ で解析を行うこととし、また複素ランジュバン法が適切に機能するよう導入されたパラメタについても、従来と同様のものを使用した。その結果、これまで確認されていた3次元時空の膨張は、この新たに定義した模型においても維持されることが確認された。従来観測されていた(3+1)次元時空の膨張が、ローレンツ対称性を正しく取り扱った模型においても再現されたことは、この3次元

時空の創発がブーストによるアーティファクトではなく、実際に物理的に実現される現象であることを明確に示すものである。行列サイズ 128 での計算には「富岳」を用いた。

サブ課題 D 「富岳による量子計算シミュレーション」

[D1 万能 QS]

状態ベクトル法シミュレータ RIKEN-braket (本年度から名称が変更となった) を用いて、量子フーリエ変換を行う量子回路のシミュレーションを行い、パフォーマンスの測定を行った。図 4 は量子ビット数を変えて「富岳」でシミュレーションしたときの各量子ゲートあたりの実行時間をプロットしたものである。ここで、 K と n_u は我々の開発した MPI 並列手法に関連するパラメタで、 $(K, n_u) = (0, 1)$ は従来手法に対応する。我々の手法を用いると MPI 通信パターンが従来手法より複雑になるため、実行時間は従来手法のものより多くなってしまふ。しかしながら、従来手法と比べ 40% 程度の速度低下に収まっており、これを許容できるなら従来手法より最大量子ビット数を 1 つ増やすことが可能なのは朗報である。

また、量子スピン系のダイナミクス研究を行えるよう、

本年度は RIKEN-braket の C++ ライブラリ (ket) に期待値や 2 状態間の忠実度を計算する関数テンプレートの実装を行った。これを用い、量子ハイゼンベルグ模型や非エルミート SSH 模型のシミュレーションを行った。この研究開発で得られた知見を bra (RIKEN-braket における「量子アセンブリコード」のシミュレータ) に反映させるのは今後の課題である。

[D2 特定 QS]

令和 5 年度に開発した行列積状態に対する並列化 time-evolving block decimation (pTEBD) 法を用いた量子計算シミュレータを用いて、ランダム量子回路に対するベンチマーク計算を「富岳」で行い、これを報告した。また、この方法を IBM の量子コンピュータ実機のプロトタイプに適した 2 次元テンソルネットワーク (PEPS) に拡張し、ウィークスケーリングを示す量子計算シミュレータを実装した。

[D3 量子古典ハイブリッド]

「D1 万能 QS」で開発した RIKEN-braket を用いて、スピン $S=1/2$ ハイゼンベルグ模型に対して QAOA (VQE) を実施した。図 5 は、変分パラメタ最適化反復ステップに対する基底状態エネルギーの収束性を最大 40 サイトまで調べた結果である。ここで、 N はサイト数、 D は ansatz における eSWAP ゲートから成る層の数である。なお、今回は従来の MPI 並列化手法 $(K, n_u) = (0, 1)$ を用いたが、このシミュレーションを「富岳」で実行するにあたって必要となる MPI プロセス数は、 $N > 30$ の場合 $2^{N-30}(1 + ND)$ とな

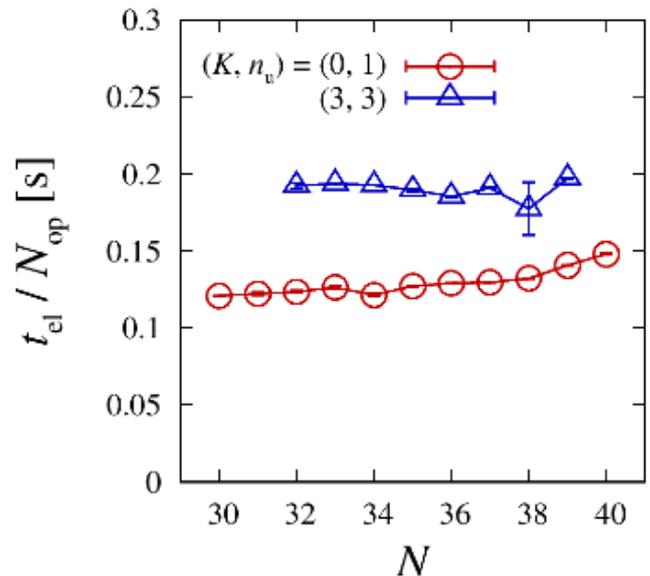


図 4. 量子フーリエ変換を行う量子回路シミュレーションのパフォーマンス

る。先行研究では ansatz の妥当性を $N = 16$ で確認していたが、我々の結果はより大きなサイズでも妥当であることを示している。特に先行研究でも議論されていた $D \sim N/4$ で収束性がよくなるということが「富岳」で行った我々のシミュレーションでも確認できた。

「D2 特定 QS」において開発した pTEBD 法を用いて、一次元異方的 J_1 - J_2 ハイゼンベルグ模型に対する量子断熱アルゴリズムによる基底状態計算を「富岳」を用いて実施した。その結果、量子断熱過程において始状態と終状態（すなわちターゲットハミルトニアンの基底状態）が異なる量子相に属する場合には、同一の量子相に属する場合と比べて、基底状態に到達するためにより多くの時間ステップを要することが明らかとなった。さらに、本断熱過程を量子回路上で実行可能な形式にするため、 Trotter 分解による離散化を行ったところ、 Trotter ステップ幅 $\delta\tau$ を $\delta\tau \sim J_1$ 程度まで大きくしても、全体の断熱時間 T と同程度の精度でターゲット状態に到達できることが確認された。これらの結果は、量子コンピュータ上での効率的なシミュレーション手法の設計に資する重要な知見を提供するものである。

[D4 量子アルゴリズム]

IBM 量子コンピュータ実機を用いて、133 量子ビットに対する 2 次元 kicked Ising 模型に対する実験を実施し、「D2 特定 QS」で開発して「富岳」で実施した pTEBD 計算および PEPS 計算と比較した。その結果、量子ダイナミクスにおいてエンタングルメントがあまり大きくならない場合は、pTEBD 計算および PEPS 計算とも、実験結果をよく再現するが、エンタングルメントがある程度発達する場合は、PEPS 計算がより実験に近い結果を与えることが分かった。

広報普及

<研究成果の情報発信>

課題で得られた研究成果の普及、社会への情報発信は、計算基礎科学連携拠点（JICFuS）が代表して行っており、主にウェブサイトを通じて研究成果を公開し、スーパーコンピュータを用いた基礎研究への理解を深めることに貢献している。

●ウェブサイトの制作・更新管理

領域：基礎科学の発展、新領域「シミュレーションでせまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ」のウェブサイト（日・英）を制作し、令和 5 年 9 月から公開している。

計算基礎科学連携拠点（JICFuS）（日）<http://www.jicfus.jp/jp/>（英）<https://www.jicfus.jp/en/>

領域：基礎科学の発展、新領域「シミュレーションでせまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ」

（日）https://jicfus.jp/fugaku_qa/jp/（英）https://jicfus.jp/fugaku_qa/en/

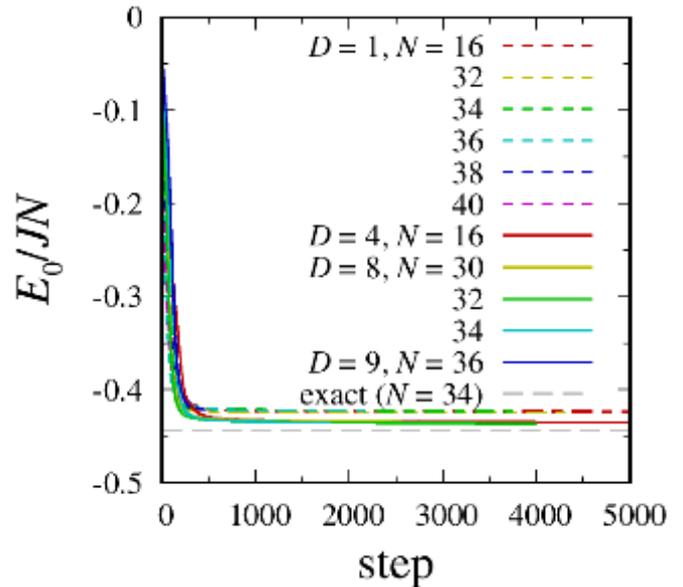


図 5. 一次元ハイゼンベルグ模型に対する QAOA (VQE) シミュレーションの結果。N は系のサイズ、D は量子回路の層数。破線は $N=34$ サイトに対する厳密な基底状態エネルギー。

●メディア対応

1) プレスリリースおよびニュースリリース

- ・量子力学的多体系の予測の難しさをランク付けする 統一的数値指標を提唱

発表日：令和6年10月18日情報解禁

発表主宰者：国立大学法人東北大学，国立大学法人東京大学

●ウェブマガジン「月刊 JICFuS」「月刊 JICFuS ムービー」製作

若手研究者を中心にインタビュー記事「月刊 JICFuS」を掲載。

令和6年度はオンラインにて取材による紹介記事を行い55号～と56号の2本と、東京女子大学と東京大学情報基盤センターの協力による紹介動画「月刊 JICFuS ムービー」1本（57号）を制作した。

【月刊 JICFuS】

・第55号「From the Atomic Nucleus to the Cosmos」（令和6年10月22日）筑波大学 計算科学研究センター Anil Kumar 研究員

・第56号「数値計算における重要課題「符号問題」に「世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法」で挑む」（令和7年2月27日）広島大学 滑川裕介 特任助教

【月刊 JICFuS ムービー】

- ・第57号「機械学習と理論物理学」（令和6年12月23日）東京女子大学 富谷昭夫 専任講師

2-3. 活動（研究会の活動等）

本課題の成果報告と計算手法等の議論のために、計算基礎科学連携拠点の主催として全体シンポジウムを開催した。成果創出加速プログラムにおける本課題「シミュレーションでせまる基礎科学：量子新時代へのアプローチ」のほか、「シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化（研究開発課題責任者：大須賀健）」、「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（研究開発課題責任者：山崎剛）」、「シミュレーションとAIで解き明かす太陽地球環境変動（研究開発課題責任者：堀田英之）」、「量子凝縮系のためのAI数値分光学で挑む量子纏れ構造の解明（研究開発課題責任者：山地洋平）」の共催で行なった。

日時：令和7年1月8日～10日 場所：アーバンネット神田カンファレンス

ホームページ：<https://kds.kek.jp/event/52621/>

参加者は、現地およびオンラインの合計で82名であった。また、このほかに以下のイベントを共催した。

[B1 B中間子崩壊]

1. Joint Workshop 29th Meeting on Physics at B factories & 26th New Physics Forum

日時：令和6年6月19日 場所：高エネルギー加速器研究機構

国内外から69名参加

2. Flavor Physics Workshop 2024

日時：令和6年12月2日-5日 場所：明山荘

国内から63名参加

[B2 エキゾチック]

1. YITP long-term and Nishinomiya-Yukawa memorial workshop "Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2024 (HHIQCD 2024)"

日時：令和6年10月14日 - 15日 場所：京都大学基礎物理学研究所

[C1 シンプル]

1. 離散的手法による場と時空のダイナミクス 2024

日時：令和6年9月2日 - 5日 場所：東京工業大学

2-4. 実施体制

実施項目	実施場所	担当責任者
プロジェクトの総合推進	茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・理論センター センター長・教授 橋本 省二
サブ課題 A「原子核から高温超伝導にわたる量子多体計算」	宮城県仙台市青葉区片平2-1-1 国立大学法人東北大学 金属材料研究所	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教授 野村 悠祐
[A1 強相関電子系] 最高レベルの変分計算の開発・実行	宮城県仙台市青葉区片平2-1-1 国立大学法人東北大学 金属材料研究所 東京都文京区本郷7-3-1 国立大学法人東京大学大学院	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教授 野村 悠祐 国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 名誉教授 今田正俊
[A2 原子核構造] 原子核構造の研究	茨城県つくば市天王台1丁目1番1 国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター	国立大学法人筑波大学 計算科学研究センター 准教授 清水則孝
[A3 量子多体問題ベンチマーク] 最高レベルの変分計算の開発・実行	宮城県仙台市青葉区片平2-1-1 国立大学法人東北大学 金属材料研究所 東京都文京区本郷7-3-1 国立大学法人東京大学大学院	国立大学法人東北大学 金属材料研究所 教授 野村 悠祐 国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 名誉教授 今田正俊
サブ課題 B「量子色力学のMCMC シミュレーションと素粒子実験」	兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目1番地2 6 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー 青木 保道

[B1 B中間子崩壊] 格子QCDによるB中間子崩壊の研究	茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・理論センター センター長・教授 橋本省二
[B2 エキゾチック] 格子QCDによるエキゾチック粒子の研究	埼玉県和光市2-1 国立研究開発法人理化学研究所 数理創造プログラム 京都府京都市左京区北白川追分町 国立大学法人京都大学 基礎物理学研究所	国立研究開発法人理化学研究所 数理創造プログラム 専任研究員 土井琢身 国立大学法人京都大学 基礎物理学研究所 教授 青木慎也
[B3 有限温度] 及び[B4 自己学習モンテカルロ] 格子QCDによる有限温度相転移の研究	兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目1番地26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー 青木保道
サブ課題C「革新的手法による負符号問題をもつ系の第一原理計算」	京都府京都市左京区北白川追分町 国立大学法人京都大学 理学研究科	国立大学法人京都大学 理学研究科 准教授 福間将文
[C1 シンプル] シンプル法による負符号問題の克服	京都府京都市左京区北白川追分町 国立大学法人京都大学 理学研究科	国立大学法人京都大学 理学研究科 准教授 福間将文
[C2 複素ランジュバン] 複素ランジュバン法による符号問題の克服	茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・理論センター センター長・教授 橋本省二
サブ課題D「富岳による量子計算シミュレーション」	兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目1番地26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー 柚木清司
[D1 万能QS] 量子計算シミュレータの開発	兵庫県神戸市中央区港島南町7丁目1番地26 国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター	国立研究開発法人理化学研究所 計算科学研究センター チームリーダー 柚木清司

[D2 特定QS] 量子計算シミュレータの開発	兵庫県神戸市中央区港島南町 7丁目1番地26 国立研究 開発法人理化学研究所 計算 科学研究センター	国立研究開発法人 理化学 研究所 計算科学研究セン ター チームリーダー 柚木 清司
[D3 量子古典ハイブリッド] 量子計算シミュレータの開発	兵庫県神戸市中央区港島南町 7丁目1番地26 国立研究 開発法人理化学研究所 計算 科学研究センター	国立研究開発法人理化学研 究所 計算科学研究センタ ー チームリーダー 柚木 清司
[D4 量子アルゴリズム] 量子計算シミュレータの開発	兵庫県神戸市中央区港島南町 7丁目1番地26 国立研究 開発法人理化学研究所 計算 科学研究センター	国立研究開発法人理化学研 究所 計算科学研究センタ ー チームリーダー 柚木 清司
広報普及	茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネ ルギー加速器研究機構 千葉県印西市平賀学園台1- 1 学校法人順天堂大学 医 学部一般教育	大学共同利用機関法人高エ ネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所・理論 センター センター長・教 授 橋本省二 学校法人順天堂大学 医学 部一般教育 助教 矢田雅 哉

別添 1 学会等発表実績

1. 学会誌・雑誌等における論文掲載

No.	掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌名等）	発表した時期
	[A1 強相関電子系] [A3 量子多体問題ベンチマーク]			
1	<i>Ab initio</i> studies on interactions in K_3C_{60} under high pressure	Jianyu Li, Zhangkai Cao, Jiahao Su, Ruipeng Wang, Haipeng Li, Yusuke Nomura, Xiaosen Yang, and Ho-Kin Tang	Phys. Rev. B 109, 134513 (2024)	2024/4

2	Dome structure in pressure dependence of superconducting transition temperature for $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$: Studies by ab initio low-energy effective Hamiltonian	Jean-Baptiste Morée, Youhei Yamaji, and Masatoshi Imada	Physical Review Research 6, 23163 (2024)	2024/5
3	Gravitational wave analogues in spin nematics and cold atoms	L. Chojnacki, R. Pohle, H. Yan, Y. Akagi, N. Shannon	Physical Review B 109, L220407 (2024)	2024/6
4	Eight-color chiral spin liquid in the $S = 1$ bilinear-biquadratic model with Kitaev interactions	R. Pohle, N. Shannon, Y. Motome	Physical Review Research 6, 033077 (2024)	2024/7
5	Fermi Machine --- Quantum Many-Body Solver Derived from Correspondence between Noninteracting and Strongly Correlated Fermions	Masatoshi Imada	J. Phys. Soc. Jpn. 93, 104002 (2024)	2024/9
6	Variational Benchmarks for Quantum Many-Body Problems	D. Wu, R. Rossi, F. Vicentini, N. Astrakhantsev, F. Becca, X. Cao, J. Carrasquilla, F. Ferrari, A. Georges, M. Hibat-Allah, M. Imada, A.M Läuchli, G. Mazzola, A. Mezzacapo, A. Millis, J.R. Moreno, T. Neupert, Y. Nomura, J. Nys, O. Parcollet, R. Pohle, I. Romero, M. Schmid, J. M. Silvester, S. Sorella, L.F. Tocchio, L. Wang, S.R. White, A. Wietek, Q. Yang, Y. Yang, S. Zhang, G. Carleo	Science 386, 6719 (2024)	2024/10
7	Derivation of low-energy Hamiltonians for heavy-fermion materials	E. A. Ghioldi, Zhentao Wang, L. M. Chinellato, Jian-Xin Zhu, Yusuke Nomura, Ryotaro Arita, W. Simeth, M. Janoschek, F. Ronning, and C. D. Batista	Phys. Rev. B 110, 195123 (2024)	2024/11
8	Quantum Many-Body Solver Using Artificial Neural Networks and its	Yusuke Nomura, Masatoshi Imada	J. Phys. Soc. Jpn. 94, 31001 (2025)	2024/12

	Applications to Strongly Correlated Electron Systems			
9	Pseudogap in electron-doped cuprates: Strong correlation leading to band splitting	M. Horio, Shiro Sakai, H. Suzuki, Y. Nonaka, M. Hashimoto, D. Lu, Z. Shen, T. Ohgi, Takuya Konno, T. Adachi, Y. Koike, Masatoshi Imada, Atsushi Fujimori	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United State of America, 122, 2406624122 (2025)	2024/12
10	Bypassing the lattice BCS-BEC crossover in strongly correlated superconductors through multiorbital physics	Niklas Witt, Yusuke Nomura, Sergey Brener, Ryotaro Arita, Alexander I. Lichtenstein, and Tim O. Wehling	npj Quantum Mater. 9, 100 (2024)	2024/12
11	Variation of electron-electron interaction in pyrochlore structures	Jianguo Li, Ji Liu, Mingjun Han, Waqas Haider, Yusuke Nomura, and Ho-Kin Tang	Phys. Rev. B 110, 245147 (2024)	2024/12
12	<i>Ab initio</i> study on heavy-fermion behavior in LiV_2O_4 : Role of Hund's coupling and stability	Steffen Backes, Yusuke Nomura, Ryotaro Arita, and Hiroshi Shinaoka	Phys. Rev. B 111, L041102 (2025)	2025/1
13	Forecasting long-time dynamics in quantum many-body systems by dynamic mode decomposition	R. Kaneko, M. Imada, Y. Kabashima, and T. Ohtsuki	Physical Review Research 7, 13085 (2024)	2025/1
14	Classical \mathbb{Z}_2 spin liquid on the generalized four-color Kitaev model	Han Yan and Rico Pohle	Physical Review Research 7, L012052 (2025)	2025/3
	[A2 原子核構造]			
1	Low spin spectroscopy of neutron-rich 43, 44, 45Cl via β^- and βn decay	Vandana Tripathi, Soumik Bhattacharya, E. Rubino, C. Benetti, J. F. Perello, S. L. Tabor, S. N. Liddick, P. C. Bender, M. P. Carpenter, J. J. Carroll, A. Chester, C. J. Chiara, K. Childers, B. R. Clark, B. P. Crider, J. T. Harke, R. Jain, B. Longfellow, S. Luite M. Mogannam, T. H.	Phys. Rev. C 109, 044320 (2024)	2024/4

		Ogunbeku, A. L. Richard, S. Saha, N. Shimizu, O. A. Shehu, Y. Utsuno, R. Unz, Y. Xiao, S. Yoshida, and Yiyi Zhu		
2	Multifaceted character of shape coexistence phenomena in atomic nuclei	S. Leoni, B. Fornal, A. Bracco, Y. Tsunoda, and T. Otsuka	Prog. Part. Nucl. Phys. 139, 104119 (2024)	2024/5
3	New isomeric transition in ^{36}Mg : Bridging the $N = 20$ and $N = 28$ islands of inversion	M. Madurga, J. M. Christie, Z. Xu, R. Grzywacz, A. Poves, T. King, J. M. Allmond, A. Chester, I. Cox, J. Farr, I. Fletcher, J. Heideman, D. Hoskins, A. Laminack, S. Liddick, S. Neupane, A. L. Richard, N. Shimizu, P. Shuai, K. Siegl, Y. Utsuno, P. Wagenknecht, and R. Yokoyama	Phys. Rev. C 109, L061301 (2024)	2024/6
4	Large-scale shell model study of β -decay properties of $N = 126$, 125 nuclei: Role of Gamow-Teller and first-forbidden transitions in the half-lives	A. Kumar, N. Shimizu, Y. Utsuno, C. Yuan, and P.C. Srivastava	Phys. Rev. C 109, 064319 (2024)	2024/6
5	Spectroscopy of deeply bound orbitals in neutron-rich Ca isotopes	P. J. Li, J. Lee, P. Doornbal, S. Chen, S. Wang, A. Obertelli, Y. Chazono, J. D. Holt, B. S. Hu, K. Ogata, Y. Utsuno, K. Yoshida, N. L. Achouri, H. Baba, F. Browne, D. Calvet, F. Châteauneu, N. Chiga, A. Corsi, M. L. Cortés, A. Delbart, J. -	Phys. Lett. B 855 (2024) 138828	2024/6

		<p>M. Gheller, A. Giganon, A. Gillibert, C. Hilaire, T. Isobe, T. Kobayashi, Y. Kubota, V. Lapoux, H. N. Liu, T. Motobayashi, I. Murray, H. Otsu, V. Panin, N. Paul, W. Rodriguez, H. Sakurai, M. Sasano, D. Steppenbeck, L. Stuhl, Y. L. Sun, Y. Togano, T. Uesaka, K. Wimmer, K. Yoneda, O. Aktas, T. Aumann, K. Boretzky, C. Caesa, L. X. Chung, F. Flavigny, S. Franchoo, I. Gasparic, R. -</p> <p>B. Gerst, J. Gibelin, K. I. Hahn, J. Kahlbow, D. Kim, T. Koiwai, Y. Kondo, D. Köpfer, P. Koseoglou, C. Lehrer, B. D. Linh, T. Lokotko, M. MacCormick, K. Miki, K. Moschner, T. Nakamura, S. Y. Park, D. Rossi, E. Sahin, F. Schindler, H. Simon, P. -</p> <p>A. Söderström, D. Sohler, S. Takeuchi, H. Toernqvist, J. Tscheuschner, V. Vaquero, V. Wagner, V. Werner, X. Xu, H. Yamada, D. Yan, Z. Yang, M. Yasuda, L. Zanetti</p>		
6	Nuclear structure properties of 193-200Hg isotopes within large-scale shell model calculations	S. Sahoo, P. C. Srivastava, N. Shimizu, and Y. Utsuno,	Phys. Rev. C 110, 024306 (2024)	2024/7

7	Nuclear structure properties of 193 - 200Hg isotopes within large-scale shell model calculations	S. Sahoo, P. C. Srivastava, N. Shimizu, and Y. Utsuno	Phys. Rev. C 110, 024306 (2024)	2024/8
8	Shell-model study for allowed and forbidden β -decay properties in the mass region “south” of 208Pb	S. Sharma, P. C. Srivastava, Anil Kumar, T. Suzuki, C. Yuan, and N. Shimizu	Phys. Rev. C 110, 024320 (2024).	2024/8
9	Refined Topology of the N = 20 Island of Inversion with High Precision Mass Measurements of 31–33Na and 31–35Mg	E. M. Lykiardopoulou, C. Walls, J. Bergmann, M. Brodeur, C. Brown, J. Cardona, A. Czihaly, T. Dickel, T. Duguet, J.-P. Ebran, M. Frosini, Z. Hockenbery, J. D. Holt, A. Jacobs, S. Kakkar, B. Kootte, T. Miyagil, A. Mollaebrahimi, T. Murboeck, P. Navratil, T. Otsuka, W. R. Plaß, S. Paul, W. S. Porter, M. P. Reiter, A. Scalesi, C. Scheidenberger, V. Somà, N. Shimizu, Y. Wang, D. Lunney, J. Dilling, and A. A. Kwiatkowski	Phys. Rev. Lett. 134, 052503 (2025)	2025/2
10	Probing New Bosons and Nuclear Structure with Ytterbium Isotope	Menno Door, Chih-Han Yeh, Matthias Heinz, Fiona Kirk, Chunhai Lyu, Takayuki Miyagi, Julian C. Berengut, Jacek Bieroń, Klaus Blaum, Laura S. Dreissen, Sergey Eliseev, Pavel Filianin, Melina	Phys. Rev. Lett. 134, 063002 (2025).	2025/2

		Filzinger, Elina Fuchs, Henning A. Fürst, Gediminas Gaigalas, Zoltán Harman, Jost Herkenhoff, Nils Huntemann, Christoph H. Keitel, Kathrin Kromer, Daniel Lange, Alexander Rischka, Christoph Schweiger, Achim Schwenk, Noritaka Shimizu, and Tanja E. Mehlstäubler		
	[B1 B 中間子崩壊]			
1	Study on the P-wave form factors contributing to BsBs to DsDs inclusive semileptonic decays from lattice simulations	Z. Hu, A. Barone, A. Elgaziari, S. Hashimoto, A. Juettner, T. Kaneko, R. Kellermann	Proceedings of Science, LATTICE2024 (2025) 241	2025/1
2	Systematic effects in the lattice calculation of inclusive semileptonic decays	R. Kellermann, A. Barone, A. Elgaziari, S. Hashimoto, Z. Hu, A. Jüttner, Takashi Kaneko	Proceedings of Science, LATTICE2024 (2025) 245	2025/1
	[B2 エキゾチック]			
1	Coupled-channel $\Lambda_c K^+ - p D_s$ interaction in the flavor SU(3) limit of lattice QCD	Faisal Etminan, Kenji Sasaki, Takashi Inoue	Phys. Rev. D 109, 074506	2024/4
2	Influence of Discretization Error on the HAL QCD Baryon Forces	Takashi Inoue and HAL QCD Collaboration	Few-Body Syst (2024) 65:34	2024/4
3	Scale setting and hadronic properties in the light quark sector with (2+1)-flavor Wilson fermions at the physical point	Tatsumi Aoyama, Takahiro M. Doi, Takumi Doi, Etsuko Itou, Yan Lyu, Kotaro Murakami, and Takuya Sugiura	Phys. Rev. D 110, 094502	2024/11
4	New configuration set of HAL QCD collaboration	E. Itou and for HAL QCD Collaboration	PoS LATTICE2023 (2024) 140	2024/11

5	Nucleon-charmonium interactions from lattice QCD	Yan Lyu, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Takuya Sugiura	Phys. Lett. B 860 (2025) 139178	2025/1
6	Physics-driven learning for inverse problems in quantum chromodynamics	Gert Aarts, Kenji Fukushima, Tetsuo Hatsuda, Andreas Ipp, Shuzhe Shi, Lingxiao Wang, and Kai Zhou	Nature Reviews Physics 7, 154-163 (2025)	2025/1
7	NJ/Ψ and $N\eta_c$ interactions from lattice QCD	Yan Lyu, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, and Takuya Sugiura	PoS LATTICE2024 (2025) 103	2025/1
8	Building Hadron Potentials from Lattice QCD with Deep Neural Networks	Lingxiao Wang, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, and Yan Lyu	PoS LATTICE2024 (2025) 076	2025/1
9	Left-hand cut and the HAL QCD method	Sinya Aoki, Takumi Doi, and Yan Lyu	PoS LATTICE2024 (2025) 089	2025/1
10	$\Lambda(1405)$ in the flavor SU(3) limit using a separable potential in the HAL QCD method	K. Murakami and S. Aoki	PoS LATTICE2024 (2025) 101	2025/1
11	Deep learning for exploring hadron-hadron interactions	Lingxiao Wang	J. Subatomic Part. Cosmol. 3 (2025) 100024	2025/1
12	Lattice gauge ensembles and data management	Y. Aoki, E. Bennett, R. Bignell, K. U. Can, T. Doi, S. Gottlieb, R. Gupta, G. von Hippel, I. Kanamori, A. Kotov, G. Koutsou, A. Patella, G. Pederiva, C. Schmidt, T. Yamazaki and Y.-B. Yang	PoS LATTICE2024 412 (2025)	2025/2
	[B3 有限温度]			
1	Characterizing Strongly Interacting Matter at Finite Temperature: (2+1)-Flavor QCD with Möbius Domain Wall fermions	Jishnu Goswami, Yasumichi Aoki, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Issaku Kanamori, Takashi Kaneko, Yoshifumi Nakamura, Yu Zhang	Proceedings of Science (PoS) LATTICE2023, 203	2024/5
2	Quark number susceptibility and conserved charge fluctuation for (2+1)-	Jishnu Goswami, Yasumichi Aoki, Hidenori Fukaya, Shoji Hashimoto, Issaku Kanamori, Takashi	Proceedings of Science (PoS) LATTICE2024, 168	2025/1

	flavor QCD with Möbius domain wall fermions	Kaneko, Yoshifumi Nakamura, Yu Zhang		
	[B4 自己学習モンテカルロ]			
1	JuliaQCD: Portable lattice QCD package in Julia language	Yuki Nagai, Akio Tomiya	arXiv:2409.03030,	2024/09
2	Lattice gradient flows (de-)stabilizing topological sectors	Yuya Tanizaki, Akio Tomiya, Hiromasa Watanabe	arXiv:2411.14812	2024/11
3	Machine Learning Estimation on the Trace of Inverse Dirac Operator using the Gradient Boosting Decision Tree Regression	Benjamin J. Choi, Hiroshi Ohno, Takayuki Sumimoto, Akio Tomiya	arXiv:2411.18170	2024/11
4	Self-learning Monte Carlo with equivariant Transformer	Yuki Nagai, Akio Tomiya	Journal of the Physical Society of Japan, 93 (2024) 11 [Editors' Choice]	2024/11
5	Equivariant Transformer is all you need	Akio Tomiya, Yuki Nagai	Proceedings of Science(LATTICE2023) 001	2024/11
	[C1 シンプル]			
1	Simplified algorithm for the Worldvolume HMC and the Generalized-thimble HMC	M. Fukuma	PTEP 2024(2024)053B02	2024/9
2	Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to the finite-density complex ϕ^4 model and the Hubbard model	M. Fukuma, and Y. Namekawa	PoS LATTICE2023 (2024) 178	2024/11
3	Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to the two-dimensional Hubbard model"	M. Fukuma, and Y. Namekawa	PoS LATTICE2024 (2025) 053	2025/2
4	Extending the Worldvolume Hybrid Monte Carlo	M. Fukuma, and Y. Namekawa	PoS LATTICE2024 (2025) 065	2025/2

	algorithm to group manifolds			
	[D1 万能QS] [D2 特定QS] [D3 量子古典ハイブリッド] [D4 量子アルゴリズム]			
1	Improved real-space parallelizable matrix-product state compression and its application to unitary quantum dynamics simulation	Rong-Yang Sun, Tomonori Shirakawa, and Seiji Yunoki	Physical Review B 110, 085149 (18-pages) (2024)	2024/8

2. 国際会議・シンポジウムにおける口頭・ポスター発表

No.	発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名（所属機関）	発表した場所（学会名等）	発表した時期
	[A1 強相関電子系] [A3 量子多体問題ベンチマーク]			
1	Quantum many-body simulations using artificial neural networks (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	Joint ICTP-WE Heraeus School and Conference on Frontiers at the Intersection of Quantum Simulation and Machine Learning	2024/4
2	Semiclassical dynamics of spin nematics and spin liquids in S=1 magnets (招待講演)	Rico Pohle (Tohoku Univ.)	Methods for modeling transport and dynamics of quantum magnets	2024/5
3	Quantum entanglement covering strong coupling superconductors and quantum spin liquid (基調講演)	M. Imada (Sophia Univ.)	Superstripes 2024	2024/6
4	Future Forecast of Quantum Matter: Long-Time Behavior Predicted from Short-Time Experimental or Theoretical Data via Dynamic Mode Decomposition (口頭)	R. Kaneko (Sophia Univ.)	Superstripes 2024	2024/6

5	Analyzing Strongly Correlated Electron Systems Using Artificial Neural Networks (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	Trends in the Theory of Quantum Materials 2024	2024/6
6	Predicting long-time dynamics of quantum many-body systems by dynamic mode decomposition (口頭)	R. Kaneko (Sophia Univ.)	Trends in the Theory of Quantum Materials	2024/6
7	Fermi Surface Expansion above Critical Temperature in a Hund Ferromagnet (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	Computational Quantum Many-Body Theory 2024	2024/7
8	Dynamics of SU(3) spin coherent states: semiclassical method and its application to spin nematics and spin liquids in spin-1 magnets (口頭)	Rico Pohle (Tohoku Univ.)	SU(N) physics in quantum many-body systems: theory, experiment, and numerics	2024/7
9	<i>Ab initio</i> studies and emergent physics of cuprate superconductors (招待講演)	M. Imada (Sophia Univ.)	International Conference on 70 years of Tanabe-Sugano diagram	2024/9
10	フェルミマシン (口頭)	今田正俊 (上智大)	日本物理学会第79回年次大会	2024/9
11	動的モード分解による量子多体系の長時間ダイナミクス予測 (口頭)	金子隆威 (上智大)	日本物理学会第79回年次大会	2024/9
12	多層型銅酸化物超伝導体の第一原理計算: 多変数変分モンテカルロ法を用いた解析 (口頭)	金子隆威 (上智大)	日本物理学会第79回年次大会	2024/9
13	Fermi machine (招待講演)	今田正俊 (上智大)	第12回学習物理領域セミナー	2024/11
14	量子多体問題への機械学習手法の応用 (口頭)	金子隆威 (上智大)	第18回物性科学領域横断研究会	2024/11
15	First-Principles Studies on Correlated Materials: Applications to Nickelate Superconductors and Noncollinear Magnets (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	The 8th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics and the 7th Symposium on International Joint Graduate Programs in Materials Science and Spintronics	2024/11

16	Incorporating Quantum Many-Body Correlations into Artificial Neural Networks (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	Correlated Quantum Materials + beyond 2024	2024/11
17	Spin Nematics Meet Spin Liquids: Exotic Phases in the Spin-1 Bilinear-Biquadratic Model with Kitaev Interactions (ポスター)	Rico Pohle (Tohoku Univ.)	Correlated Quantum Materials + beyond: Symposium	2024/11
18	Artificial neural networks for incorporating quantum many-body correlations (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	CREST-EPiQS International Workshop 2024	2024/12
19	無限層ニッケル酸化物超伝導体の電子状態：理論 (招待講演)	野村悠祐 (東北大)	超伝導研究の新潮流	2024/12
20	機械学習と量子多体問題 (招待講演)	今田正俊 (上智大)	学術変革学習物理勉強会	2025/2
21	ボルツマンマシンの基礎と量子多体問題への応用 (招待講演)	野村悠祐 (東北大)	学習物理勉強会 ホップフィールド模型・ボルツマンマシンの基礎と応用	2025/2
22	Boltzmann machine and Its Applications to Materials Science (招待講演)	M. Imada (Sophia Univ.)	The Quantum Frontier of Machine Learning	2025/3
23	Fermi machine (口頭)	M. Imada (Sophia Univ.)	APS march meeting 2025	2025/3
24	Ab initio Studies on Cuprate High-Tc Superconductors (招待講演)	M. Imada (Sophia Univ.)	APS march meeting 2025	2025/3
25	Predicting long-time quantum dynamics from short-time experimental or theoretical data via dynamic mode decomposition (口頭)	R. Kaneko (Sophia Univ.)	APS march meeting 2025	2025/3
26	量子相分類と量子ダイナミクスへの機械学習手法の応用 (口頭)	金子隆威 (上智大)	日本物理学会 2025 年春季大会	2025/3
27	Spin liquids meet spin nematics in the S=1 Kitaev model with bilinear-biquadratic interactions (招待講演)	Rico Pohle (Tohoku Univ.)	APS march meeting 2025	2025/3
28	Classical spin liquid on the generalized four-color Kitaev model (口頭)	Rico Pohle (Tohoku Univ.)	APS march meeting 2025	2025/3

29	Neural-network solver for quantum matter (招待講演)	Yusuke Nomura (Tohoku Univ.)	Machine Learning for Quantum Matter	2025/2
30	量子多体物理とボルツマンマシン (招待講演)	野村悠祐 (東北大)	日本物理学会春季大会 2025	2025/3
	[A2 原子核構造]			
1	Triaxial Shapes and Rotational Energies of Atomic Nuclei (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	国際ワークショップ Exploring nuclear physics across energy scales 2024: Intersection between nuclear structure and high energy nuclear collisions	2024/4
2	The shell model and the nuclear rotation, after seven decades (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	国際シンポジウム Nuclear Structure 2024	2024/7
3	Large-scale shell model study of β -decay properties of $N = 126, 125$ nuclei along the r-process path (招待講演)	Anil Kumar (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)	[RIBF ULIC mini-WS] Structure of neutron-rich matter revealed by beta decay	2024/7
4	Nuclear shapes studied by Monte Carlo shell model calculations (口頭)	Y. Tsunoda (Center for Nuclear Study, the University of Tokyo)	Celebrating 75 Years of the Nuclear Shell Model and Maria Goeppert-Mayer	2024/7
5	Prevailing triaxial shapes in atomic nuclei and a quantum theory of rotation of composite objects (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	第57回 Zakopane Conference on Nuclear Physics	2024/8
6	モンテカルロ殻模型による $N=50$ 近傍の核構造の研究 (口頭)	角田佑介 (東大 CNS), 清水則孝 (筑波大計科セ), 大塚孝治 (理研仁科セ/東大理)	日本物理学会第79回 年次大会	2024/9
7	ジルコニウム同位体とその周辺での変形共存 (口頭)	柳瀬宏太 (理研仁科), 角田佑介 (東大 CNS), 大塚	日本物理学会第79回 年次大会	2024/9

		孝治（理研仁科），清水則孝（筑波大計セ）		
8	大規模殻模型計算による N=126, 125 中性子過剰核のベータ崩壊（口頭）	清水則孝（筑波大計科セ），Anil Kumar（筑波大計科セ），宇都野穰（原研），C. Yuan（Sun Yat-sen U.），P. C. Srivastava（IIT Roorkee）	日本物理学会第79回 年次大会	2024/9
9	Shell model study of beta-decay in neutron-rich N = 126, 125 nuclei along the r-process path（ポスター）	Anil Kumar（Center for Computational Sciences, University of Tsukuba）	22nd International Conference on Recent Progress in Many-Body Theories（RPMBT22）	2024/9
10	Driving with Ms. Silvia into Isotopic Ridges（招待講演）	大塚孝治（東京大学/理化学研究所）	国際ワークショップ Multifaceted aspects of collaborative research on nuclear structure	2024/10
11	Unexplored excitation due to triaxial deformation and electron scattering（招待講演）	大塚孝治（東京大学/理化学研究所）	国際シンポジウム Low-Energy Electron Scattering for Nucleon and Exotic Nuclei	2024/10
12	Shell model study of beta-decay in neutron-rich N = 126, 125 nuclei along the r-process path（ポスター）	Anil Kumar（Center for Computational Sciences, University of Tsukuba）	15th ISAJ Annual Symposium	2024/10
13	Quasi-particle vacua shell model and its applications to medium-heavy nuclei（招待講演）	清水則孝（筑波大学計算科学研究センター）	International Symposium “International Conference on Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2024（NTSE-2024）”	2024/11

14	Large-scale shell-model calculations, quasi-particle vacua shell model, and their applications (招待講演)	清水則孝 (筑波大学計算科学研究センター)	International Symposium “Celebrating 75 Years of the Nuclear Shell Model and Maria Goeppert-Mayer”	2024/11
15	Large-scale shell model study of β^- -decay properties of N = 126, 125 nuclei along the r-process path (招待講演)	Anil Kumar (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)	Rising Researchers Seminar Series, Washington University	2024/11
16	Shapes and rotations of deformed nuclei in a fully quantum many-body view (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	Shapes and Symmetries in Nuclei; from Experiment to Theory 国際会議	2024/11
17	Nuclear wave functions for HIC: ab initio NCSM (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	Light ion collisions at the LHC 国際会議	2024/11
18	Piet's initiative for shape coexistence and (phase) transitions in heavy nuclei (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	国際ワークショップ The Quest for Heavy Element Research, KU Leuven	2024/11
19	Emerging nuclear landscape and CI calculations on supercomputers (招待講演)	大塚孝治 (東京大学/理化学研究所)	Nuclear Theory in the Supercomputing Era - 2024 (NTSE-2024)	2024/12
20	Large-scale shell model study of β^- -decay properties of N = 126, 125 nuclei along the r-process path (招待講演)	Anil Kumar (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)	International Conference “Nuclear Theory in the Supercomputing Era NTSE-2024”	2024/12
21	準粒子真空殻模型法による中重核構造の研究 (口頭)	角田佑介 (東大 CNS)	「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024	2025/1

22	Neutron-rich nuclei around ^{78}Ni with the VS-IMSRG-based interaction (ポスター)	Anil Kumar (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)	Single-particle and collective motions from nuclear many body correlations (PCM2025)	2025/3
	[B1 B 中間子崩壊]			
1	CKM 行列要素決定のための格子 QCD 計算の現状	金児隆志 (KEK)	基研研究会 素粒子物理学の進展 2024	2024/08
2	Study on the P-wave form factors contributing to $B_s B_s$ to $D_s D_s$ inclusive semileptonic decays from lattice simulations	Z. Hu (KEK)	LATTICE 2024	2024/08
3	Systematic effects in the lattice calculation of inclusive semileptonic decays	R. Kellermann (KEK)	LATTICE 2024	2024/08
4	Semileptonic B to D^* decays	Takashi Kaneko (KEK)	国際研究会 3rd Edition of Lattice meets Continuum	2024/10
	[B2 エキゾチック]			
1	Recent Lattice QCD results of hadron interactions from the HAL QCD method (招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	Reimei Workshop on Hadron interactions with strangeness and charm	2024/6
2	Hadron interactions in lattice QCD: Non-perturbative studies on interactions between composite particles (基調講演)	Sinya Aoki (YITP)	XXXV IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2024)	2024/7
3	Exploring properties of extreme matter with Machine Learning (基調講演)	Lingxiao Wang (RIKEN)	EMMI Workshop - Aspects of Criticality II	2024/7
4	Lattice QCD study of Ξ_{cc} - Ξ_{cc} interactions	T. Doi (RIKEN iTHEMS), Y. Lyu (RIKEN iTHEMS), K. Murakami (TI Tech)	Lattice 2024	2024/7

	on the physical point (口頭)	and L. Zhang (RIKEN iTHEMS/CAS SINAP) for HAL QCD Collaboration		
5	N_c/ψ and N_c/η_c interactions from lattice QCD (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	Lattice 2024	2024/7
6	Left-hand cut and the HAL QCD method (口頭)	Sinya Aoki (YITP)	Lattice 2024	2024/7
7	Learning Hadron Interactions from Lattice QCD (口頭)	Lingxiao Wang (RIKEN iTHEMS)	Lattice 2024	2024/7
8	From Quarks to Nuclear Physics using Lattice QCD (招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS)	QNSI kickoff workshop	2024/8
9	Rebuilding Dense Matter EoSs from Neutron Star Observations with Deep Learning (招待講演)	Lingxiao Wang (RIKEN iTHEMS)	QCHSC2024	2024/8
10	Doubly charmed tetraquark T_{cc} from lattice QCD (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	QCHSC2024	2024/8
11	Interaction between two hadrons in lattice QCD (基調講演)	Sinya Aoki (YITP)	CD2024	2024/8
12	N_c/ϕ interaction from Lattice QCD (招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	E16 workshop	2024/9
13	$N_c/c\bar{c}$ interactions from lattice QCD (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	Hard Probe 2024	2024/9
14	Charmed hadron interactions from physical point lattice QCD simulations (招待講演)	T. Doi (理研 iTHEMS), Y. Lyu (理研 iTHEMS) and L. Zhang (上海応物研) for HAL QCD Collaboration	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9
15	格子 QCD の基本原理と応用 : 格子 QCD の過去、現在、未来 (招待講演)	青木慎也 (京大基研)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9

16	HALQCD バリオン間力への離散化誤差の影響についてその5 (口頭)	井上貴史 (日大生物資源)	日本物理学会第79回 年次大会	2024/9
17	格子 QCD による奇パリティ核力の計算 II (口頭)	杉浦拓也 (立正大) for HAL QCD Collaboration	日本物理学会第79回 年次大会	2024/9
18	Lattice QCD studies of Hadron interactions from the HAL QCD method (招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	YITP long-term workshop on Hadrons and Hadron Interactions in QCD (HHIQCD2024)	2024/11
19	T_{cc} and left-hand cut singularity (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	HHIQCD2024	2024/11
20	Learning Hadron Interactions from Lattice QCD and Femtoscopy (口頭)	Lingxiao Wang (RIKEN iTHEMS)	HHIQCD2024	2024/11
21	Learning Hadron Interactions with Neural Networks (基調講演)	Lingxiao Wang (RIKEN iTHEMS)	PHD2024	2024/11
22	N_c/ψ and N_c/η_c interactions from lattice QCD (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	East Asian Workshop on Exotic Hadrons 2024	2024/12
23	Recent progress on charmed hadron interactions from LQCD (口頭)	Yan Lyu (RIKEN iTHEMS)	HADRON2025	2025/3
24	New configuration set of HAL QCD collaboration (招待講演)	Etsuko Itou (YITP, Kyoto U. and RIKEN iTHEMS)	ECT* workshop SCALE SETTING: PRECISION LATTICE QCD FOR PARTICLE AND NUCLEAR PHYSICS	2025/3
	[B3 有限温度]			
1	Mixed Precision Solvers for Lattice QCD on Supercomputer Fugaku (ポスター)	Issaku Kanamori (RIKEN)	16th JLESC Workshop	2024/4
2	Chiral Fermion Simulations on Fugaku and QCD Thermodynamics (招待講演)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	Mini workshop on lattice calculations for contemporary	2024/6

			nuclear and particle physics	
3	Chiral Fermion Simulations on Fugaku and QCD Thermodynamics (招待講演)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	CCP2024	2024/7
4	Conserved charge fluctuations in (2+1)- flavor QCD with Möbius Domain Wall Fermions (口 頭)	Jishnu Goswami (RIKEN)	The 20th International Conference on QCD in Extreme Conditions (XQCD 2024)	2024/7
5	QCD thermodynamics on the physical point with 2+1 flavor Möbius domain wall fermions (口頭)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	Lattice 2024	2024/7
6	Quark number susceptibility and conserved charge fluctuation for (2+1)-flavor QCD with Möbius domain wall fermions (口頭)	Jishnu Goswami (RIKEN)	Lattice 2024	2024/7
7	Spectrum of preconditioned Moebius domain-wall operators (ポスター)	Issaku Kanamori (RIKEN)	Lattice 2024	2024. 7/28- 8/3
8	Finite temperature QCD explored with chiral fermions (招待講演)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	ECT* workshop on New developments in studies of the QCD phase diagram	2024/9
9	Chiral condensate of 2+1 and 3 flavor QCD with domain wall fermions (口 頭)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9
10	Finite temperature QCD with 2+1 flavor domain wall fermions at physical point (口頭)	Issaku Kanamori (RIKEN)	日本物理学会 第 79 回年次大会	2024/9
11	Conserved charge fluctuations in (2+1)-	Jishnu Goswami (RIKEN)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9

	flavor QCD with Domain Wall fermions (口頭)			
12	Quark number susceptibility and conserved charge fluctuations of (2+1)- Flavor QCD with Möbius Domain Wall fermions (口頭)	Jishnu Goswami (RIKEN)	German Japanese Workshop 2024	2024/9
13	Multigrid Solvers in Bridge++ (口頭)	Issaku Kanamori (RIKEN)	German Japanese Workshop 2024	2024/9
14	Finite temperature QCD explored with chiral fermions (口頭)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	German Japanese Workshop 2024	2024/9
15	Chiral Fermion Simulation and QCD Thermodynamics (招待講演)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	RIKEN-BNL Joint Workshop on Fundamental Quantum Science	2024/10
16	Quark number susceptibility and conserved charge fluctuation for (2+1)- flavor QCD with Möbius domain wall fermions (口頭)	Jishnu Goswami (RIKEN)	Hadrons and Hadron Interactions in QCD 2024 (HHIQCD2024)	2024/10
17	QCD thermodynamics explored with chiral fermions (口頭)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	Recent advances in high temperature QCD Workshop	2024/10
18	Recent results from lattice QCD on the phase diagram (基調講演)	Jishnu Goswami (RIKEN)	The 10th Asian Triangle Heavy-Ion Conference (ATHIC 2025)	2025/1
19	GPU Implementation of Lattice QCD code with OpenACC (ポスター)	Issaku Kanamori (RIKEN)	The 7th R-CCS International Symposium	2025/1
20	QCD thermodynamics explored with chiral fermions (招待講演)	Yasumichi Aoki (RIKEN)	Confinement and symmetry from	2025/2

			vacuum to QCD phase diagram	
21	汎用格子 QCD コード Bridge++の GPU 版について (口頭)	金森逸作 (理研)	日本物理学会 2025 年 春季大会	2025/3
22	Exploration of the Phase Diagram of QCD at finite temperature and density Using Chiral Fermions (口 頭)	Jishnu Goswami (RIKEN)	日本物理学会 2025 年 春季大会	2025/3
23	格子 QCD: 富岳からポスト富 岳、CPU から GPU に向けて (招待講演)	金森逸作 (理研)	2024 年度第 2 回計算 科学フォーラム	2025/3
	[B4 自己学習モンテカルロ]			
1	Machine learning and theoretical physics (口 頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	JICFuS meeting	2024/5
2	Development of CASK: Gauge Symmetric Transformer (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	Lattice2024	2024/7
3	Let's see inside of ChatGPT (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	Akita Prefectural Odate Homei High School	2024/7
4	MLPhys in Japan and Developments of CASK: Gauge Symmetric Transformer (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	ML meets LFT	2024/7
5	Machine Learning Methods in Lattice QCD (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	QCHSC2024	2024/8
6	機械学習 (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	Summer school for lattice field theory 2024	2024/9
7	Machine learning in lattice gauge theory (口 頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	German Japanese Seminar 2024	2024/9/
8	Symplectic integrators in lattice QCD (口頭)	Akio Tomiya (東京女子 大学)	Analytical Mechanics Mini- workshop	2024/9

9	Let's see Inside of generative AI (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	Akita Prefectural Odate Homei High School	2024/10
10	Lattice QCD with Machine Learning (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	Physics-of-intelligence-and-machine-learning-2024	2024/10
11	Why AI study got Nobel prize? (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	TWCU Faculty Union Sponsored Event: "Exploring the Charms of Tokyo Women's University" Research Presentation	2024/11
12	Let's see Inside of generative AI (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	Yakumo High School	2024/12
13	Gauge Covariant Transformer (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	Lattice Field Theory and Machine Learning	2024/12
14	Julia ではじめる格子 QCD (口頭)	Akio Tomiya (東京女子大学)	Julia in Physics 2024	2024/12
	[C1 シンプル]			
1	Use of Lefschetz thimbles towards solving the sign problem (基調講演)	M. Fukuma (Kyoto Univ)	ALF Workshop 2024	2024/7
2	Worldvolume Hybrid Monte Carlo algorithm for group manifolds (口頭)	M. Fukuma (Kyoto Univ)	Lattice 2024	2024/8
3	Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to the (1+2)-dim Hubbard model (口頭)	Y. Namekawa (Hiroshima Univ)	Lattice 2024	2024/8
4	Sign problem and the Worldvolume HMC method I: basic algorithm (口頭)	M. Fukuma (Kyoto Univ)	German Japanese Workshop 2024	2024/9

5	Sign problem and the Worldvolume HMC method II: various applications (口頭)	Y. Namekawa (Hiroshima Univ)	German Japanese Workshop 2024	2024/9
6	世界体積 HMC 法の Hubbard 模型および Yang-Mills 理論への応用	福間将文 (京都大)	離散的手法による場と時空のダイナミクス 2024	2024/9
7	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のハバード模型への適用	福間将文 (京都大), 滑川裕介 (広島大)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9
8	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の格子ゲージ理論への適用	福間将文 (京都大), 滑川裕介 (広島大)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9
9	Application of the Worldvolume HMC method to lattice field theories	M. Fukuma (Kyoto Univ)	HHIQCD2024	2024/10
10	Sign problem and the Worldvolume HMC method -- Basics and applications --	福間将文 (京都大)	「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024	2025/1
11	符号問題を持つ量子多体系への世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の適用	福間将文 (京都大)	学習物理物性関係討論会	2025/1
12	半充填でないハバード模型の量子モンテカルロ計算への世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の適用	福間将文 (京都大), 滑川裕介 (広島大)	日本物理学会 2025 年春季大会	2025/3
13	フェルミオン系の量子モンテカルロ計算への世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の適用”	福間将文 (京都大), 滑川裕介 (広島大)	日本物理学会 2025 年春季大会	2025/3
14	量子多体系の実時間ダイナミクスへの世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の適用	福間将文 (京都大), 滑川裕介 (広島大)	日本物理学会 2025 年春季大会	2025/3
	[C2 複素ランジュバン]			
1	複素ランジュバン法を用いた有限密度格子 QCD におけるカラー超伝導の研究 (口頭)	三浦光太郎 (KEK)	日本物理学会第 79 回 年次大会	2024/9

2	Complex Langevin Method applied to Lattice QCD at High Density (口頭)	Kohtaroh Miura (KEK)	German Japanese Workshop 2024	2024/9
3	Complex Langevin Lattice QCD for Color-Superconductivity at Extremely High Density (口頭)	三浦光太郎 (KEK)	KEK-THEORY Workshop 2024	2024/12
4	Complex Langevin simulation of the IKKT matrix model with or without "gauge-fixing" the Lorentz symmetry (口頭)	山森直幸 (KEK/総研大)	KEK-THEORY Workshop 2024	2024/12
5	Complex Langevin Lattice QCD for Color-Superconductivity at High Density (口頭)	三浦光太郎 (KEK)	富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024	2025/1
6	複素ランジュバン法を用いた高密度格子 QCD に基づくカラー超伝導の研究 (口頭)	三浦光太郎 (KEK)	日本物理学会 2025 年春季大会	2025/3
	[D1 万能QS] [D2 特定QS] [D3 量子古典ハイブリッド] [D4 量子アルゴリズム]			
1	Unveiling clean two-dimensional discrete time quasicrystals on a digital quantum computer (口頭)	Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	IBM Quantum Partner Forum 2024	2024/5
2	Massively Parallel State-Vector Simulation of Quantum Computer (口頭)	Naoki Yoshioka (RIKEN), Nobuyasu Ito (RIKEN), Kazuhiro Seki (RIKEN), Tomonori Shirakawa (RIKEN), and Seiji Yunoki (RIKEN)	CCP2024	2024/7
3	量子コンピュータを用いた量子ダイナミクスシミュレーション (口頭)	柚木清司 (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	第3回学術変革領域「学習物理」物性関係討論会	2024/7
4	Pushing Forward for Quantum Advantage with Error Mitigation and HPC (口頭)	Netanel Lindner (QEDMA) and Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	Q2B24 Tokyo	2024/7
5	Quantum many-body dynamics in digital quantum computers (口頭)	Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	22nd International Conference on Recent Progress in Many-Body Theories (RPMBT22)	2024/9

6	Quantum many-body dynamics in digital quantum computers (口頭)	Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	RIKEN - LBNL Workshop on Quantum Information Science	2024/9
7	RIKEN Quantum: Advancing Quantum Computational Science for Scientific Research Applications (口頭)	Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	RIKEN - LBNL Joint Workshop on Fundamental Quantum Science	2024/10
8	Pushing Forward for Quantum Advantage with Error Mitigation and HPC (口頭)	Netanel Lindner (QEDMA) and Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	Q2B24	2024/12
9	Quantum computational science for quantum many-body systems in condensed matter physics (口頭)	Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)	High Energy Physics in the Quantum Era	2024/12
10	ノイズの大きな量子コンピューターを用いた量子多体系のシミュレーション (口頭)	白川知功 (理研)	第13回兵庫県マテリアルズ・インフォマティクス講演会	2025/1
11	High-Performance Computing to Support the Application of Quantum Computers for Quantum Many-Body Problems (口頭)	Tomonori Shirakawa (理研)	International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics (MPQCP 2025)	2025/1
12	Massively Parallel State-Vector Simulation of Quantum Computer (口頭)	吉岡直樹 (R-CCS)、伊藤伸泰 (R-CCS)、関和弘 (RQC)、白川知功 (R-CCS/RQC/PRI/RIKEN iTHEMS)、柚木清司 (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)、Doru Thom Popovici (LBNL)、Anastasiia Butko (LBNL)	「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024	2025/1
13	Massively parallel state-vector simulation of quantum computer (ポスター)	Naoki Yoshioka (R-CCS)、Nobuyasu Ito (R-CCS)、Kazuhiro Seki (RQC)、Tomonori Shirakawa (R-CCS/RQC/PRI/RIKEN iTHEMS)、Seiji Yunoki (R-CCS/RQC/PRI/CEMS)、Doru Thom Popovici (LBNL)、	The 7 th R-CCS International Symposium	2025/1

		and Anastasiia Butko (LBNL)		
--	--	--------------------------------	--	--