

(続紙 1)

京都大学	博士 (理 学)	氏名	上門 和彦
論文題目	Chiral phase transition in QCD with critical fluctuation		
(論文内容の要旨) We study the chiral phase transition of the strong interaction at finite temperature and finite baryon density. This is usually accomplished by using chiral effective models respecting the chiral symmetry of QCD. Near the phase boundary, the fluctuations of the soft modes increase. We incorporate these fluctuations by using the functional renormalization group (FRG) method, which is one of the machineries to evaluate an effective action based on the renormalization group idea. We first investigate the QCD phase diagram with isospin chemical potential. At finite isospin chemical potential, charged pions can condensate and the effective potential becomes a function of two variables, the chiral condensate and charged pion condensation. We have numerically solved the renormalization group evolution of the effective potential of two variables on the two dimensional grid. We find that it is necessary to solve the FRG equation of the pion 2-point function simultaneously. When the pion mass is given by the pole of the 2-point function instead of the curvature of the effective potential, we find that pions start to condense at isospin chemical potential corresponding to the pion mass in vacuum and we can solve the so-called Silver Blaze problem. We also discuss the QCD phase diagram in three dimensions, temperature, chemical potential and isospin chemical potential. The pion condensation phase boundary is found to bend in the higher isospin chemical potential direction when quarks appear. By comparing the phase structure with the mean field approximation and full FRG calculation, we have clarified the effects of the fluctuation on the phase structure. Next we study the QCD critical point and the critical region around it. Near the QCD critical point, the fluctuation of the baryon number density in addition to that of the chiral condensate diverges. We have taken account of the baryon number density fluctuation effects by introducing a new field which represents the phonon and couples to the baryon density in the quark-meson model. We solve the FRG equation of the effective potential which is a function of two variables, the chiral condensate and baryon number density. It is found that the mixing of the chiral condensate and baryon number density causes a kind of level repulsion between the curvature masses, which in turn leads to an expansion of the critical region around the QCD critical point, depending on the coupling in the model yet to be determined from microscopic theories or hopefully by experiments.			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は汎関数繰り込み群(functional renormalization group; FRG)により場の揺らぎの効果を取り入れ、QCD 相図について研究した成果をまとめたものである。

量子場の揺らぎを厳密に取り入れる手法の開発は、場の理論の基本的課題である。汎関数繰り込み群の方法では、カットオフ関数を導入した有効作用の繰り込み群発展を考える。赤外カットオフ k 以下の運動量をもつモードの伝播が抑えられるようにカットオフ関数を選ぶと、有効作用は k が大きい場合には古典作用に一致し、 k をゼロとすると場の揺らぎを取り入れた量子論的な有効作用となる。よって有効作用の k による発展方程式（フロー方程式）を解くことにより、古典作用から出発し、量子論的な有効作用を得ることが原理的に可能となる。近年、汎関数繰り込み群の方法は様々な対象に適用され、臨界現象などの理解での有効性が示されている。学位申請者は本論文で汎関数繰り込み群の方法を発展させ、その適用範囲を広げるとともに、QCD 相図における揺らぎの役割を明らかにしたものである。

まず、アイソスピン化学ポテンシャルを含む非対称物質の相図についての分析が示されている。 u クォークと d クォーク数(あるいは陽子数と中性子数) が異なる非対称物質は中性子過剰核や中性子星内部などで現れる。バリオン化学ポテンシャルがゼロの場合、アイソスピン化学ポテンシャルがパイ中間子質量の半分のときに荷電パイ中間子凝縮が起こると考えられるが、汎関数繰り込み群を用いた従来の分析ではこの性質が満たされていなかった。学位申請者は本論文において、パイ中間子の 2 点関数と有効作用の発展を同時に解き、2 点関数の極からパイ中間子の質量を決めることにより、この問題を解決した。さらに温度・バリオン化学ポテンシャル・アイソスピン化学ポテンシャルの 3 次元空間における QCD 相図においてパイ凝縮相、カイラル相転移面の構造を示した。これらの成果は新規性をもち、理論的に優れているとともに、コンパクト天体現象などへの示唆に富み、高い価値をもつ研究業績といえる。

次に、QCD 臨界点と臨界領域に対するバリオン密度揺らぎ効果の分析が示されている。臨界点近傍では、秩序変数と結合するソフトモードの揺らぎが大きくなる。QCD 臨界点の周りでは、カイラル凝縮とともにバリオン密度揺らぎが重要となるが、従来のカイラル有効モデルでは後者が陽に取り入れられていない。本論文ではクォーク・メソンモデルにバリオン密度と結合する新たな場（フォノン場）を導入し、2 変数の有効ポテンシャルに対する汎関数繰り込み群方程式を解くことにより、2 つの場の揺らぎを同時に取り入れた枠組みを提案した。この枠組みによる結果は、臨界領域の大きさと形が、フォノン場とバリオン密度の結合の強さに敏感であることを示している。この研究は新たな枠組みの提案とともに、現在進んでいる高エネルギー重イオン衝突実験における臨界点探索への示唆に富む重要な成果といえる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 25 年 1 月 15 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。