

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 27 年度

研究開発課題名：

超伝導回路を用いた量子シミュレータ

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者：

中村 泰信

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

超伝導量子回路を用いて、強相関量子多体系・多体非平衡開放系の量子シミュレータを実現する。ジョセフソン接合を用いて実現される超伝導量子ビットは、離散的な量子準位を持つ人工量子 2 準位系である。これらを多数集積化し結合することで、多体系のモデルハミルトニアンを実装することが可能になる。量子ビットの大きな非線形性や強い相互作用を利用した人工量子多体系の相転移や、マイクロ波駆動やエネルギー散逸の存在のもとでの非平衡開放系のダイナミクスを調べることで、量子モデルの振る舞いに関する知見を従来の計算機よりも効率的に得ることを目的とする。

目標：サイト数 100 個の超伝導量子回路を用いた小規模強相関多体系・非平衡開放系シミュレータ回路の実現。

課題：均一性が高くコヒーレンスのよい量子ビットを集積化するための製造技術を確立する。量子シミュレータの理論的検討と回路設計を行い、回路の試作を行う。量子ビットの制御と読み出しなど周辺技術の実装も進める。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

ジョセフソン接合列または超伝導量子ビット列を用いた強相関多体系の量子シミュレーション

2次元ジョセフソン接合列上の量子化磁束集団を強相関系の量子シミュレータとして用いることを計画した。量子相転移、駆動場のもとでの非平衡量子相転移、励起および緩和ダイナミクスなどを、回路量子電磁力学の手法を駆使して検出することを目指す。外部印加磁場により、格子占有率を制御可能であり、また量子化磁束間の相互作用の強さやネットワーク構造も回路パラメータの設計により調節可能である。100×100 サイト程度への拡張は容易であると考えている。実験では、超伝導ソレノイドコイルを用いて空間的に均一な磁場が印加できるような無酸素銅製マイクロ波空洞共振器を制作した。その中に、SQUID 型のジョセフソン接合を持つ transmon 型超伝導量子ビットを置き、共振器のマイクロ波応答を介して磁場依存性を確認した。またポンプマイクロ波により量子ビットを電場駆動したときの dressed state の形成の様子も共振器のプロブマイクロ波に対する応答を通じて観測した。ジョセフソン接合列や超伝導量子ビット列の応答を調べるために必要な測定系の立ち上げが完了したといえる。

続いて、3×31 サイトの四角格子ジョセフソン接合列の両側に電極パッドを接続した試料を作製し、マイクロ波共振器中での応答の測定を開始した。外部磁場により各サイトにおける磁束量子の占有率を変化させながら、共振器応答を調べている。初期的な結果について 2-2 で報告する。

超伝導量子シミュレータに向けたマイクロ波量子光学ツールの拡充

回路量子電磁力学の手法のひとつの強みは、駆動場や出力場の非古典的性質を扱うことができることである。散逸エンジニアリング、熱浴エンジニアリングなどと呼ばれることもある。それを念頭に、

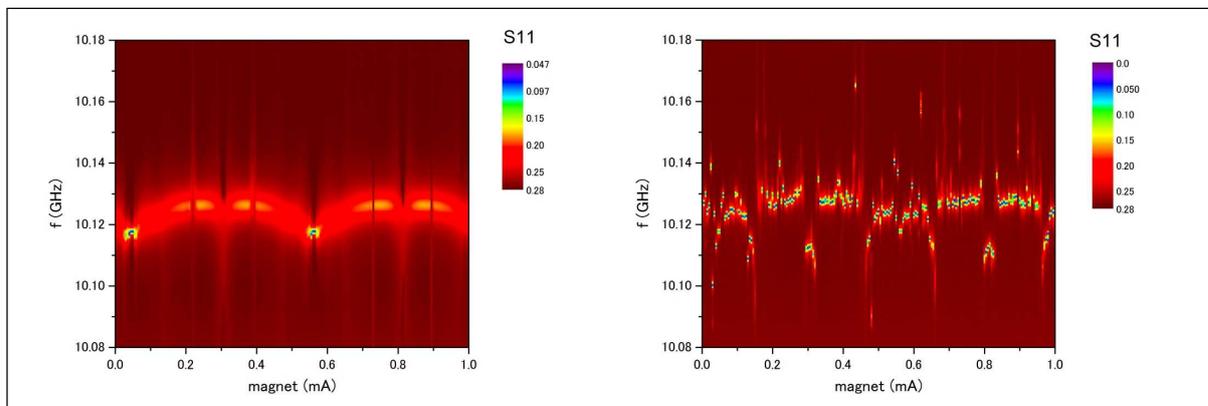
縮退ジョセフソンパラメトリック増幅器を用いたスクイーズド光生成と評価, ジョセフソンパラメトリック発振器の臨界性の理論的検討[●1], マイクロ波単一光子検出器の提案[●3, ●4]と実現[K. Inomata *et al.* arXiv:1601.05513 (2016)]などを行った.

2-2 成果

空洞共振器と結合したジョセフソン接合列のマイクロ波応答

3×31 サイトの四角格子ジョセフソン接合列を結合させた無酸素銅製マイクロ波共振器の応答を約 10 mK の低温環境において調べた. 接合列の長辺はそれぞれ大きい電極パッドによって短絡されており, その 2 つのパッドが双極子アンテナとして共振器内基本定在波モードの電場と結合する. また外部から接合列に垂直な磁場を印加しており, 磁場によって接合列の形成する格子の中の磁束量子の占有率を制御することができる. 磁束量子同士には斥力相互作用が働いている. 各接合におけるジョセフソンエネルギーと一電子帯電エネルギーの比の設計値は 3 倍ぐらいであり, 磁束量子の量子性が顕著に現れてくる領域を狙っている.

磁場の関数として, 共振器周波数周辺におけるマイクロ波の反射係数を測定したのが下の図に示す結果である. 磁場印加用のコイルに流す電流のスケールでおよそ 0.52 mA の周期的な応答が観測され, 接合列全体にわたる磁束量子の占有率の制御が実現していると考えられる. また 1 周期の 1/2, 1/3, 2/3 のあたりには特徴的な構造が現れ, 磁束量子の配置が格子に整合して規則化していることを示唆している. 左と右の図の違いは測定に用いたマイクロ波パワーであり, 右の方が 1 万分の 1 程度弱いパワーでの測定結果である. 弱パワー下ではさらに詳細な構造が見られており, これらについて解析中である.



2-3 新たな課題など

ジョセフソン接合列のマイクロ波応答には豊富な構造が見えることが分かってきた. 現在, 2 つの周波数のマイクロ波を用いて接合列の励起エネルギースペクトルも測定中である. これらを詳細に調べる上で, 制御すべきパラメータが多く, 測定の効率を上げるとともに, マシントイムの確保が重要である. またこれらの結果を理解し, 量子シミュレーションの実現に向けて有意義な議論をするためには理論解析が重要である. これについては引き続き理論家との議論の場を積極的に設けていく予定である.

3. アウトリーチ活動報告

該当なし.