

課題名 (タイトル) :

格子ゲージ理論の新しい計算手法の研究開発

利用者氏名 : ○清水 裕也

理研での所属研究室名 : 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ゲージ理論の数値シミュレーションは、素粒子の力学を第一原理から非摂動的に調べることのできる現状唯一の方法である。しかし、現在の数値シミュレーションに用いられているハイブリッドモンテカルロ法には様々な問題点が存在する。特に、相転移近傍における臨界減速や高密度系等で起こる符号問題は現在のアルゴリズムの枠内での解決は困難と考えられる。一方で、他分野において同種の問題に効果的なアルゴリズムが知られている事例も存在する。

本研究では特に、物性物理学分野で近年目覚ましい発展を遂げているテンソルネットワークアルゴリズムに着目し、この手法を応用して格子ゲージ理論の新しい数値計算手法の研究開発を行う。スーパーコンピュータを用いた大規模数値解析によって、開発アルゴリズムの上記の問題への有用性の実証に取り組む。

2. 具体的な利用内容、計算方法

テンソルネットワークアルゴリズムの一つであるテンソルくりこみ群法を拡張して、2次元格子上の量子電気力学 (格子 Schwinger 模型) に適用し、従来法では計算が困難なパラメータ領域の数値解析を行った。格子ゲージ理論におけるフェルミオンの主流の定式化である Wilson フェルミオンを採用し、フェルミオンの種類が 1 種類の場合を取り扱った。

テンソルの縮約と行列の固有値分解・特異値分解が主要な演算内容である。ノード当たりのメモリ容量が多い方が大きな次元のテンソルを扱うのに有利であり、また Intel 社により高度にスレッド並列化された固有値分解・特異値分解ルーチンが提供されていることから BigWaterfall を主に利用した。テンソル縮約演算については、Intel 社の提供する高

度に最適化された BLAS レベル 3 ルーチンを利用するように実装して実行性能を高めた。

Dittrich 等によって考案された付加的構造を持ったテンソルネットワークのアイデアを取り入れることによってテンソルのブロック分割を行い、各ブロックを別々の計算ノードに割り振ることによって分散メモリ並列化を行った。ノード間通信は Co-array Fortran により実装した。Intel 社の通信ライブラリは複数のネットワークファブリックに対応しているが、BigWaterfall において標準で用いられる DAPL では結果に異常が発生したため、OFA に切り替えて利用した。

3. 結果

Wilson フェルミオンの質量パラメータ m と電気相互作用の結合定数 g を様々に変えながら、パリティ対称性の破れの秩序変数を計算し、パリティ対称性が自発的に破れた相の構造を調べた。強結合極限における計算結果を図 1 に示す。強結合極限においては $m=-0.7$ 付近と $m=-1.8$ 付近の二箇所で相転移を起こすことが分かった。この二つの相転移の性質を調べるために中心電荷 c の計算も行った。その結果、 $m=-0.7$ 付近の相転移はすでに知られている Ising 相転移であるのに対し、 $m=-1.8$ 付近の相転移は Berezinskii-Kosterlitz-Thouless (BKT) 相転移であることが判明した。さらに、結合定数を小さくしていくと、Ising 転移点は $m=0$ に近づいていくのに対し、BKT 転移点は $m=-2$ に近づくという結果が得られた。

Wilson-Dirac 行列の対角成分が 0 になる点である $m=-2$ においては、スケール次元の計算結果に三重項構造が現れた。これは SU(2)対称性が実現していることを示唆している。この三重項構造は計算した全ての結合定数において観測された。

我々の数値解析結果から示唆される、Wilson フェルミオンが 1 種類の場合の相図を図 2 に示す。偶

数種類の場合に知られている青木相とは大きく異なる相構造であることが判明した。

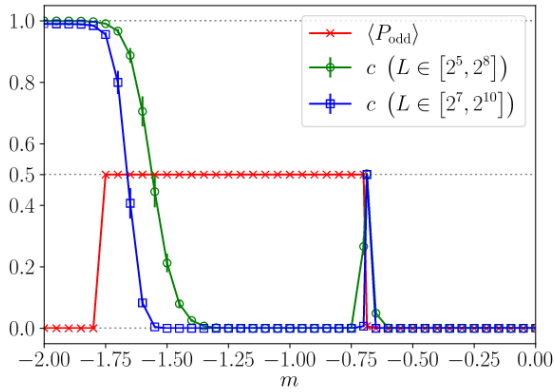


図 1 強結合極限におけるパリティ対称性の秩序
亦新し中心重荷の計算結果 (論文 [11] より)

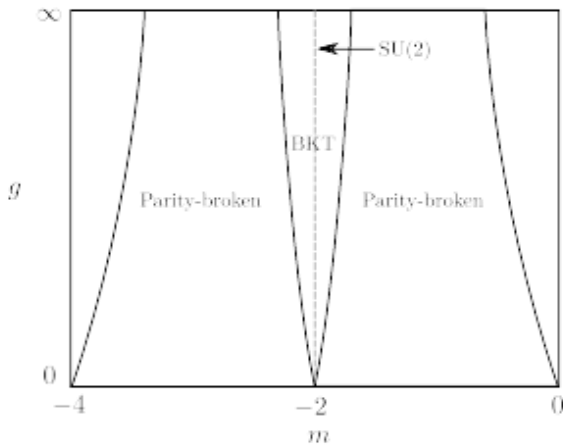


図 1 1 種類の Wilson フェルミオンの相図 (論文 [11] より)

4. まとめ

テンソルくりこみ群法を用いて格子 Schwinger 模型の数値解析を行い、Wilson フェルミオンが 1 種類の場合の相構造を調べた。擬フェルミオン法に基づくハイブリッドモンテカルロ法では計算が不可能である、Wilson-Dirac 行列が零や負の固有値を持つ領域においてもテンソルくりこみ群法はうまく機能し、相構造の全容を解明することに成功した。特に、BKT 相の存在や、その内部に SU(2)対称性が実現しているラインがあることを初めて示した。

5. 今後の計画・展望

現実世界では 3 種類の軽いクォークが存在するため、3 種類の Wilson フェルミオンの相構造を解明することが重要であり、手法の拡張に取り組みたい。

Schwinger 模型はあくまで Toy Model であり、強い相互作用に関する第一原理である量子色力学 (QCD) に発展させることが最終的な目標である。

平成 29 年度 利用研究成果リスト

【論文、学会報告・雑誌などの論文発表】

- [1] Yuya Shimizu and Yoshinobu Kuramashi,
``Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition in lattice Schwinger model with one flavor of Wilson fermion'' ,
Physical Review D **97**, 034502 (2018).