

プログラム名：量子人工脳を量子ネットワークでつなぐ高度知識社会基盤の実現

PM名：山本 喜久

プロジェクト名：量子シミュレーション

委 託 研 究 開 発

実 施 状 況 報 告 書 (成 果)

平成 27 年度

研究開発課題名：

非平衡アナログ量子シミュレーション超伝導量子ビットシステム

研究開発機関名：

国立研究開発法人理化学研究所

研究開発責任者：

蔡 兆申

I 当該年度における計画と成果

1. 当該年度の担当研究開発課題の目標と計画

アナログ型量子シミュレーションを行う超伝導量子ビットシステムの研究である。研究の対象は、強相関電子系と非平衡解放電子系であり、特に量子系の非平衡なアナログシミュレーションを行う。量子ビットシステムとして、超伝導量子ビットや超伝導共振器、各種のマイクロ波導波路を用いる。量子多体系のモデルや分子モデルを超伝導量子システムにより実現し、アナログ量子シミュレーションを行い、その結果を評価する。

2. 当該年度の担当研究開発課題の進捗状況と成果

2-1 進捗状況

分子振動スペクトルの量子シミュレーションを研究主題として目標に定め、研究を進める。これはボゾンサンプリングの手法により作り出される、古典コンピューターでは計算できない複雑な量子状態を利用する量子シミュレーションである。超伝導量子回路でボゾンサンプリングを実現するには、単光子源、単光子ディテクター、超伝導共振器、そして超伝導共振器同士を結合させる磁束量子ビットに基づく結合装置が必要である。プログラム可能な万能ボゾンサンプリング回路の実現に向けた研究を進める。アナログ計算機特有の計算精度、回路キャリブレーションの問題に対するエラー抑制とエラー訂正の可能性も検討を始める。

複雑な分子の振動スペクトルを古典コンピューターで得ることは、数百モード以上では困難である。この革新的な量子手法による分子の振動スペクトル量子シミュレーションは、複雑な分子の吸収、発光や光電子効果の予測につながり、分子の特性の特定に重要な意味を持ち、製薬などへの工業的なインパクト、天体科学などへの科学的なインパクトは広範囲で大きい。

超伝導量子回路でボゾンサンプリングを実現するには、単光子源、単光子ディテクター、超伝導共振器、そして超伝導共振器同士を結合させる磁束量子ビットに基づく結合装置が必要である。この内、超伝導共振器同士の結合以外は、すでに我々のグループで実現に成功している回路であり、これまでの研究成果との整合性はとてもいい。またオンオフ可能な超伝導の非線形結合器は、線形光学回路では不可能であった、プログラム可能な万能ボゾンサンプリング回路を実現可能にすることを特徴とする（線形光学回路では、鏡などの配置はプログラム困難）。

2-2 成果

実験的な研究成果を以下に述べる。一つの実験は、オンデマンドの単光子源（マイクロ波領域）の実現である（Z.H. Peng, J.S. Tsai, O.V. Astafiev, Arxiv: 1505.05614）。これは前記の超伝導量子回路におけるボゾンサンプリングでの、初期状態の Fock 状態の準備に必要な重要な要素である。この単光子源は、伝送線に直結しているので、一般的状況に対応できるオンデマンド単光子源である。周波数は可変で、磁場により約 6.7GHz から 9.1GHz まで変調可能で、効率は 75%程度と見積もられる。単光子性を示すアンチバンチング特性も観測されている。図 1 にこの回路の概略図と等価回路図を示す。

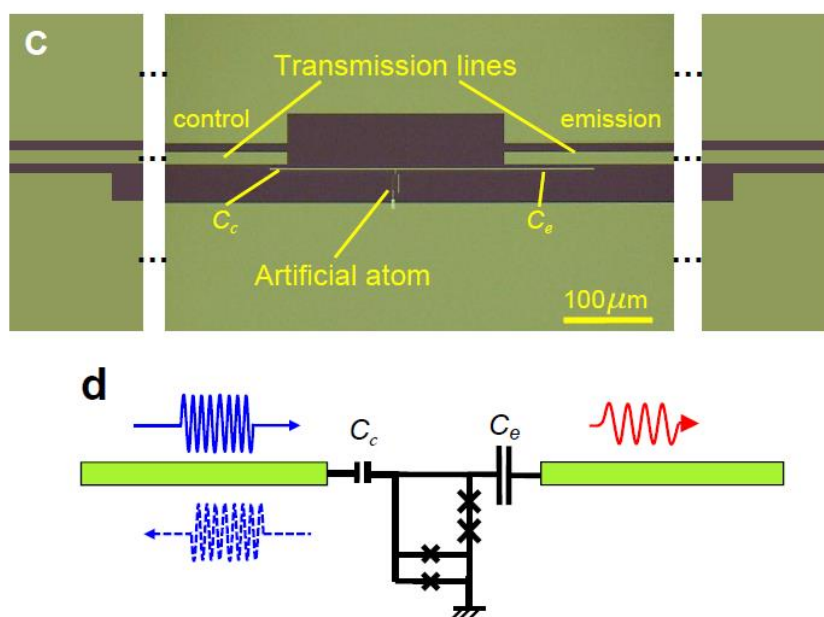


図1 概略図と等価回路図

もう一つの関連した実験は、超伝導ボゾンサンプリング回路でビームスプリッターの役割を果たす、二つの超伝導共振器コヒーレントに結合する回路である。このようなオンオフ可能な超伝導の非線形結合器は、ビームスプリッターを使った線形光学回路では実現が不可能であった、プログラム可能な万能ボゾンサンプリング回路の実現を可能にすることを特徴とする。この実験は超伝導3準位系と二つの共振器が結合した系での、関連したレーザー発振の観測である (Z.H. Peng, Yu-xi Liu, J.T. Peltonen, T. Yamamoto, J.S. Tsai, O. Astafiev, Phys. Rev. Lett., 115, 223603, 2015)。関連した線幅は大変狭く、Schawlow-Townes limit より4桁低いものを観測した。

同じくボゾンサンプリング回路の読み出しに必要で、他の光子ベースの量子情報処理にも応用可能な、単一マイクロ波光子の単事象検知器を超伝導量子回路で実現し、約76%の検出効率を確認した (K. Inomata et al, submitted)。

2-3 新たな課題など

ボゾンサンプリング回路関連の研究では、複数の単光子源、共振器と単光子源の結合器、単光子検出器を集積する必要がある。このようなコンポーネントをスケラブルに集積することが一つの課題になる。今後はこのような問題意識に立った実験の遂行を計画し、ボゾンサンプリングに基づく量子シミュレーション実現に向け、その構成要素の動作確認を進める。超伝導ボゾンサンプリング回路を更に展開し、複数の単光子源間を結合させることにより、単光子間にエンタングルメントを作り、量子クラスター演算を行う万能量子計算機に発展させることができる。そのような量子コンピューターのエラー訂正、スケラリングなどに関する理論的考察も行う。

3. アウトリーチ活動報告

北青山の TEPIA 先端技術館 (<http://www.tepia.jp/>) での「量子コンピュータ実現に向けた技術」の展示の作成に関与し、アテンダント向けの講演を行った。