

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 計算を実現することである。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

2023年度は、上記課題(i)~(v)のうち、特に(iii)に関して以下に述べるような重要な進展があった。

エンタングルメント・エントロピーは、量子多体系の量子的なもつれを測る定量的な指標として重要な物理量であるにもかかわらず、モンテカルロ法で直接計算することは難しいため、過去のモンテカルロ法を用いた計算では、エンタングルメント・エントロピーそのものではなく、エントロピック C 関数と呼ばれる派生関数の計算に注力されてきた。より正確に言えば、その派生関数も、エンタングルメント・エントロピーではなく、近似的に2次のレンニ・エントロピーを用いて計算されている。場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの直接計算のためには、TRG法において分配関数そのものが計算できる特性が本質的に重要である。われわれは、新たな計算手法を用いて、(1+1)次元のO(3)非線形シグマモデルのエンタングルメント・エントロピーを計算し、場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの非摂動計算の実証に成功した。

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/Pegasus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

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

S. Akiyama, and Y. Kuramashi,

Journal of High Energy Physics 10, 077 (2023).

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

X. Luo, and Y. Kuramashi,

Physical Review D107, 094509 (2023).

“Entanglement and Rényi entropies of (1+1)-dimensional $O(3)$ nonlinear sigma model with tensor renormalization group”,

X. Luo, and Y. Kuramashi,

Journal of High Energy Physics 03, 020 (2024).

(2) 学会発表

S. Akiyama,

“Tensor renormalization group approach to higher-dimensional quantum fields on a lattice” (招待講演),

Workshop on Tensor Networks in Many Body and Quantum Field Theory,
INT, University of Washington, Seattle, USA, Apr. 18-21, 2023.

秋山進一郎,

“Tensor renormalization group approach to higher-dimensional quantum fields on a lattice” (招待講演),

研究会「離散的手法による場と時空のダイナミクス 2023」

筑波大学, つくば, 9 月 11-14 日, 2023 年.

秋山進一郎,

“Tensor renormalization group approach to the four-dimensional lattice gauge theories” (招待講演),

Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity (QIMG2023),
4th week: ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum
Information,

京都大学基礎物理学研究所, 京都, 9 月 25-29 日, 2023 年.

秋山進一郎,

“Tensor network approach toward (3+1)-dimensional lattice field theories”,

研究会「Tensor Network 2023」,

筑波大学計算科学研究センター, つくば, 11 月 14-16 日, 2023 年.

藏増嘉伸,

“テンソルネットワーク法の量子場理論への応用” (招待講演),

素粒子論, 理論核物理, 領域 1, 領域 11 合同シンポジウム「テンソルネットワー
ク法の進展とさらなる可能性」

日本物理学会 2024 年春季大会,

オンライン, 3 月 18-21 日, 2024 年.

(3) その他

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	○	36,000	0
Wisteria/BDEC-01	○	200,000	100,000
※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。			