

論文審査の結果の要旨

氏名 山本 剛史

ナノスケールの量子回路は、さまざまな量子系特有の輸送現象を実現する理想的な物理系として長く研究されてきたが、最近では、超伝導量子回路が量子計算を実現するためのデバイスとしての可能性も盛んに研究されている。提出された論文は、超伝導量子ドットやジョセフソン接合列などを研究対象とし、その熱浴との相互作用の効果について、量子モンテカルロ法などの数値計算手法を用いて、その臨界現象、マイクロ波などへの応答特性、熱コンダクタンスなどの輸送特性を明らかにしたものである。

本論文は6つの章と8つの付録から構成されている。第1章と第2章は、関連した先行研究の概説になっており、第3章、第4章、第5章が本論文のオリジナルな部分になっている。第6章は結論である。第1章は、本論文を含めて超伝導量子デバイス研究の大きな動機になっている量子計算関連研究のこれまでの研究についての概説である。第2章は、本論文の中心的なテーマである超伝導回路とそれに対するスピン・ボゾンモデルやジョセフソン接合列の物理、さらにボーズグラス転移など乱れの効果による現象に関するこれまでの研究についての概説である。第3章では、超伝導量子ドットとそこに結合した導線からなる系が、ある場合にはスペクトル密度関数が周波数の1より小さい冪に比例するサブオーミックシステムとなることを指摘し、結合強度を変化させたときに生じうる量子臨界現象について論じている。第4章では、乱れのあるジョセフソン結合鎖の両端にマイクロ波導波管を結合したデバイスにおいて、そのマイクロ波透過率から系の内部状態を調べる方法を提案し、これとモデル系の計算を組み合わせることで、特徴的な乱れ依存現象を観測したとしている。第5章では、2準位系が共鳴器を介して熱浴と接しているシステムを量子Rabiモデルの解析によって調べ、全体の熱輸送特性を議論している。

以下では、この論文のオリジナルな部分である第3章、第4章、第5章の内容とそれに対する本審査委員会の評価について述べる。

第3章では、超伝導部分を含む量子ビット一つと熱浴が結合した系を考察している。この系はスピンとボゾンが結合したモデルで表現でき、Leggett (1987) や Caldeira-Leggett (1983) などの研究があるが、その特性、とくに臨界現象はボゾンのスペクトル強度関数によって定性的に異なることがWinter-Rieger-Vojta-Bulla (2009) などによって指摘されている。すなわち、スペクトル強度関数が周波数依存性を特徴づける冪指数が1より大きい（スーパーオーミック）、等しい（オーミック）、小さい（サブオーミック）の3つの場合である。いずれの場合も、スピンとボゾンの結合定数をゼロからスタートして増大させていったときに、波動関数が2準位系の2状態に広がった相から、どちらかに局在し

た相への量子相転移が起こるとされており、オーミックのときにはKT転移が、サブオーミックの場合には通常の冪的な臨界現象が予想されている。しかし、実際には、サブオーミックの状況を実験的に実現する方法が明らかでなかった。本章では、導線部分を超伝導RLC回路が直列に並んだものとして実現することで、広い周波数帯でスペクトル強度関数が1より小さな冪でよく特徴づけられることを見出した。また、この系のマイクロ波に対する散乱強度を特徴づける動的相関関数を連続時間量子モンテカルロ法を用いて計算し、その周波数依存性が解析的理論から予想される臨界指数とよく一致することを見出した。

第4章では、乱れのあるジョセフソン接合列の両端に伝送線路をつけたデバイスを考察し、このシステムのマイクロ波透過率からシステム内部の状態を調べる方法を提案した。また、実際にこれをモデル系の数値計算で実証した。一般にジョセフソン接合列は1次元 sine-Gordon モデルによって記述されるが、乱れのある系で Luttinger パラメータが小さい場合にはボーズグラス相が実現され、その古典安定解は位相が不規則にピン留めされた状態になる。本章では実験的に実現される状況が古典安定解のまわりの量子ゆらぎ状態で良く記述されることを論じたうえで、量子ゆらぎの自由度に対するランダムな古典安定解の影響が、構造のないガウス型ホワイトノイズによるものとは質的に異なることを数値計算から実証している。一例としては、反射係数の周波数依存性が低周波領域で周波数の4乗に比例することを見出し、ガウス型ホワイトノイズで期待される1乗とは明確に異なっていることを明らかにした。

第5章では、超伝導量子ビットがLC共鳴器を介して熱浴と相互作用している系を考察している。超伝導量子ビットを表す2準位系と共鳴器を表すボゾンとの結合系は量子Rabiモデルによって記述されるが、ここで考察しているのは、量子Rabiモデルが更に熱浴が結合した系である。論文提出者は、共鳴器と熱浴のボゾン自由度が結合した新しいボゾン自由度と捉えることで、この複合系を取り扱い、NIBA近似と呼ばれる近似法を用いることで、熱伝導係数を導いている。結果としてこの系の熱伝導係数が、量子Rabiモデルの多準位性を反映して、温度の関数として2つのピークを持つことを明らかにした。

以上のように、論文提出者は本論文において超伝導量子回路をモデル化し、それを量子モンテカルロなどの手法によって扱うことによって、いくつかの超伝導量子デバイスの量子臨界現象や輸送特性などを明らかにし、さらにジョセフソン接合列におけるボーズグラス相を実験的にプローブするための手段の提案も行っている。実験状況に即して考察されたこれらの問題やそこから得られた知見は、近年盛んに議論されている量子計算デバイスの開発において有用であることが期待されるだけでなく、量子輸送現象の基礎的な研究の今後の進展にとっても重要なものであると評価され、物性理論としての価値は十分にあると認められる。

本論文は共同研究者等との共同研究の成果であるが、構想、数値計算、結果の解析の主要部分は論文提出者が中心となって遂行されたものと判断された。また、論文の内容と形式は東京大学大学院理学系研究科における博士論文に関する指針に則っていることを確認した。以上により、博士（理学）の学位を授与できるものと審査員全員が認定した。

最終試験の結果の要旨

氏名 山本 剛史

成績 合格

本委員会は、論文提出者に対し令和4年1月13日、学位論文の内容及び関連事項について、口頭試験を行った。

その結果、論文提出者は、物理学、特に量子デバイス理論について博士（理学）の学位を受けるにふさわしい十分な学識をもつものと認め、審査委員全員により合格と判定した。