

Relation between Z_3 symmetry and sign problem and analyses of pure $SU(2)$ gauge theory based on gradient flow

開田, 丈寛

<https://doi.org/10.15017/4059986>

出版情報 : 九州大学, 2019, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 開田 丈寛

論 文 名 : Relation between Z_3 symmetry and sign problem
and analyses of pure SU(2) gauge theory based on gradient flow
(Z_3 対称性と符号問題の関係とグラディエントフローに基づく
純 SU(2) ゲージ理論の解析)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

陽子や中性子、パイ中間子などのハドロンは、クォークと呼ばれる素粒子で構成されている。クォーク間にはグルーオンで媒介される強い相互作用が働いており、強い相互作用を記述する理論は量子色力学 (QCD) と呼ばれる。QCD は、高エネルギーにおいて相互作用が弱くなる漸近自由性を再現し、これにより高エネルギー領域では摂動計算が可能となる。一方、低エネルギー領域では相互作用が強くなり、摂動計算が破綻する。しかし、格子 QCD による数値計算を用いることで、この問題を解決し、QCD の非摂動的な振る舞いを取り扱うことができる。

クォークとグルーオンの状態は温度と化学ポテンシャルに依存する。低温・低化学ポテンシャル領域では、クォークは強い相互作用によりハドロン内部に閉じ込められる。高温状態になると、クォークとグルーオンは自由粒子のように振る舞えるクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相に移る。一方、低温で化学ポテンシャルが大きくなると、クォークがクーパー対をなすカラー超電導相へと移る。低温・有限化学ポテンシャル領域には、核物質や高密度天体に関する物理的な情報があると考えられるため、有限化学ポテンシャル領域における QCD 物性の解明は、重要な課題の一つである。

格子 QCD 計算は、QCD 物性を調べるための手法である。しかし、有限化学ポテンシャル領域では、符号問題と呼ばれる数値計算上の困難により、格子計算が困難となる。この問題への対処法として、近年では複素ランジュバン法や Lefschetz thimble 法が提案されているが、未だ信頼できる結果は得られていない。そこで本博士論文では、QCD の有限化学ポテンシャル領域を調べるアプローチ法として、 Z_3 -QCD と 2-color QCD に着目した。

1. Z_3 -QCD は、QCD の中心対称性である Z_3 対称性を厳密に取り入れた QCD 模型である。この模型は零温度極限で元の QCD に帰着することが知られており、またスピン模型を用いた数値計算では、 Z_3 対称性を模型に取り入れることで符号問題が緩和されることが確認された。このことから、 Z_3 -QCD を調べることで零温度・有限化学ポテンシャルでの QCD 物性を知る手がかりが得られると期待される。本研究では、さらなる議論のために、格子 QCD の有効模型を用いて、 Z_3 対称性と符号問題の関係性について調べた。今回用いた有効模型では、格子 QCD 計算と同様に、有限化学ポテンシャル領域で符号問題が生じる。そこで符号問題の対処法の一つである reweighting 法を用いて数値計算を行った。ここで、reweighting 法で現れる reweighting factor を符号問題の深刻さの指標とした。その結果、模型に厳密な

Z_3 対称性を取り入れることで、符号問題が深刻化する領域が狭まることを確認した。また、**reweighting** 法の独自改良を行い、この方法の有用性について格子 QCD の有効模型を用いて検証した。その結果、改良した **reweighting** 法を用いることで符号問題の深刻さを抑えることができた。

2. **2-color QCD** は、通常の **3-color QCD** に近い性質を有している。大きく異なる点は、「**2-color QCD** は有限化学ポテンシャル領域で符号問題が存在しない」ことである。したがって、有限化学ポテンシャル領域で **2-color QCD** の格子 QCD 計算は実行可能となる。これにより、格子計算の結果と比較することで、QCD の有効模型の有用性を調べることができる。QCD の有効模型を構築するためには、純ゲージ理論の熱力学量が必要となり、またこの量は転移温度付近における QGP の性質を調べる際にも重要となる。特に、純 **SU(2)**ゲージ理論の熱力学量は、**large-N** 解析等に重要な情報を与えると期待されている。しかし、先行研究における純 **SU(2)**ゲージ理論の格子計算では、熱力学量の連続極限が取られていない。そこで本研究では、近年発展しているグラディエントフローに基づく計算手法を用いて、連続極限における純 **SU(2)**ゲージ理論の熱力学量の測定を行った。その結果、高温領域で先行研究と無矛盾な結果を得た。また、今回使用した温度領域では、純 **SU(2)**ゲージ理論の状態は理想気体的な **2-color QGP** に到達しないことを確認した。最後に、純 **SU(N \geq 3)**ゲージ理論との比較を行った。その結果、温度に対する振る舞いが異なることを確認した。これは各理論における相転移次数の違いに由来するものと考えられる。