

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 増山 雄太

本論文は「超伝導回路を用いた非平衡量子系の研究」と題し、超伝導量子ビットを用いて、非平衡状態における量子系の振る舞いを研究した成果をまとめている。量子非平衡系の物理に対し、駆動量子系、開放量子系、量子フィードバック系という三つの切り口からのアプローチを行っている。

駆動量子系は非平衡定常系の一種であり、駆動場により環境との相互作用を制御することにより量子系における特定の量子状態を安定化させる、散逸エンジニアリングの舞台として関心を集めている。本研究では、共振器-超伝導量子ビット結合系を連続マイクロ波で駆動することにより駆動量子系を形成し、量子ビットに誘起される新規な遷移を観測した。次に、開放量子系および量子フィードバック系に対して、非平衡系においても成り立つ等式である、積分型のゆらぎの定理を実験的に検証した。ゆらぎの定理は近年の非平衡物理学の研究において中心的な役割を占めており、量子系を用いたゆらぎの定理の検証は今後の非平衡物理学の進展の土台となる重要な成果である。これらの研究成果は、これまで関連性が弱かった、量子情報科学と非平衡物理学の結び付きを強めるものであり、今後の量子非平衡物理学の発展に大きく寄与する成果である。

本論文は全8章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本研究の背景として、非平衡物理学のこれまでの研究の進展および超伝導量子回路の技術の発展について説明し、超伝導量子回路を用いて非平衡物理学を研究することの妥当性および新規性を明確にしている。

第2章では、量子非平衡系に関して本研究の基盤となる理論を説明している。非ユニタリーな状態変化の時間発展を記述する方法として、量子マスター方程式および量子トランジェクトリ法について説明している。次に、量子非平衡系においても成り立つ恒等式である積分型のゆらぎの定理の説明を行っている。

第3章では、量子制御技術および量子測定技術について説明している。ここでは、本研究に用いた超伝導量子回路および測定制御技術の理論的な記述がなされている。続いて、共振器モードと量子ビットの相互作用を研究する回路量子電気力学について説明している。

第4章では、本研究で構築した実験系について説明している。まず、マイクロ波を用いた超伝導量子回路に対する制御測定技術を説明している。続いて、共振器-超伝導量子ビット系の基礎測定の結果を示している。また、量子ビットの量子非破壊測定に用いたジョセフソンパラメトリック増幅器の説明を行っている。

第5章では、共振器-超伝導量子ビット結合系をマイクロ波で駆動した際に誘起される新規な遷移を観測した実験結果を示し、その物理的な説明を行っている。共振器を駆動する強度を調節することにより、量子ビット-共振器系の着衣状態間遷移の許容・禁制を制

御できることを見出した。この様子を Jaynes-Cummings 模型と Franck-Condon 描像を用いて説明している。この結果は、駆動場による量子ビットの散逸の制御に関する新しい可能性を示唆している。

第 6 章では、二点測定と呼ばれる、量子系の始状態と終状態のエネルギーを測定する方法を用いて、積分型ゆらぎの定理($e^{\beta W} = 1$)の検証を行っている。ここで、 W は系が外界にする仕事、 β は逆温度、 $\langle A \rangle$ は A の期待値を表す。さらに、量子系に緩和が存在すると、二点測定を用いて系が外界にする仕事 W を正確に測定することができないため、積分型ゆらぎの定理の期待値が 1 からずれることを説明している。エネルギー緩和および位相緩和による期待値のずれを理論的に研究し、二点測定の間 Ramsey パルスシーケンスを挿入した実験によりそれを検証した。本研究は、量子非破壊測定手法による二点測定を用いて量子系における積分型ゆらぎの定理を検証した初めての実験である。

第 7 章では、フィードバック操作を含んだ系において成り立つ積分型のゆらぎの定理($e^{\beta W - I} = 1$)を実験的に検証している。ここで I は QC 相互情報量であり、古典系における相互情報量に対応する物理量である。フィードバック操作を含めた積分型のゆらぎの定理に関しては、これまで古典系では実験的検証が行われているが、量子系における実験は報告されていない。本研究では、フィードバック操作を含めた積分型のゆらぎの定理を量子系において初めて検証している。さらに、フィードバック信号を得るための、量子系に対する測定強度を変化させた場合にも、積分型のゆらぎの定理が成り立つことを実験的に確かめている。また、系の時間発展の逆過程が存在しない場合にエントロピー生成の計算が形式的に発散することによる絶対不可逆性がゆらぎの定理に与える影響を、量子ビットの初期実効温度を変えて測定を行うことにより、検証している。本研究における実験は、測定により得た情報量を仕事に変換する変換器を、量子系において初めて実現したものである。

第 8 章は本研究のまとめと今後の展望を述べている。

これらの成果は、量子非平衡物理学において近年急速に進展している理論的な枠組みを実験的に検証したものであり、重要な意義があるものと認められる。同時に、本研究では、超伝導量子回路が非平衡物理学を研究するために最適な系の一つであることが示されている。この成果は、今後、量子コヒーレンスやエンタングルメントを含む系に対する量子非平衡物理学理論の構築および実験的検証への展開の足掛かりとなるものであり、量子情報科学と非平衡物理学を橋渡しする領域を切り拓く成果として、物理工学への寄与が大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。