	研究代表者	東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授 中村 泰信（なかむら やすのぶ） 研究者番号:90524083
	研究課題 情報	課題番号：22H04937 キーワード：超伝導、量子ビット、マイクロ波、量子光学 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

超伝導量子回路上における導波路量子電磁力学（導波路QED）は、マイクロ波量子光学の一端として回路量子電磁力学から派生し、特に1次元導波路上を伝搬するモードにおける量子状態の制御や観測に注目するものである。本研究では、マイクロ波伝搬モードに対する新たな量子状態制御・観測手法を開発し、量子情報処理や量子センシングへの応用可能性を探る。

●研究の背景

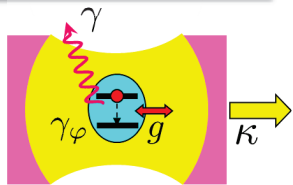
電子レンジや携帯電話通信に使われているマイクロ波も光と同様に電磁波の一種である。19世紀に誕生した電磁気学では電磁波は真空中でも伝わる電場と磁場の波として理解されてきた。一方で、20世紀に生まれた量子力学の世界では、個々の周波数の電磁場の励起は、周波数に比例した間隔を持つ飛び飛びのエネルギー状態を取り、そのエネルギー量子に相当する光子が生成された状態の量子力学的な重ね合わせが電磁波として伝搬していると説明される。それなので、例えば、光子検出器という装置を用いて微弱な電磁波を計測すると、光子1つ1つがランダムに飛んできていることが観測される。

このような電磁波の量子的な性質を研究する学問分野は量子光学と呼ばれ、レーザー研究の進展とともに、また原子と光の相互作用の研究などを通じて発展してきた。特に1980年代からは空洞共振器量子電磁気学という分野の研究が盛んになり、共振器に閉じ込められた光子と離散準位系としての原子が強く結合し、1光子と1原子の間の量子力学的な相互作用が観測されるようになった。

さらに2000年代からは、電気回路上で実現する超伝導量子ビット（あたかも原子のように離散的かつ非調和的なエネルギー準位を持つ回路）と超伝導共振回路を舞台とする、回路量子電磁力学（回路QED）の研究が開始され、共振回路中に閉じ込められたマイクロ波光子と超伝導量子ビットの量子状態制御や読み出し技術が飛躍的に向上した。この展開により、マイクロ波帯域における量子光学すなわちマイクロ波量子光学の研究が盛んになり、現在の超伝導量子コンピュータ研究の急速な進展の技術的基盤となっている。

導波路QEDについては2010年代初頭から研究が始まったものの、ここ数年でさらに急速に理論と実験が進展し、新たな展開を見せている。導波路上の「飛んでいる」光子の量子状態を制御することは、共振器中の「止まっている」光子の状態を制御することと本質的に異なる点が多く、新しいアイデアが求められている研究対象であると同時に、新しい技術や応用の可能性を拓くものである。

共振器内0次元モード



1次元伝送線路上伝搬モード

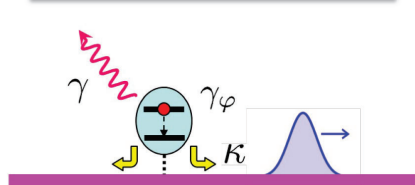


図1 マイクロ波量子光学の研究対象の典型的な構成。(a)共振器（回路）量子電磁力学：共振器に閉じ込められた（0次元の）光子と量子2準位系（量子ビット）の相互作用。結合強度g、量子ビットのエネルギー緩和率 γ 、位相緩和率 γ_ϕ 、共振器の緩和率 κ 。(b)導波路量子電磁力学：量子2準位系と1次元伝送線路上の伝搬モード中の光子の相互作用。ここで κ は量子ビットから伝送線路へのエネルギー緩和率を示す。

●研究の目的

導波路量子電磁力学のフロンティアを開拓すべく、本研究では以下のような問いに挑む。

- 超伝導回路上の1次元伝送線路上におけるマイクロ波伝搬モードに対する高度な量子制御・観測技術を実現するにはどのような方法が可能であり、どのように量子情報処理に応用できるか？
- 超伝導ジョセフソン接合の持つ非線形性を利用した量子ビットやパラメトリック増幅回路を駆使して、非古典的なマイクロ波伝搬モード状態を送信し受信するにはどうしたらよいか？

●研究の具体例

具体例として以下のような研究項目を計画している。

- ① 量子情報を保持する量子ノードが伝送線路上に多数接続された全結合型1次元量子ネットワーク
- ② 時分割モード間の量子もつれ状態生成と評価および量子フィードフォワード制御
- ③ ジョセフソン接合の非線形性を利用した伝搬型パラメトリック増幅器の開発と応用
- ④ マイクロ波単一光子検出器の量子センシングへの応用
- ⑤ 超伝導量子回路を利用したマイクロ波非相反素子など新規素子開発

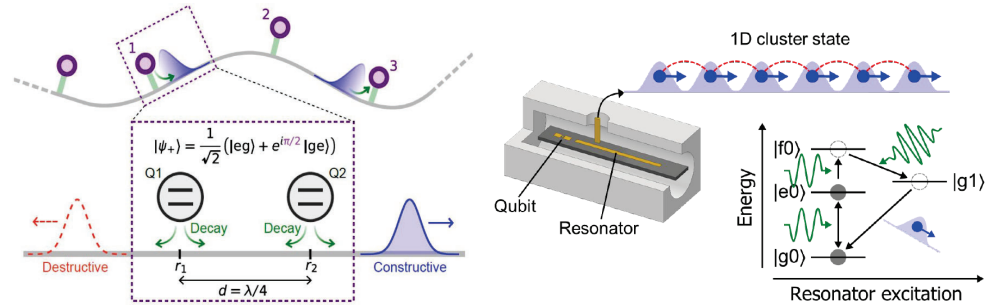


図2 1次元伝送線路と結合した2つの量子ビットで構成される量子ノードを多数配置した全結合型1次元量子ネットワークのモデル

図3 共振器中の超伝導量子ビットを用いた時分割モード上マイクロ波光子クラスター状態（量子もつれ状態の一種）の生成手法の例

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●超伝導回路上の導波路量子電磁力学の理解の深化と新規技術開発

超伝導量子回路を用いたマイクロ波伝搬モード上の量子状態に対する新たな制御・観測手法を開発し、量子情報処理や量子センシングへの応用可能性を探る。

●量子技術応用への貢献

導波路量子電磁力学さらにはマイクロ波量子光学の研究は、電磁波の量子状態を精確に制御・観測するという基本的な技術の開発に不可欠である。そのため、量子コンピュータや量子通信、量子センシングなど、様々な量子技術への応用が期待されている。例えば、超伝導量子コンピュータにおける量子ビットの制御や読み出しなど、量子コンピュータ動作の基本的な要素技術には、すでにマイクロ波量子光学の研究から得られた多くの知見が活かされている。今後も、量子コンピュータの研究開発におけるマイクロ波量子光学の役割は重要であると考えられ、量子コンピューティング技術の発展に伴い、社会的な課題の解決に役立つ量子コンピュータの実現に貢献すると期待される。量子センシングの分野でも、マイクロ波単一光子源・スクイズド状態光源やマイクロ波単一光子検出器など、従来の方式をしりぞく高感度計測につながる技術が実現されており、先端科学技術分野での応用が期待されている。