

# 単一光子による決定論的な量子状態スイッチング

越 野 和 樹 〈東京医科歯科大学教養部〉

猪 股 邦 宏 〈理化学研究所創発物性科学研究センター〉

中 村 泰 信<sup>†</sup> 〈東京大学先端科学技術研究センター〉

山 本 剛<sup>†</sup> 〈日本電気株式会社スマートエネルギー研究所〉

多数の量子ビットからなるスケーラブルな量子回路を動作させることは量子情報処理をはじめとする「量子状態工学」の究極の目標であり、空間的に局在した物質量子ビット間を、優れた量子コヒーレンスと伝播性をあわせ持つ光子によって量子的に接続することが、その自然な実装方法の一つであろう。ところが、個々の光子を原子などの物質量子ビットと効率良く相互作用させることは簡単では無い。例えば自由空間中の原子にひとつの光子を照射しても、ほとんどの場合光子は原子と相互作用せず素通りしてしまう。この原因は、照射光と原子発光の空間モード形状が著しく異なるためである。この困難を打破しうるのが「導波路 QED 系」と称される一次元的な光学系である。この系では、原子や人工原子からの発光がファイバーや導波路などの一次元モードへとほぼ完全に誘導される。よって、この系において一次元モードから原子へ励起光を照射すると、照射光と原子からの散乱光との空間モードが良く一致しているため両者は強く干渉する。その結果、光子が原子を「素通り」する確率振幅を消去し、光子と原子との相互作用効率を劇的に増強することができる。

本稿では、一次元的に伝播する光子が、 $\Lambda$ 型の許容遷移を持つ三準位系 ( $\Lambda$ 系) により反射される状況、特に  $\Lambda$ 系の二つの輻射緩和レートが等しい場合に着目する。このセットアップにおいて  $\Lambda$ 系に共鳴する光子をひとつ入射すると、 $\Lambda$ 系は必ずラマン型遷移を経てもう一方の量子状態へとうつり、入射光子はエネルギー保存を満たすよ

う周波数変換を受けたのち反射方向に出射されることが理論的に予言されている。これは、光子の周波数にエンコードした「光子量子ビット」と  $\Lambda$ 系の二つの基底状態にエンコードした「物質量子ビット」とが一回の反射によって交換すること、すなわちハイブリッド量子回路におけるメディア変換器や双方向量子状態メモリ (交換ゲート) への応用可能性を示唆している。

本稿では、超伝導量子ビットを人工原子、マイクロ波伝送線路や共振器を電磁場モードとして用いる「超伝導回路 QED 系」における上述の現象の観測を報告する。具体的には、離調の大きな原子-共振器系を外場によりドライブし、回転座標での固有状態である「着衣状態」により輻射緩和レートの揃った  $\Lambda$ 系を構成する。また  $\Lambda$ 系への入射波として、単一マイクロ波光子の代わりに微弱な定常マイクロ波を照射する。まず反射波の振幅を測定し、振幅がほぼ完全に消滅していること (減衰率 99.7%) を確認した。これは  $\Lambda$ 系による入射波の完全吸収 (インピーダンス整合) を意味している。次に出力場のパワースペクトルを測定し、入射光子の約 74% が周波数下方変換を受けていることを確認した。効率の不完全性は  $\Lambda$ 系の吸収飽和が主原因であり、単一光子の入射に対しては効率 100% の決定論的変換に近づくことが期待される。この過程は別の周波数の光子との相互作用なしにおける「線形光学」的な下方変換と言える。これらの測定結果は、単一のマイクロ波光子が超伝導量子ビットの状態を決定論的にスイッチすることを強く裏付けている。

## —Keywords—

### ラマン型遷移:

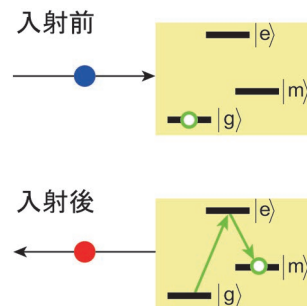
物質中に光を入射したときに、散乱光に入射光と異なる振動数の光が含まれる現象をラマン効果という。入射光子が系とエネルギーのやりとりを行って異なる振動数の光子に変換する遷移は、広くラマン型遷移と呼ばれる。

### 超伝導回路 QED:

超伝導細線を平行に並べると、同軸ケーブルと類似の回路ができて、理想的なマイクロ波の導波管を作製することができる。さらにこれを、別に作製した超伝導量子ビットと強く結合させることもできる。このような電磁場モードと小数準位系の系は、電磁場空洞 (キャビティ) 中の原子と似ており、超伝導回路 QED (Quantum Electrodynamics) と呼ばれる。

### 着衣状態:

周期外場下ではエネルギー固有状態と似た性質をもつ「準エネルギー固有状態」を定義することができる。このような状態を「着衣状態」と呼び、特に回転波近似を採用すると、「外場とともに位相が回転する基底」に基底変換することで、時間に依存しないハミルトニアンを導出でき、着衣状態はその固有状態として定義できる。



単一光子による  $\Lambda$  系のスイッチング

<sup>†</sup> 理化学研究所創発物性科学研究センター