【105】

氏　名（本籍）	齋藤　華（宮城県）
学位の種類	博　士（理　学）
学位記番号	博　甲　第　6381　号
学位授与年月日	平成25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	**Finite density QCD in the heavy quark region** （クォーク質量が大きい領域での有限密度QCD）

主　査	筑波大学教授	理学博士	青木慎也
副　査	筑波大学教授	理学博士	石橋延幸
副　査	筑波大学教授	理学博士	金谷和至
副　査	筑波大学准教授	博士（理学）	石塚成人

論文の内容の要旨

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、単体で取り出すことが出来ないが、1兆度以上の高温や、中性子星の内部に相当する高密度の状況では、通常とは大きく異なる状態に相転移すると予言されている。人類がこれまでその存在を確認したことのないこのようなクォーク物質も、近年の高エネルギー原子核衝突実験の発達により、ついに地上で実現させることが出来るようになったと考えられている。しかし、外部に冷えて飛び出してくる多数のハドロンを通じて極めて複雑な現象を観測しなければならないため、理論的な解析と実験の結果を密接に組み合わせることにより初めてその性質を解明することが可能になる。また、こうした超高温の状況は、ビッグ・バン直後に実現されていたと考えられるので、クォーク物質が高温でどの様な相転移を起こすかの解明は、初期宇宙の進化を探る上でも重要である。一方、クォークの基礎理論は量子力学（QCD）により与えられることが確立しているが、強結合の複雑系でありその性質を解析的に導くことは難しく、模型の不定性を排除してQCDの第一原理だけからクォーク物質の非摂動・非線形な諸性質を導出するための唯一の方法が、格子QCDに基づく数値シミュレーションである。これまでの格子QCDの研究により、初期宇宙などに相当する低密度では、低温の閉じ込め相と高温のクォーク・グルオン・プラズマ（QGP）相の間の相転移は、特異性を伴わないクロスオーバーだが、高エネルギー原子核衝突実験で部分的に実現している可能性がある中密度の状況では、物理量の非連続性を伴う1次相転移に変わると考えられている。密度の増加に伴ってクロスオーバーが1次相転移に変わる臨界点の特定は、実験結果の解析上極めて重要である。

本論文で著者は、1次相転移の存在を効率よく検出する方法として、物理量の確率分布関数によって定義した有効ポテンシャルを研究した。再重み付け（reweighting）の手法と組み合わせ、有効ポテンシャルの微分を見ることで、1次相転移の位置を効率よく特定できると期待される。その方法の検証のために、クォークが非常に重い場合の格子QCDのシミュレーションを実行し、クォークが重い領域の有限温度・有限密度相構造を研究した。クォーク質量を重くすることで、シミュレーション・コストを下げると同時に、ホッピングパラメータ展開による解析的扱いも可能になる。

クォークが無限に重い場合には、有限温度相転移は、SU（3）純ゲージ理論の閉じ込め相転移となり、弱

い1次相転移だが、クォーク質量無限大から徐々に軽くすると、有限のクォーク質量で有限温度相転移がクロスオーバーに変わると期待される。現実のクォーク質量では、上に述べたように、クロスオーバーと考えられている。著者は、本研究の前の修士論文（Phys, Rev. D84 (2011) 054502 として最終的に公表された）で、密度がゼロの場合に、クォーク質量が大きい領域での相転移温度をヒストグラム法で研究し、その臨界点を特定した。本研究では、これを有限密度に拡張し、クォーク質量が大きい領域の臨界点がどのような化学ポテンシャル依存性を持つのかを明らかにした。

修士論文の研究では、物理量として、グルオンのエネルギー密度に相当する「ブラケット」のみを考えたが、本論文では、これを有限密度に拡張する場合に、クォークのエネルギー密度の自由度に対応するポリアコフ・ループの実部も記述する2変数の有効ポテンシャルを考えると、再重み付け法を効率良く適用できることを示した。また、有限密度QCDシミュレーションに不随する符号問題が、臨界点近傍ではキュムラント展開により回避できることも示した。これらにより、臨界点近傍で複素位相の効果が小さいことを示し、クォーク質量が大きい領域での臨界点を化学ポテンシャルの関数として決定した。

審査の結果の要旨

この研究により、確率分布関数によって定義した有効ポテンシャルが、有限密度の1次相転移を検出する上で強力な手法であることが示された。クォークが軽い現実的な場合における相転移次数を研究する上でも有用と期待できる。論文の最後には、その方向に向けての研究や手法の展開についてもコメントされている。博士論文として十分な水準に達していると認められる。

平成25年2月15日、数理物質科学研究科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。

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。