

博士論文（要約）

超伝導回路を用いた
非平衡開放量子系の研究

増山 雄太

歴史的背景と本研究の位置づけ

ジョセフソン接合を構成要素とする超伝導回路を用いた量子二準位系（超伝導量子ビット）は、量子計算機の構成要素の最有力候補の一つと考えられている。超伝導量子ビットは、その巨視的な素子サイズに起因して、大きな双極子モーメントを持つ。また超伝導共振回路では高いQ値が実現できる。このため、他の系では到達できないパラメータ領域にある電磁場との量子力学的強結合が実現できている。これまで培われてきた量子エレクトロニクスの理論を超伝導量子ビット回路に適用し、高い精度での量子ビット操作・射影測定・フィードバック制御・エンタングルメント生成など、量子計算に向けた量子制御・測定技術が発展してきた。また、空洞共振器中に超伝導量子ビットを配置することで長いコヒーレンス時間も達成された。さらに、近年は量子計算機に向けた取り組みとして、多量子ビット化や、量子計算機のアーキテクチャーの模索などが行われている。量子情報・量子エレクトロニクスの理論は孤立量子系や量子誤り訂正された系などの量子コヒーレンスが完全に保たれている場合を想定することが多いが、量子コヒーレンスが緩和しうる状況での物理の理解が進むことで、これらの理論が更に発展すると期待される。しかし、量子論の非平衡系・開放系における一般的な理解はあまり進んでいない。それは非平衡系が複雑であり、物理法則の抽出が困難であるからである。本研究では実験により量子非平衡系の普遍的な法則の発見を推進することを目指す。特に非平衡系の中でも次に説明する3つの内容を対象とする。

1. 駆動された開放量子系の研究: 量子系を駆動することで非平衡定常状態を実現する。量子エレクトロニクス分野では、量子系を駆動し続け、環境系も含めた平衡状態を生成したい量子状態に安定化する技術を熱浴（散逸）エンジニアリングという。量子系の環境系への緩和がある場合にも定常状態としてエンタングルド状態やスクイーゾド状態などの量子的な状態が実現できるという利点がある。この技術を用いて状態の初期化や、量子調和振動子への量子情報の符号化、操作、保護など量子計算に必要な技術が開発されてきた。また、量子エレクトロニクス分野以外の駆動量子系としては、光照射による物質の巨視的变化を起こす光誘起相転移、励起子のボース・アインシュタイン凝縮などが挙げられる。上記の他にも系を駆動することで安定化する様々な非平衡定常状態が理論的に提案されており、実験的な検証が行われてきている。本研究では熱浴エンジニアリングにより、超伝導量子ビット回路にこれまで新奇な量子状態を生成し、駆動強度を変化させることによりその状態への遷移を制御した。

2. ゆらぎの定理: 熱統計力学の理論的な枠組みは長い時間をかけ発展してきた。平衡系の理論である熱力学はClausius, Gibbsらによって1800年代に構築された。その後、Einsteinによるブラウン運動の理論(1905年)、久保らによる線形応答理論（1953年-）などにより線形非平衡系の理論が発展した。ゆらぎの定理は非線形非平衡の状況下でも成立する理論であり、Evansらの数値計算による発見(1993年)から始まり、Jarzynski, Crooksらの研究によって発展してきた。ゆらぎの定理は熱力学や線形応答理論を包含す

る理論で、ゆらぎの定理から揺動散逸定理や熱力学第二法則を導出することができる。本研究では積分形のゆらぎの定理であるJarzynski等式を対象とする。量子系においては、Jarzynski等式が孤立系でのみ成立することが示されており、イオントラップを用いて実験的に検証されている（2015年）。しかし、現実の量子系は開放系であり、有限のデコヒーレンスを持っている。上記の先行研究は散逸の小さい状況で行われており、デコヒーレンスの効果は観測されていなかった。ゆらぎの定理を開放量子系まで拡張する理論はまだ発展途上であり、理論・実験の双方から研究が必要である。本研究では超伝導量子ビット系を用いて、量子Jarzynski等式に対するデコヒーレンスの影響を調べた。

3. 情報熱力学：ゆらぎの定理は沙川らによってフィードバック操作も含めた理論へと拡張された（2010年）。フィードバックまでを含めたゆらぎの定理は、情報を自由エネルギーや仕事に変換できるという、情報理論と熱力学を結ぶ理論である。この拡張された理論により、情報のエントロピーと熱力学エントロピーとを統一的に記述することができ、Maxwellの悪魔のパラドックスの解決がなされた。古典系においてはコロイド粒子を用いた実験によりこの理論が検証されている（2010年）。一方、量子系ではこれまで実験的な検証が行われていなかった。本研究では、超伝導量子ビット系を用いて、フィードバック操作を含めた量子Jarzynski等式の検証を行った。

実験方法と結果

上記の各テーマに対応して、本研究の構成は大きく3つの内容に分けられる。以下、各内容について説明する。

1. 駆動された量子系における散逸の制御：アルミニウム製の超伝導空洞共振器の中央に超伝導量子ビットを配置した系のマイクロ波透過特性を調べた。両者の間の分散的相互作用により、量子ビットの状態に応じて共振器の共鳴周波数がシフトする。平行して別のマイクロ波を用いて量子ビットを共鳴励起すると、共振器透過率の変化として、量子ビット励起スペクトルが観測される。そのときに、共振器内のマイクロ波光子数に依存した離散的なACシュタルクシフトにより、量子ビットの共鳴線が複数現れることを観測した。さらに共振器内の平均光子数に依存して、各共鳴線が低周波側へシフトすることおよび複数の細かい共鳴線に分裂することを発見した。この細かい共鳴線は超伝導量子ビット系を駆動することにより生じる新奇な遷移に対応するものであり、駆動強度によって遷移の許容/禁制を制御することができることを明らかにした。また、共同研究者の越野和樹氏らとこの共鳴の理論的な理解を行い、Frank-Condon描像を用いて説明し、電気回路を用いた共振器量子電磁力学においてもこの描像が適用できる状況があることを示した。

2. デコヒーレンスを含んだゆらぎの定理：超伝導量子ビット状態の射影測定を行うために、超伝導空洞共振器と超伝導量子ビットで構成される系にJosephsonパラメトリック

ク増幅器を接続し実験を行った。量子ビットに対する二度の射影測定のエネルギー状態の違いから量子系のエネルギー変化を計算し、Jarzynski等式を検証した。超伝導量子ビットのエネルギー緩和および位相緩和の影響を観測するために、二度の射影測定の間二つの $\pi/2$ パルス照射し、二つの $\pi/2$ パルスの前後の時間間隔をそれぞれ変化させ時間間隔依存性の測定を行った。その結果、デコヒーレンスの影響による量子Jarzynski等式の変化を観測した。また、Jukka Pekola氏らと共同で、緩和率が小さい場合に適用可能な理論式を導出しこの実験結果との一致をみた。また、量子ビットの初期状態として異なる重ねあわせ状態を用意して同様の実験を行うことで、環境温度と量子ビット実効温度が異なる状況でのJarzynski等式の変化の観測も行った。

3. フィードバック操作を含めたゆらぎの定理：研究2で用いた実験系にフィードバック装置を追加した。量子ビットの状態に関する情報を持ったマイクロ波を、射影測定出力信号を閾値判定し、フィードバック装置のトリガーに入力することにより量子ビットの緩和時間より短い遅延時間での以内にフィードバック操作を実現した。研究2と同様に二回の連続する測定を行い、その二回の測定の間量子ビット制御用のフィードバックパルス照射することで、フィードバック操作を含めた状況下での量子Jarzynski等式の検証を初めて行った。エントロピー生成を計算する際、始状態から終状態への遷移確率を計算するが、フィードバック操作を行うことでエントロピー生成を計算できない過程が生じる。この過程を絶対不可逆な過程と呼び、量子ビットの実効温度を変えてフィードバック操作を行うことで、絶対不可逆な過程の比率の変化を観測した。

まとめと展望

本研究では、1: 駆動された量子系における散逸の制御、2: デコヒーレンスを含んだゆらぎの定理、3: フィードバック操作を含めたゆらぎの定理の研究を行った。これらの成果により非平衡開放量子系の振る舞いを実験的に検証し、理論的な理解を推進した。量子系で上記の研究を行うための実験系は「高速かつ多数回の操作および測定・高安定性・量子非破壊射影測定・フィードバック制御」という要素を実現可能であることが望ましい。この要請を満たすうえで超伝導量子ビット系は優れた性能を持つため、量子系での非平衡統計力学やフィードバックの研究に適している。今後、本研究の成果を基礎として、超伝導量子ビット系を用いた多くの研究が進んでいくと予想される。特に、量子ビットの数を複数にすることでエンタングルメントの影響も考慮した量子多体非平衡系・量子熱力学の探究が行われていくと期待される。