

令和 5 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00148

研究課題名（和文）テンソルネットワーク法による計算物理学の新展開

研究課題名（英文）New Development of Computational Physics with Tensor Network Scheme

研究代表者

藏増 嘉伸（Kuramashi, Yoshinobu）

筑波大学・計算科学研究センター・教授

研究者番号：30280506

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,500,000円

研究成果の概要（和文）：テンソルネットワーク(TN)スキームにおける数値解析手法の一つであるテンソル繰り込み群(TRG)を用いて、既存のモンテカルロ法では困難であった符号問題・複素作用問題が存在する物理モデルの解析を行った。主要成果として、(i)(3+1)次元有限密度Nambu-Jona-Lasinio(NJL)モデルの低温高密度領域におけるカイラル一次相転移の実証、(ii)(1+1)次元および(2+1)次元Hubbardモデルの金属-絶縁体転移の高精度解析に成功、(iii)(3+1)次元有限密度Z2ゲージヒッグスモデルにおける臨界終点の決定に成功、が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

(3+1)次元有限密度NJLモデルにおけるカイラル一次相転移の実証や(1+1)次元および(2+1)次元Hubbardモデルの金属-絶縁体転移の高精度解析の成功は、TRG法が符号問題・複素作用問題を解決していることの証左であるとともに、TRG法が素粒子物理学や物性物理学の分野を超えた可搬性を有していることを意味している。また、TRG法を用いた(3+1)次元有限密度Z2ゲージヒッグスモデルの臨界終点の決定は、TRG法を4次元ゲージ理論に適用した世界で最初の成功例であり、将来の有限密度QCDの相構造解析に向けた重要な布石となる成果である。

研究成果の概要（英文）：We apply the tensor renormalization group (TRG), which is one of the numerical algorithms in the tensor network (TN) scheme, to various physics models with the sign or the complex action problem for which the conventional Monte Carlo approach is useless. Our major achievements are (i) confirmation of first-order chiral phase transition in cold and dense Nambu-Jona-Lasinio model, (ii) high precision analyses of the doping-driven metal-insulator transition in (1+1)- and (2+1)-dimensional Hubbard model, (iv) successful determination of the critical endpoint in (3+1)-dimensional Z2 gauge-Higgs model.

研究分野：素粒子論

キーワード：テンソルネットワーク テンソル繰り込み群 有限密度 符号問題 Nambu-Jona-Lasinioモデル Hubbardモデル Z2ゲージヒッグスモデル

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

1980年代以降、これまで計算素粒子物理学を牽引してきた格子 QCD 計算(モンテカルロ法をベースとしたアルゴリズムを採用)では、近年の計算機能力の向上や新規アルゴリズムの開発・改良の結果、自然界の u, d, s クォーク質量直上でのシミュレーションや、更には軽原子核の束縛エネルギー計算までもが可能となりつつある。このような成功の一方で、長年にわたり本質的問題として認識されながらも、効果的な解決策が見出されることなく取り残されたままの課題が存在する。その代表的かつ重要な例が、モンテカルロ法における符号問題・複素作用問題やフェルミオン系シミュレーションの膨大な計算コストである。これらの問題は、いずれもモンテカルロ法の本質的な欠点に起因しており、ベースとなるアルゴリズムとしてモンテカルロ法を採用している限り、根本的解決は難しい。

2007年に物性物理学分野において、2次元古典スピンモデルに対してテンソル繰り込み群(TRG)と呼ばれる決定論的アルゴリズムが提案された。TRG法は、(i)原理的に符号問題・複素作用問題がないこと、(ii)計算コストの体積依存性が対数的であること(一辺の長さLのd次元格子体積L^dに対する計算コストはd×ln|L|に比例)、(iii)グラスマン数(反可換性を持つ数)を直接扱えること、(iv)物理量の期待値だけでなく分配関数そのものを計算できること、などの魅力的な特徴を有している。研究代表者である蔵増は、共同研究者と共にTRG法を(1+1)次元Schwingerモデルの相構造解析に応用し、上記のモンテカルロ法における問題が解決されていることを実証した。これにより、計算素粒子物理学の長年の懸案であった有限密度QCD、θ項を持つ場の理論、格子上的超対称性理論などの研究に対して、TRG法を応用した新たな展開の可能性が開けた。

2. 研究の目的

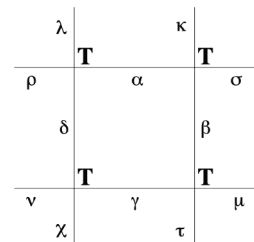
長期的な目標としては、TRG法を素粒子物理学分野とその関連分野に応用し、上記の(i)~(iv)の利点を活用することによって、これまでの計算物理学が成し得なかった新たな物理研究の開拓を目指している。ただし、本研究では3年間という実施期間を考慮し、TRG法を用いた(3+1)次元有限密度Nambu-Jona-Lasinio(NJL)モデルと(1+1)次元と(2+1)次元のHubbardモデルの相構造解析を目標とした。これらの計算は、TRG法が複素作用問題を持たないという利点を最大限に活用しており、これまでのモンテカルロ法ベースのアルゴリズムが成しえなかった科学的成果を得ることが期待される。

NJLモデルの解析には2つの重要な意義がある。一つは、(3+1)次元有限密度QCDに取り組む前段階としての予備的研究である。QCDの相図は温度と密度の関数として複雑な構造を持つことが期待されているが、まず第一歩として低温・高密度領域で予想されている一次相転移(ハドロン相⇒クォーク・グルーオンプラズマ相またはその他の相)の検証と、その一次相転移が消失する点(臨界終点)の温度と密度の決定が理論的に重要だと考えられている。実験的にも現在臨界終点の探索が精力的に行われている状況にある。NJLモデルはQCD理論の低エネルギー有効理論であり、既に幾つかの解析的手法によって低温・高密度領域における一次相転移と臨界終点の存在が予想されていることから、TRG法による計算結果との比較・検討を行うことが可能である。また数値計算上の利点として、QCD理論そのものに比べて自由度が格段に少ないため、TRG法によるNJLモデルの解析が容易であることが挙げられる。そのため、QCD理論を扱うための予備的研究として、(3+1)次元有限密度NJLモデルの解析は非常に有用な科学的・技術的知見を与えてくれる。もう一つの意義は、他分野への応用可能性・発展性である。符号問題・複素作用問題は、物性物理学、原子核物理学、量子化学などの分野で扱われるモデルにおいても存在し、量子多体系の数値計算における普遍的な問題である。特に、NJLモデルは、物性物理学において長年の間重要な研究対象となっているHubbardモデルとTRG計算における技術的共通点が多い。NJLモデルに対して用いられる計算手法はHubbardモデルへのダイレクトな応用が可能であり、更にNJLモデルが(3+1)次元をターゲットとしているのに対して、Hubbardモデルは(1+1)次元と(2+1)次元がターゲットであり、計算コストも少ない。以上の理由により、(3+1)次元有限密度NJLモデルの解析と並行して、Hubbardモデルの相構造解析を行う。

3. 研究の方法

まず、TRG法の概略を2次元イジングモデルを例にとって説明する。TRG法では、最初にモデルの分配関数Zを局所的(格子点)に定義されたテンソルの積で書き表す。

$$Z = \sum_{\text{all spin states}} \exp\left(-\frac{1}{k_B T} \mathcal{H}\right) = \sum_{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots=1}^2 T_{\alpha\lambda\rho\delta} T_{\sigma\kappa\alpha\beta} T_{\mu\beta\gamma\tau} T_{\gamma\delta\nu\chi} \dots$$



ここで、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \dots$ は隣接するテンソル間のボンドを表す添字である。この表式は 2 次元正方格子を仮定しているが、それ以外の場合でも、相互作用が局所的であれば必ず上式のような TN 形式で表せることが知られている。もちろん、このテンソル積の添字に関する縮約をすべて実行してしまえば、厳密な分配関数 Z の値が得られるが、それでは自由度が巨大過ぎて、たとえ最先端のスーパーコンピュータであっても計算可能な格子サイズは非常に小さなものに限られる。そのため、特異値分解に基づいた重要度の高い自由度の選択とブロック変換の一種による疎視化を組み合わせた手続きを反復することにより、分配関数 Z の値そのものを高精度で計算することが可能となる。重要度の判断は、特異値の大きさに基づいて行う。具体的には、特異値の大きい順番に D_{cut} 個の自由度を残し、その他の自由度は棄ててしまう。TRG 法において、その計算精度をコントロールするパラメータは D_{cut} (ボンド次元と呼ぶ)のみである。

2007 年に提唱されたオリジナルな TRG 法は 2 次元にしか適用できないアルゴリズムであったが、その後高次元(3 次元以上)に適用可能な HOTRG 法が開発された。更に、HOTRG 法よりも計算コストを減らした ATRG 法が開発された。われわれ筑波大学を中心とするグループは、TRG 法、HOTRG 法、ATRG 法をグラスマン数化するとともに、HOTRG 法と ATRG 法の計算コードの並列化を行った。これらはフェルミオン系物理モデルの高精度計算を行う上で必須となる計算技術であり、本研究において活用した。

4. 研究成果

(1) (3+1)次元有限密度 NJL モデルの相構造解析

並列版 ATRG コードをグラスマン数化し、Kogut-Susskind フェルミオンによる(3+1)次元有限密度 NJL モデルの定式化を用いて低温・高密度領域におけるカイラル相転移を調べた。図 1(左)はオーダーパラメータであるカイラル凝縮($\bar{\chi}\chi$)の化学ポテンシャル μ に対する依存性を表している。 $\mu \approx 3.0$ において($\bar{\chi}\chi$)の有限の値からゼロへの不連続な変化が確認できるため、カイラル対称性の回復が一次相転移で起きていることがわかる。また、図 1(右)は粒子数密度(n)の化学ポテンシャル依存性をプロットしたものである。カイラル凝縮の場合と同様にゼロから 1 への不連続な変化が確認できる。これらの結果から、(3+1)次元有限密度 NJL モデルの低温・高密度領域において一次相転移が起きていることが確認できた。このモデルは符号問題を内包しているため、従来のモンテカルロ法では解析が困難であったが、TRG 法により世界で初めて一次相転移の存在を実証した。この研究は(3+1)次元有限密度 QCD の相転移解析へ向けての重要なマイルストーンである。

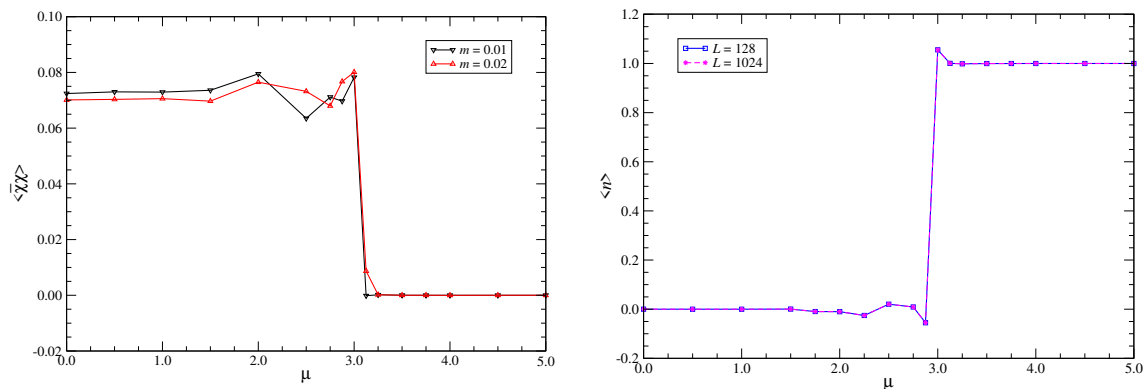


図 1: (3+1)次元有限密度 NJL モデルにおける $L = 1024$ におけるカイラル凝縮($\bar{\chi}\chi$) (左) と $m = 0.01$ における粒子数密度(n) (右) の化学ポテンシャル μ 依存性。 L は 4 次元超立方体の一辺の長さを、 m はフェルミオン質量を表す。

(2) (1+1)次元 Hubbard モデルの金属-絶縁体転移

物性物理学における Hubbard モデルは素粒子物理学における NJL モデルとほぼ同じ経路積分表式で表されるため、NJL モデルにおける TRG 法の成功により、TRG 法による Hubbard モデルの相構造解析への道が開かれた。Hubbard モデルは強相関電子系の単純化されたモデルであり、金属-絶縁体転移や高温超伝導などの理論的本質を含んでいると考えられているが、符号問題のために数値的解析が困難なことが知られている。本研究では、(1+1)次元 Hubbard モデルにおける金属-絶縁体転移の計算を行い、Bethe 仮説に基づいて理論的に予想されている臨界化学ポテンシャルの値を再現することに成功した。図 2(左)は、 $D_{\text{cut}}=80$ でクーロンポテンシャル $U = 4$ 、ホッピングパラメータ $t = 1$ における電子密度(n)を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものである。 $\mu = U/2 = 2$ が half-filling 状態であるが、 $1 \leq \mu \leq 3$ の領域において(n) = 1 の plateau が形成されていることから、絶縁体状態であることがわかる。また、 $\mu \leq -2$ 、 $\mu \geq 6$ も絶縁体状態であることが見てとれる。図 2(右)は、 $D_{\text{cut}}=80$ で $2.60 \leq \mu \leq 3.00$ の領域において μ の刻み幅を細かくし、電子密度(n)の μ 依存性をより細かく調べたものである。曲線は fit 結果を表しており、 $D_{\text{cut}}=60, 65, 70, 75, 80$ の結果を $D_{\text{cut}}=\infty$ に外挿することにより、臨界化学ポテンシャルとして $\mu_c = 2.642(05)(13)$ を得た。この値は、Bethe 仮説に基づいた理論値 $\mu_c = 2.643 \dots$ と一致

している。また、各 D_{cut} での fit において得られた臨界指数も、Bethe 仮設に基づいた理論値 $\nu = 0.5$ に数%の誤差の範囲内で一致した。

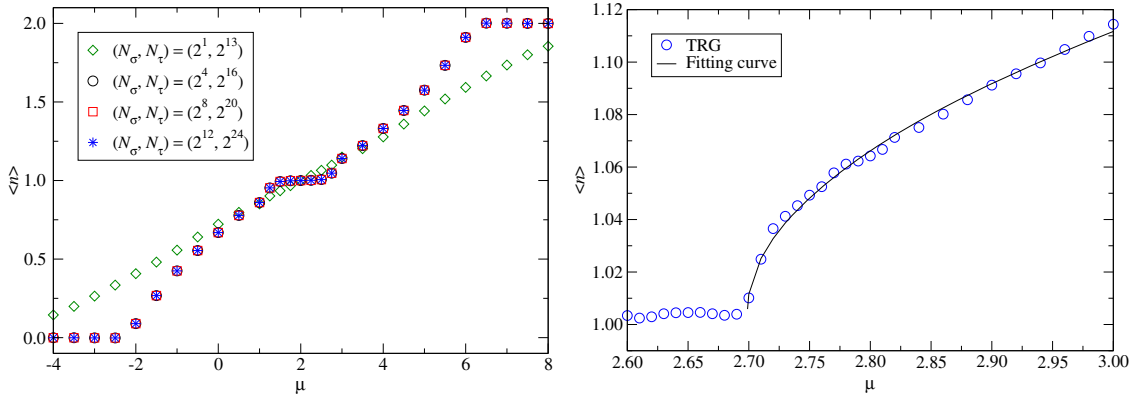


図 2: (左) $(U, t) = (4, 1)$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものの。 $D_{\text{cut}} = 80$ で (N_σ, N_τ) は格子サイズ。 (右) $2.60 \leq \mu \leq 3.00$ の領域において左図よりも μ の解像度を上げて電子密度 $\langle n \rangle$ を計算したものの。 曲線は fit 結果を表す。

(3) (2+1)次元 Hubbard モデルの相構造解析

(1+1)次元 Hubbard モデルの解析の後、(2+1)次元 Hubbard モデル計算を行い、(2+1)次元でも(1+1)次元の場合と同様に、有限のクーロンポテンシャル $U (> 0)$ において、金属-絶縁体転移が起きることを示した。 図 3(左)は、 $D_{\text{cut}} = 80$ で $U = 8$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものである。 $\mu = U/2 = 4$ が half-filling 状態であるが、 $2 \leq \mu \leq 6$ の領域において $\langle n \rangle = 1$ の plateau が形成されていることから、絶縁体状態であることがわかる。 また、 $\mu \leq -4$ 、 $\mu \geq 12$ も絶縁体状態であることが見てとれる。 格子サイズは $(N_\sigma = N_{x,y}, N_\tau) = (2^{12}, 2^{24})$ 、 $(2^8, 2^{20})$ の 2 種類であるが、格子間隔 $(a, \varepsilon) = (1, 10^{-4})$ を用いて物理的スケールに変換すれば $(L, \beta = \frac{1}{T}) = (4096, 1677.7216)$ 、 $(256, 104.8576)$ となり、大体積で極低温であることがわかる。 両者の結果が一致していることから、熱力学極限かつゼロ温度の結果と見做すことができる。 図 3(右)は、 $6.0 \leq \mu \leq 8.2$ の領域において μ の刻み幅を細かくし、電子密度 $\langle n \rangle$ の $D_{\text{cut}} (=D)$ 依存性を調べたものであるが、ほとんど D_{cut} 依存性がないことがわかる。 曲線は μ と $D_{\text{cut}} (=D)$ に関する global fit を表しており、これにより $D_{\text{cut}} = \infty$ における臨界化学ポテンシャル μ_c を決定することができる。 他のクーロンポテンシャル $U = 80, 2$ でも同様の計算を行い、いずれの場合も $\mu_c > U/2$ で金属-絶縁体転移が起きていることが示された。

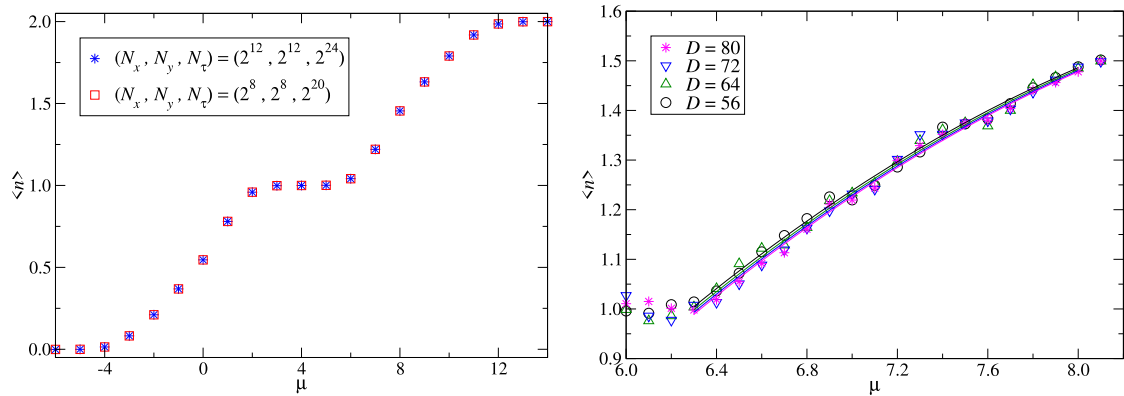


図 3: (左) $U = 8$ における電子密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数としてプロットしたものの。 $D_{\text{cut}} = 80$ で格子サイズは $(N_\sigma = N_{x,y}, N_\tau) = (2^{12}, 2^{24})$ (青) と $(2^8, 2^{20})$ (赤) の 2 種類。 (右) $6.0 \leq \mu \leq 8.2$ の領域において左図よりも μ の解像度を上げて電子密度 $\langle n \rangle$ を計算した結果。 曲線は μ と $D_{\text{cut}} (=D)$ に関する global fit の結果を表す。

(4) (3+1)次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルの相構造解析

本研究課題における当初目標は(3+1)次元有限密度 NJL モデルと(1+1)次元および(2+1)次元 Hubbard モデルの相構造解析であったが、課題実施期間の最初の 2 年間で当初目標は達成したため、最終年度の 3 年目は、(3+1)次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルの相構造解析に取り組んだ。 特に、ゼロ密度および有限密度におけるヒッグス相と閉じ込め相の間の相転移に着目することによって、それぞれの場合における臨界終点を決定した。

図 4(左)は、(3+1)次元 Z_2 ゲージヒッグスモデルの $\mu = 1$ における臨界終点を決定するために、リンク変数の期待値 $\langle L \rangle$ をパラメータ β と η の関数としてプロットしたものである。 $\langle L \rangle$ の跳びは一

次相転移を表しているが、その跳びが消失する点が臨界終点となる。図 4(右)は、臨界終点を決定するために、リンク変数の期待値の跳び $\Delta\langle L \rangle$ をパラメータ β と η の関数として fit し、 $\Delta\langle L \rangle = 0$ となる臨界終点 $(\beta_c, \eta_c) = (0.3053(2), 0.1595(3))$ を外挿で求めたものである。同様の計算を $\mu = 0, 2$ でも実行し、それぞれの臨界終点を決定することに成功した。また、ベンチマークテストとして(2+1)次元のゼロ密度の Z_2 ゲージヒッグスモデルの臨界終点を計算し、他の計算手法で得られた高精度結果との一致を確認した。本研究は、TRG 法を 4 次元ゲージ理論に適用した世界で最初の成功例であり、将来の(3+1)次元有限密度 QCD の相構造解析に向けた重要な布石となる成果である。

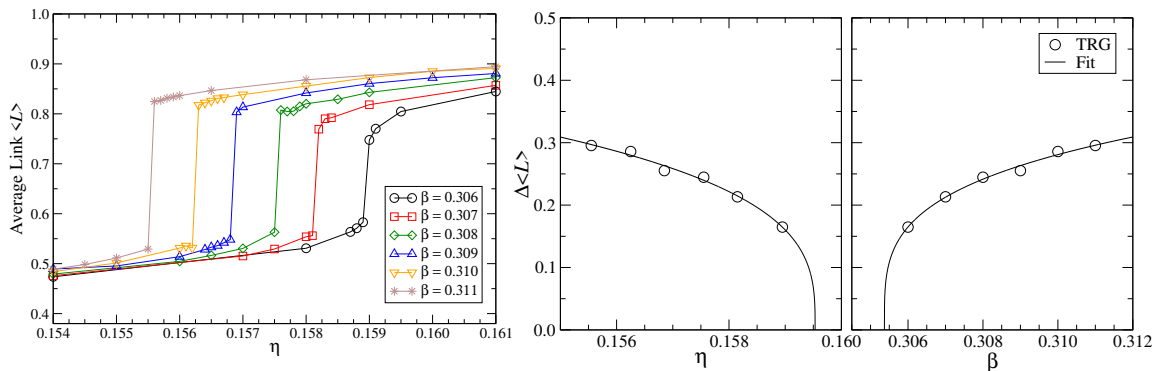


図 4: (左) $\mu = 1$ におけるリンク変数の期待値 $\langle L \rangle$ を $0.306 \leq \beta \leq 0.311$ の範囲で η の関数としてプロットしたもの。 $D_{\text{cut}}=48$ で格子サイズは $V = 32^4$ 。 (右)リンク変数の期待値の跳び $\Delta\langle L \rangle$ をパラメータ β と η の関数として fit したもの。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi	4. 巻 2205
2. 論文標題 Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z ₂ gauge-Higgs model at finite density	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 102
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/JHEP05(2022)102	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Yusuke Yoshimura	4. 巻 104
2. 論文標題 Phase transition of four-dimensional lattice Λ^4 theory with tensor renormalization group	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 34507
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.034507	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi	4. 巻 104
2. 論文標題 Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 14504
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevD.104.014504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi, Takumi Yamashita	4. 巻 2022
2. 論文標題 Metal-insulator transition in the (2+1)-dimensional Hubbard model with the tensor renormalization group	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 023101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptac014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama Shinichiro, Kuramashi Yoshinobu, Yamashita Takumi, Yoshimura Yusuke	4. 巻 2021
2. 論文標題 Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu-Jona-Lasinio model with tensor renormalization group	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP01(2021)121	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Akiyama Shinichiro, Kadoh Daisuke, Kuramashi Yoshinobu, Yamashita Takumi, Yoshimura Yusuke	4. 巻 2020
2. 論文標題 Tensor renormalization group approach to four-dimensional complex Λ^4 theory at finite density	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of High Energy Physics	6. 最初と最後の頁 177
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/JHEP09(2020)177	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計23件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Shinichiro Akiyama
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories
3. 学会等名 Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shinichiro Akiyama
2. 発表標題 An overview of tensor network method for lattice field theories
3. 学会等名 Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋山進一郎, 藏増嘉伸
2. 発表標題 Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z2 gauge-Higgs model at finite density
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会(素核宇)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山進一郎
2. 発表標題 Particle physics with tensor network scheme
3. 学会等名 第9回「富岳」を中核とするHPCIシステム利用研究課題成果報告会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山進一郎
2. 発表標題 素粒子物理学とテンソルネットワーク
3. 学会等名 第2回量子ソフトウェアワークショップ: これからの量子シミュレーション - 古典から量子へ、量子から古典へ - (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 秋山進一郎
2. 発表標題 テンソル線り込み群法による格子理論研究の開拓
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yoshinobu Kuramashi
2. 発表標題 Application of tensor renormalization group to Nambu - Jona-Lasinio model and Hubbard model
3. 学会等名 International Workshop on Tensor Networks in Many Body and Lattice Field (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshinobu Kuramashi
2. 発表標題 Application of tensor renormalization group to Quantum Field Theories
3. 学会等名 DWQ@25: The event marks the passage of twenty-five years since the first numerical simulations with Domain Wall Quarks (DWQ) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichiro Akiyama
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories
3. 学会等名 Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshinobu Kuramashi, Shinichiro Akiyama, Takumi Yamashita, Yusuke Yoshimura
2. 発表標題 Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu - Jona-Lasinio model with tensor renormalization group
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichiro Akiyama, Yoshinobu Kuramashi
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model
3. 学会等名 The 38th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinichiro Akiyama
2. 発表標題 Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu - Jona-Lasinio model with tensor renormalization group
3. 学会等名 YITP workshop QCD phase diagram and lattice QCD (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山進一郎
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories
3. 学会等名 量子多体計算のフロンティア (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 秋山進一郎
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional Hubbard model
3. 学会等名 KEK理論センター研究会「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山進一郎, 藏増嘉伸
2. 発表標題 テンソル繰り込み群による1+1次元Hubbard模型の研究
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会(素核宇)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 山下巧
2. 発表標題 Metal-insulator transition in (2+1)-dimensional Hubbard model with tensor renormalization group
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Akiyama, D. Kadoh, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura
2. 発表標題 Tensor renormalization group approach to four-dimensional complex ϕ^4 theory at finite density
3. 学会等名 Asia-Pacific Symposium for Lattice field theory (APLAT2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Akiyama, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura
2. 発表標題 Restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu--Jona-Lasinio model with tensor renormalization group
3. 学会等名 KEK Theory Workshop 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Akiyama, Y. Kuramashi, T. Yamashita, and Y. Yoshimura
2. 発表標題 restoration of chiral symmetry in cold and dense Nambu--Jona-Lasinio model with tensor renormalization group
3. 学会等名 YITP workshop Quantum computing for quantum field theories (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋山進一郎, 加堂大輔, 藏増嘉伸, 山下巧, 吉村友佑
2. 発表標題 テンソル繰り込み群による4次元有限密度複素スカラー場の理論の研究
3. 学会等名 基研研究会「熱場の量子論とその応用」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山進一郎, 加堂大輔, 藏増嘉伸, 山下巧, 吉村友佑
2. 発表標題 テンソル繰り込み群による4次元有限密度複素スカラー場の理論の研究
3. 学会等名 素粒子若手オンライン研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 山下巧, 吉村友佑
2. 発表標題 テンソル繰り込み群による3+1次元有限密度Nambu - Jona-Lasinio模型の研究
3. 学会等名 日本物理学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋山進一郎, 藏増嘉伸, 吉村友佑
2. 発表標題 4次元 Λ 4理論のテンソル繰り込み群による研究
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	武田 真滋 (Takeda Shinji) (60577881)	金沢大学・数物科学系・准教授 (13301)	
研究分担者	中村 宜文 (Nakamura Yoshifumi) (40598231)	国立研究開発法人理化学研究所・計算科学研究センター・技師 (82401)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	秋山 進一郎 (Akiyama Shinichiro) (10963548)		
研究協力者	吉村 友佑 (Yoshimura Yusuke)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------