

論文審査の要旨および学識確認結果

報告番号	(甲)／乙第 号	氏 名	Kharga Digvijay
論文審査担当者：	主査	慶應義塾大学教授	博士（理学） 大橋 洋士
	副査	慶應義塾大学教授	理学博士 高野 宏
		慶應義塾大学准教授	博士（工学） 神原 陽一
		慶應義塾大学准教授	博士（理学） 渡邊 紳一
(論文審査の要旨)			
Bachelor of Science with Honours in Physics、Master of Science in Physics、Kharga Digvijay 君の学位請求論文は、「Strong-coupling Properties of an Ultracold Bose-Fermi Mixture with a Hetero-nuclear Feshbach Resonance」と題し、全5章より構成されている。 本研究が対象とするボース・フェルミ混合気体とは、ボース原子とフェルミ原子を混合し極低温まで冷却した量子気体を指す。この系は、フェッシュバッチ共鳴により、ボース原子とフェルミ原子との間にはたらく引力相互作用の強さを自在に制御できるという特徴を有しており、ボース原子ガス成分がボース・アインシュタイン凝縮を起こす一方でフェルミ原子ガス成分がフェルミ縮退状態となる弱結合極限から、両者が強く結合しフェルミ分子気体となる強結合極限までを統一的に研究できる系として注目されている。また、同じく相互作用制御が可能な冷却フェルミ原子気体との比較から、強結合効果に対する粒子の量子統計性（ボース、フェルミ統計）の影響が解明できるものと期待されている。しかし、冷却フェルミ原子気体の強結合物性の研究に有効である T 行列近似 (TMA) はボース・フェルミ混合気体の強結合領域を正しく記述できず、この系に適用可能な強結合理論の開発が当該研究分野において急務となっている。本研究は、この重要課題に対し、TMA が抱える困難の原因を突き止め、ボース・フェルミ混合気体に対する新しい強結合理論の構築に成功するという、非常に重要な成果を挙げている。さらに、この理論を駆使し、この系の1粒子励起や熱力学的性質に対する対形成揺らぎの影響を理論的に明らかにする、という成果も挙げている。 第1章は序論である。ボース・フェルミ混合気体とフェッシュバッチ共鳴、および、冷却フェルミ原子気体が説明された後、本研究の目的が述べられている。 第2章では、ボース・フェルミ混合気体に対する新しい強結合理論が説明されている。TMA の自己エネルギーに現れるボースグリーン関数が、ボース・アインシュタイン凝縮において成り立つべき条件（ギャップレス条件）を満たしておらず、これがボース・フェルミ混合気体の強結合領域を正しく記述できない原因であることを突き止めている。そして、それを改善することで、強結合領域のフェルミ分子気体状態を正しく記述できるようになることを具体的計算により示している。 第3章では、第2章で構築した理論を用い、ボース・アインシュタイン凝縮転移温度近傍におけるボース・フェルミ混合気体の1粒子励起を研究している。引力相互作用が強くなると、対形成揺らぎにより、フェルミ原子、ボース原子、フェルミ分子の励起が結合し、フェルミ原子やボース原子の1粒子励起スペクトルにこれら3種類の励起分散を反映したピーク構造が現れることを明らかにしている。更に、フェルミ原子気体では対形成揺らぎに起因する1粒子励起の結合は擬ギャップ現象を引き起こすが、ボース・フェルミ混合気体の場合、フェルミ分子の励起によりこの量子多体現象が抑制されることも明らかにしている。この成果は、粒子の統計性の違いが擬ギャップ現象の発現に大きく影響することを示すものであり、重要である。 第4章では、ユニタリ極限におけるボース・フェルミ混合気体の熱力学的性質を研究している。第2章で構築した理論とユニタリ極限で成り立つ普遍熱力学を組み合わせ、この相互作用強度における内部エネルギー、圧力、エントロピー、比熱の温度依存性を得ることに成功している。また、比熱が示す非単調な温度変化が対形成揺らぎに因ることを明らかにし、この系の対形成揺らぎを研究するうえで、比熱の温度変化の観測が非常に有効であることを理論的に指摘している。 第5章では、結論として本研究の成果がまとめられている。 本研究は、強結合ボース・フェルミ混合気体を扱える新しい理論の構築に成功しており、その成果は高く評価できる。様々な物理量に対し本研究が明らかにした強結合効果は、当該研究分野の今後の発展に大いに貢献するものである。また、フェルミ原子ガスとの比較研究で明らかとなった強結合領域での2つの系の類似性と差異は、広く強結合超流動現象の理解に資するものである。よって、本論文の著者は博士(理学)の学位を受ける資格があるものと認める。			
学識確認結果	学位請求論文を中心にして関連学術について上記審査委員で試問を行い、当該学術に関し広く深い学識を有することを確認した。 また、語学（英語）についても十分な学力を有することを確認した。		