

氏 名（本籍）	ともながあきよし 朝 永 顕 成（福岡県）
学 位 の 種 類	博士（理学）
学 位 記 番 号	甲第 1256 号
学位授与の日付	2022 年 3 月 19 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学 位 論 文 題 目	Ultrastrong interaction phenomena for superconducting quantum devices (超伝導量子デバイスのための超強結合現象 に関する研究)

論 文 審 査 委 員 (主査) 嘱託教授 蔡 兆申
教授 二国 徹郎 教授 徳永 英司
教授 渡邊 昇 准教授 佐中 薫
准教授 Mark Sadgrove

論文内容の要旨

This thesis is concerned with ultrastrong coupling in superconducting circuits, with a view to its application to quantum devices. Ultrastrong coupling is defined as coupling in which the coupling energy between quantum systems exceeds 10% of the energy of each quantum system. It is theoretically suggested that quantum circuits with higher scalability and quantum gates with higher speed and efficiency can be constructed by using this phenomenon. In particular, in quantum annealing machines and Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) computers, we proposed that ultrastrong coupling can be used to construct circuits with dense graphs, and these circuit can increase computational efficiency. In addition, since ultrastrong coupling is a phenomenon that does not usually appear in natural atoms, it is an important field where observations of vacuum radiation and super-radiation are expected as fundamental optical phenomena.

Superconducting circuits have a very large size (macroscopic quantum state) for quantum systems, ranging from a few nm to a few 100~ μm , and have been used in various basic and applied research by taking advantage of the high degree of

freedom in circuit design. Research into ultrastrong coupling is one such example, and by utilizing the high electric field density in the pseudo two dimensions and the large dipole moment, it is possible to couple artificial atoms to the resonator with an intensity that is impossible in natural atoms.

In this thesis, we start from touching on the various theories of quantum mechanics necessary for understanding superconducting circuits, and discuss the fundamentals of circuit quantum electrodynamics. In addition, we will discuss the handling of noise, which is an unavoidable consideration when operating quantum systems. After that, we mainly discuss the experimentally implemented two ultrastrongly coupled systems.

First, we investigate the ultrastrong tunable coupler for coupling of superconducting resonators. The obtained coupling constant exceeds 1 GHz, and wide range tunability is achieved for both antiferromagnetics and ferromagnetics couplings, ranging from -1086 MHz to 604 MHz. The ultrastrong coupler is composed of rf-SQUID with dc-SQUID as tunable junctions, which connected to resonators via shared aluminum thin film meander lines enabling the observed very large coupling constant. The spectrum of the coupler clearly shows the breaking of the rotating wave approximation, and our circuit model treating the Josephson junction as a tunable inductance reproduces the experimental results well. The ultrastrong coupler is expected to be utilized in quantum annealing circuits and/or NISQ devices with dense connections between qubits.

Second, we report on an experimentally observed anomalous doubly split spectrum and its split-width fluctuation in an ultrastrongly coupled superconducting qubit and resonator. From an analysis of the circuit model Hamiltonian, we found that the doubly split spectrum and split-width fluctuation are caused by discrete charge hops due to quasiparticle tunneling and a continuous background charge fluctuation in the islands of a flux qubit. During 70 hours of spectrum measurement, the split width fluctuated but the middle frequency of the split remained constant. This observation indicates that the quasiparticles in our device mainly tunnel in one particular junction, as expected from the energy difference between quasiparticle states, during this 70 hours. The background offset charge obtained from the split width was found to have a $1/f$ noise characteristic. We also showed that the monitoring of the island gate charge of an ultrastrongly coupled system by single-tone spectroscopy is helpful for evaluating the behavior of quasiparticles.

論文審査の結果の要旨

本論文は、量子デバイスへの応用を視野に入れた、超伝導量子回路における超強結合系に関するものである。超強結合とは量子系同士の結合エネルギーが各量子系の遷移エネルギーの 10%を超える結合を指す。この現象を用いることで、よりスケーラビリティの高い量子回路が組めることや、より高速、高効率な量子ゲートを掛けられることがこれまで理論的に示唆されている。また量子光学的にも新しい領域であり、新たな量子現象の観測や、センシングへの応用も期待されている。

超伝導量子回路は、数 nm から数 100 μ m という量子系としては非常に大きなサイズ（巨視的量子状態）を持ち、回路故の高い設計自由度を活かして様々な基礎・応用研究に用いられてきた。超強結合系もその一つであり、電場密度の高さと、高い双極子モーメントを利用することで、自然原子では難しい強度で、人工原子と共振器を結合させることができる。

本論文では、まず超伝導量子回路を理解する上で必要な量子力学の諸理論に触れ、回路量子電磁力学の基礎事項について述べている。また量子系を操作する上で避けられない勘案事項であるノイズについて紹介し、超伝導量子回路の応用として、特に量子情報処理マシンについて概要を記した。同時に超強結合系の特性と、それをデバイスへ応用する諸提案についても紹介を行った。

本論文の主題として、2 つの超強結合系について特に詳しく調べている。1 つは共振器同士による超強結合である。超伝導量子回路で作製した 2 つの集中定数素子型の共振器を Superconducting quantum interference device (SQUID) にミアンダインダクタンスを介して直接結合することで、可変（強磁性から反強磁性）かつ反強磁性領域において超強結合を達成した。また本系では SQUID は量子性を持たない可変のインダクタンスとして扱ったが、論文の中で立てたモデルは実験結果を非常によく再現し、スペクトルの測定において明らかに回転波近似が破れることを示した。さらに回路上に存在するクロストークを考慮することで、より詳細に理論と実験の一致を確認した。これにより高い設計自由度を持つ共振器同士に強い結合を持たせることで、より複雑な量子回路が組めることが見込め、量子アニーリングマシンや現在実機の開発が急がれている Noisy intermediate scale quantum デバイスへの応用が期待される。また結合器を十分高速に変化させることでエンタングルメント状態の取り出しや、Fock 状態の生成なども利用可能と考えられる。

2 つ目は磁束量子ビットと共振器が超強結合した系における電荷ノイズの評価である。本研究では、超強結合故に、共振器を測定することで量子ビットに働くノイズを評価することができることを示唆し、これを用いて電荷ノイズの評価を行った。電荷ノイズが磁束量子ビットに働くと、エネルギー Spektrum が変化する。準粒子が Spektrum 測定より十分速い速度でジョセフソン接合をトンネルすることで Spektrum は分裂し、

超伝導アイランド環境電場が変化するとこの分裂幅が変化する。用いた量子ビットは、超伝導アイランドとジョセフソン接合がそれぞれ4つずつあり、スペクトルの分裂に影響するジョセフソン接合が3つ、分裂幅に影響する超伝導アイランドが2つ存在する。しかしながら実験結果から、準粒子が主にトンネルするジョセフソン接合はそのうち1つであり、環境電場が主に影響を与える超伝導アイランドも1つであることが確認された。このジョセフソン接合と超伝導アイランドは、準粒子トンネリングの前後での系のエネルギー変化を計算することである程度特定することができる。これによりこれまでいくつか報告されていた複数の接合を持つ量子ビットのスペクトルが2本にしか分裂しない理由を明らかになった。さらに磁束量子ビットの超伝導アイランドに働く環境電場揺らぎが $1/f$ の周波数依存性を持つことを初めて観測した。微視的なノイズの原因や挙動を明らかにすることは、今後ノイズを減らしていくために必要不可欠であり、次の量子デバイス作成における大きな指針となる。

本論文が博士（理学）の学位論文として十分に価値があるものと認められる。