

論文審査の結果の要旨

1

氏名 阿武木 啓朗

クォーク物質は低温高密度において超伝導状態にあり、ハドロン相や高温で実現されるクォーク・グルオンプラズマ相とは異なる相になると考えられている。フェルミ面上にあるクォークはバリオン化学ポテンシャル μ 程度の運動量を交換する自由クォークと考えることができる。BCS理論によりフェルミ面上のクォーク間に引力が働くとクーパー不安定性が生じて系の基底状態は超伝導状態になりエネルギーギャップがつくられる。クォーク系にはスピン自由度だけではなくカラー・フレイヴァーの自由度があるため様々な基底状態が可能であるが、中でも2フレイヴァー超伝導(2CS)、カラー・フレイヴァーロッキング超伝導(CFL)の2つが研究されてきた。本論文は、南部・ゴリコフ形式に拡張したシュウインガー・ダイソン方程式を用いて、2CSおよびCFL状態のギャップ方程式を与え、広範囲の密度・温度領域で、カラー超伝導の性質および両者の競合について調べることを目的としている。

本論文は5章からなり、第1章では本研究全体の動機と背景を述べ、第2章では南部・ゴリコフ形式に拡張したシュウインガー・ダイソン方程式、第3章では質量のない2フレイヴァー物質における2CSに関する数値計算結果、第4章では質量のない3フレイヴァー物質における2CSおよびCFLに関する数値計算結果を報告している。第5章は議論、まとめと展望である。

本論文で用いた改良型梯子近似に基づくシュウインガー・ダイソン法は低エネルギーで真空の物理をよく再現し、高エネルギーで摂動論的量子色力学(QCD)と矛盾のない結果を与えることが知られている。論文提出者の研究動機はこの模型を用いて広範な密度領域におけるカラー超伝導を統一的な観点から調べることである。

論文提出者はギャップ方程式を数値的に解き、ギャップ関数、クーパー対の空間的拡が

りを計算することによって、漸近的高密度領域での対相関の性質と低密度領域での対相関の性質が定性的に異なることを見つけた。また、高密度領域ではBCS描像がよく成り立つが、低密度領域では強く束縛したボソンの自由度のボース・アインシュタイン凝縮のような、BCS描像とは異なる対相関が起こる可能性を示唆した。ただし論文提出者の方法では低密度においてゲージ依存性が無視できないので改良の余地がある。

論文提出者は、超伝導相からクォーク・グルオンプラズマ相への相転移がBCS超伝導体と同様に定性的には2次相転移の特性を示すことを見出したが、一方で、フェルミ面上のギャップと相転移温度を関係付ける普遍関係式は低密度側でBCS理論から大きくずれることを発見した。論文提出者は、この事実と、低密度でのギャップおよび臨界温度の解析解からのずれを根拠として、低密度領域における強結合の効果の重要性、特に、フェルミ面から遠く離れた自由度の対形成への重要な寄与を指摘している。

また論文提出者は、2CSのギャップを $\Delta(2CS)$ 、CFLのカラー・フレイヴァー1重項および8重項のギャップをそれぞれ、 $\Delta_1(CFL)$ および $\Delta_8(CFL)$ とすると、それらの間には大小関係 $\Delta_1(CFL) > \Delta(2CS) > |\Delta_8(CFL)|$ が成り立っていることを見つけた。しかし、2CSからクォーク・グルオンプラズマ相への相転移温度と、CFLからクォーク・グルオンプラズマ相への転移温度は同じであった。そこで論文提出者は、これらの相転移がクーパー対の空間的構造変化を伴わず、コヒーレントな対の数の減少によって特徴づけられていることを結論した。

さらに論文提出者は、コーンウォール・ジャキーフ・トンボウリスの有効作用を用いて $\mu=300\sim 1000$ MeVの領域で、ストレンジクォーク質量が0の極限では、2CSはQCDの相図に現れないことを見つけた。 $|\Delta_8(CFL)|$ が $\Delta(2CS)$ より小さいにも関わらずCFL状態の方が安定である理由は、ギャップの大きさと、対相関に寄与する自由度との間の競争の結果であることを示した。また、運動学的判定基準を用いてストレンジクォークの質量の効果を評価した。ストレンジクォークの有効質量が200 MeV以下の場合、2CSは $T=0$, $\mu \geq 300$ MeVの領域に現れなかった。これによって論文提出者は、カイラル対称性の破れた真空が、

T=0において、CFL相と滑らかにつながっている可能性を示唆した。

論文提出者は広範囲の密度・温度領域で、カラー超伝導の性質および相転移について従来の研究で欠けていた統一的描像を与える着実な成果を得たと評価される。

なお、本論文は初田哲男、板倉数記との共同研究であるが、論文提出者が主体となって実際の計算を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。