

令和5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6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5年度（報告年度）の実施内容	- 1 -
2-1. 当該年度（令和5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）	- 15 -
2-4. 実施体制	- 15 -

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5年度（報告年度）の実施内容

2-1. 当該年度（令和5年度）の事業実施計画

令和5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「富岳」各サブ課題間の連絡調整を実施した。

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] これまでの研究で、2次元正方格子上で最近接(J1)と次近接(J2)の相互作用を持つ量子スピン模型(J1-J2 ハイゼンベルグ模型)や有機固体である dmit 塩の第一原理有効ハミルトニアンにおいて、強い量子スピンゆらぎをもつ量子スピン液体状態が発現することがわかってきた。量子スピン液体は電子スピンが分数化したスピノンが創発する一方、高温超伝導においても電子の分数化が創発する。この2種類の分数化には根底となる多体波動関数の構造と量子もつれから統一的な理解が可能であることが示唆されている。このことは量子スピン液体に電荷を注入すると高温超伝導が発現するののかという根源的問いにも関係する。本研究では次近接のホッピングと最近接のホッピングが競合するハーフフィリングのハバード模型という単純化した模型を含めた高温超伝導体の有効模型に対し、機械学習とモンテカルロを組み合わせた変分手法による精密な計算を行い、J1-J2 ハイゼンベルグ模型の変分基底状態解や励起構造と詳細な比較を行うなど、2つの分数化の統一的な理解を追究する。また、現実の多様な物質群

で第一原理計算、機械学習と組み合わせた複数の分光実験による実験検証とも緊密に連携する。

[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。特に質量数が 80～150 となる領域の核種の核構造計算をすすめ、ニッケル同位体やジルコニウム同位体の周辺核種のエキゾチックな核構造を議論する。また、殻模型計算をベースにした量子多体計算手法の開発・検討をおこなう。

[A3 量子多体問題ベンチマーク] 量子多体問題に対し、古典コンピュータや量子コンピュータなどのハードウェアの違い、解析手法のアルゴリズムの違いを乗り越えて、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）を定める。その上で、1次元の量子スピン系や不純物模型など比較的強力な数値計算手法が知られている問題から、幾何学的フラストレーションのある量子スピン系やハバード模型などの解析が困難な系にいたるまで、まず古典コンピュータ側で生成された世界最高精度レベルのベンチマーク結果を収集する。それらのリストをスイス連邦工科大学ローザンヌ校の Carleo グループらと協力して世界に公開する。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。実時間発展や線形応答量の計算から量子ダイナミクスとそのもつれ構造を理解することは量子多体物理学の困難な課題である。特に長時間の時間発展を高精度で長時間安定にシミュレートする方法はチャレンジであり、機械学習と組み合わせながら長時間ダイナミクスを安定的に行う手法を開発し、ベンチマークを進める。

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] 既に生成した格子カットオフが 2.5-4.6GeV の配位データ上で、 $D_s \rightarrow X_s \ 1 \ \nu$ 包括的崩壊の崩壊率を計算して有限体積効果などを精査し、系統誤差を評価する手法を確立して、次年度以降の定量的計算へとつなげる。同時に、 $B \rightarrow D^* 1 \ \nu$ 排他的崩壊のシミュレーションを反跳パラメタが 1.1-1.3 の領域へと拡張し、より幅広い領域での実験との比較検証を進める。これらの研究を現実世界のボトムクォーク質量直上へと拡張して高精度化するため、カットオフが 7.2 GeV, サイズが $72^3 \times 144$ の格子での配位データの生成に向け、アルゴリズムとパラメタの選定とコードセットの最適化を進める。

[B2 エキゾチック] テトラクォーク状態の候補である T_{cc} に対応する D 中間子- D^* 中間子間の相互作用ポテンシャルやそのフレーバーパートナーの相互作用について、HAL QCD 法に基づいた格子 QCD 第一原理計算を行う。物理点近傍データの計算・解析を進めると共に、これまでの「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実行する。また、核子-クォークonium状態の計算・解析を開始する。クォークoniumとして(ssbar)状態を考えた場合は LHC ALICE 実験におけるフェムトスコピー研究、(ccbar)状態を考えた場合は LHC LHCb 実験におけるペンタクォーク研究と密接に関係しており、これら実験との連携を進めていく。

[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)を物理点直上に取りつつ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 3 年間かけて実行する。初年度は粗い格子(時間方向の格子点数 $N_t=12$)の空間時間サイズ比 $R=N_s/N_t=3, 4$ について、それぞれ温度を 8 点程度、4 点程度をとり、(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議論し実装する。

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: 8×8 および 12×12 格子上で、パラメタ(温度、化学ポテンシャル、斥力ポテンシャル)を変えながら物理量を計算し、得られた結果を複素ランジュバン法やテンソルネットワーク法の結果と比較する。複素ランジュバン法では行列式のゼロ点のために特異ドリフト問題が生じ、テンソルネットワーク法では大きな内部自由度のために系統誤差が無視できなくなる可能性がある。こうした困難がないと思われる世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法が実際に優位性を示せるかを確認する。(2) 量子場の実時間ダイナミクス: $8 \times 8 \times 8$ から $16 \times 16 \times 16$ の 3 次元格子上のスカラー場とゲージ場について、実時間相関関数から輸送係数を直接読み取り、他の手法で得られた輸送係数と比較する。並行して、非平衡過程を直接シミュレートするアルゴリズムを確立する。

[C2 複素ランジュバン] 有限密度 QCD に適用する研究では、格子サイズ $8^3 \times 128$ の場合について、化学ポテンシャルなどのパラメタを変えながらスタガードフェルミオンを用いた計算を実行し、カラー超伝導相の探索を行う。また、超弦理論の研究では、行列サイズ 256 の場合について、正則化パラメタを変えながら IKKT 行列模型の計算を実行し、 $(3+1)$ 次元時空の生成を検証する。

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] アダマールゲートを各量子ビットに作用する量子回路や量子フーリエ変換を利用した整数値の加算を行なう量子回路、いくつかの量子ゲートをランダムに量子ビットに作用させる量子回路などを例にして、状態ベクトル法による量子計算シミュレーションを最大で「富岳」全系の $1/3$ 程度を用いて実行する。これは、倍精度浮動小数点数を用いた計算の場合は最大 46 量子ビット規模、単精度の場合は最大 47 量子ビット規模までの計算を行うことに対応する。また、この計算は、従来の MPI 並列化手法を用いた計算のほか、我々が最近開発した、通信パターンが複雑になる代わりにこれまでより多くのメモリを効率的に使用できる手法を用いても行い、計算時間や通信時間についてのトレードオフが従来の手法と比較してどの程度になるか調査する。

[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。具体的には、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する。テンソルの演算には我々が独自に開発しているテンソルライブラリを用いる。特に、一つのテンソルを複数の計算ノードに分散させて格納する分散メモリ型テンソルライブラリを開発し、より大きなボンド次元のテンソルを扱えるようにすることで高精度化を図る。得られたコードは、簡単な量子回路の計算、および、典型的な量子古典ハイブリッド計算に用いてベンチマークをとる。

[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。本格的な開発は来年度行う計画であるが、今年

度はそのための準備として小規模で動作する量子-古典ハイブリッド計算シミュレーションの開発を行う。

[D4 量子アルゴリズム] [D3]で開発した量子-古典ハイブリッド計算シミュレーションを活用し、スピン 1/2 反強磁性ハイゼンベルグ模型などに対する量子-古典ハイブリッド量子アルゴリズムの提案およびその検証を行う。

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）

プロジェクトの総合推進

本事業全体の取りまとめを行った。以下にあげる各研究の進捗を確認し、計算機資源の配分等の調整を行った。本研究を一般に紹介するためにシンポジウムの開催、ウェブサイトでの研究紹介記事やプレスリリースなど随時情報発信を行った。

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]

次近接のホッピング t と最近接のホッピング t' が競合するハーフフィリングのハバード模型に対し、 $|t'|/|t|=0.5\sim 0.9$ 、 $U/t=12, 16, 20, 24$ のパラメタ点に対して、機械学習とモンテカルロを組み合わせた変分手法による精密な計算を行った。その結果、ハバード相互作用が大きい領域において、量子スピン液体に特徴的な励起構造を示すことを突き止めた。このことは、高温超伝導と量子スピン液体が密接に関係する可能性を示唆する。また、4 種類の異なる銅酸化物高温超伝導体に対する 2 次元正方格子上的有効ハバード模型を、最大 $36\times 36=1,296$ の正方格子のサイズ上で、かつ、相互作用パラメタも第一原理で見積もられた値付近で網羅的に値を変えながら計算することによって、銅酸化物高温超伝導体の系統的物質依存性、物質設計指針、および超伝導発現の機構の理解が進んだ。

[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を構築し、球形核での八重極振動状態やジルコニウム 100 での急激な変形状態遷移を系統的に再現した。特に、中性子過剰なジルコニウム同位体では新たな励起状態が実験的に見つかっており、2 番目の 2+状態の励起エネルギーが下がることから、非軸対称変形が起こることを示した。図 1 に、ジルコニウム同位体の励起エネルギーを縦軸に、中性子数を横軸に示す。黒線のシンボルが実験値、色付きが殻模型計算結果である。理論計算から予言された原子核の変形をシンボルの色で示している。

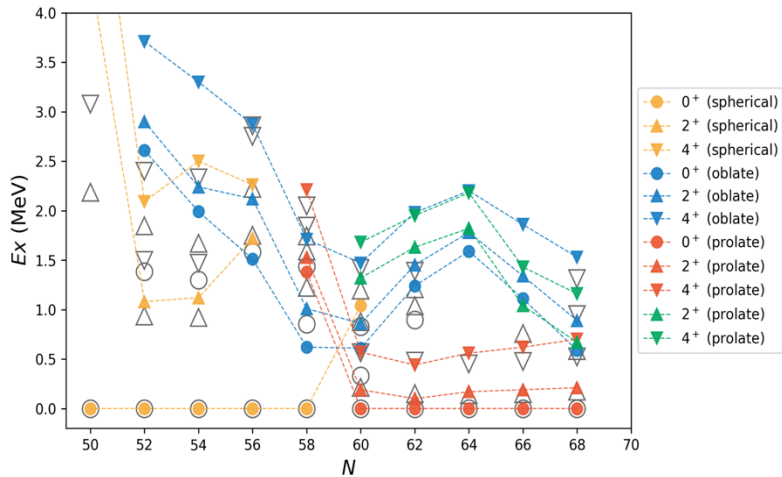


図 1：ジルコニウム同位体の励起エネルギーと形状（2+および 4+のうち、最低エネルギーをもつ状態をオレンジで、次に低いエネルギーをもつ励起状態を緑で表記した）

エルビウム 166 周辺の核種では、変形した原子核の回転バンドとして 0^+ 、 2^+ 、 4^+ 、 $\dots$ 状態が現れるほかに、別の 2^+ 状態が比較的低い励起エネルギーで現れる。図 2a に示すように、従来の描像では軸対称に変形した原子核が非軸対称な振動をすることで別の 2^+ 状態が現れると考えられている。準粒子真空殻模型法によりエルビウム 166 周辺の核種の構造を計算し解析したところ、図 2b に示すように非軸対称変形した原子核が異なる回転をすることで現れる 0^+ 、 2^+ 、 4^+ 状態の回転バンドともう一つの 2^+ 状態が実験で観測される状態に対応するという結果が得られた。このような非軸対称変形核の回転という描像について議論した論文を準備した。

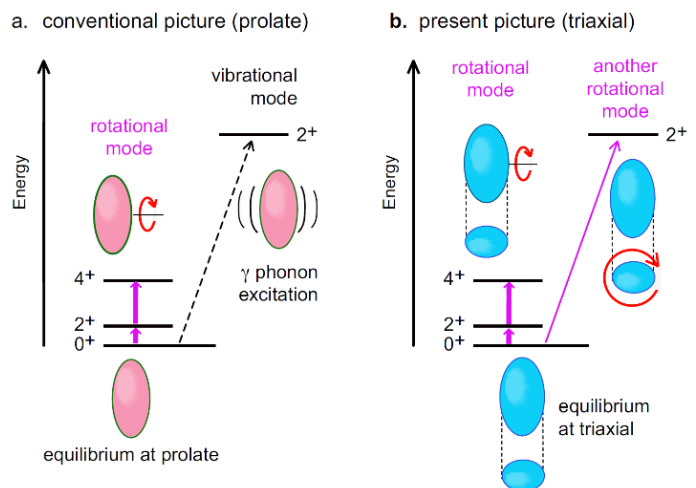


図 2：変形核の回転・振動により現れる状態の模式図

ニッケル 78 付近の中性子過剰核は、元素合成の r 過程にかかわる核種である。ニッケル 78 (陽子数 28, 中性子数 50) は、二重魔法性のため重要な核種であるが、安定核から大きく離れた中性子過剰核のため実験データが少ない。そのため、ニッケル 78 近傍でより安定核側の多くの実験データが得られている核種を 5 つ選び、同じ模型空間・設定で理論計算をおこない、理論模型の確かさを検証した。模型空間として pf 殻と sdg 殻の 2 主殻を用い、偶偶核や奇核の励起エネルギーの実験値をより再現できるように有効相互作用の調整を進めた。図 3 は計算した奇核のうち 5 核種について励起状態のエネルギーの実験値と計算値を比較したものであり、実験値を概ね再現している。

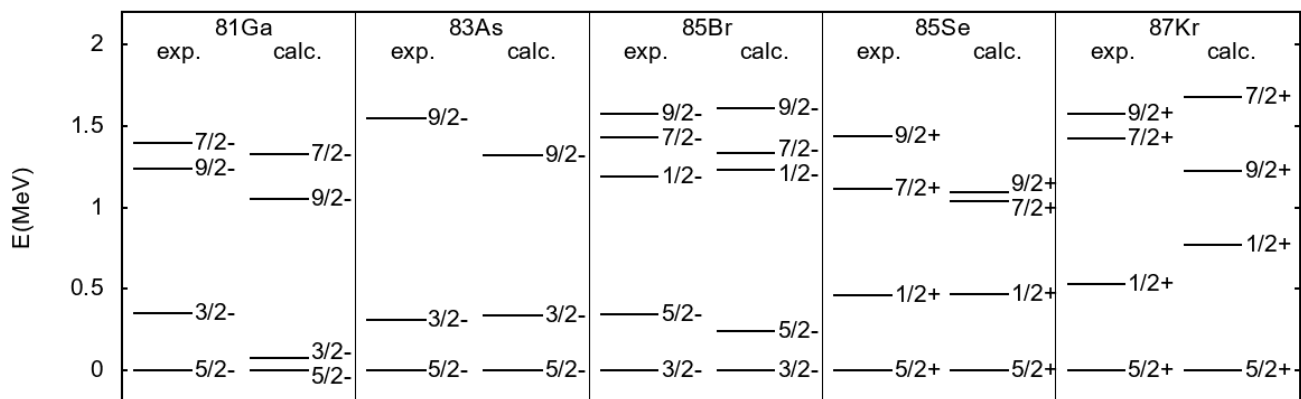


図 3: 中性子数 50、51 の奇核の励起状態のエネルギーの実験値と計算値の比較。

元素合成 r 過程によって生じる元素組成第 3 ピークの理解に向けて、中性子数 126、または 125 をもつ中性子過剰同中性子体の大規模殻模型計算を実行し、ベータ崩壊半減期を求めた。これらの核種の大部分はいまだ加速器実験で生成できず、理論による予言が求められている。ベータ崩壊には許容 (GT) 遷移と第一禁止 (FF) 遷移の両方の寄与を取り込んだ。安定核近傍領域 (陽子数 Z が 80 近傍) では第一禁止遷移が主な寄与となるが、陽子数を減らして中性子過剰領域に移ると、許容遷移が支配的になることを示した。さらに、従来の理論予測より半減期が短い可能性を示唆した。(図 4)

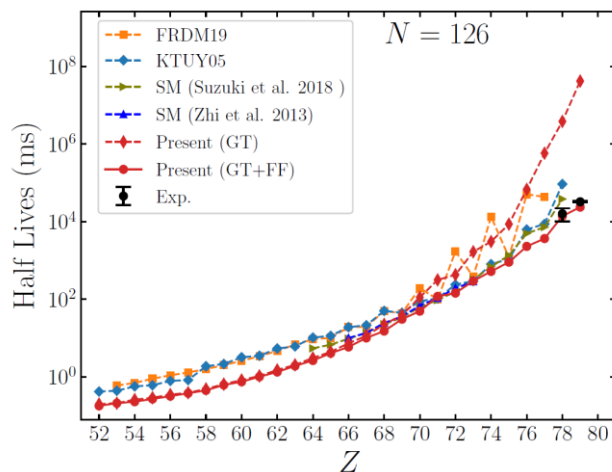


図 4: 中性子数 126 同中性子体のベータ崩壊半減期。横軸に陽子数、実験値 (黒)、我々の計算結果 (赤)、様々な先行研究結果が示されている。

原子核殻模型に基づいた量子多体計算手法の検討をおこなった。強相関電子系で有用性が示されている機械学習のひとつである制限ボルツマンマシンを殻模型計算の変分モンテカルロに取り込んだ計算枠組みの検討をおこなった。pf 殻模型空間のニッケル 56 をテストケースとしてベンチマークをおこなったところ、制限ボルツマンマシンの導入はエネルギーの収束をわずかであるが加速することがわかった。また、同様に強相関電子系や量子化学分野で提唱された FCIQMC(Full configuration interaction quantum Monte Carlo)法の原子核殻模型計算への応用を試み、コード開発をおこなった。

[A3 量子多体問題ベンチマーク]

量子多体問題の解析において、異なるハードウェア (量子コンピュータや古典コンピュータ) やアルゴリズムの違いを乗り越えて、統一的な性能比較ができるような“指標”となる物理量として、V-score (規格化されたエネルギーの分散) を提案した。その上で、古典コンピュータ側で生成された世界最高精度レベルの変分計算による V-score の結果を $O(10^2-10^3)$ 点収集した。これらのデータセットを世界に向けて公

開した(<https://github.com/varbench/varbench>)。古典コンピュータを用いた解析の世界最高基準が明らかになることによって、量子優越性の基準がより明確になった。また、機械学習の技術や動的モード分解を用いて量子スピン系の長時間ダイナミクスを予言する手法を開発し、そのベンチマークを行った。

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]

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から決定した小林・益川行列要素 $|V_{cb}|$ が矛盾しているという長年の問題を解決するため、格子量子色力学（格子 QCD）の数値シミュレーションによる両崩壊の研究を推進した。

エクスクルーシブ崩壊については、QCD のカイラル対称を保つ理論的にクリーンな定式化と高性能な「富岳」を用いることにより、QCD の非摂動効果を記述し、理論計算の最大誤差の源である形状因子を高精度決定した。海外の先行研究が我が国で実施された KEKB/Belle 実験の測定データと矛盾する理論データを得ているのに対し、本研究では同実験と整合する結果を得た。KEKB/Belle をさらに高精度化する SuperKEKB/Belle II 実験との詳細な比較、及び、 $|V_{cb}|$ の高精度決定に向け、この計算を反跳パラメタが 1.0 から 1.3 の幅広い領域へと拡張するとともに、離散化誤差をより良く制御するために格子カットオフを 7.2GeV に上げたシミュレーションの実行に向けて、パラメタの検討とコードセットのテストを進めた。この研究との詳細な比較検証によって $|V_{cb}|$ の矛盾を理解・解決するために、格子 QCD のシミュレーションによってインクルーシブ崩壊を研究する手法の開発を進めた。既に、計算コストの小さい Bs 中間子崩壊を例にとり、エクスクルーシブ崩壊のシミュレーション研究や従来の解析的計算と整合する結果を与える手法を開発した。その不定性を制御して定量的な研究手法を確立するために、離散化誤差などの従来の系統誤差の制御が容易である Ds 中間子崩壊に着目し、インクルーシブ崩壊の研究において最も非自明な系統誤差となる有限時空体積の効果を調べた。特に、有限体積効果を記述するモデルを開発、検証することにより、この効果を評価・補正することが可能になりつつある。

[B2 エキゾチック]

テトラクォーク状態 T_{cc} に対応する D-D* 間相互作用や、核子- ϕ メソン間相互作用・核子-J/ ϕ 間相互作用など核子-クォークonium間の相互作用について、格子 QCD 第一原理計算により、物理点近傍における計算・解析、物理点直上における計算を実行した。また得られた結果を LHCb 実験や LHC-ALICE 実験と比較したり、さらに格子 QCD データと実験データの組み合わせにより、従来未知であった相互作用の導出などを行った。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 10~14%を達成している。

このうち、 T_{cc} に関する研究においては、D-D* 中間子間の相互作用ポテンシャルについて、「富岳」の大規模計算で得られた物理点近傍 ($m_\pi=146\text{MeV}$) のデータについて詳細解析を行い、相互作用が全領域において引力であること、また遠距離では 2 パイオン交換力の重要性を示唆する結果を得た。また得られたポテンシャルにより、D-D* 閾値付近に仮想状態が存在することを示した。さらに、この結果を 2 パイオン交換力描像に基づいて物理点直上に外挿したところ、仮想状態は束縛状態へと変化することを示した。得られたポテンシャルに基づき、LHC b 実験における $D^0 D^0 \pi^+$ 不変質量に対応する理論計算を行ったところ、

実験データを良く再現することを示した。(図 5) この成果創出に引き続き、クォーク質量について外挿に頼らない物理点直上での結果を得るため、D-D*間相互作用の物理点直上格子 QCD 計算を行った。

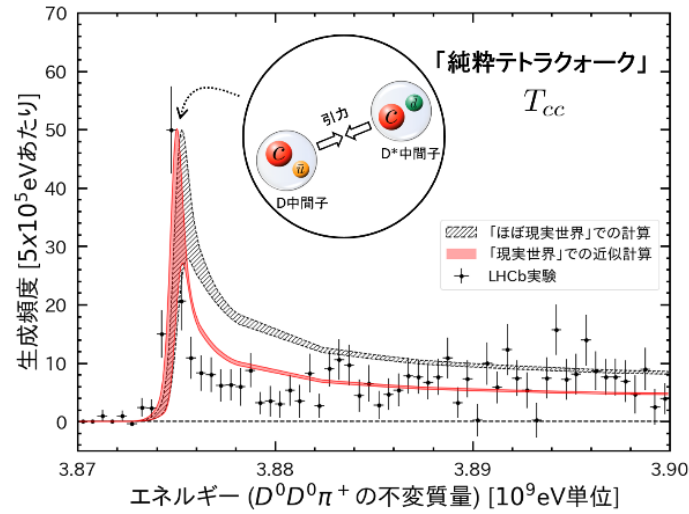


図 5: LHCb 実験における $D^0 D^0 \pi^+$ 不変質量について、実験データと格子 QCD 計算の比較図

[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行なった。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。

初年度は粗い格子(時間方向の格子点数 $N_t=12$)の空間時間サイズ比 $R=N_s/N_t=3, 4$ について、それぞれ温度を9点、5点ととり、(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。

図6はカイラル極限で実現する相転移の秩序変数であるu,dクォークカイラル凝縮を、有限質量で起こる加算的紫外巾発散を極力排除し(加法くりこみ)、さらに乗法的くりこみを、非摂動くりこみの β パラメトリゼーション(『素粒子から元素』結果)を用いて施したものを温度の関数として図示したものである。加法くりこみは、その m_{res} 効果を正しく取り込む手法を新たに開発して適用し、『素粒子から元素』より改良されたものになっている。図中、c1, d1~d3 のデータは『素粒子から元素』の若干重いudクォーク質量の結果($m_l = 0.1m_s \simeq 3m_{ud}$ で、p2, p3 が今回の新しい物理点直上($m_l = m_{ud}$)の結果である。変曲点が(擬)相転移点にあたり、それは低温側にシフトしている事が見て取れる。

図7はu,dクォークカイラル凝縮の感受率の内、非連結部分を温度の関数としてプロットしたものである。物理点直上の結果はp2, p3 であり、それぞれ、格子体積が[空間] $\times$ [時間] $=N_s^3 \times N_t = 36^3 \times 12, 48^3 \times 12$ である。ほぼ全統計で解析し結果が安定しているp2については内挿線も求めており、それにより頂点の位置と誤差を灰色バントで示している。カイラル凝縮でもそうだったように、大きな体積依存性は認められず、むしろ現時点の解析では頂点の高さが体積と共に増加する兆候は全くない。つまり、この遷移は解析的クロスオーバーである事と矛盾しない。またカイラル凝縮でも見られた要に遷移温度は $m_l = 0.1m_s \simeq 3m_{ud}$ に比べて低くなっている。今後、全統計でのp3解析の実行により、相転移の有無、(擬)相転移温度の決定が可能になる。令和6年度以降は、さらに、格子間隔が $3/4$ になる $N_t = 16$ の複数体積の計算を行い、連続極限へのスケールリングを理解する計画となっている。

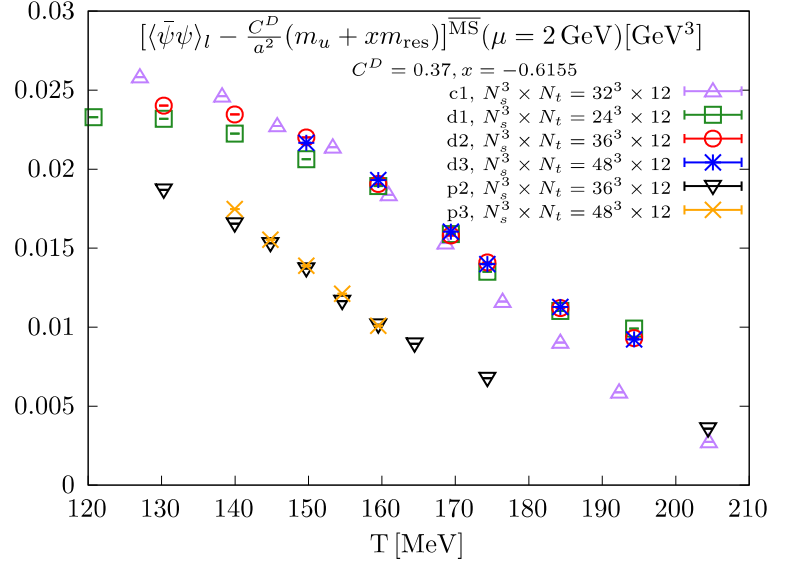


図 6: くりこまれたカイラル凝縮

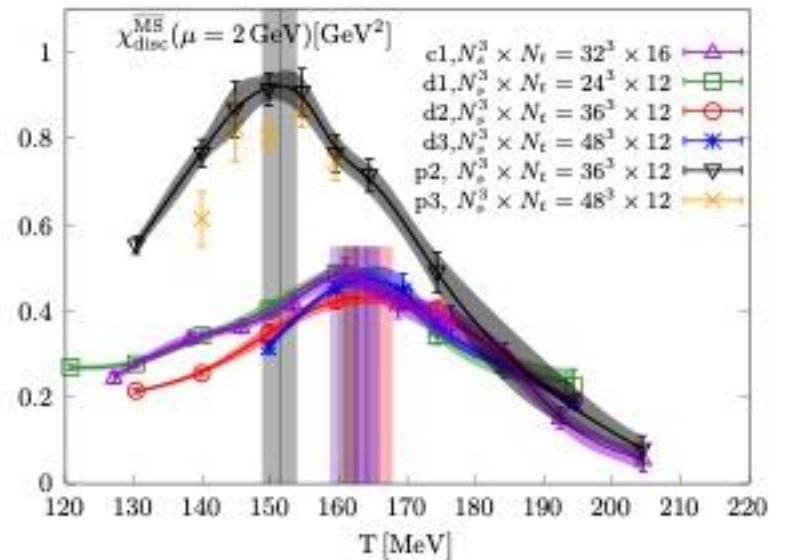


図 7 くりこまれた非連結カイラル感受率

これら物理点直上の QCD 配位を用いて、トポロジカル電荷や、クォーク数密度の揺らぎの解析も並行して進行中であり、課題終了時には、それらも含めた相転移近傍 QCD 熱力学のカイラルフェルミオンを用いた結果が得られる。

[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、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議論し実装することとした。今年度は、研究によりフェルミオンのシミュレーションには当初考えていた畳み込み型ニューラルネットよりもトランスフォーマー型ニューラルネットのほうが性能を改善できることが示された。そのため本年度は、計画を変更し、ゲージ共変なニューラルネットを拡張する定式化を行った。

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 シンブル]

有限密度複素スカラー理論にシンブル法を適用する世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法のコードを開発し、「富岳」256 ノードを利用することで、有限密度複素スカラー理論の計算コストスケールリングが、 $96 \times 96 \times 96 \times 96$ 格子まで自由度の 1 乗となることを示した。

ハバード模型においては、 4×4 および 6×6 格子上で、パラメタ(有限温度、有限化学ポテンシャル)を変えながら、物理量(エネルギー密度と粒子数密度)を「複素ランジュバン法」と「世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法」の 2 つの手法で計算した。複素ランジュバン法が行列式のゼロ点由来の特異ドリフト問題のために破綻してしまう一方で、シンブルに基づく世界体積ハイブリッド・モンテカルロ法は破綻なく機能し、従来から知られている計算手法である ALF (Algorithms for lattice fermions) と正しく一致することを確認した。また、ボソン化の手法を工夫することで、パラメタ領域によっては計算コストを自由度の 2 乗にできることが分かった ($8 \times 8 \times 8$ まで確認)。

量子場の実時間ダイナミクス：スカラー場に対し、熱平衡状態における実時間相関関数を計算するコードを完成させ、 $8 \times 8 \times 8$ および $16 \times 16 \times 16$ 格子上で計算を進めた。ゲージ場については、計算の核となる世界体積法の群多様体への拡張を完成させ、簡単な模型で動作を確認した。シンブル法を複雑なゲージ場の群多様体に適用するのは初めての試みであり、その複雑さのため当初の想定よりも開発に多大な時間を要したが、スカラー場とゲージ場の輸送係数の本格解析に向けた準備を整えることができた。また、非平衡過程を直接シミュレートするアルゴリズムを確立した。

[C2 複素ランジュバン]

有限密度 QCD に適用する研究では、格子サイズ $8^3 \times 128$ の場合について、5 種類の化学ポテンシャル (μ) と 6 種類の diquark-source term 結合定数 (J)、計 30 のパラメタにおいてスタガードフェルミオンを用いた計算を実行した。 μ は baryon 数の急激な変化が見られる値の近傍(カラー超伝導相が期待される領域)に選んだ。その上で baryon 数、chiral 凝縮、diquark 補助場の二乗、ランジュバン drift-term 等の J 依存性 ($J = 0.0 - 0.1, 0.02$ 毎)を調べた。特に quark 由来の drift-term は J が大きいほど増大し、 $J=0.1$ では singular drift-term 問題(ランジュバン法と経路積分の等価性が保証されなくなる問題)が起きることがわかった。一方、現在までに得られたランジュバン発展のデータからは、diquark 補助場

二乗の有意な J 依存性は見られなかった。その原因を追究したところ、この物理量が非常に強い自己相関を持っているため、現在得られている統計量では正しい計算ができていないことが明らかになった。この問題を解決すべく、この物理量と等価なものを diquark 補助場と quark 場をゲージ不変に組み合わせた量で表すことを考えた。この量は自己相関が弱いことが期待され、有意な J 依存性を見ることが可能となると考えられる。実際に、そのような量を計算するためのコードを開発した。

また、超弦理論の非摂動論的定式化として提案された行列模型の複素ランジュバン・シミュレーションを行い、(3+1)次元の膨張宇宙が出現することを検証すべく、以下のような研究を行った。これまでの研究で、この行列模型の素朴な数値シミュレーションでは実の時空が出現しないことを見出し、作用にローレンツ不変な項を加えることで、実の時空を実現した。3次元空間の膨張は、フェルミオンの効果を取り入れることで実現できると考えたが、フェルミオンを含む模型のシミュレーションの安定化のために mf というパラメタ（最終的には0へ外挿する）を導入した。今年度の研究では、 mf を導入したことでフェルミオンの効果が弱まってしまうので、 xi というパラメタ（最終的には1へ外挿する）を導入してボゾンの揺らぎの効果を抑えることにより、超対称性がある場合に類似した状況を実現した計算を行った。その結果、行列サイズが96と128の場合、(3+1)次元の実の時空の創発が見られた。これは、 mf を0に近づけるとともに xi を1に近づけられた場合に(3+1)次元の実の時空の創発を見るための第一歩として大きな意義がある。

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]

アダマールゲートを各量子ビットに作用する量子回路を主として、いくつかの量子回路について、最大で「富岳」の1/3系規模までの状態ベクトル法による量子計算シミュレーションを行った。図8はどちらも、量子ビット数 N 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当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、それぞれユニット量子ビット数、ユニット内プロセス数と呼ぶ。状態ベクトル法の大規模シミュレーションを行うためにはMPI並列化が必須であるが、従来の手法ではMPIプロセス数と状態ベクトルのデータサイズがどちらも2のべき乗でなければならないという制限があり、我々の手法を使うとその制限を取り払い、より多くのメモリを用いることができるようになる。なお、 $(K, n_u) = (0, 1)$ は従来手法に対応するパラメタである。

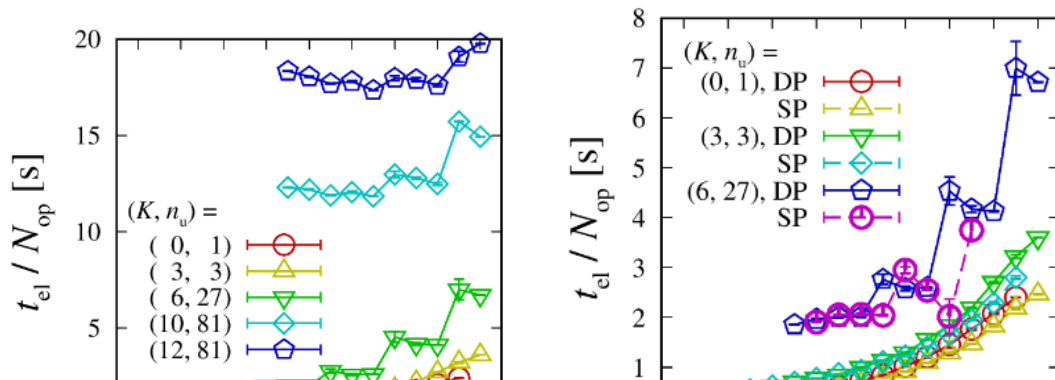


図 8: 量子ビット数 N vs. 量子ゲート当たりの実行時間。(左図) 倍精度浮動小数点数 (DP) を用いた結果。(右図) DP と単精度浮動小数点数 (SP) を用いた場合の計算結果の比較。

図 8 左は $(K, n_q) = (0, 1), (3, 3), (6, 27), (10, 81), (12, 81)$ での結果をまとめたものである。我々の手法を用いると MPI 通信パターンが従来の手法より複雑になるため、実行時間は従来のものより多くなってしまふ。しかしながら、最も簡単なパラメタである $(K, n_q) = (3, 3)$ の場合、従来手法と比べ 28%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ろう。また、このパラメタは「富岳」の small リソースグループでの最大ノード数である 384 ノードでのシミュレーションが可能なるものであり、例えば small リソースグループのみで研究を行う場合は我々の手法を用いることでより大きい量子回路のシミュレーションが行える。なお、 $(K, n_q) = (6, 27)$ は「富岳」の large リソースグループで最大ノード数を利用可能なパラメタ、 $(K, n_q) = (10, 81), (12, 81)$ は huge リソースグループで最大ノード数 (1/2 系規模) を利用可能なパラメタに対応しており、特に後者はさらに量子ビット数を増やせるため今回の実験がうまくいったことは重要である。

図 8 右は複素数の表現として倍精度浮動小数点数 (DP) を 2 個用いた場合と単精度浮動小数点数 (SP) を 2 個用いた場合の比較である。どのような量子回路をシミュレーションしたいかにはよるものの、あまり深さが必要ではない量子回路の場合は倍精度浮動小数点数の精度が必要ないことが期待できる。その場合、単精度浮動小数点数を用いれば同じ規模のシミュレーションでさらに量子ビット数を増やすことができる。そこで、今回我々のシミュレータを SP での計算に対応させ、DP と SP のパフォーマンス比較を行った。まだ SP については最大規模までのシミュレーションはできていないが、DP と比べほぼ同じ計算時間で 1 つ量子ビット数が多いシミュレーションができていたことが分かる。

[D2 特定 QS]

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、図 9(a) (b) に示すランダム量子回路に対して、ベンチマーク計算を行った。図 9(a) に示す回路は Hardware efficient ansatz をベースに、1 量子ビットゲートの回転角をランダムにしたもの、図 9(b) に示す回路は、SWAPalpha ゲートの回転角をランダムにしたゲートである。図 9(a) の量子回路を 1 次元にした場合の 1 レイヤーを演算させるのにかかる計算コストを示したものが図 9(c)、図 9(a) の量子回路を 2 次元上に配置した場合の 1 レイヤーを演算させるのにかかる計算コストを示したものが図 9(d) である。計算では、量子ビット数に比例するように、計算ノード数を増加している。その結果、量子ビット数によらず計算コストが一定である事がわかった。すなわち、我々の計算結果は並列計算としては理想的な weak-scaling を示していることがわかった。図 9(e) (f) は、図 9(b) の量子回路のそれぞれ、1 次元、2 次元に対する結果であり、同様に weak-scaling を示している。

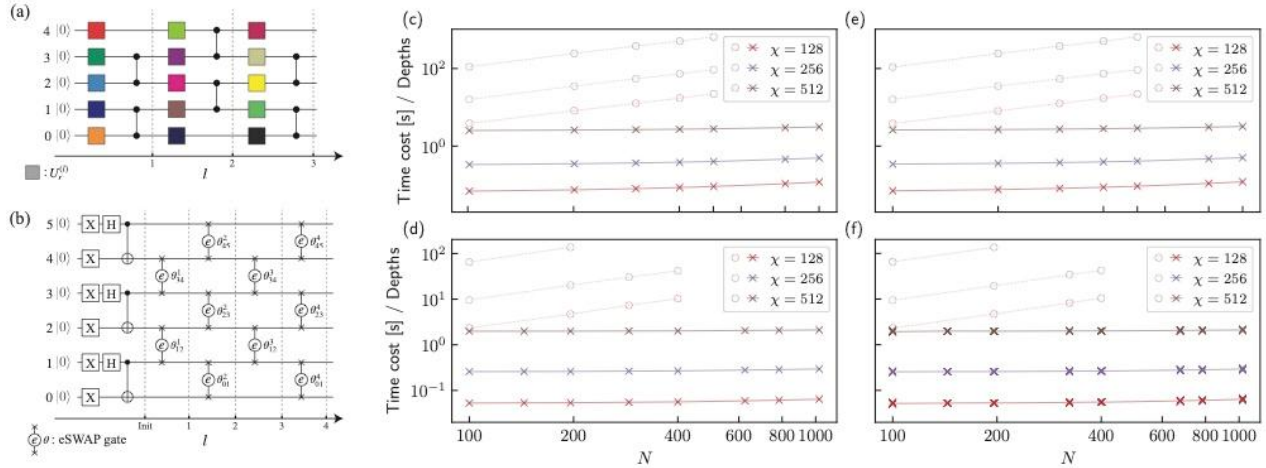


図 9 : (a)Hardware efficient ansatz を元にしたランダム量子回路、および、(b)SWAP-alpha ゲートを用いた量子スピン系を念頭に置いたランダム量子回路。(a)の量子回路を(c) 1次元上にした場合、および、(d)二次元上に配置した場合にかかる計算コスト。白抜きの円で示した結果は、逐次計算による結果、バツで示した結果は pTEBD 法による計算結果を示す。(e) (f) は、(b) の量子回路を (e) 1次元、および、(f) 2次元にした場合にかかる計算コスト。

[D3 量子古典ハイブリッド]

量子-古典ハイブリッド計算の例として、[D1]で述べた状態ベクトル法のシミュレータを利用した Variational Quantum Eigensolver (VQE) の開発を行った。VQE は主に物理系や分子系の基底状態を計算するために提案された変分アルゴリズムであり、ansatz の計算（とそのエネルギー期待値）を量子コンピュータで行い、その結果を用いて ansatz のパラメタ更新を古典コンピュータで行う。今回、1次元 スピン 1/2 反強磁性 Heisenberg 模型に対してシミュレータを開発したが、その際、ansatz は先行研究[Seki, Shirakawa, and Yunoki, PRA 101, 052340 (2020)]で提案されていたもの（の一部）を採用した。なお、変分パラメタの更新には最急降下法を用いた。

図 10 に ansatz の 1 サイトあたりのエネルギー期待値（結合係数 J で規格化）の VQE step 依存性を示す。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。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 $2^{N-30}(1 + ND)$ となる。図のグレーの破線は Lanczos 法を用いて求めた基底状態エネルギー期待値であり、

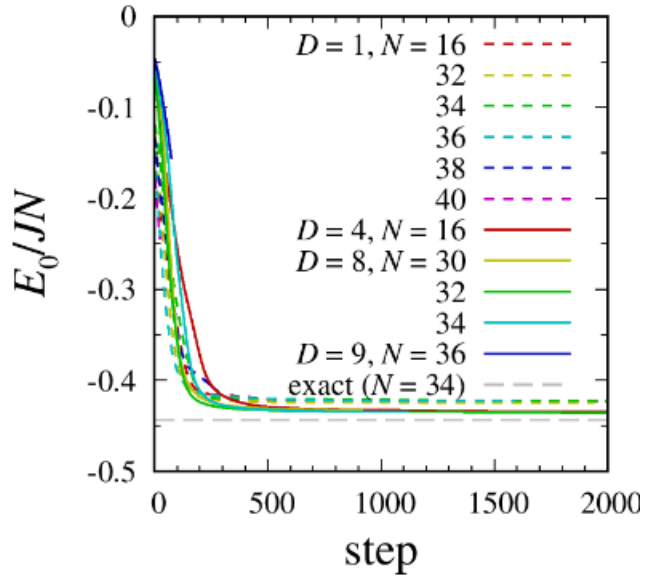


図 10: 状態ベクトル法を用いた、1次元スピン 1/2 反強磁性 Heisenberg 模型の基底状態に対する VQE 計算結果。 N は量子ビット数、 D は量子回路長。

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我々のシミュレーションでも確認できた。

[D4 量子アルゴリズム]

[D3]で記述した通り、スピン 1/2 反強磁性 Heisenberg 模型に対して、量子-古典ハイブリッド量子アルゴリズムである VQE の「富岳」へ実装し、その精度の検証を開始した。特に、量子ビット数（つまり系の大きさ）を大きくした場合の VQE の変分パラメタの収束性は、現在、議論の中心となっており、今後、状態ベクトル法を用いたシミュレーションにより明らかにしたい。

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/

●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

・クォーク 4 個から成る「純粋テトラクォーク」ー加速器実験で見えた新粒子をスーパーコンピュータ「富岳」で解明ー

発表日：令和5年10月20日情報解禁

発表主宰者：理化学研究所、京都大学、大阪大学

メディア掲載：マイナビニュース(10/23)

・機械学習を組込んだ第一原理強相関電子状態計算法を用いて、銅酸化物超伝導の物質依存性を定量再現し、超伝導を制御する主成分が明らかに

発表日：令和5年11月27日情報解禁

発表主宰者：早稲田大学、上智大学、物質・材料研究機構

2) 受賞

・大塚 孝治 客員主管研究員がフンボルト賞を受賞

発表日：令和5年6月14日

発表主宰者：理化学研究所

●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 5 年度はオンラインにて取材による紹介記事を行い 52 号～と 53 号の 2 本と、理化学研究所協力による動画による紹介「月刊 JICFuS ムービー」1 本（54 号）を制作した。

【月刊 JICFuS】

- ・第 52 号「How to Visualize the Unseen」（令和 6 年 1 月 10 日）慶應義塾大学 Rico Pohle 特任助教
- ・第 53 号「物質の成り立ちを決めるハドロン間力の解明で新たな一歩」（令和 6 年 3 月 4 日）東京工業大学 理学院 村上耕太郎 研究員

【月刊 JICFuS ムービー】

- ・第 54 号「量子コンピュータを支えるシミュレーション」（令和 6 年 2 月 22 日）理化学研究所 計算科学研究センター 白川知功 上級研究員

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）」の共催で行なった。

- ・日時：令和 5 年 12 月 18 日～20 日
- ・場所：筑波大学東京キャンパス 1 3 4 講義室
- ・ホームページ：<https://kds.kek.jp/event/48556/>

参加者は、現地およびオンラインの合計で 75 名であった。

また、このほかに「B1 B 中間子崩壊」が共催する形で以下のイベントを開催した。

1. “27th Meeting on Physics at B Factories”，Jun 30, 2023, 名古屋大学 KMI（ハイブリッド），国内外から 58 名参加
2. “28th Meeting on Physics at B Factories”，Spe 8, 2023, 新潟大学，国内から 44 名参加
3. “Belle II Physics Work 2023”，Oct 30 - Nov 2, 2023, 国内外から 123 名参加
4. “Flavor Physics Workshop 2023”，2023 年 11 月 22-25 日，ハートピア熱海、静岡、主に国内から 60 名参加

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」	神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1 学校法人慶應義塾大学	学校法人慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 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	神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1 学校法人慶應義塾大学 東京都新宿区大久保3-4-1 学校法人早稲田大学	学校法人慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 野村 悠祐 学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 主任研究員(研究院准教授) 金子 隆威
[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	神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1 学校法人慶應義塾大学 東京都新宿区大久保3-4-1 学校法人早稲田大学	学校法人慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授 野村 悠祐 学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 主任研究員(研究院准教授) 金子 隆威
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
[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	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 大阪府茨木市美穂が丘10番地1 国立大学法人大阪大学 核物理研究センター	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 国立大学法人大阪大学 核物理研究センター 教授 保坂 淳

	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	Quantum criticality of bandwidth- controlled Mott transition	Kensaku Takai, Youhei Yamaji, Fakher F. Assaad, Masatoshi Imada	Phys. Rev. Res. 5, 033186	2023/09/13
2	Boltzmann machines and quantum many-body problems	Yusuke Nomura	J. Phys.: Condens. Matter 36, 073001	2023/11/10
3	Superconductivity studied by solving ab initio low-energy effective Hamiltonians for carrier doped CaCuO ₂ , Bi ₂ Sr ₂ CuO ₆ , Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O ₈ , and HgBa ₂ CuO ₄	Michael Thobias Schmid, Jean-Baptiste Morée, Ryui Kaneko, Youhei Yamaji, Masatoshi Imada	Phys. Rev. X 13, 041036	2023/11/28
4	Instability of the Pa ₃ ⁻ fulleride Cs ₃ C ₆₀ at ambient pressure and superconducting state of the fcc phase	Changming Yue, Yusuke Nomura, Kosmas Prassides, and Philipp Werner	Phys. Rev. B 108, L220508	2023/12/26
	[A2 原子核構造]			

1	Systematic shell-model study of 98–130Cd isotopes and 8+ isomeric states	D. Patel, P. C. Srivastava, and N. Shimizu	Nuclear Physics A 1039, 122742 (2023)	2023/08/21
2	Systematic shell-model study of 99–129Cd isotopes and isomers in neutron-rich 127–131In isotopes	D. Patel, P. C. Srivastava, N. Shimizu, and Y. Utsuno	Physical Review C 109, 014310 (2024)	2024/01/08
	[B1 B 中間子崩壊]			
1	$B \rightarrow D^* \ell \nu$ semileptonic form factors from lattice QCD with Möbius domain-wall quarks	Y. Aoki, B. Colquhoun, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, R. Kellermann, J. Koponen, E. Kou	Phys. Rev. D 109 (2024) 074503	2024/04/04
2	$B_s \rightarrow K \ell \nu$ form factors from lattice QCD with domain-wall heavy quarks	P. Mohanta, T. Kaneko, S. Hashimoto	Proceedings of Science, Lattice 2023 (2024) 267	2024/05/04
3	Studies on finite-volume effects in the inclusive semileptonic decays of charmed mesons	R. Kellermann, A. Barone, S. Hashimoto, A. Jüttner, T. Kaneko	Proceedings of Science, Lattice 2023 (2024) 272	2024/05/04
	[B2 エキゾチック]			
1	Interaction potentials for two-particle states with nonzero total momenta in lattice QCD	Yutaro Akahoshi and Sinya Aoki	Phys. Rev. D 108, 034510	2023/08/23
2	Lattice study on a tetra-quark state T_{bb} in the HAL QCD method	Takafumi Aoki, Sinya Aoki, and Takashi Inoue	Phys. Rev. D 108, 054502	2023/09/11
3	Lattice study on a tetraquark state T_{bb} in the HAL QCD method	Sinya Aoki, and Takafumi Aoki	PoS(LATTICE2022)049	2023/04/06
4	New configuration set of HAL QCD collaboration	Etsuko Itou for HAL QCD collaboration	PoS(LATTICE2023)140	2023/12/27
5	Chemical potential (in)dependence of hadron scatterings in the hadronic phase of QCD-like theories and its applications	Kotaro Murakami, Etsuko Itou and Kei Iida	JHEP02(2024)152	2024/02/21
6	Study on $\Lambda(1405)$ in the flavor SU(3) limit in the HAL QCD method	Kotaro Murakami and Sinya Aoki	PoS LATTICE2023, 063 (2024)	2023/12/27
7	Lattice quantum chromodynamics (QCD) studies on decuplet baryons as meson-baryon bound states in the HAL QCD method	Kotaro Murakami, Yutaro Akahoshi, Sinya Aoki, Takumi Doi, and Kenji Sasaki (HAL QCD Collaboration)	Prog. Theor. Exp. Phys. 2023 043B05	2023/04/03

8	Doubly charmed tetraquark T_{cc}^{+} from lattice QCD near physical point	Yan Lyu, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Yoichi Ikeda, and Jie Meng	Phys. Rev. Lett. 131, 161901	2023/10/16
9	Indication of a ϕ bound state from a correlation function analysis	Emma Chizzali, Yuki Kamiya, Raffaele Del Grande, Takumi Doi, Laura Fabbietti, Tetsuo Hatsuda, Yan Lyu	Phys. Lett. B 848 (2024) 138358	2023/11/27
10	Toward Nuclear Physics from Lattice QCD on Quantum Computers	Arata Yamamoto, Takumi Doi	Prog. Theor. Exp. Phys. 2024 033D02	2024/02/06
	[B4 自己学習モンテカルロ]			
1	Equivariant transformer is all you need	Akio Tomiya and Yuki Nagai	PoS LATTICE2023	2023/12/27
	[C2 複素ランジュバン]			
1	The emergence of expanding space-time in the Lorentzian type IIB matrix model with a novel regularization	Mitsuaki Hirasawa, Konstantinos N. Anagnostopoulos, Takehiro Azuma, Kohta Hatakeyama, Jun Nishimura, Stratos Papadoudis, Asato Tsuchiya	PoS CORFU2022 (2023) 309	2023/07/04
	[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	Efficient variational quantum circuit structure for correlated topological phases	Rongyang Sun, Tomonori Shirakawa, Seiji Yunoki	Physical Review B 108, 075127	2023/08/11
2	Improved real-space parallelizable matrix-product state compression and its application to unitary quantum dynamics simulation	Rongyang Sun, Tomonori Shirakawa, Seiji Yunoki	arXiv:2312.02667	2023/12/05

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	Ab initio studies of cuprate superconductors and analyses on the electron fractionalization、口頭(招待講演)	Masatoshi Imada (Waseda Univ.)	Hsinchu, Taiwan (THE 21st TAIWAN-JAPAN-KOREA SYMPOSIUM ON STRONGLY CORRELATED ELECTRON SYSTEMS)	2023/04/06-07
2	Ab initio studies of cuprate superconductors and analyses on electron fractionalization、口頭(招待講演)	Masatoshi Imada (Waseda Univ.)	Ischia, Italy (Superstripes 2023)	2023/06
3	Ab initio studies on quantum spin liquid in molecular solids and superconductivity in cuprates、口頭(招待講演)	Masatoshi Imada (Waseda Univ.)	Trieste, Italy (Quantum Monte Carlo methods at work for describing novel states of matter)	2023/07
4	Ab initio studies on quantum spin liquid in molecular solids and superconductivity in cuprates、口頭(招待講演)	Masatoshi Imada (Waseda Univ.)	Beijing, China (The 10 th International Workshop on Strong Correlation and Angle-Resolved Photoemission Spectroscopy)	2023/09
5	The Nickel Age of Superconductivity: Comparison with Cuprates and Theoretical Design of Cuprate-analog Nickelates、口頭	Yusuke Nomura (Keio Univ.)	Incheon, Korea (International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2023)	2023/07
6	Quantum many-body problems and artificial neural networks、口頭(招待講演)	Yusuke Nomura (Keio Univ.)	Kobe, Japan (CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics)	2023/08
7	Artificial neural networks for analyzing quantum many-body correlations、口頭(招待講演)	Yusuke Nomura (Keio Univ.)	Liyang, China (Conference of Condensed Matter Physics 2023)	2023/08
8	Doping Asymmetry and Layer-Selective Metal-Insulator Transition in Trilayer K_3C_{60} 、口頭(招待講演)	Yusuke Nomura (Keio Univ.)	Beijing, China (The Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Systems 2023)	2023/09
9	Quantum many-body solvers using artificial neural networks、口頭(招待講演)	Yusuke Nomura (Keio Univ.)	Saitama, Japan (Computational	2023/10

			Approaches to Quantum Many-Body Systems)	
10	Spin Nematics Meet Spin Liquids: Exotic Phases in the Spin-1 Bilinear- Biquadratic Model with Kitaev Interactions、ポスター	Rico Pohle (Keio Univ.)	Trieste, Italy (Fractionalization and Emergent Gauge Fields in Quantum Matter)	2023/12
11	Spin Nematics Meet Spin Liquids: Exotic Phases in the Spin-1 Bilinear-Biquadratic Model with Kitaev Interactions、口頭	Rico Pohle (Keio Univ.)	Chennai, India (Highly Frustrated Magnetism 2024)	2024/01
	[A2 原子核構造]			
1	Shell-model studies of medium-heavy nuclei for the neutrinoless-double-beta-decay matrix element and the nuclear Schiff moment、口頭(招待講演)	清水則孝 (筑波大学計算科学研究センター)	6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikologa village, Big island Hawaii, Hawaii, USA,	2023/11/27
2	Large-scale shell-model study for beta-decay properties of neutron-rich nuclei、口頭(招待講演)	清水則孝 (筑波大学計算科学研究センター)	6th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, Waikologa village, Big island Hawaii, Hawaii, USA,	2023/11/27
3	Quasi-particle vacua shell model and shape phase transition of Nd isotopes", CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics、口頭	清水則孝 (筑波大学計算科学研究センター)	CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan	2023/08/05
4	Nuclear structure studied by shell model calculations using two-nucleon amplitudes、口頭	角田 佑介 (東京大学原子核科学研究センター)	Reimei Workshop "Intersection of Nuclear Structure and Direct Reaction, JAEA	2024/02/29

5	Nuclear shapes studied by Monte Carlo shell model calculations、口頭(招待講演)	角田 佑介 (東京大学原子核科学研究センター)	The workshop on frontier nuclear studies with gamma-ray spectrometer arrays (gamma24), Osaka University	2024/03/26
6	殻模型計算による中性子過剰カドミウム同位体の四重極モーメントと変形の解析、口頭	宇都野 穰(原子力研究開発機構)	日本物理学会 2024 年春季大会、オンライン	2024/03/20
7	Legend and Prospects of the Tensor Force in Nuclei、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	Shape Coexistence Workshop, University of Guelph	2023/05/01
8	Prevailing triaxial shapes in exotic and heavy nuclei、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	4th Int. Conf. on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS), Avignon, France	2023/06/05
9	Legend and Prospects of the Tensor Force in Nuclei、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	Nuclear Physics in the 2020s and Beyond, Argonne National Lab., USA	2023/07/10
10	Triaxiality and shape coexistence as basic modes of collective bands of heavy nuclei、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	17th Int. Conf. Capture Gamma-Ray Spectroscopy and related topics, Maison Minatoc, USA	2023/07/18
11	Nuclear paradigms superseded after 70+ years thanks to supercomputing on K and FUGAKU、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	3 rd Nuclear Physics School for Young Students, Fudan University, China	2023/08/11-12
12	Clusters and shapes in atomic nuclei from nuclear-force perspectives、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	第 9 回クラスター階層領域研究会、東京工業大学、日本	2023/09/22
13	Milestones and Prospects of Shell Model、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	The Past, Present, and Future of Nuclear Structure Theory in the FRIB Era, Michigan State university, USA	2023/09/25
14	New Concepts of Nuclear Structure Science、口頭(招待講演)	大塚孝治 (東京大学理学系研究科)	IGK 2891 workshop, Darmstadt, Germany	2023/11/27

	[B1 B 中間子崩壊]			
1	Flavor Physics From Lattice QCD、口頭	T. Kaneko (KEK)	Korean Physical Society and Physical Society of Japan Joint Symposium	2023/04/20
2	B meson semileptonic decays from lattice QCD、口頭	T. Kaneko (KEK)	34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023)	2023/04/04-08
3	$B_s \rightarrow K \ell \nu$ form factors from lattice QCD with domain-wall heavy quarks、口頭	P. Mohanta (KEK)	40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/07/31
4	Studies on finite-volume effects in the inclusive semileptonic decays of charmed mesons、口頭	R. Kellermann (SOKENDAI)	40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/07/31
5	Challenges in the lattice QCD computation of inclusive processes、口頭	S. Hashimoto (KEK)	Lattice QCD and Probes of New Physics	2023/08/07-11
6	Towards the understanding of the inclusive vs exclusive puzzles in the $ V_{xb} $ determinations、口頭	S. Hashimoto (KEK)	EuroPLEx Final Conference	2023/09/11-15
7	Status and progress of lattice QCD、口頭	T. Kaneko (KEK)	12th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2023)	2023/09/18-22
8	Updates on inclusive charmed and bottomed meson decays from the lattice、口頭	R. Kellermann (SOKENDAI)	12th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle (CKM2023)	2023/09/18-22
	[B2 エキゾチック]			
1	Doubly charmed tetraquark T_{cc}^{++} in (2+1)-flavor QCD near physical point、口頭	S. Aoki (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)	40th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2023)	2023/07/31-08/04
2	Recent results on hadron interactions in the HAL QCD method、口頭	S. Aoki (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)	2023 Santa Fe Workshop, "Lattice QCD and Probes of New Physics"	2023/08/07-11

3	Lattice studies on hadron interactions including strange, charm and bottom quarks in the HAL QCD method、口頭	S. Aoki (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)	The 2nd Korea-Japan Nuclear Physics Workshop	2023/11/13-15
4	Influence of discretization error on the HALQCD baryon forces、口頭	T. Inoue (Nihon University)	25th European Conference on Few-Body Problems in Physics	2023/07/31
5	Nucleon-Lambda interaction from lattice QCD、口頭	T. M. Doi (Kyoto U)	BISHOP 2023	2023/05/17
6	Baryon-baryon interaction from lattice QCD、口頭	T. M. Doi (Kyoto U)	41st SPP Physics Conference	2023/07/19-21
7	Nucleon-hyperon interaction from lattice QCD on physical point、口頭	T. M. Doi (Kyoto U)	40th International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2023)	2023/07/31-08/04
8	QCD と第一原理計算、口頭(招待講演)	伊藤悦子 (京大基研)	計算物理春の学校 2024	2024/03/15
9	Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit from lattice QCD、口頭(招待講演)	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology)	Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024)	2024/02/19-21
10	Understanding exotic hadrons from the first-principle calculation in lattice QCD、口頭(招待講演)	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology)	The 2023 Fall Meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society and the Physical Society of Japan	2023/11/26-12/1
11	Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit from lattice QCD、口頭	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology)	Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023	2023/11/14-17
12	Study on Lambda(1405) in the flavor SU(3) limit in the HAL QCD method、口頭	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology), Sinya Aoki (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)	The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/07/31-08/04
13	Hadron scatterings in small chemical potential、口頭	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology)	19th International Conference on QCD in	2023/07/26-28

			Extreme Conditions (XQCD 2023)	
14	Studies on baryon resonances from lattice QCD、口頭(招待 講演)	Kotaro Murakami (Tokyo Institute of Technology)	Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF- ex WS)	2023/03/14-16
15	Nuclear LS force from Lattice QCD、口頭	T. Sugiura (RCNP, Osaka University)	HAWAII2023	2023/11/26- 12/01
16	Doubly charmed tetraquark T^+_{cc} from lattice QCD、口頭(招待講演)	Yan Lyu (Peking Universtiy/ RIKEN iTHEMS)	Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023	2023/11/14-17
17	Baryon interaction from the time-dependent HAL QCD method on the lattice、口頭(招 待講演)	Kenji Sasaki (CiDER, Osaka University) (HAL QCD Collaboration)	The sixth joint meeting of the Division of Nuclear Physics of the American Physical Society (APS) with the nuclear physicists of the Physical Society of Japan (JPS)	2023/11/26- 12/01
18	N- ϕ interaction from lattice QCD and implication from combined analysis with femtoscopic data、口頭(招待講 演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	Fourth International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (HEF-ex 2024)	2024/02/19-21
19	Hadron interactions and Exotics from Lattice QCD in the HAL QCD method、口頭	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	Nagoya Workshop on Exotic Hadrons 2023	2023/11/14-17
20	Hadron-hadron interactions from Lattice QCD with the HAL QCD method、口頭(招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	International workshop on J-PARC hadron physics 2023 (J-PARC Hadron 2023)	2023/09/12-15
21	Hadron interactions from Lattice QCD、口頭(招待講演)	T. Doi (RIKEN iTHEMS) for HAL QCD Collaboration	34th IUPAP Conference on Computational Physics (CCP2023)	2023/08/04-08
	[B3 有限温度]			

1	Isentropic Equation of state and speed of sound of (2+1)- flavor QCD、口頭	J. Goswami	The QCD Phase Transition, 786. WE-Heraeus-Seminar (Frankfurt)	2023/04/03-05
2	Characterizing Strongly Interacting Matter at Finite Temperature: (2+1) Flavor QCD with Möbius Domain Wall Fermions、口頭	J. Goswami	The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (online)	2023/07/31-08/04
3	QCD thermodynamics with Möbius domain wall fermions near physical point、ポスター	Y. Aoki	34th IUPAP Conference on Computational Physics (Kobe)	2023/08/04-08
4	Multigrid Solver for Lattice QCD on GPU Machines、口頭	I. Kanamori	34th IUPAP Conference on Computational Physics (Kobe)	2023/08/04-08
5	Exploring the Critical Points in QCD with Multi-Point Pade and Machine Learning Techniques in (2+1)-flavor QCD、口頭	J. Goswami	Quark Matter 2023 (Houston)	2023/09/03-09
6	Characterizing Strongly Interacting Matter at Finite Temperature: (2+1) Flavor QCD with Möbius Domain Wall Fermions、口頭	J. Goswami	Large-scale lattice QCD simulation and application of machine learning (Tsukuba)	2023/11/23-25
7	QCD phase transition from lattice、口頭	Y. Zhang	The 15th workshop on QCD phase transition and relativistic heavy-ion physics (Zhuhai)	2023/12/15-19
8	Characterizing Strongly Interacting Matter at Finite Temperature: (2+1) Flavor QCD with Möbius Domain Wall Fermions、口頭	J. Goswami	成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム (Bunkyo)	2023/12/18-20
9	Mixed Precision Solvers for Lattice QCD on Supercomputer Fugaku、ポスター	I. Kanamori	The 6th R-CCS International Symposium (Kobe)	2024/01/29-30
	[B4 自己学習モンテカルロ]			

1	素粒子論における格子 QCD と機械学習を用いたその計算、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	KEK サマーチャレンジ OBOG 第6回世代間交流会	2024/2/23
2	古典スピンから格子場の理論へ、機械学習の応用、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	OIST mini meeting: 異分野融合による新たな科学の創造	2024/2/21
3	格子 QCD とその周辺における機械学習の活用、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	High Performance Computing Physics	2024/03/05
4	Machine learning for lattice field theory、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	International conference on MACHINE LEARNING PHYSICS	2023/11/16
5	自己学習モンテカルロとトランスフォーマー、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	「成果創出加速」基礎科学合同シンポジウム	2023/12/18
6	Equivariant transformer is all you need、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/08/02
7	Integrating Machine Learning into Lattice QCD、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	15th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences	2023/10/02
8	Julia 言語による格子 QCD の実装、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	日本物理学会 2024 年本会	2023/09/16
9	素粒子物理における Julia の活用、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	数学と物理における Julia の活用	2023/07/12
10	自己学習モンテカルロ、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	「富岳」成果創出加速プログラム・キックオフミーティング	2023/06/21
11	Flow based sampling for 3- and 4-dim. Model、口頭	富谷昭夫 (大阪国際工科専門職大学)	The Future is non-perturbative	2023/06/07
	[C1 シンプル]			
1	Applying the Worldvolume HMC method to dynamical fermion systems、口頭	M. Fukuma (Kyoto univ)	The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/07/31-08/04
2	Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to	Y. Namekawa (Kyoto univ)	The 40th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2023)	2023/07/31-08/04

	the complex ϕ^4 theory at finite density、口頭			
3	符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法、口頭(招待講演)	福間将文(京都大)	「富岳」成果創出加速プログラム キックオフミーティング	2023/06/21
4	符号問題におけるシンプルの方法、口頭(招待講演)	福間将文(京都大)	駒場研究会「場の理論への非摂動的アプローチ」	2024/03/30
5	符号問題の解決法としての世界体積ハイブリッドモンテカルロ法とその格子模型への適用、口頭(招待講演)	福間将文(京都大)	「富岳」成果創出加速プログラム 合同シンポジウム	2023/12/19
6	符号問題と世界体積ハイブリッドモンテカルロ法、口頭	福間将文(京都大)	学習物理学の創生 領域会議 (招待講演)	2023/09/27
7	格子シミュレーションによる符号問題への挑戦、口頭	滑川 裕介(京都大)	瀬戸内サマーインスティテュート 2023	2023/09/21
8	Applying the Worldvolume Hybrid Monte Carlo method to dynamical fermion systems、口頭(招待講演)	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 2023	2023/09/14
9	複素変数格子シミュレーションによる符号問題への挑戦、口頭	滑川 裕介(京都大)	KEK 研究会 「熱場の量子論とその応用」	2023/08/30
10	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の様々な格子模型への適用 I、口頭	福間将文(京都大)、滑川 裕介(京都大)	日本物理学会 2024 年年度大会	2024/03/19
11	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法の様々な格子模型への適用 II、口頭	福間将文(京都大)、滑川 裕介(京都大)	日本物理学会 2024 年年度大会	2024/03/19
12	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のダイナミカルフェルミオン系への適用 I、口頭	福間将文(京都大)、滑川 裕介(京都大)	日本物理学会 2023 年年度大会	2023/09/16
13	世界体積ハイブリッドモンテカルロ法のダイナミカルフェルミオン系への適用 II、口頭	福間将文(京都大)、滑川 裕介(京都大)	日本物理学会 2023 年年度大会	2023/09/16
	[C2 複素ランジュバン]			
1	Recent progress in the numerical studies of the Lorentzian IKKT model、口頭	Konstantinos Anagnostopoulos (National and Technical Univ. of Athens)	“Large-N Matrix Models and Emergent Geometry”	2023/09/07

2	The effects of SUSY on the emergent spacetime in the Lorentzian type IIB matrix model、口頭	Mitsuaki Hirasawa (INFN)	“Corfu 2023: Workshop on Noncommutative and Generalized Geometry in String theory, Gauge theory and Related Physical Models”	2023/09/23
3	Progress in the numerical studies of the type IIB matrix model、口頭	Asato Tsuchiya (Shizuoka Univ.)	“East Asia Joint Workshop on Fields and Strings 2023”	2023/11/13
4	The effect of fermions on the emergence of (3+1)-dimensional expanding space-time in the Lorentzian type IIB matrix model、口頭	Kohta Hatakeyama (Hirosaki Univ.)	“KEK Theory Workshop 2023”	2023/11/29
5	The effect of fermions on the emergence of (3+1)-dimensional space-time in the Lorentzian type IIB matrix model、ポスター	Takehiro Azuma (Setsunan Univ.)	“The 6th R-CCS International Symposium”	2024/01/29
	[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	Memory-Efficient State-Vector Simulation of Quantum Computer、口頭	吉岡直樹 (理研 R-CCS)、伊藤伸泰 (理研 R-CCS)	34 th IUPAP Conference on Computational Physics	2023/08/07
2	「富岳」を用いた変分量子固有値ソルバー法による大規模シミュレーション、口頭	吉岡直樹 (理研 R-CCS)、伊藤伸泰 (理研 R-CCS)、関和弘 (理研 RQC)、白川知功 (理研 R-CCS)、柚木清司 (理研 RQC)	日本物理学会第 78 回年次大会	2023/09/18
3	「富岳」を用いた量子コンピュータの大規模シミュレーション、口頭	吉岡直樹 (理研 R-CCS)、伊藤伸泰 (理研 R-CCS)、関和弘 (理研 RQC)、白川知功 (理研 R-CCS)、柚木清司 (理研 RQC)	第 49 回量子情報技術研究会	2023/12/17
4	Quantum-classical data conversion using tensor network optimization techniques、口頭	Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS)、Hiroshi Ueda (Osaka	APS March Meeting 2024, Minneapolis, USA	2024/03/07

		U.), Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)		
5	Improved real-space parallelizable matrix-product compression and its application to unitary quantum dynamics simulation、口頭	Rong-yang Sun (RIKEN R-CCS)、Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS)、Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	APS March Meeting 2024, Minneapolis, USA	2024/03/06
6	物性物理学における量子コンピュータ応用、口頭	柚木清司 (理研 R-CCS)	KEK 素核研物構研連携研究会 2024	2024/03/26
7	Quantum simulation for correlated quantum many-body systems on noisy quantum devices、口頭	Rong-yang Sun (RIKEN R-CCS)	Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, Kobe Japan	2024/02/16
8	Quantum simulation for quantum many-body systems: variational quantum algorithms and beyond、口頭	Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	International Workshop on Massively Parallel Programming for Quantum Chemistry and Physics (MPQCP 2024), Wako	2024/01/09
9	テンソルネットワーク法を用いた量子計算のシミュレーション、口頭	白川知功 (理研 R-CCS)	第4回量子ソフトウェアワークショップ:NISQ 計算時代の量子シミュレーションと量子コンピュータシミュレータ、東京大学	2023/12/25
10	Quantum simulation for quantum many-body systems: variational quantum algorithms and beyond、口頭	Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	CECAM Workshop: Quantum Algorithms for Chemistry and Material Science Simulation: Bridging the Gap Between Classical and Quantum Approaches, Lausanne	2023/12/14
11	Quantum-classical data conversion using tensor network optimization techniques、口頭	Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS)	CECAM Workshop: Quantum Algorithms for Chemistry and Material Science Simulation: Bridging the Gap Between Classical and Quantum Approaches, Lausanne	2023/12/14

12	Scalable quantum simulation for topological quantum phases on noisy quantum devices、口頭	Rong-yang Sun (RIKEN R-CCS)	ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information, Kyoto	2023/09/25
13	量子コンピュータによる量子ダイナミクスと量子優位性、口頭	柚木清司 (理研 R-CCS)	量子イノベーションイニシアティブ協議会第9回セミナー (オンライン)	2023/09/05
14	Simulation of quantum computing based on the tensor network methods、口頭	白川知功 (理研 R-CCS)	第19回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会、埼玉	2023/08/31
15	Scalable quantum simulation for topological quantum phases on noisy quantum devices、口頭	Rong-yang Sun (RIKEN R-CCS)、Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS), Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	CCP2023 - 34th IUPAP Conference on Computational Physics, Kobe	2023/08/08
16	Approximate State Preparation using Tensor Network Optimization Techniques、ポスター	Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS), Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) 2023, Bellevue	2023/9/17-22
17	Scalable Quantum Simulation for Topological Phases on NISQ Devices、ポスター	Rong-yang Sun (RIKEN R-CCS)、Tomonori Shirakawa (RIKEN R-CCS), Seiji Yunoki (RIKEN R-CCS)	IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE) 2023, Bellevue	2023/9/17-22