

論文審査の結果の要旨

氏名：松浦 妙子

本論文は英文で書かれ、本文6章 (chapter) と補章 (appendix) 5章から構成されている。第1章は序論で、この研究の背景と問題の設定、それに対するこの論文の基本的方法の説明、そして論文の構成と残りの各章の簡単な要約が述べられている。第2章は「カラー超伝導」についてのレビューで、その基本的概念がまとめられ、第3章では、Ginzburg-Landau 型の自由エネルギーによってカラー超伝導状態を記述する方法が説明され、それを u 、 d 、 s クォークの質量が縮退している高密度極限の仮想的な系に適用して、3つのカラーとフレーバーが1対1に組んだ CFR (Color-Flavor-Locking) 相がその最も安定な基底状態となることが示されている。第4章では、実際の s クォークの質量が現実的な値をもち、電気的中性条件、 β 平衡条件によって化学ポテンシャルの縮退が解かれた場合が取り扱われている。秩序変数の2次の係数が s クォークの質量にどのように依存するかが摂動論で計算され、その結果をもちいてカラー超伝導相の相構造が調べられている。第5章は、秩序変数が2次元的なボージェット (渦) 構造をもつ可能性が検討されている。この2章がこの論文の中核をなしている。第6章は論文のまとめにあてられ、計算の詳細の説明は5つの補章でおこなわれている。

この論文において筆者は、核物質の高密度相として最近注目されているカラー超伝導相の相構造と渦構造について、Ginzburg-Landau 理論に基づいて行った研究の成果をまとめている。核物質は、重い原子核の中心部分を理想化した陽子と中性子からなる高密度物質であるが、その密度が原子核の飽和密度よりも更に一倍以上高い高密度では、個々の核子はそれを構成するクォークの一般的な物質 (クォーク物質) に融解すると考えられ、更にクォーク間に2体の引力が働くと、超伝導のBCS理論で良く知られているように、フェルミ面上でクーパー対生成に対する不安定性が生じ、カラー超伝導相が実現すると理論的に考えられている。そのようなクォーク間の引力はグルーオン交換によって、クォーク対がカラーについて反3重項状態にあるとき働くことが知られており、それを反映した秩序相が実現することが予想される。クォークはスピン、カラー、フレーバーの内部自由度をもつため、それらがどのような組み合わせをもった凝縮相が実現されるかということが通常の超伝導相と違って特に興味をもたれる。また凝縮相において内部空間における対称性の破れのトポロジーを反映して凝縮体が渦構造をもつ可能性も興味ある問題である。著者等はこの2つの問題について研究を行った。

これまでの研究では、3種類の軽いクォークのフレーバーの質量差を無視する近似で、カラーとフレーバーのそれぞれの3重項の成分が1対1に結合した CFL 相が最も安定に実現されると考えられてきた。しかし、実際に中性子星などで問

題となる密度領域では、 s クォークの質量 ($m_s \simeq 150 - 200\text{MeV}$) はクォークの化学ポテンシャルと同程度で無視できないことから、筆者等はフレーバー対称性が破れたより現実的な状況でどのような相が熱力学的にもっとも安定となるかを調べた。筆者等がとったアプローチは、秩序変数の4次までの項で自由エネルギーを書き下す Ginzburg-Landau による半現象論的な方法で、クォークの質量への依存性を Cornwall-Jackiw-Tomboulis の複合場有効ポテンシャルの方法を用いて摂動的に計算し、それをつかって熱力学的安定性を調べた。

その結果、低温では CFL 相を少し変形した mCFL 相が実現し、温度を上げるに従って、まず s クォークと u クォークのペアリング (対) が消えて ds クォーク対、 ud クォーク対が残った dSC 相と呼ばれる相が安定となり、更に温度が上がると、 sd クォーク対も解けて、 ud クォーク対だけが凝縮した 2SC 相が安定となるという結果を得た。 sd クォーク対が su クォーク対に比べて安定なのは、平均してフェルミ面のサイズが大きいため結合状態を作るのにつかう状態数がおおきくなり強く結合できることによると筆者は結論している。但し、この結論は比較的低温の場合のみ適用でき、最近の別の研究では、温度が高い場合はペアリングを作る2つのクォークのフェルミ面のサイズに大きな違いがあると、逆に結合状態は作りにくくなり安定性が逆転するという結果も報告されている。著者は、更にそれぞれの凝縮相においてどのような励起モードが出現するかについても検討し、マイスナー効果によって質量をもつグルーオンのモードの数が mCFL 相、dSC 相、2SC 相によって異なることを示している。マイスナー効果で遮蔽されていないグルーオンは熱的揺らぎが大きく臨界点近傍で相転移の次数を2次転移から1次転移に変化させる可能性が補章で議論されている。

この論文では、カラー超伝導体の中に1次元的な渦構造をもったゲージ場の配位ができる可能性も検討されている。一般に超伝導体はマイスナー効果に依って磁場を排除するが、第2種超伝導体では量子化された渦の形で磁場が侵入できることが知られている。渦の中心ではクーパー対を記述する秩序変数が0となり正常相となって磁場の存在を許しその周りで浸透長の距離で磁場が広がった構造が安定となる。同様なことは、超流体でも秩序変数の位相の自由度を用いて作ることができ、この場合はゲージ場を伴わないため単位長さあたりの渦のエネルギーは系の大きさとともに対数発散する。著者等は、カラー超伝導体中でも秩序変数が渦状に変化した構造をもって安定となる解が存在することを秩序変数のトポロジカルな性質の考察から示し、その渦構造を Ginzburg-Landau 理論を用いてその局所平衡解を数値計算に依って求めた。著者等が見つけたカラー超伝導体中の渦は、超流体の渦と超伝導体の磁場の渦との両方の性質を兼ね備えた解となっており、著者等はこの解を「半超流動渦」と命名している。

この論文の一部は指導教官である初田教授等との共同研究に基づいているが、本人の寄与が十分あり、博士号を授与するのに十分な内容であると審査員一致で判定した。