

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 28 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。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。プログラム可能な万能ボゾンサンプリング回路を実現するには、単光子源、単光子計測、超伝導共振器、そして超伝導共振器同士を結合させる結合装置などの要素技術が必要である。今年度は、上記の要素技術の中でも最も重要な単光子源と単光子計測の実現を目標とする研究計画を立案した。

### 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

超伝導回路でボゾンサンプリングを行う鍵となるデバイスは、オンデマンドで単一光子の生成が可能な超伝導単光子源である。これは外部伝送線に非対称に接続された超伝導量子ビットである。一方の伝送線より励起  $\pi$  パルスで量子ビットに照射し、その後エネルギー緩和過程により光子がもう一方の伝送線に放出される原理に基づいている。生成される光子は、超伝導量子ビットのエネルギー帯域であるマイクロ波領域のものである。

超伝導磁束量子ビットを使ったオンデマンドの単光子生成実験において、2015 年度には単光子生成効率が約 75%程度、周波数変調は、磁場により約 6.7GHz から 9.1GHz まで変調可能であることを反射光の位相・振幅特性より観測していた。2016 年度は同様な回路において、単光子源である明確な証拠として Hanbury-Brown-Twiss 測定における光子間のアンチ・バンチングを観測し、成果を Nature Communication 誌に掲載した。

単光子計測に関しては、前年度に単光子による決定論的量子ビットの状態操作技術を発展させ、量子ビットの読み出しをすることで、高効率な単光子の計測に繋げた。その成果も Nature Communication 誌に掲載した。

#### 2-2 成果

今年度、磁束量子ビットを使ったオンデマンドで動作する単光子源を使った実験では、生成された光子の相関関数を詳しく調べる実験を行った。量子ビットより発生した光子を、ビームスプリッターにより分配し、この二つのチャンネルの相関を調べ、1 次の相関関数と 2 次の相関関数を得た。図 1 にこのように得られた 2 次の相関関数  $G_2$  を示す (Hanbury-Brown-Twiss 測定)。黒い線は観測された結果 ( $10^{10}$  回のトレースの平均) で、赤線はシミュレーション結果である。図のように、時間  $T$  で繰り返されている単光子のピークとともに、 $\tau=0$  でアンチ・バンチングを観測した。この結果は、われわれの単光子源が、高品質な単光子性を持ち合わせていることを明確に示している。光子の生成効率は、約 65%から 90%程度であった。

将来ボゾンサンプリング回路を動作するときに必要な非断熱的な量子ビットの操作を考えると、電荷型量子ビットの方が、磁束量子ビットを使うより回路構成がより簡単である。今年度我々は、

電荷型量子ビット（トランズモン）を使った単光子源も作成し、その性能を評価した。分光スペクトルと反射光の振幅・位相特性から、特に 7.5GHz 周辺で、約 85%と比較的高い単光子生成効率が観測された。

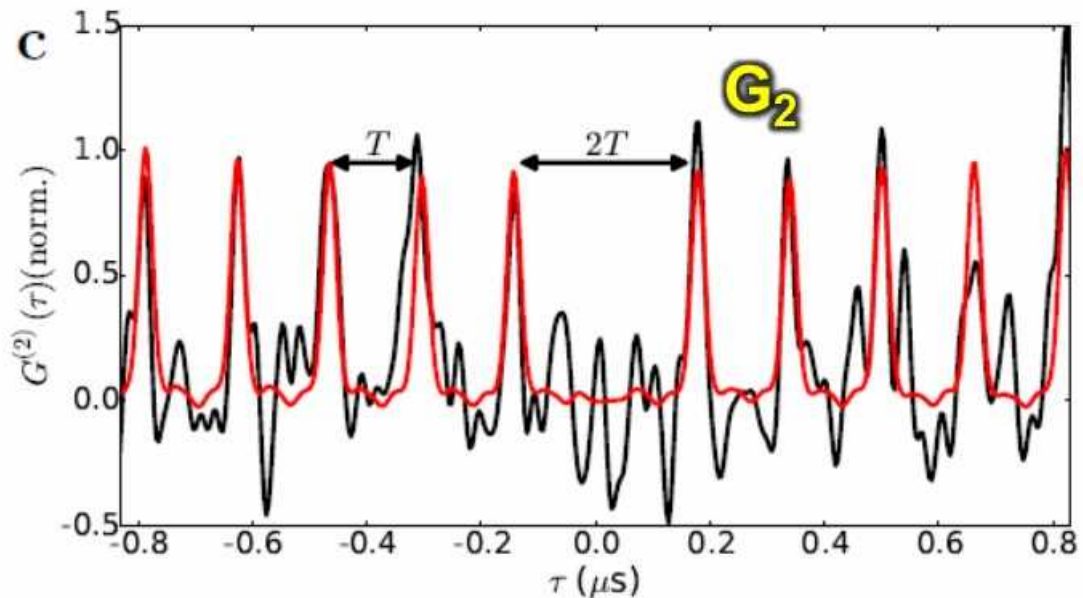


図1 単光子源を使った Hanbury-Brown-Twiss 測定でのアンチ・バンチング

ボゾンサンプリングを行うために、オンデマンド単光子源から共振器に光子を注入する必要がある。超伝導共振器と結合した単光子源を作成し、その特性を調べた。この実験には磁束量子ビットを使用した。この新規の回路では、量子ビットの3準位を使い  $0 \leftrightarrow 2$  転位を入射光で駆動すると、今までの原子物理で知られていた古典的 Aulter-Townes 分裂とは異なる、量子化 Aulter-Townes 分裂を分光実験により観測した。量子化 Aulter-Townes 分裂の観測は、たった一つの人工原子で構成される物理系では初めてである。この現象では、入射光の平均数が1以下の低いレベルになっても、量子化されたエネルギーの分裂が残る。このとき、量子化エネルギー分裂の大きさは、量子ビットと共振器の結合の大きさで定まる。

### 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。現在共振器を含めた超伝導集積回路のスケラリングの問題に取り組んでいる。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。

## 3. アウトリーチ活動報告

東京理科大学内で、高校生を対象としたアウトリーチング活動に参加した。「日本・アジア青少年サイエンス交流事業」さくらサイエンスプラン（2016/10/7）と、グローバルサイエンスキャンパス基礎コース（2017/2/19）である。