

令和元年6月12日現在

機関番号：12602

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05497

研究課題名(和文) 着衣状態エンジニアリングに基づく決定論的量子ゲートの開発

研究課題名(英文) Development of deterministic quantum logic gates based on dressed-state engineering

研究代表者

越野 和樹 (KOSHINO, Kazuki)

東京医科歯科大学・教養部・准教授

研究者番号：90332311

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：空間的に離れた量子ビット間にゲート操作を行うことは、分散型量子計算において必須の要素技術である。本研究では、マイクロ波光子と超伝導人工原子の間で動作する、2量子ビットゲートを提案した。本ゲートは、ゲート動作が光子の反射により決定論的に完了する、人工原子に照射するドライブ光によりゲートの種類をその場制御できる、という特長を有する。この原子-光子ゲートを連続的に作用させることで、空間的に離れた超伝導人工原子の間に様々な2量子ゲートをかけることができる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超伝導人工原子は、量子コンピュータ実現の最有力候補と目されているが、多数の人工原子を一か所に集めた集積化回路を用いて行う方法が現在の主流であり、配線の複雑化やそれに伴う漏話(クロストーク)が避けられない。それに相補的なアイデアとして、空間的に離れた量子ビット間を量子力学的に接続する「分散型量子計算」が提案されている。本研究成果は、超伝導人工原子系で分散型量子計算を遂行するための具体的手法を明らかにしたものであり、超伝導量子計算の実現可能性を拓げるものである。

研究成果の概要(英文)：Gate operation between remote qubits is an essential technological element in the distributed quantum information processing. In this project, we proposed a deterministic two-qubit gate between a microwave photon and a superconducting artificial atom. This gate has the following advantages: (i) the gate operation completes deterministically upon reflection of a photon, and (ii) the gate type can be continuously varied through in-situ control of the drive field. Applying such atom-photon gates sequentially, we can perform various gate operations between remote superconducting atoms.

研究分野：量子光学(理論)

キーワード：量子状態操作 マイクロ波量子光学 量子情報 超伝導回路 QED 着衣状態 量子ダイナミクス

1. 研究開始当初の背景

原子が導波路やファイバーなどの一次元光学系と強く結合した系は「導波路QED系」と呼ばれており、一次元系に特徴的な入射光と原子からの輻射との強い干渉効果に由来して、自由空間中の量子光学とは質的に異なる挙動を示すことが理論・実験の両面から明らかにされている。特に、 Λ 型の光学遷移を有する「 Λ 原子」が導波路モードに強く結合している系において、 Λ 原子の二つの輻射崩壊レートの等しい場合には、原子に共鳴する単一の入射光子が確率100%でラマン型遷移を引き起こし、原子の量子状態をスイッチする「決定論的単一光子ラマン遷移」が起こることが知られており、2014年にルビジウム原子を用いてイスラエルのグループによって実験的に確認された[Shomroni et al, Science **345**, 903 (2014)].

一方、超伝導人工原子により基板上にマイクロ波量子光学系を構築する「回路QED」系が、量子コンピュータ実装の有力候補として注目を集めている。超伝導人工原子は本質的には非線形調和振動子であるため、自然には Λ 原子を実現することはできない。研究代表者らは、過去の理論研究において、分散的に結合した超伝導原子-共振器系に、周波数・パワーを適切に調整したドライブ光を照射することによって、結合系の着衣状態を用いて Λ 型のマイクロ波遷移を実現するスキーム「着衣状態エンジニアリング」を提案した[Koshino et al, Phys. Rev. Lett. **111**, 153601 (2013)]. それを利用して、 Λ 系に単一光子を入射すると、反射後にその光子が決定論的に周波数変換を受けることを実験的に確認した[Inomata et al, Phys. Rev. Lett. **113**, 063604 (2014)]. これは回路QEDにおける、初めての決定論的単一光子ラマン遷移の実測である。また、回路QEDでは光子エネルギーがマイクロ波領域にあり、可視光領域の光子と比較してエネルギーが遥かに小さいため、単一光子検出技術が未開拓であった。研究代表者らは、決定論的単一光子ラマン遷移と超伝導人工原子の単一試行読み出しを融合させることによって、世界で初めてマイクロ波光子の高効率検出に成功した[Inomata et al, Nature Communications **7**, 12303 (2016)]. このゲートは時間ゲート型の検出器であり、高効率検出のためにはマイクロ波光子の到着するタイミングを予め知っている必要があったが、超伝導人工原子に2つの共振器を結合させることにより、連続的なマイクロ波光子検出へと拡張できることを提案した[Koshino et al, Physical Review A **93**, 023824 (2016)].

2. 研究の目的

前述のように、我々は回路QED系において世界で初めて決定論的単一光子ラマン遷移を実現し、マイクロ波単一光子検出へと応用した。本研究では、この現象を超伝導原子とマイクロ波光子間の2量子ビットゲートへと応用し、空間的に離れた複数の超伝導量子ビットをマイクロ波光子により量子力学的に接続する、分散型量子回路を理論的にデザインすることを目的とする。またこのような量子回路では、光子のルーティングを自在に行うための、ビームスプリッターやサーキュレータなどの光学素子も必要である。本研究では、分割比や伝播方向などをその場制御できる、小型のマイクロ波光学素子も併せて考案する。

3. 研究の方法

本研究は理論研究であり、導波路QED系の光学応答解析が主たる研究内容であるが、その具体的方法は次の通りである。①導波路QED系は、超伝導人工原子・共振器・導波路などにより構成される。それらの量子力学的ハミルトニアンを書き下す。②そのハミルトニアンからハイゼンベルグ方程式を導く。導波路の固有モードは波数の定まった状態であるが、フーリエ変換により実空間表示の導波路演算子を導入すると「入出力関係式」が得られる。これにより、導波路モードの無限自由度を直接取り扱う必要が省け、問題は原子および共振器からなる離散自由度系の開放系量子力学に帰着する。出力光の性質は入出力関係式により計算可能である。③導出したハイゼンベルグ方程式に対して、初期状態ベクトルで期待値をとり、各種物理量を数値的に計算する。

考案したデバイスの実現可能性や、理論で得られた知見の応用方法などについては、回路QED実験に実績の豊かな研究協力者と頻繁に議論を行った。

4. 研究成果

(1) 超伝導原子とマイクロ波光子間の2量子ビットゲート

考察の対象とするのは、超伝導人工原子と共振器が分散的に結合した系(図1)である。本提案では、原子-共振器系の4つの状態 $|g, 0\rangle$, $|e, 0\rangle$, $|g, 1\rangle$, $|e, 1\rangle$ を用いる。ただし、 g/e は原子状態を、0/1は共振器内光子数を表す。原子に適切なドライブ光を照射すると、状態 $|g, 0\rangle$, $|e, 0\rangle$ が混成されて着衣状態 $|\underline{1}\rangle$, $|\underline{2}\rangle$ を、状態 $|g, 1\rangle$, $|e, 1\rangle$ が混成されて着衣状態 $|\underline{3}\rangle$, $|\underline{4}\rangle$ を作る。この4準位系は図2(a)に示すような光学遷移を有しており、状態 $|\underline{i}\rangle$ から状態 $|\underline{j}\rangle$ への輻射崩壊レートを κ_{ij} と表す。この4準位系の特徴は、照射するドライブ光の周波数および強度により、崩壊レートの比を大きく変えられる点にある。

本提案では、光子量子ビットとして2種類の周波数を用い、原子量子ビットとしては着衣状態 $|1\rangle$, $|2\rangle$ を用いる。光子を原子-共振器系に反射させることで、2量子ビットゲートが遂行される。光子と原子の相互作用後に、光子量子ビットが2つの周波数状態で張る空間内に留まるためには、状態 $|1\rangle$, $|2\rangle$ のエネルギー差 $\Delta\omega$ が一定である必要がある。図2(b)はドライブ光の周波数と強度（ラビ振動数）の関係を表す図であるが、 $\Delta\omega = \text{const.}$ の条件は、赤色の曲線で表現される。この曲線上の点 P_{id} では本系はアイデンティティゲートとして動作し、光子や原子の状態は変化せずそのまま反射される。点 P_{sw} では本系はスワップゲートとして動作し、原子と光子の量子情報が交換する。また、点 P_{rs1} や点 P_{rs2} では本系はルートスワップゲートとして動作し、原子と光子の間に量子もつれを生成することができる。

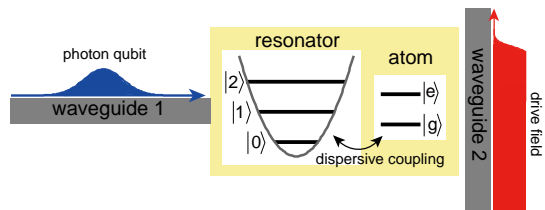


図1：セットアップの概略図。

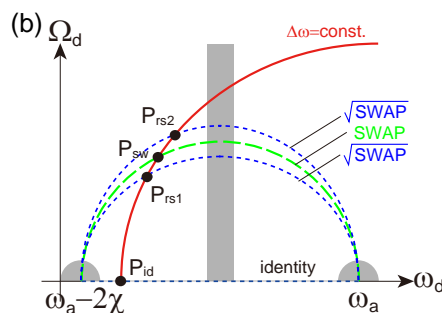
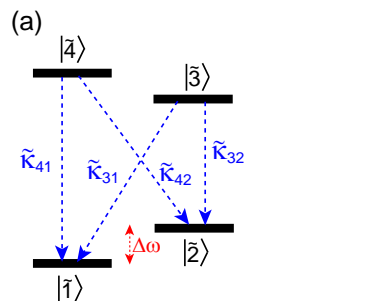


図2：着衣状態エンジニアリング。(a)着衣状態の準位構造。(b)様々なゲートを実現するためのドライブ条件。縦軸は強度、横軸は周波数。

(2) 離れた原子間の決定論的もつれ生成

上述の超伝導原子-共振器系を、図3に示すようにサーキュレータを介してカスケード的に繋ぐことにより、マイクロ波光子により量子力学的に接続された次元の超伝導原子ネットワークを構築することができる。ここではその応用の一つとして、離れた超伝導原子の間に決定論的に量子もつれを生成する方法を提案した。図3では二つの超伝導原子の初期状態は基底状態 $|1\rangle$ であり、原子1へのドライブ条件は図2(b)の点 P_{rs1} 、原子2へのドライブ条件は図2(b)の点 P_{sw} に設定する。ここに単一光子を入射すると、光子は原子1に反射されたのちに原子1と量子もつれを生じる。次に原子2に反射されると、光子と原子2との間で量子情報の交換がおこるので、結局原子1と原子2の間に量子もつれが生成される。出力光子は原子1、2ともつれていないため、原子間の量子もつれに影響がない。超伝導原子-共振器系の分散シフトが 75 MHz の場合には、共振器崩壊レートを 5.482 MHz、入射光子のパルス長を 1.584 μs と選ぶと最適になり、量子もつれ生成の忠実度は 0.983 に達する。

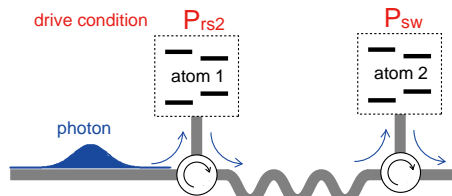


図3：離れた原子間の量子もつれ生成方法。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

① S. Masuda, S. Kono, K. Suzuki, Y. Tokunaga, Y. Nakamura, and K. Koshino, *Nonreciprocal microwave transmission based on Gebhard-Ruckenstein hopping*, Physical Review A (査読有) **99** (2019) 013816.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.013816>

② S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, Y. Nakamura, *Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon*, Nature Physics (査読有) **14** (2018) 546.

<https://doi.org/10.1038/s41567-018-0066-3>

③ S. Kono, Y. Masuyama, T. Ishikawa, Y. Tabuchi, R. Yamazaki, K. Usami, K. Koshino, and Y. Nakamura, *Nonclassical Photon Number Distribution in a Superconducting Cavity under a Squeezed Drive*, Physical Review Letters (査読有) **119** (2017) 023602.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.023602>

④ K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y. Tokunaga, T. Yamamoto, and Y. Nakamura, *Theory of Deterministic Entanglement Generation between Remote Superconducting Atoms*, Physical Review Applied (査読有) **7** (2017) 064006.

<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.064006>

⑤ K. Inomata, Z. R. Lin, K. Koshino, W. D. Oliver, J. S. Tsai, T. Yamamoto and Y. Nakamura, *Single microwave-photon detector using an artificial A-type three-level system*, Nature

〔学会発表〕 (計 26 件)

- ① K. Koshino, S. Kono, Y. Tabuchi, A. Noguchi, D. Lachance-Quirion, Y. Nakamura, *Breaking the trade-off between gate and relaxation times of a superconducting qubit with a Josephson quantum filter: Theory*, APS March meeting, 2019 年
- ② S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, D. Lachance-Quirion, Y. Nakamura, *Breaking the trade-off between gate and relaxation times of a superconducting qubit with a Josephson quantum filter: Experiment*, APS March meeting, 2019 年
- ③ Z. Lin, S. Masuda, K. Inomata, K. Koshino, T. Yamamoto, Y. Nakamura, *Real-time detection of an itinerant microwave photon using dressed-state engineering*, APS March meeting, 2019 年
- ④ J. Ilves, S. Yamazaki, S. Kono, Y. Sunada, M. Kim, K. Koshino, Y. Nakamura, *Generation of a microwave time-bin qubit with a superconducting qubit*, APS March meeting, 2019 年
- ⑤ S. Masuda, S. Kono, K. Suzuki, Y. Tokunaga, Y. Nakamura, K. Koshino, *Theoretical study of nonreciprocal microwave transmission based on Gebhard-Ruckenstein hopping*, APS March meeting, 2019 年
- ⑥ K. Koshino, K. Inomata, S. Kono, Z. Lin, T. Yamamoto, Y. Nakamura, *Detection of itinerant single microwave photons using superconducting qubits*, 18th Asian Quantum Information Science Conference, 2018 年
- ⑦ S. Masuda, S. Kono, K. Suzuki, Y. Tokunaga, Y. Nakamura, K. Koshino, *Theoretical study on microwave circulator based on Gebhard-Ruckenstein hopping*, 18th Asian Quantum Information Science Conference, 2018 年
- ⑧ S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, Y. Nakamura, *Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon*, APS March meeting, 2018 年
- ⑨ K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y. Tokunaga, T. Yamamoto and Y. Nakamura, *Tunable quantum gate between a superconducting atom and a propagating microwave photon*, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics, 2017 年
- ⑩ S. Kono, K. Koshino, Y. Tabuchi, A. Noguchi, Y. Nakamura, *Quantum non-demolition detection of an itinerant microwave photon using an entangling gate with a superconducting qubit*, International School and Symposium on Nanoscale Transport and photonics, 2017 年
- ⑪ K. Koshino, K. Inomata, Z. R. Lin, Y. Tokunaga, T. Yamamoto and Y. Nakamura, *Tunable quantum gate between a superconducting atom and a propagating microwave photon*, APS March meeting, 2017 年
- ⑫ K. Koshino, *Microwave single-photon detection using impedance-matched Lambda system*, Workshop on Quantum Information Science in Korea, 2016 年
- ⑬ K. Koshino, *Tunable quantum gate between a superconducting atom and a propagating microwave photon*, 8th international workshop on solid-state quantum computing, 2016 年

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称：非線形マイクロ波フィルタ
発明者：中村泰信, 河野信吾, 越野和樹
権利者：同上
種類：特許
番号：E128P05
出願年：2018 年
国内外の別： 国内

〔その他〕

研究室ホームページ

<http://www.tmd.ac.jp/artsci/physics/ikuzak/index.html>
プレスリリース「マイクロ波光子を吸収せず検出することに成功」
<https://www.rcast.u-tokyo.ac.jp/ja/news/release/20180313release.html>
プレスリリース「マイクロ波単一光子の高効率検出を実現」
http://www.riken.jp/pr/press/2016/20160725_1/

6. 研究組織

(1) 研究分担者

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中村泰信

ローマ字氏名：NAKAMURA Yasunobu

研究協力者氏名：猪股邦宏

ローマ字氏名：INOMATA Kunihiro

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。