

論文審査の結果の要旨

氏名：池田 貴

本論文は本文 5 章と付録 4 節から成る。第 1 章の導入部では、強い相互作用の基礎理論である QCD（量子色力学）の基本的な性質と、この論文の主題となる高温・高バリオン密度の物理の概観が述べられ、本論の課題の設定が行われている。第 2 章では、真空におけるカイラル対称性の自発的破れをシュウィンガー・ダイソン（SD）方程式から記述する理論的方法が述べられ、第 3 章でその有限温度・有限バリオン密度への拡張が行われている。この 3 章が、論文の主要部であり、カイラル相転移にたいするハドロン物質の相図がレインボウ近似と呼ばれる真空の記述で用いられた方法の拡張により計算され、有限密度での臨界 3 重点の存在が示される。第 4 章ではその結果を用いて、クォーク数感受率の計算が行われ、相対論的重イオン衝突実験におけるカイラル相転移のシグナルとの関係が議論された後、最後章でこの研究の成果をまとめている。一部の計算の詳細は補遺に記されている。論文は英文であるが、総じて読みやすく明瞭に書かれている。

この論文の主題となる高温・高密度の極限状態にある物質の研究は、一昨年より米国ブルックヘブン国立研究所で新しい加速器（RHIC）を用いた相対論的原子核衝突実験が始まっており、現在、原子核物理学と素粒子物理学の両分野にまたがって国際的に大きな注目を集めている研究テーマである。この論文では、QCD の真空で自発的に破られているカイラル対称性の有限温度・有限クォーク密度での回復、「カイラル相転移」の問題に焦点を当て、標準的な QCD の摂動論から出発してその理論的記述を試みている。すなわち、摂動計算のファインマン・ダイアグラム展開で現われる様々な項の一部を SD 方程式を使って系統的に無限個足しあげるという方法で、有限温度・有限クォーク密度における QCD の自由エネルギーを近似的に計算し、それをもとにこの相転移における様々な物理量の理論計算をおこなっている。

この研究の基礎になるのは、以前、東島や Miransky 等によって QCD の真空の記述たいして行われた研究で、QCD の SD 方程式に現われるクォークの自己エネルギーの摂動ダイアグラム展開のなかでレインボウ・ダイアグラムと呼ばれる特殊な項のみを拾い集める近似を用いると、SD 方程式の自己無撞着解としてカイラル対称性の自発的破れに相当する解が得られることが知られている。このような計算は量子電磁気学（QED）でも行うことができるが、QCD では「漸近的自由」と呼ばれる結合定数が近距離（紫外領域）で小さくなる性質と、逆に遠距離（赤外領域）で結合定数が大きくなる性質を持つ点が異なる。後者がカイラル対称性の自発的破れを引き起こす原因となる。実際の計算には、結合定数の増加に人為的に上限を与えて赤外発散を防ぐという方法がとられる。この論文の第 2 章は、前

半がこの東島・Miransky 理論のレビューに当てられている。この章では、更に、東島・Miransky 理論で取り上げられなかったクォークの閉じ込めの効果を、双対 Landau・Ginsburg 模型によって記述することが検討されており、この部分は著者のオリジナルな研究結果である。

この論文の主要部である第3章では、有限温度・有限クォーク密度へのSD方程式の拡張を、Cornwall-Jackiw-Tombolisによって導入された複合演算子に対する有効ポテンシャルの方法を用いて行っている。QCDのCJT有効ポテンシャルを2ループの近似で計算すると、摂動計算で梯子近似でクォークの自己エネルギーのレインボウ・ダイアグラム和近似に相当した自由エネルギーが計算できることが示されている。実際、このように計算されたCJT有効ポテンシャルの定留値条件から有限温度・有限クォーク密度におけるクォークの松原温度グリーン関数を自己無撞着に決める式が求まる。この論文では、この式（クォークのギャップ方程式）を更に2種類の近似を用いて数値的に解き、自由エネルギーやカイラル相転移の秩序変数の温度とクォーク化学ポテンシャルへの依存性を調べている。その際、クォークの温度グリーン関数の波導関数繰り込み条件の取扱いによって、結果が数値的にも定性的にも大きく変わることが示されている。この部分の研究は、これまでどこにも報告されていない、全くオリジナルな結果である。

この研究で得られた結果で興味深いのは、クォーク質量を無視する極限でカイラル相転移が低クォーク密度のとき2次相転移であったのがクォーク密度が増すと1次相転移に変わることを示し、その転換点にあたる臨界3重点を求めた点である。このような振る舞いは、これまでも南部-Jona-Lasinio模型のようなより現象論的なQCDの有効模型でも得られていたが、この論文の様にQCDの性質により依拠した方法で同じような結果が得られたことは、特定の模型に依らないこの結果の普遍性を示すものと考えられ、重要である。また、この論文では、その第4章で新たにクォーク数感受率と呼ばれる揺らぎの計算を行っており、臨界3重点付近でこのような揺らぎの増幅が起ることを示している。著者は、高エネルギー重イオン衝突実験でこのような揺らぎによってバリオン・反バリオンの対生成の増加が起るかも知れないと推論している。これも、カイラル相転移の新しいシグナルの提案として大変興味深い。

以上、この論文は方法的にも結果的にも多くの新しい重要な成果を含み、博士論文として十分な内容であると判定する。なお、本論文の第3章は、既にProgress of Theoretical Physics誌に本論文の著者の単名の論文として掲載決定となっている。

従って、博士（理学）の学位を授与できると認める。