

学 位 審 査 報 告 書

(ふ り が な) 氏 名	やまだ やすひろ 山 田 康 博
学 位 (専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 号
学 位 授 与 の 日 付	平 成 年 月 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) 量子ドットを介した非平衡アンドレーエフ輸送	
論 文 調 査 委 員	(主査) 川 上 則 雄 教 授 高 橋 義 朗 教 授 前 野 悦 輝 教 授

理 学 研 究 科

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	山田 康博
論文題目	量子ドットを介した非平衡アンドレーエフ輸送		
(論文内容の要旨)			
近年の微細加工技術の進展により、ナノメータースケールの大きさに半導体や金属を加工できるようになった。本論文では、そのようなナノスケール系の典型例である量子ドットを取り上げ、常伝導リードと超伝導リードを繋いだ量子ドット複合系に対する非平衡アンドレーエフ輸送について解析している。この系を理論的に取り扱うため、南部－ケルディッシュ空間でのダイアグラム展開を基にした修正二次摂動法を定式化している。提案された修正二次摂動法は、相互作用が弱い極限のみならず強い極限 (原子極限) でも量子ドット系の正しい振る舞いを再現し、さらに中間領域においても定性的に正しい答を与えることを確認している。この手法を用いることで、従来困難であった非平衡状態において近藤効果と超伝導相関が拮抗する領域での輸送特性について系統的な研究を行っている。 まず非平衡輸送の特性を明確にするため、系を特徴付ける繰り込まれたパラメータを導入し、系の基底状態と線形応答について解析している。繰り込まれたパラメータは、この系の低エネルギー領域を特徴付ける量であり、中でも、繰り込まれたリード－量子ドット間の結合定数が系の基底状態を記述する上で本質的であることを見いだしている。この解析に基づき基底状態相図を確立し、基底状態は常伝導リード強結合領域と超伝導リード強結合領域に分類されることを明らかにしている。さらに、ゼロバイアスコンダクタンスの計算結果を数値くりこみ群の計算結果を比較することで、本論文で定式化した修正二次摂動法の有用性を確認している。特に、クーロン相互作用の幅広い領域にわたり修正二次摂動法が正しく物性を記述することを見出している。 非平衡状態の解析においては、特に量子ドットにおける近藤相関と超伝導相関の絡み合いに注目し、微分コンダクタンス、量子ドット内の超伝導対振幅ならびに局所状態密度に関して系統的な計算を行っている。絶対零度かつ平衡状態において導入された繰り込まれた結合定数により非平衡輸送特性の本質が統一的に記述されることを見いだしている。例えば、基底状態として近藤一重項が支配的な場合、微分コンダクタンスに特徴的な有限バイアスピークが生じるが、このピークを与えるバイアス電圧の値は、上記の繰り込まれた結合の強さで与えられる。この微分コンダクタンスのピークが異常な温度依存性を示すこと、さらにこれが近藤共鳴状態を利用した非平衡アンドレーエフ反射の増大によって生じていることを明らかにしている。また、量子ドットにおけるアンドレーエフ共鳴状態が常伝導リードのフェルミ面とその対称なエネルギー面にピン止めされる現象も発見している。これらの現象は、強相関極限における基底状態の転移点近傍で見られ、近藤・超伝導相関の非平衡状態下での絡み合いに由来する。さらに、微分コンダクタンスにおいて上記のピークとは別にアンドレーエフ束縛状態に起因したピークが生じることを理論的に示している。本論文で解析された有限バイアス電圧下での微分コンダクタンスの特徴的な振る舞いが、最近の実験結果を定性的に説明することを示し、上記の非平衡状態における近藤効果と超伝導の非自明な絡み合いが量子ドット複合系で実際に生じていることを明らかにしている。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文で山田氏はナノ量子系の典型例である量子ドットに注目し、常伝導リードと超伝導リードに結合した量子ドット複合系の量子輸送現象を理論的に解析している。特に超伝導近接効果に起因する非平衡アンドレーエフ輸送に対する電子相関効果に重点を置いて、低温において現れる種々の異常な現象を理論的に明らかにしている。

超伝導体に接合した量子ドット複合系の非平衡輸送を調べるため、山田氏はまず南部－ケルディッシュ形式のグリーン関数法を用いて修正二次摂動法を定式化している。この手法は、弱相関および強相関の極限で正確な答を与え、さらに中間領域でも定性的に正しい振る舞いを再現する優れたものである。山田氏は、この手法を用いてこれまで解析が難しかった非平衡状態において近藤・超伝導相関が拮抗する領域での輸送特性を解析している。まず、系の基底状態について解析し、繰り込まれた共鳴トンネル結合が基底状態を記述する重要なパラメータであることを示している。これにより系の複雑な輸送特性を明確に取り扱うことができるようになり、その結果、基底状態は常伝導リード強結合領域と超伝導リード強結合領域に分類されることを示している。ここで開発した理論的手法の有用性をチェックするため得られた結果を数値くりこみ群による厳密な結果と比較し、広いパラメータ領域で提案した理論手法が有効であることを確かめている。

本論文の中心テーマである非平衡輸送に関しては、量子ドットにおける近藤効果と超伝導相関の競合に重点をおいて系統的な解析を行っている。非平衡状態においても繰り込まれた共鳴トンネル結合を用いて低温での輸送特性を統一的に記述し、微分コンダクタンスに現れる有限バイアスでのピーク位置は繰り込まれた結合で与えられることを明らかにしている。本論文の最も興味深い成果は、微分コンダクタンスのピーク構造が近藤共鳴状態を利用した非平衡アンドレーエフ反射の増大によるものであることを解明した点である。この成果の副産物として、アンドレーエフ共鳴状態が常伝導リードのフェルミ面とその対称なエネルギー面にピン止めされる現象も発見している。これらの現象が、強相関領域における近藤・超伝導相関の非平衡状態下での絡み合いに由来することが重要である。ここで理論的に得られた有限バイアス下での特徴的な振る舞いの多くは、最近の量子ドット複合系の実験結果を定性的に説明しており、非平衡状態における近藤効果と超伝導の非自明な絡み合いが、実験で得られている輸送特性の異常な振る舞いの解明には必須であることを示している。

このように、本論文は量子ドット複合系の量子輸送に対する相関効果と超伝導近接効果を明らかにしたものである。この成果は量子ドット系のみならず、ナノ量子系の非平衡輸送現象の理論的基礎を与える研究としても高く評価される。公聴会においても、山田氏は入念に準備された明快な発表を行い、基本的な質問や専門的な質問にも丁寧な答え、高い学識を有していることをアピールした。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成22年1月13日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行い、その結果合格と認めた。