

令和 6 年 6 月 1 4 日現在

機関番号： 8 2 6 2 6

研究種目： 研究活動スタート支援

研究期間： 2022 ~ 2023

課題番号： 2 2 K 2 1 2 9 4

研究課題名（和文）熱平衡下における仮想光子の実験的検出

研究課題名（英文）Vertial to real photon coversion in superconducting circuit

研究代表者

朝永 顕成（Tomonaga, Akiyoshi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・量子・AI融合技術ビジネス開発グローバル研究センター・研究員

研究者番号： 5 0 9 6 6 5 2 0

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000 円

研究成果の概要（和文）：超伝導回路を用いて作製した、capacitive shunted flux qubitとLC共振器をジョセフソン接合を介して結合することで、3準位原子-共振器相互作用を実現した。このスペクトルを回路モデルから解析することにより、確かに両者が超強結合領域で相互作用していることを確認した。またこのモデルを用いてシミュレーションすることにより、結合が3準位原子の中でバイアスを変化させることによって各準位との結合を変化させることができることが見られた。2量子ビットを共振器に超強結合させた系も作製し、その系において1光子による2原子同時励起の初めての実験的証拠を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超強結合系は、自然原子を用いて実現するのは非常に難しく超伝導回路による人工原子の双極子モーメントの大きさや回路故の電場密度の高さが可能にする量子電磁力学の新たなプラットフォームである。近年実験的に達成できる気運が高まっていることで様々な理論提案がされているが、実験的にそれらを確かめた例は数少なく、新しい研究分野と言える。今回超強結合が可能にする新しい物理現象の観測に取り組んだことにより、回路によってどの程度実現できるか、理論的に理想的なモデルと実験系がどの程度離れているかなど重要な知見を得たことでこの分野でさらに議論が活発化する足掛かりを作ったといえる。

研究成果の概要（英文）：We realized a three-level artificial atom-resonator interaction in ultrastrong coupling regime. The three-level artificial atom composed of capacitively shunted flux qubit which fabricated with superconducting thin film. By analyzing the spectrum using a circuit model Hamiltonian, we confirmed that both elements are indeed interacting in the ultrastrong coupling regime. Additionally, simulations using this model demonstrated that the coupling between each level of the three-level atom can be modified by changing the bias. We also constructed a system in which two qubits are ultrastrongly coupled to the resonator, and obtained the first experimental evidence of two atoms being simultaneously excited by a single photon in this system.

研究分野： 量子電磁力学

キーワード： 量子力学 量子コンピュータ 超伝導量子回路 マイクロ波量子光学

1. 研究開始当初の背景

コンピュータが生まれてから人間社会が持つ情報量は加速度的に大きくなっており、それに伴い、その情報を処理するための新しいデバイスの開発が求められている。この状況は少なくとも次の数十年に渡って変わることはないだろう。その新しい情報処理デバイスの候補の一つが、量子コンピュータである。量子コンピュータはこれまでの古典的な 0、1 の情報ではなく、中間状態を利用したアナログコンピュータであり、さらに量子もつれ状態、量子干渉効果を使って全く新しい原理で動作する。そして種々の問題において、古典コンピュータに対して計算能力が大幅に向上することが理論的に予測されている。一方で量子ビットが持つエラー率は依然として高く、実用化までには数多くの問題が残されていることも事実である。

今回本プロジェクトを始めるにあたって申請者が注目したのは、基底状態ですでに量子ビットと共振器が量子もつれ状態にある、超強結合系の利用である。量子コンピュータでは、この量子もつれ状態を用意することにハードルがあるため、基底状態としてすでに準備されているものが使えれば非常に効率が良いという試算である。超強結合は、量子ビットと共振器との結合エネルギーがそれぞれの固有エネルギーに対して 10% を超えるような結合系を指す。こうした系は、自然原子などでは通常起こらない特殊な状態であり、量子系をある程度自由にデザインできる超伝導量子回路においては新たなプラットフォームだといえる。とは言え、超強結合系が直接量子コンピュータに利用できるかと言えば、話はそう単純ではなく、理論・実験両面からこの生まれて間もないプラットフォームに対する更なる理解が必要であった。

2. 研究の目的

超強結合系では、基礎理論としていくつか特異な現象を観測することが期待されており、その一つがバーチャル光子のリアル光子への変換である。バーチャル光子というのは、量子ビットと共振器が強く結合しているために、系全体の固有状態をそれぞれの積状態としての測定基底を持ってきて観測すると、あたかも基底状態や、量子ビットの状態が光子を持っているように見えるということからその名がついている。これが机上だけの話であるとするとなんの数学的なトリックとして終わってしまうが、実際にこの光子変換が実験室で実現可能となると、全く新しい物理の発見であり新しい真空状態(仮想的に光子を持つ)のエンジニアリングが始まるといえる。本研究はこれを目指し、超伝導量子回路を用いて超強結合系の仮想光子検出に取り組んだ。

3. 研究の方法

仮想光子の検出方法はいくつか提案があるが、申請者が注目したのは 3 準位原子と共振器との超強結合を利用して、自発的に仮想光子を取り出す R. Stassi, et al, PRL, 110, 243601 (2013) の理論提案である。他にも原子と共振器との結合を直接 ON/OFF することによって結合分のエネルギーを取り出すというシンプルな方法も考えられるが、後者の方法では、結合という境界条件を直接操作することになるため、共振器の鏡を時間的に動かして真空から光子を励起するような動的カシミール効果と現象的には似ているように思われ、また原子のエネルギーを動かさずに結合だけ入り切りするのは操作としての難易度も高いと考えた。一方前者の方は、3 準位原子のうち、上 2 準位を共振器と強く結合しておくことで、原子を励起した後、基底状態へ落ちる過程で確率的にはあるが原子のエネルギーが自発的に共振器光子へと変換されて出てくるといった特徴がある。通常全く周波数が異なる原子の固有エネルギーが、共振器光子へと変換されることはないため、原子が仮想的に持っていた光子を放出しているとみることができる。ただこの現象は確率的に起こるため、光子生成などのデバイスとして使うためにはもう少し制御

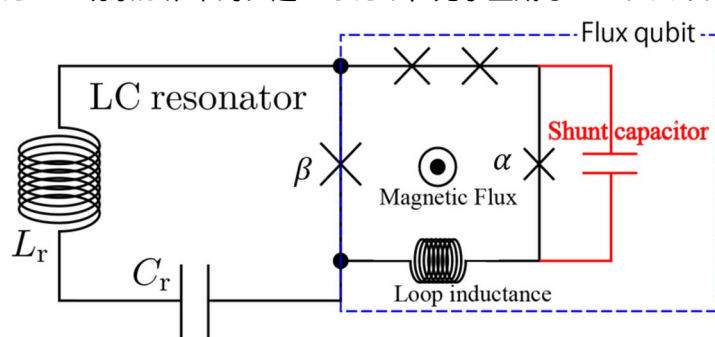


Fig. Designed circuit for virtual photon conversion

を工夫する必要があるが、基礎物理的には非常に新しい現象と言える。

そこで、左図のように超伝導回路を想定した 3 準位人工原子と LC 共振器との超強結合系を設計した。左の LC 共振器に対して、×印を含むループが磁束量子ビットを示しており、接合が両者間で大きな相互インダクタンスとして共有されており、これにより超強結合を達成する。さらに、赤色部分のように Shunt capacitor を導入することによ

り、量子ビットのエネルギー構造を調整し、3 準位目までが通常の超伝導回路計測器で測定可能な範囲である 30GHz 程度に収まるように設計している。これを元に、シミュレーションにより仮想光子への変換が可能であるかどうか、そして実際に作製と測定を行った。

4. 研究成果

最初に設計回路における、人工原子の各準位と共振器との結合をプロットしたのが次の図である。

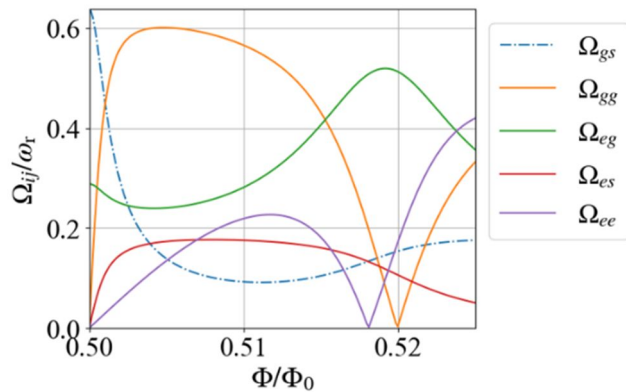


Fig. Coupling matrix elements plotted against normalized flux bias

の図である。ラベルは人工原子の下の準位から s, g, e とつけてある。図から人工原子への磁束バイアスが 0.52 付近で、eg 準位との結合が最大となり、s を含む準位とはあまり結合していない状況が実現している。これにより、人工原子をまず g 状態へ励起することで共振器と結合させ、そのあと自然緩和を待つと、原子のエネルギーが確立適に光子に変換されて出てくることが期待できる。

次に、この設計に基づいて実際に作製した回路が下図である。シリコンウェハー上に、Nb 薄膜で共振器やフィードライン、shunt キャパシタを作製し、ジョセフソン接合

は Al/AlOx/Al 接合で作製している。下図（右）は、この系のスペクトルの測定に回路モデルによるフィッティングを乗せたものである。スペクトルの測定は、共振器の共振周波数でトランスミッションラインの透過シグナルの強度をポンプラインからドライブ周波数 ω_d を入れながら見ている。

スペクトルとフィッティングの結果から、確かに人工的に 3 準位原子を作製し、共振器と超強結合させることに成功した。とはいえこのフィッティングは十分一致していると言える段階ではないため、より詳細な物理モデルの検討が必要である。またこのスペクトルの結果を踏まえて、人工原子を励起し共振器光子に変換される様子の測定を試みているが、放出される共振器光子のシグナルが非常に弱いことから 2023 年度までには予測したような光子変換は見えず、今後実験セットアップを見直して測定を行っていくことが課題となっている。本研究で用いた人工 3 準位原子と共振器の超強結合系は、量子コンピュータへの応用も期待されていることから、引き続き実験に取り組んでいく予定であり、データがまとまり次第論文として投稿する予定である。

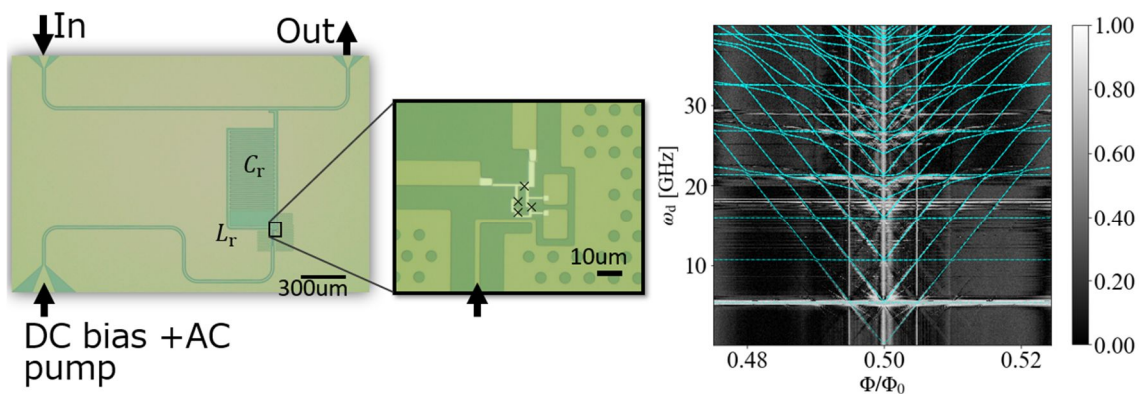


Fig. Optical microscope images of fabricated circuit and their spectrum

最後に、本研究を始めるにあたって最初に通常の 2 準位量子ビットと共振器の結合系を作製し、超強結合のテストを行った。この時、2 つの量子ビットを 1 つの共振器に超強結合させる系を試作したところ、超強結合の特異な量子現象の 1 つである 1 光子による 2 原子同時励起の最初の証拠となるエネルギーの交換を示すスペクトルを得た。通常 1 光子が割れることはないが、超強結合系が生み出す強い真空揺らぎを中間状態とすることであたかも光子が割れて 2 つの原子を同時励起することが可能となる。この現象も理論的に予測 L. Garziano, et. Al, PRL. 117, 043601 (2016) されてから 8 年間実験的証拠は見られていなかったものであるが、今回初めて示すことに成功しており、本成果は論文として投稿中である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1 . 発表者名 Akiyoshi Tomonaga
2 . 発表標題 Virtual to real photon conversion using C-shunt flux qubit
3 . 学会等名 36th International Symposium on Superconductivity (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Akiyoshi Tomonaga
2 . 発表標題 Ultrastrongly coupled device in superconducting quantum circuit
3 . 学会等名 第49回量子情報技術研究会
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Akiyoshi Tomonaga
2 . 発表標題 Two superconducting artificial atoms ultrastrongly coupled to a single mode resonator
3 . 学会等名 American Physical Society March Meeting 2023 (国際学会)
4 . 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6 . 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	スタッシー ロベルト (Stassi Roberto)	メッシーナ大学	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ノリ フランコ (Nori Franco)	理化学研究所 (82401)	
研究協力者	蔡 兆申 (Tsai Jaw Shen)	理化学研究所 (82401)	
研究協力者	向井 寛人 (Mukai Hiroto)	理化学研究所 (82401)	
研究協力者	吉原 文樹 (Yoshihara Fumiki)	東京理科大学 (32660)	
研究協力者	猪股 邦宏 (Inomata Kunihiro)	産業技術総合研究所 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	メッシーナ大学			