

奇周波数 Fermi 超流動における
Cooper 対の性質と核スピン-格子緩和率への影響

2025 年度

岩崎舜平

報告番号	Ⓐ 乙 第	号	氏 名	岩崎 舜平
主 論 文 題 名： 奇周波数 Fermi 超流動における Cooper 対の性質と核スピン-格子緩和率への影響				
(内容の要旨) 本論文では、異なる時刻の Fermi 粒子間で Cooper 対が形成される奇周波数超流動を理論的に研究した。従来の奇周波数超流動理論が抱えていた「1 粒子励起スペクトルが負になる」という困難を克服するモデルを提案、それを用い、この系の Cooper 対波動関数の時空間構造や強結合効果、核スピン-格子緩和率 T_1^{-1} への影響を明らかにした。 第 1 章での当該研究分野の概観と研究動機の説明、および、本論文で用いる経路積分形式の超流動理論を第 2 章で紹介した後、第 3 章では、負の 1 粒子励起スペクトルの問題を解決した奇周波数超流動の新しいモデルを提案した。このモデルを 1 成分奇周波数 s 波超流動に適用、第 2 章で紹介した経路積分形式での BCS-Eagles-Leggett 理論の枠組みで、絶対零度における Cooper 対波動関数の時空間構造を、幅広い相互作用領域で明らかにした。特に強結合極限では、Cooper 対波動関数の大きさが同時刻成分を除き、偶周波数 s 波超流動状態のそれに一致することを示した。 第 4 章では、Nozières-Schmitt-Rink 理論の枠組みで 1 成分奇周波数 s 波超流動の超流動転移温度 T_c を評価、強結合極限の T_c が、全ての Fermi 粒子が強く結合した分子になったと仮定した場合の理想 Bose 気体の Bose-Einstein 凝縮温度に一致することを明らかにした。この結果は、奇周波数超流動では同時刻の Fermi 粒子間で Cooper 対形成は起こらないにも拘わらず、通常の s 波超流動と同様、強結合領域では Bose 分子的に振る舞うこと示している。 第 5 章では、第 2 章で提案したモデルを 2 成分奇周波数超伝導状態に適用、T_c 以下の核スピン-格子緩和率 T_1^{-1} の振る舞いを研究した。運動量空間での Cooper 対の対称性が p 波の場合、コヒーレンスピークの抑制という、偶周波数 p 波超伝導でも見られる現象に加え、T_1^{-1} が低温で Korringa 則的振る舞いを示すことを明らかにした。この計算結果を奇周波数 p 波超伝導の可能性が近年指摘されている $\text{CeRh}_{0.5}\text{Ir}_{0.5}\text{In}_5$ で測定された T_1^{-1} と比較、量子臨界点近傍で観測された異常な温度依存性を理論的に説明できることを示した。また、奇周波数 s 波超伝導の T_1^{-1} についても研究し、偶周波数 s 波超伝導では T_c 直下でコヒーレンスピークを示すのに対し、奇周波数 s 波超伝導の場合、状況によっては低温に向かい T_1^{-1} が増大し続けることを見出した。 第 6 章で、本論文のまとめと今後の展望を述べた。				

Thesis Abstract

No.

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. use only	*Office	Name	Shumpei Iwasaki
Thesis Title				
Cooper-pairing properties of odd-frequency Fermi superfluids and effects on nuclear spin-lattice relaxation rate				
Thesis Summary				
In this thesis, I theoretically investigated odd-frequency Fermi superfluids. I proposed a model odd-frequency pairing interaction which can overcome the well-known serious problem in the theory of this field that the calculated single-particle excitation spectrum unphysically becomes negative. Using this model, I studied the space-time structure of an odd-frequency Cooper pair, as well as strong-coupling corrections to the odd-frequency superfluid phase transition temperature. I also examined how the odd-frequency pairing affects the nuclear spin-lattice relaxation rate T_1^{-1} in the superfluid state. After overviewing this field and presenting the motivation of my work in Chap. 1, I explained the path-integral formalism of the Fermi superfluid theory in Chap.2. I then presented in Chap.3 a model odd-frequency pairing interaction which can overcome the above-mentioned difficulty for single-particle excitations. Using this model, I examined the space-time structure of an odd-frequency Cooper-pair wavefunction in a single-component odd-frequency s-wave Fermi superfluid at $T=0$, within the framework of the combined path-integral scheme with the BCS-Eagles-Leggett strong-coupling theory. In the strong-coupling limit, I clarified that, except for the equal-time pairing component, the magnitude of the odd-frequency pair wavefunction coincides with that in the ordinary even-frequency s-wave superfluid state. In Chap. 4, I evaluated the superfluid transition temperature T_c in a single-component odd-frequency s-wave Fermi superfluid, within the framework of the strong-coupling theory developed by Nozières-Schmitt-Rink. In the strong-coupling regime, the calculated T_c was found to be well-described by the Bose-Einstein condensation temperature of an ideal Bose gas where all fermions form tightly bound molecular bosons. This indicates that, despite the absence of equal-time pairing, odd-frequency Cooper pairs exhibit bosonic behavior in the strong-coupling regime. In Chap. 5, I applied the model interaction presented in Chap.3 to the odd-frequency superconducting state, to calculate the nuclear spin-lattice relaxation rate T_1^{-1} below T_c. In the case of the odd-frequency p-wave polar state, in addition to the vanishing coherence peak as in the even-frequency p-wave case, I found that T_1^{-1} exhibits Korringa-law-like behavior far below T_c. I also showed that the calculated T_1^{-1} well-explains the recent experiment on CeRh_{0.5}Ir_{0.5}In₅, which is considered as a candidate for odd-frequency p-wave superconductivity. I also dealt with the odd-frequency s-wave case. Under a certain condition, I found that the calculated T_1^{-1} continues to increase with decreasing temperature, which is quite different from the even-frequency s-wave case, where the coherence peak appears just below T_c. I summarized this thesis in Chap. 6.				