



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Bose Glass and Fermi Glass [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	高橋, 是清
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15836号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/91911
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Korekiyo_Takahashi_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 高橋 是清

審査担当者 主 査 特任教授 丹田 聡
副 査 准教授 小布施 秀明
副 査 教 授 戸田 泰則
副 査 教 授 市村 晃一
副 査 助 教 延兼 啓純 (北海道大学理学院)

学位論文題名

Bose Glass and Fermi Glass

(ボーズグラスとフェルミグラス)

量子相転移の中でも、超伝導-絶縁体 (S-I) 転移、金属-絶縁体転移 (M-I) は、多くの理論と実験が繰り返され、現在も議論され続けているテーマである。これらの転移では、電子相関と乱れという 2 つの大きな要素が拮抗した役割を演じる。電子相関によって Mott 転移、乱れによっては Anderson 転移が起こるが、それぞれこれらの量子現象が絡み合い複雑な電子輸送現象を引き起こしている。これらの現象は単純に切り分けることはできず、多くの実験結果をもとに理論的解析が進められている。

本研究は、乱れのある S-I 転移において、局在状態から超伝導状態に達する過程について論じている。熱ゆらぎによらない量子局在領域における電気伝導は、それぞれ Fermi glass と Bose glass の観点から議論されてきた。しかし、その S-I 転移における超伝導状態に達する前の弱局在領域は、この 2 種類の局在がどのようになっているのかわかっていない。Fermi glass は、Mott 局在と Anderson 局在から研究されている。特に Anderson 局在は β 関数スケーリングにより、弱局在領域から強局在領域まで研究されている。一方、Bose glass は、Cooper 対の boson が局在化した絶縁体であり、双対関係にある vortex による boson が超流動状態になっている。この強局在 boson の研究は、乱れを含む Mott-Hubbard に基づく Fisher スケーリング理論によって分析されてきた。しかしながら、これら Fermi glass と Bose glass を結びつける理論は存在しない。乱れのある S-I 転移において、局在状態から超伝導状態に達する中で、Fermi glass のままなのか、それとも、Fermi glass から、boson-fermion mixture 状態、もしくは Bose glass への遷移の存在があるのだろうか？ あった場合はどのような条件があるだろうか。これらが、本論文の目的となるテーマである。

その結果、乱れのある 2 次元超伝導物質において boson が空間的に局在する絶縁体、Bose glass 相と fermion が局在する Fermi glass 相への相転移の存在を β 関数から発見し、物質によらずこの境目がユニバーサルな量子抵抗値 (h/e^2) であることを示した。

本研究は、普遍性を議論するために実験試料として、乱れのある 2 次元超伝導物質であるものの構造の異なる Nd 系銅酸化物高温超伝導体と Pb 超薄膜を用いた。さらに検証のために同じ Nd 系でも Nd 系 Pd 酸化物の実験データを利用した。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章において、本研究の背景と動機について説明した。

第2章において、本研究に関連する相転移について議論した。基本的な概念から相転移に必要な臨界指数、ユニバーサリティについて説明した。また、3次元と異なる2次元の相転移の特徴と相転移を理解する上で必要な繰り込み群流れについて言及した。

第3章において、2次元金属-絶縁体転移について、主に局在側の機構について議論した。Mott転移、Anderson転移について説明後、Anderson局在を理解する上で、不可欠な β 関数を使ったスケールリング理論について述べ、その β 関数の特徴をまとめた。また、Anderson局在以外にも局在を起こす電子間相互作用の温度依存性も $\ln T$ であることを説明した。

第4章において、2次元超伝導-絶縁体転移について、Fisherスケールリングを使って、乱れ・磁場を変調したS-I転移について解釈する方法を説明した。Fisherの2次元超伝導体の相図から、本研究の立場を再認識した。S-I転移で現時点で認められているBose glass発見の実験を示した。また超伝導転移温度よりも高い温度でのCooper対の発見やマルチフラクタル上での超伝導転移温度の上昇などの近年の研究を紹介した。

第5章において、本研究に関連する重要な観点である2次元弱局在のbosonの輸送について、抵抗率の温度依存性がどうなるかを議論した。

第6章から第9章において、本研究で利用した実験資料について説明した。
順に、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$ 薄膜、 $\text{Nd}_2\text{CuO}_{4-x}\text{F}_x$ 単結晶、 $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{PdO}_4$ 薄膜、Pb 超薄膜について述べ、製造方法、当時の研究成果についてまとめた。

第10章では、前章にて説明した実験資料から本研究で利用するデータをグラフ化した。

第11章では、実験的 β 関数を使って分析した結果をまとめた。本研究によりシンプルな実験的 β 関数分析法を用いて、乱れのある2次元超伝導物質においてbosonが空間的に局在する絶縁体、Bose glass相と、fermionが局在するFermi glass相への相転移の存在を発見した。

第12章では、本研究の総括を行った。
以上より工学的・理学的にも価値があると考えられ工学博士の学位をえるにふさわしい資格を有している。