

超伝導量子パラメトロン——測定と制御の理論

- 増田 俊平 <産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター，産業技術総合研究所 NEC-産総研量子活用テクノロジー連携研究ラボ shumpei.masuda@aist.go.jp>
- 山本 剛 <日本電気株式会社セキュアシステムプラットフォーム研究所，産業技術総合研究所 NEC-産総研量子活用テクノロジー連携研究ラボ tsuyoshi.yamamoto@nec.com>
- 川畑 史郎 <産業技術総合研究所新原理コンピューティング研究センター，産業技術総合研究所 NEC-産総研量子活用テクノロジー連携研究ラボ s-kawabata@aist.go.jp>

量子コンピュータの実用化に向けた研究が様々な物理系を用いた量子ビットを使って行われている。どの物理系にもそれぞれの長所、短所があり、どれが実用化に最も適しているか現時点で決定することはできない。超伝導量子ビットは人工的に性質（共振周波数や相互作用の強さなど）を設計可能という利点を持ち、実用的量子コンピュータの有力候補として期待されている。その中で超伝導量子パラメトロン（以降 Kerr Parametric Oscillator (KPO)）と呼ばれる超伝導量子ビットが最近注目され始めている（右の用語解説も参照）。

標準的な超伝導量子ビットのトランズモンと同じく KPO も共振現象により特定の周波数の光子を閉じ込める共振器である。トランズモンは光子が1つある状態とない状態（真空状態）を量子ビットとして用いるのに対し、KPO では2つの異なる位相をもったコヒーレント状態が安定に存在でき、この2状態を量子ビットとして用いる。量子ビットの性能を下げる要因として光子損失がある。コヒーレント状態は光子損失に対して安定であるためビット反転エラーが抑えられ、少ないオーバーヘッドで量子エラー訂正が行えることが期待される。これが KPO を用いる利点の一つである。

KPO は非線形振動子の性質を持ち、共振周波数の2倍の速さで振動するポンプ磁場で駆動される。動作原理はブランコと同じパラメトリック励振に基づいている（右図）。ブランコでは π 位相が異なる2種類の振動が可能であるが、それと同様に KPO では同位相と逆位相のコヒーレント状態が安定して存在する。古典的なブランコとの違いは両者の重ね合わせが可能なことである。

これまでに KPO を使った量子アニーリングマシンや誤り耐性汎用量子コンピュータの理論提案がなされており、少数量子ビットの実験も報告されている。しかし、KPO の基本的な評価・制御方法はまだ十分に確立していない。

例えば、ポンプ強度によって KPO のエネルギー構造が決まるが、ポンプ強度を実験的に直接測ることは難しい。先行研究ではポンプを一度切ってから KPO の状態を調べ、ポンプ下の KPO のエネルギー構造を間接的に求める手間の掛かる方法が使われていた。一方、他の多くの系では、電磁波を照射して反射・透過する光を測定するシンプルな分光法がエネルギー構造を求めために用いられている。

このような背景のもと、著者たちはポンプ下の KPO でも同じ手法が使えないだろうかと考え、KPO の反射測定の理論を構築した。この手間の掛からない測定方法は KPO のエネルギー構造やポンプ強度に加えて、KPO の準位間の結合強度を直接測ることも使えるので、KPO の制御に有用である。

別の課題として、ポンプ磁場がより高い振動数の項を同時に発生させてしまい、理想的な KPO のハミルトニアンからのズレが生じるという問題がある。量子コンピュータを実現するためには正確な状態の準備と制御が求められるため、このズレの影響を評価することは応用上重要である。著者たちは、この不都合な振動が KPO の状態準備や制御に及ぼす影響を定量的に調べた。さらに時間依存の離調（KPO の共振周波数とポンプ周波数の差）を使うことで状態準備における不都合な振動の影響を低減できることを示した。

用語解説

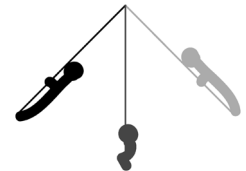
超伝導量子ビット：

KPO を含めて超伝導量子ビットはウエハ上にニオブやアルミニウムなどの超伝導体薄膜を微細加工することによって作製される。超伝導量子ビットの非線形性を実現するために通常、非線形インダクタであるジョセフソン接合が用いられる。

超伝導量子パラメトロン：

ここでは、非調和性のパラメータが光子損失率よりも大きなジョセフソンパラメトリック発振器のことを指す。このパラメータ領域のジョセフソンパラメトリック発振器は Kerr parametric oscillator (KPO) と呼ばれる。

パラメトリック励振とブランコ：



調和振動子のパラメータを共振周波数の2倍の周波数で変化させると振動が大きくなる。ブランコに立ち乗りした場合は1周期の間に2回屈伸していると振動が大きくなるだろう。これはブランコに乗る人の重心（実効的には振り子の糸の長さ）という振動系のパラメータを共振周波数の2倍の周波数で振動させているのである。同じ屈伸運動で位相が π 異なる2つの運動が実現しうる。