

課題名 (タイトル) :

格子 QCD への応用を目指したテンソルくりこみ群法の研究

利用者氏名 : ○清水 裕也、吉村 友佑

所属 : 計算科学研究機構 連続系場の理論研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

スーパーコンピュータを用いた格子量子色力学 (格子 QCD) の数値シミュレーションは、物質の基本的な構成要素である素粒子クォークの力学を、第一原理から非摂動的に調べることできる現状唯一の方法である。しかし、モンテカルロ法に基づいた現在の計算アルゴリズムでは、符号問題のためにシミュレーションが困難な状況が存在する。

一方、物性物理学の分野において、テンソルネットワークアルゴリズムと呼ばれる手法が符号問題への有効性の観点から注目を集めている。しかし、テンソルネットワークアルゴリズムは QCD のようなゲージ理論における有効性が確立していない。また、現状では低次元系への応用が主で、4 次元系の研究は大きく遅れている。

本研究では、テンソルネットワークアルゴリズムの一種であるテンソルくりこみ群法に着目し、比較的シンプルな模型を使って上述の問題の研究を進め、将来的な格子 QCD 計算への応用の足がかりを築く。

2. 具体的な利用内容、計算方法

格子 QCD に近い性質を持っている 2 次元格子量子電気力学 (2 次元格子 QED) と、4 次元系の研究の第一段階として、4 次元 Ising 模型の数値解析を行った。

2 次元格子 QED 計算のために、Dittrich 等の decorated TRG 法にフェルミオンを取り入れる拡張アルゴリズムを開発した。格子フェルミオンの定式化は Wilson 形式を採用した。4 次元 Ising 模型の計算は Xie 等の HOTRG 法を 4 次元系に拡張して行った。これらの計算の主要部分であるテンソルの縮約計算については、各システムの CPU ベンダが提供する、高度に最適化された BLAS レベ

ル 3 ルーチンを可能な限り利用するように実装して実行性能を高めた。

3. 結果

2 次元格子 QED について、従来法では計算が困難な 1 フレーバー系の相構造を調べ、パリティ対称性が破れた相への相転移線を決定した。臨界フェルミオン質量の連続極限値の計算にも成功した。さらに、2 フレーバー以上の場合に予想されている青木相とは異なる相構造をしていることを発見した。

4 次元 Ising 模型の臨界温度を、最も高精度なモンテカルロ計算値と比較して 0.017% 程度のずれの範囲内で求めることに成功した。

4. まとめ

テンソルくりこみ群法を用いて 2 次元格子 QED の数値解析を行い、従来法の限界を超えたパラメータ領域の相構造の解明に成功した。これにより、ゲージ理論においてもテンソルくりこみ群法が有効であることを示した。

また、4 次元系への拡張の第一段階として、4 次元 Ising 模型の臨界温度を高い精度で求めることに成功した。

5. 今後の計画・展望

2 次元格子 QED については、新しく見つかった相の詳細な解析を行う予定である。また、現在の格子 QCD 計算で用いられている、0(a) 改良された Wilson フェルミオンやドメインウォールフェルミオンへの拡張も進める。

4 次元 Ising 模型については、臨界指数の決定を精度目標としてアルゴリズムの改良を進める。

平成 27 年度 利用研究成果リスト

**【国際会議などの予稿集、proceeding】**

- [1] Yuya Shimizu and Yoshinobu Kuramashi,  
`Study of the continuum limit of the Schwinger model using Wilson' s lattice formulation' ,  
Proceedings of Science, LATTICE 2015, 049.

**【国際会議、学会などでの口頭発表】**

- [1] Yuya Shimizu and Yoshinobu Kuramashi,  
`Study of the continuum limit of the Schwinger model using Wilson' s lattice formulation' ,  
The 33rd International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE 2015), July 2015,  
Kobe International Conference Center.
- [2] 清水 裕也,  
「Tensor renormalization group approach to (1+1)-dimensional lattice QED」,  
密度行列繰り込み群法における最近の展開, 2015 年 8 月, 理化学研究所計算科学研究機構.
- [3] 吉村 友佑, 清水 裕也, 藏増 嘉伸, 武田 真滋,  
「4 次元 Ising モデルにおける高次テンソルくりこみ群」,  
日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月, 大阪市立大学.