

プロジェクト名(タイトル):

変数変換を含むハイブリッド・モンテカルロ法の格子量子色力学への適用

利用者氏名:

○松本 信行(1)

理研における所属研究室名:

(1) 仁科加速器科学研究センター 理研 BNL 研究センター 計算物理研究グループ

## 1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

量子色力学(QCD)はハドロン物理を記述する理論で、現在最も基本的な物理法則として受け入れられている素粒子標準模型の一角をなす。しかしながら、「強い力」と呼ばれる相互作用の性質のため、ハドロンに関する物理量の第一原理計算は、数値的手法を用いて非摂動的に行う必要がある。この計算では、時空を格子状に区切り、経路積分の積分変数(場)を定義する。この枠組みを「格子場の理論」と呼ぶ。近年の大型計算機の発達により、格子場の理論を用いた QCD 計算は、実験と競合するほどの精度を出せるようになった。その際たる成功例にミュオン粒子の異常磁気能率があり、最低次の値 2 に対して、実に 10 のマイナス 10 乗のオーダーの補正項を計算している。

この格子計算において、大きな不定性を与えている要因の 1 つが連続極限(格子間隔を 0 にする極限)への外挿である。これは原理的には格子間隔を小さくしたシミュレーションを行うことで小さくできるのだが、実際の計算では「臨界減速の問題」が立ちだかる。この問題は、系内に生じる空間的に長い相関のため、モンテカルロ法で生成するマルコフ連鎖の自己相関時間が長くなり、数値計算が著しく非効率になる現象である。本プロジェクトは、この臨界減速の問題に対して、Lüscher 氏によって 2009 年に提案された「自明化写像」を発展させることで対処することを目的としたものである。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

我々はシュウィンガー・ダイソン方程式を活用することで、近似的な自明化写像を定義するフロー係数を決定する枠組みを作った。そして、本計算機を用いて、まずこの係数を数値的に決定し、自明化写像として従来の方法より改善が見られたか、そして臨界減速の問題にどの程度対処できたかを評価した。

## 3. 結果

自明化写像の近似の良さを測る量として、フロー後の系の有効作用が厳密な自明化写像のものからどの程度ずれているかを測った。すると、我々の枠組みにより得られた有効作用は、わずかではあるが従来知られていた「フロー時間展開」による構成法よりも厳密なものに近づいていた。

しかしながら、臨界減速の改善としては未だ不十分であると言わざるを得ない。実際、長距離の物理量の自己相関時間を計測してみると、モンテカルロ・ステップでは若干の改善が見られるのだが、数値アルゴリズムによるオーバーヘッドの方が大きいと、総じて計算が加速できたとは言えないのである。

## 4. まとめ

臨界減速の問題は格子 QCD 計算に内在する問題として長らく取り上げられてきた問題であるが、数値精度が実験精度と競合するようになってきた今、より切迫した問題になっている。これに対して、我々は Lüscher 氏の自明化写像を発展させることで対処することを試みた。

我々が考案したシュウィンガー・ダイソン方程式を活用したフロー係数の決定法によって、従来の「フロー時間展開」の方法に比べて、より厳密な自明化写像に近い写像を得ることができた。しかしながら、臨界減速の解決のためには不十分であった。

## 5. 今後の計画・展望

この結果を受けて、低次元のモデルを使い、度厳密な自明化写像を調べてみると、そのフロー係数はフロー時間展開のものとは大きく異なり、我々が想定していたより精密なものであることがわかってきた。現在、この低次元モデルを使って、厳密な自明化写像の性質をもう少し詳しく調べており、より有効な近似方法を探っているところである。

2022年度 利用研究成果リスト

**【雑誌に受理された論文】**

P. Boyle, T. Izubuchi, L. Jin, C. Jung, C. Lehner, N. Matsumoto and A. Tomiya, “Use of Schwinger–Dyson equation in constructing an approximate trivializing map,” PoS LATTICE2022 (2023), 229.

**【口頭発表】**

N. Matsumoto, “Diagnosing trivializing maps,” Challenges and opportunities in Lattice QCD simulations, Kobe, Japan, 16.02.2023

N. Matsumoto, “Towards conquering critical slowing down,” HU Berlin / NIC DESY Zeuthen joint lattice seminar, Zeuthen, Germany (online), 09.01.2023,

P. Boyle, T. Izubuchi, L. Jin, C. Jung, C. Lehner, N. Matsumoto and A. Tomiya, “Use of Schwinger–Dyson equation in constructing an approximate trivializing map,” LATTICE 2022, Bonn, Germany, 08.08.2022

N. Matsumoto, “Search for an Effective Change of Variable in QCD simulations,” DWQ@25, BNL, USA (online), 13.12.2021