

テンソルネットワーク法を用いた素粒子物理学の研究

Particle Physics with Tensor Network Scheme

藏増 嘉伸

筑波大学

1. 研究目的

テンソルネットワーク(TN)スキームとは、多体問題を TN 形式によって定式化し、高精度解析を行う一群の理論的・計算手法的枠組みである。既存の数値計算手法(モンテカルロ法など)と異なり、原理的に符号問題・複素作用問題がないこと、計算コストの体積依存性が対数的であること、グラスマン数を直接扱えること、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。本プロジェクトの目的は、TN スキームにおけるラグランジアン形式に基づくアプローチの一つであるテンソル繰り込み群(Tensor Renormalization Group, 略して TRG)を発展させ、4次元格子 QCD 計算に適用可能なアルゴリズムを開発することである。現時点での課題として、テンソルくりこみ群の(i)非可換ゲージ理論への拡張、(ii)高次元モデルへの応用、(iii)物理量計算のための手法開発、(iv)素粒子論的に興味深い低次元モデルへの応用、(v)物性物理学における強相関電子系への応用、という 5 つが挙げられる。

2. 研究成果の内容

2022 年度は、上記課題(i)~(v)のうち、特に(i), (ii)に関して以下に述べるような重要な進展があった。

2021 年度から 2022 年度初頭にわたる重要な成果として、(3+1)次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルの臨界終点の決定に成功したことが挙げられる。これまで TRG 法のゲージ理論への応用は(1+1)次元か(2+1)次元に限られていたが、本研究は世界初の(3+1)次元ゲージ理論への応用例であり、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。ただし、(3+1)次元有限密度 Z_2 ゲージヒッグスモデルには符号問題が存在しないため、2022 年度は、符号問題を持つ 4 次元有限密度 Z_3 ゲージヒッグスモデルの臨界終点の決定に取り組んだ。その結果、符号問題が存在する場合でも、TRG 法の有効性が確認できた。また、最も簡単な非可換ゲージ理論である $SU(2)$ ゲージ理論の解析に向けた予備的研究として、(1+1)次元有限密度 $SU(2)$ プリンシパルカイラルモデルの粒子数密度を計算し、シルバーブレイズ現象を確認した。これにより、ガウス求積法による $SU(2)$ 群の離散化が有効であることが実証できた。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

TRG 法に基づくアルゴリズムでは、一般に、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。TRG 法において最も計算コストを要する部分はテンソルの縮約計算であり、この計算の大部分は行列行列積として実装可能である。2次元モデルの場合は、全体の計算時間の約半分を行列行列積計算が占める。次元が高くなると、この割合は更に増大し、4次元モデルでは8割以上に達する。行列行列積は演算律速であり、メニーコアやGPUの高い演算性能を十分に活用することができる。したがって、CygnusのGPUを用いた演算加速機構およびWisteria-Oは本プロジェクトに非常に適した計算機システムであり、それらの利用はTNスキームに基づく数値計算にとって極めて有用である。

4. 今後の展望

従来通り、(i)非可換ゲージ理論への拡張、(ii)高次元モデルへの応用、(iii)物理量計算のための手法開発、(iv)素粒子論的に興味深い低次元モデルへの応用、(v)物性物理学における強相関電子系への応用という5つの方向性で研究開発を継続していく計画である。

5. 成果発表

(1) 学術論文

“Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z_2 gauge-Higgs model at finite density”,

S. Akiyama, and Y. Kuramashi,

Journal of High Energy Physics 2205, 102 (2022).

“Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional $SU(2)$ principal chiral model at finite density”,

X. Luo, and Y. Kuramashi,

arXiv: 2208.13991 [hep-lat].

“Critical endpoint of (3+1)-dimensional finite density Z_3 gauge-Higgs model with tensor renormalization group”,

S. Akiyama, and Y. Kuramashi,

arXiv: 2304.07934 [hep-lat].

(2) 学会発表

S. Akiyama,

“Tensor renormalization group approach to higher-dimensional lattice field theories” (招待講演),

Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations and related fields, RIKEN R-CCS, Kobe, Japan, Feb. 15-17, 2023.

S. Akiyama,

“An overview of tensor network method for lattice field theories” (招待講演),

Kobe Workshop on Cosmology and Fundamental Physics 2023,

Kobe University, Kobe, Japan, Mar. 18-21, 2023.

秋山進一郎, 藏増嘉伸,

“Tensor renormalization group study of (3+1)-dimensional Z_2 gauge-Higgs model at finite density”,

日本物理学会 2022 年秋季大会(素核宇),

岡山理科大学, 岡山, 9 月 6-8 日, 2022 年.

秋山進一郎,

“Particle physics with tensor network scheme” (招待講演),

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,

オンライン, 一般財団法人高度情報科学技術研究機構, 10 月 27-28 日, 2022 年.

秋山進一郎,

“素粒子物理学とテンソルネットワーク” (招待講演),

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〜,

東京大学(本郷), 東京, 1 月 30 日, 2023 年.

秋山進一郎,

“テンソル繰り込み群法による格子理論研究の開拓” (招待講演),

日本物理学会 2023 年春季大会,

オンライン, 3 月 22-25 日, 2023 年.

(3) その他 (受賞)

秋山進一郎,

第 17 回(2023 年) 日本物理学会若手奨励賞(素粒子論領域) (2022 年 10 月)

「テンソル繰り込み群法による格子理論研究の開拓」.

課題番号 : hp210074,

課題参加者 : 秋山進一郎, 藏増嘉伸(課題代表), 吉村友佑,

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 HPCI 利用研究課題優秀成果賞 (2022 年 7 月)

「テンソルネットワーク法を用いた素粒子物理学の研究」.

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	6,300	0
Wisteria/BDEC-01	○	800,000	0

※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。