

氏名(本籍地)	馬場 惇			
学位の種類	博士(理学)			
学位記番号	博甲第 9778 号			
学位授与年月日	令和 3年 3月 25日			
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当			
審査研究科	数理物質科学研究科			
学位論文題目	Measurement of Chiral Susceptibility in Lattice QCD with Wilson Fermion using Gradient Flow (Gradient flow の下での Wilson fermion を用いた格子 QCD によるカイラル感受率の測定)			
主査	筑波大学教授	博士(理学)	藏増 嘉伸	
副査	九州大学教授	博士(理学)	鈴木 博	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	山崎 剛	
副査	筑波大学准教授	博士(理学)	伊敷 吾郎	

論 文 の 要 旨

審査対象論文は、高温クォーク・ハドロン物質の相転移と熱力学特性を、クォークの基礎理論である量子色力学(QCD)に基づいた格子シミュレーションにより研究したものである。クォークは、通常は陽子や中性子などのハドロンの中に閉じ込められており、単独で取り出すことができないが、1兆度以上の超高温では、ハドロンから溶け出してクォーク・グルオン・プラズマ状態に相転移すると考えられている。この高温クォーク・ハドロン物質の相転移と熱力学特性の解明は、宇宙の初期進化、中性子星の内部構造、高エネルギー重イオン衝突実験の理解などにおいて、極めて重要である。この相転移は本質的に非摂動的な現象であるため、定量的な予言には、格子 QCD に基づく大規模シミュレーションが不可欠である。有限温度・有限密度 QCD のシミュレーション研究の多くは計算量が少ないスタガード型格子クォークを用いて行われているが、連続極限で QCD を再現することが証明されていないという本質的問題を孕んでいる。本論文では、理論的基礎が確立している Wilson 型改良格子クォーク作用と改良格子グルオン作用である岩崎作用と組み合わせ、u,d クォークが現実よりやや重い場合の 2+1 フレーバー QCD でシミュレーションを実行して、相転移温度や相転移の特性を検出する上で重要な役割を果たすカイラル感受率と $U(1)_A$ 感受率を測定している。Wilson 型クォークは、連続極限の正しさが保証されている反面、有限間隔の格子上ではカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に関して非自明なくりこみが要求されるという困難があった。この論文では、Gradient flow (勾配流) に基づいて九州大学の鈴木博により開発された SFtX 法 (small flow-time expansion method) を用いて、格子上でのカイラル対称性の破れに由来する非自明なくりこみの問題を解決している点に、特徴がある。

申請者は、SFtX 法の改良に向けての最新の成果を取り入れた格子計算を遂行し、その結果、くりこまれたカイラル感受率の disconnected 部分は相転移に敏感に反応するが、数値的に大部分を占める

connected 部分が相転移点で緩やかに変化するため、全体としてのカイラル感受率は相転移に敏感ではないことを示した。connected 部分が相転移に敏感でないという結果は他の方法による先行研究と定性的に一致している。クォーク質量を物理点まで下げた試験研究から、物理点ではカイラル感受率における disconnected 部分の寄与が大きくなるだろうと示唆した。また、くりこまれた $U(1)_A$ 感受率の結果が、カイラル格子クォーク(Domain Wall Fermion)の結果と定量的に矛盾しないことを示し、その温度依存性から、相転移温度近傍では $U(1)_A$ 対称性が回復していないことを示唆した。u,d クォークが現実よりやや重い場合の結果だが、物理点でのシミュレーションに向けて技術的基盤を固める上で重要な成果であると認められる。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

本論文では、高温クォーク・ハドロン物質の相転移と熱力学特性を、理論的不定性のない Wilson 型改良クォーク作用を用いた格子 QCD シミュレーションによって計算している。Wilson 型クォークは有限格子間隔においてカイラル対称性を陽に壊しているため、カイラル対称性に関わる物理量に対して非自明な繰り込みが必要であるが、申請者は、gradient flow に基づいた新たな計算手法を用いて、非自明なくりこみの問題を解決し、カイラル感受率など熱力学量の計算に成功した。本論文の計算結果は、Wilson 型クォークを用いた物理点での相転移研究の技術的基盤を確立するものであり、その成果は高く評価できる。本論文は、以下の評価項目の全てを満たしていることを確認した。

- ① 研究内容に関連する先行研究の把握と理解、およびその文献・資料に対する適切な評価と引用
- ② 適切な研究課題設定および研究方法の明確な提示とその妥当性
- ③ 得られた結果の再現性、あるいは第三者による検証可能性
- ④ 明快な論文構成と結論に至るまでの論旨の適切な展開
- ⑤ 国際水準での学術的貢献

〔最終試験結果〕

令和3年2月12日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。