

氏 名	きた ざわ まさ きよ 北 澤 正 清
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2867 号
学位授与の日付	平 成 17 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	Fluctuations of Diquark - pair Field and Precursory Phenomena in Color Superconductivity (カラー超伝導におけるクォークの対場のゆらぎと前駆現象)
論文調査委員	(主 査) 教 授 國 廣 悌 二 教 授 中 村 卓 史 教 授 堀 内 昶

論 文 内 容 の 要 旨

強い相互作用を記述する量子色力学 (QCD) は高温、高密度で多様な相構造を持つことが理論的に予言されている。近年、これらの相転移現象の兆候がアメリカのブルックヘブン国立研究所の実験施設 RHIC などにおける超相対論的原子核衝突実験や中性子星の観測データの中に見え始めており、有限温度・有限密度状態において QCD が示すこれらの相転移、およびそれに付随した臨界現象の探求は、理論・実験の双方にとって非常に興味深く且つ現実的な課題である。申請者は申請論文において、低温・高密度領域のクォーク物質中での実現が期待されるカラー超伝導状態に関して、特に臨界温度近傍で増大するクォークの対場のゆらぎ、およびそれが物理量にもたらす効果に関する理論研究を行い興味深い結果を得た。

まず、線形応答理論を用いて臨界温度より高温の通常相における対場のスペクトル関数、および動的構造因子を計算し、カラー超伝導の臨界温度近傍における対場のゆらぎの大きさを見積もった。この結果、比較的低密度領域のカラー超伝導においては、臨界温度の1.2倍程度までの温度に渡ってゆらぎが大きな強度を持つことが示された。このような温度領域は通常の金属超伝導のそれと比べて非常に広いが、これが QCD の低エネルギーにおける強結合性の反映であることを指摘し、低密度領域のカラー超伝導における対場のゆらぎの重要性を初めて議論した。また、ゆらぎが形成する集団運動モードの極を数値的に導出すると共に臨界温度近傍のゆらぎが従う時間依存 Ginzburg-Landau 方程式を微視的に導出し、これらを用いてゆらぎの性質を議論した。特に、弱結合超伝導においては対場のゆらぎが形成する集団運動モードは過減衰型のモードであるのに対し、カラー超伝導においては集団運動モードが振動減衰型のモードになることを示し、このような集団運動モードの性質が強結合系の超伝導では無視できない粒子・孔間の非対称性によってもたらされたものであることを示した。また、微視的に導出された時間依存 Ginzburg-Landau 方程式の妥当性についても議論を行い、この方程式が広い温度・運動量領域に渡ってゆらぎの線形な時間発展を再現できることを数値的に示した。

次に、モードの一極近似のもとに、対場のゆらぎが系の比熱および電気伝導度にもたらす効果を計算し、これらの物理量が臨界温度付近においてゆらぎの効果によって増大・発散することを示した。また、比熱と電気伝導度の特異な振る舞いの起源として、前者は静的・空間的なゆらぎ、後者は動的なゆらぎが本質であることを明らかにした。比熱の増大は臨界温度の10%ほど高温から顕著に見られ始めるが、超新星爆発によって生成された原始中性子星の冷却過程において、このようなゆらぎの効果が観測できる可能性についても興味深い議論を行った。

更に、臨界温度近傍で増大する対場のゆらぎがクォークの準粒子描像にもたらす効果について調べた。対場の振幅のゆらぎの効果をクォークに取り込むため、T-行列近似を用いてクォークの自己エネルギーを求め、クォークの一粒子スペクトル関数および分散関係を計算した。この結果として、臨界温度付近ではフェルミ面近傍の準粒子の寿命が短くなるほか分散関係にギャップ的な構造が出現するなど、非フェルミ液体的な性質が出現することを示した。また、このような非フェルミ液体的な性質がもたらされる機構に関して、クォークの対場のゆらぎに対応したソフトモードの放出機構に関連つけて詳細かつ明快に議論した。さらに、クォーク準粒子のクォーク間引力に対する変化を調べ、強結合領域では共鳴散乱と呼ばれる

機構によりスペクトル関数および分散関係に特徴的な構造が出現することを示した。また、フェルミ粒子の状態密度を相対論的な枠組みで定式化して通常相におけるクォークの状態密度を初めて計算し、比較的広い温度領域に渡ってクォークの状態密度には高温超伝導の特徴的な現象である擬ギャップ現象と類似したくぼみが発生することを示した。

このように、申請者は申請論文においてカラー超伝導における対場のゆらぎの性質およびその物理量への効果を系統的に調べ、QCDの強結合性を反映して低密度領域のカラー超伝導に出現する豊富な物理現象の存在を明らかにした。これらの結果に基づき、この領域のカラー超伝導の性質が高温超伝導などの強相関電子系の超伝導と類似していることを強く示唆した。さらに、前駆現象を通してカラー超伝導を地上の実験で観測するためのアイデアを提示した。

論文審査の結果の要旨

素粒子の「強い相互作用」の基礎理論である量子色力学（QCD）に基づき、高温、高密度でハドロン・クォーク物質の示し得る多様な相構造およびその物性を研究することが、最近、大きな興味の対象となっている。それは、環境を変えることによりQCD真空の構造を明らかにするという基本的な重要性を持つだけでなく、中性子星中心部の構造や可能なクォーク星の物性を解明する上でも重要な意義を持つからである。特に、比較的低温度且つ超高密度でクォーク物質が確実に起こすと考えられている「カラー超伝導」の問題はこの分野の中心的課題の一つになっている。申請者は申請論文において、カラー超伝導臨界温度近傍であるが臨界温度より高い温度でのクォーク物質中の示すカラー超伝導の前駆現象をクォークの対場のゆらぎに焦点を当てて、その重要性および他の観測可能量への効果を理論的に研究し、中性子星の現象や地上での重イオン衝突実験において、カラー超伝導についての知見を得る可能性を探り、興味深い結果を得ている。

対象となる密度領域でのクォーク物質においては、QCDの摂動論が使えないこと、また、このような密度ではゲージ場よりもクォーク対場のゆらぎが支配的であることを注意し、クォーク場で書かれたカイラル有効模型を用いた分析を行っている。対場の揺らぎの性質を調べるために、有限温度での線形応答理論を適用し、まず、臨界温度より高温の通常相における対場のスペクトル関数、および動的構造因子を計算し、カラー超伝導の臨界温度近傍における対場のゆらぎの大きさを見積もっている。結果は、臨界温度の1.2倍程度までの温度に渡ってゆらぎが大きな強度を持つというものであり、これは、各々の臨界温度 T_c を基準とした温度のスケールで、通常の金属超伝導の場合に比べて2桁から3桁も広い温度領域になっている。この幅広い臨界領域はQCDの低エネルギーにおける強結合性の反映であることを指摘し、低密度領域のカラー超伝導における対場のゆらぎの重要性を説得的に示している。また、ゆらぎが集団運動モードを形成することを示し、その複素エネルギーを数値的に導出し、この集団モードがいわゆる「ソフトモード」になっているという重要な結論を得ている。この集団運動モードが振動減衰型になっていることを示し、弱結合超伝導においては対場のゆらぎが形成する集団運動モードは過減衰型のモードであることと対比し、この違いが対象となっているクォーク物質のダイナミクスにおいて粒子とフェルミ球内の孔（ホール）間に存在する非対称性によってもたらされたものであることを明らかにしている。さらに、集団モードの複素振動数の波数依存性を議論し、臨界温度近傍のゆらぎが従う時間依存 Ginzburg-Landau 型の方程式を初めて微視的に導出するとともに、この実効的方程式を用いてゆらぎの時間・空間依存性を様々な初期条件のもとで議論し、ゆらぎの特性を明らかにしている。

対場のゆらぎが系の比熱および電気伝導度にもたらす効果を微視的に計算し、これらの物理量が臨界温度付近においてモードのソフト化の効果によって増大・発散するという特異な振る舞いをすることを示している。さらに、比熱の特異的増大が臨界温度の10%ほど高温から顕著に見られ始めることに注目し、そのことが超新星爆発によって生成された原始中性子星の冷却過程における可能な役割について興味深い議論を行い、カラー超伝導についての情報が対場のゆらぎを通して観測できる可能性を指摘している。

以上の対場のゆらぎはクォーク対が作るものであるが、申請者はさらに、この対場のゆらぎとの相互作用によりクォークの準粒子描像が変化する可能性についても考察を進めている。すなわち、対場の振幅のゆらぎの効果を効率よく取り込むため、T-行列近似を用いてクォークの自己エネルギーを求め、クォークの一粒粒子スペクトル関数および分散関係を計算している。その結果、次のような興味深い結果を得ている：臨界温度付近でフェルミ面近傍の準粒子の寿命が短くなり、さらに、クォークの状態密度にギャップ的な構造が生まれる（擬ギャップ現象）など、典型的な非フェルミ液体的な性質が発現する。

このような興味深い性質の発現が、クォークと対場のソフトモードとの量子的な二重散乱過程（共鳴散乱過程）によりもたらされることを詳細かつ明快に示している。

さらに、このような基礎的研究を基に相転移の前駆現象を通してカラー超伝導に関する情報を地上の実験で獲得する方策についても興味深いアイデアを提案している。

このように、本申請論文で報告された研究は、有限温度、有限密度におけるクォーク物質の物性についてのオリジナルで基本的な研究であり、この学問分野への重要な貢献である。よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。