

学位論文 博士（理学）

質量インバランスを有する
極低温フェルミ原子気体を記述する強結合理論と
成分に依存する擬ギャップ現象の研究

2015 年度

慶應義塾大学大学院理工学研究科

花井 亮

主 論 文 要 旨

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	花井 亮
主 論 文 題 目： 質量インバランスを有する極低温フェルミ原子気体を記述する強結合理論と成分に依存する擬ギャップ現象の研究				
(内容の要旨)				
<p>本論文では、${}^6\text{Li}$-${}^{40}\text{K}$ 混合フェルミ原子気体といった「質量インバランスを有する極低温フェルミ原子気体」を理論的に研究し、弱結合領域から強結合領域までの全相互作用強度において、任意の質量差がある状況を統一的に扱える強結合理論を構築する。さらに、この理論を用い、BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)-BEC (Bose-Einstein condensation) クロスオーバー領域での超流動転移温度に対する質量インバランスの効果、および、超流動転移温度近傍に現れる擬ギャップ現象を明らかにする。</p>				
<p>本論文の前半では、異なる質量を有する 2 種類のフェルミ原子で構成された混合フェルミ原子気体に対し、任意の引力相互作用強度、質量差がある場合を全て扱うことができる強結合理論の構築を行う。質量インバランスがない場合の強結合フェルミ原子気体の研究で大きな成功を収めてきた (非自己無撞着) T 行列近似 (TMA) を、質量差がある場合に適用すると、超流動転移温度が 2 価になるなどの非物理的な結果を与えることを示し、その原因がやはりこの理論が破綻することが知られている「スピンインバランスを有するフェルミ原子気体」の場合と類似していることを指摘する。しかし、スピンインバランス系に対し有効とされる「拡張 T 行列近似 (ETMA)」を質量インバランス系に適用すると、質量差が小さい領域では超流動転移温度の 2 価性はなくなるものの、質量差がある程度大きくなると、弱結合領域で超流動転移温度が消失するという新たな困難が生じる。本論文では、その原因が、軽い原子と重い原子それぞれのフェルミ面に対する強結合補正の不備に因ることであると突き止め、それを克服するために拡張 T 行列近似をさらに拡張し、1 粒子スペクトルに対する強結合補正を完全に自己無撞着に取り入れることでこの問題が解決されることを明らかにする。</p>				
<p>本論文後半では、この「自己無撞着 T 行列近似 (SCTMA)」を用い、常流動相の 1 粒子状態に対する強結合効果とそれに対する質量インバランス効果を研究する。強い粒子間引力相互作用が働く系では、超流動転移温度以上でもクーパー対が形成される結果、1 粒子励起スペクトルに擬ギャップと呼ばれる窪み構造が現れることが知られているが、質量インバランスが存在する場合、軽い成分も重い成分も等しくクーパー対形成に関与するにも係らず、擬ギャップの現れ方に顕著な違いがあることを示す。${}^6\text{Li}$-${}^{40}\text{K}$ 混合フェルミ原子気体では ${}^6\text{Li}$、${}^{40}\text{K}$ 両成分に擬ギャップ現象が現れる領域だけでなく、${}^6\text{Li}$ 成分のみに擬ギャップが現れるというこれまで知られていない擬ギャップ現象が現れる領域があることを理論的に明らかにする。</p>				

SUMMARY OF Ph.D. DISSERTATION

School Keio University	Student Identification Number	SURNAME, First name Hanai, Ryo
Title Strong-coupling theory of an ultracold Fermi gas with mass imbalance and component-dependent pseudogap phenomena		
Abstract <p>In this thesis, I theoretically investigate an ultracold Fermi gas with mass imbalance. I construct a strong-coupling theory that enables us to deal with BCS (Bardeen-Cooper-Schrieffer)-BEC (Bose-Einstein condensation) crossover physics, in the presence of arbitrary mass difference between the two components. Using this, I clarify the superfluid phase transition temperature (T_c) and effects of mass imbalance in the BCS-BEC crossover region. I also discuss pseudogap phenomena in the normal state near T_c.</p> <p>I show that the (non-self-consistent) T-matrix approximation (TMA), which has extensively been used in the mass-balanced case, unphysically gives a double-valued T_c in the presence of mass imbalance. As the origin of this, I point out a similarity between this system and the spin-imbalanced case, where TMA also does not work. Indeed, the extended T-matrix approximation (ETMA) developed in the spin-imbalanced case is shown to eliminate the above-mentioned double-valued T_c. However, when the mass imbalance is remarkable to some extent, I find that ETMA gives vanishing T_c in the BCS regime, because of insufficient treatment of strong-coupling corrections to the Fermi surfaces of the two components. By further extending ETMA to include strong-coupling corrections in a fully self-consistent way, I successfully determine T_c of a mass-imbalanced Fermi gas in the whole BCS-BEC crossover region.</p> <p>Within the framework of this self-consistent T-matrix approximation (SCTMA), I also examine single-particle excitations and effects of mass imbalance. In a strongly-interacting Fermi gas, the formation of preformed Cooper pairs is known to induce a pseudogap (dip) structure in single-particle excitation spectra. I show that the visibility of this strong-coupling phenomenon is very different between the two components (that is, it appears more remarkably in the light-mass component), in spite of the fact that both the components equally contribute to the preformed Cooper pairs. I identify the region where both the components exhibit the pseudogap, as well as the region where the pseudogap is only seen in the light-mass component (${}^6\text{Li}$) in the phase diagram of a ${}^6\text{Li}$-${}^{40}\text{K}$ Fermi-Fermi mixture.</p>		