

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者

高柳 英明 (東京理科大学理学部第一部応用物理学科 教授)

主たる共同研究者

上田 正仁 (東京工業大学大学院理工学研究科 教授)

仙場 浩一 (NTT物性科学基礎研究所 主幹研究員)

島津 佳弘 (横浜国立大学大学院工学研究科 准教授)

3. 研究内容及び成果

本研究は、NTT 基礎研究所が永年培ってきた超伝導メソスコピックデバイスの作製技術、低温での低雑音測定技術の蓄積を活かし、数ある量子ビットの候補の中からスケーラビリティの優位性に注目し、微小な超伝導リングに3個のジョセフソン接合を配置したSQUID(超伝導量子干渉素子)を採用した2ビットの量子もつれ実現をめざしたもので、以下の研究成果を得た。

外部共振回路と磁束量子ビットとの巨視的量子もつれの実現(真空ラビ振動の観測)

光子との量子もつれは、従来、原子と光子などミクロな対象では知られており、原子が上準位にあり空洞共振器中の光子が0個(真空)の状態と、原子が下準位にあり空洞共振器中に光子が1個の状態、光子のエネルギーが原子準位のエネルギー差に近い場合、光子と原子は量子もつれを生じ、これらの2つの状態間を時間的に規則正しく振動することが知られている(真空ラビ振動)。インダクタンス( $L$ )とキャパシタンス( $C$ )とで構成される最も基本的な電気回路の一つであるLC共振回路が単一光子の共振器となりうることに注目し、LC回路を超伝導量子ビットと十分強く相互作用するよう同一チップ上に作製し、改良を重ね単一の光子と超伝導量子ビットが量子もつれ状態にあることを示す真空ラビ振動を観測することに初めて成功した。この結果は数百万個の電子から構成されるマイクロアンペア程度の超伝導電流が、単一光子と量子もつれ状態を形成可能であることを実証した成果である。

得られた真空ラビ振動の周波数は、リュードベリー原子を用いた場合の真空ラビ振動の約2800倍にも達したことから超伝導量子ビットは、原子に比べて約3桁以上もマイクロ波と強く相互作用する系であることが実証できた。

多光子過程を用いた量子ビットのコヒーレント操作(異なる波長の光子の組み合わせを用いたパラメトリック制御)

量子ビットのコヒーレント操作にはマイクロ波が用いられる。その場合2つの異なる波長のマイクロ波光子のエネルギーの和と差がエネルギー分裂に一致するとき、この2つの光子を用いた2光子ラビ振動が観測されることを見出した。この現象は理論的にも証明され、制御法としても有用であることがわかった。これはいわゆる量子ビットのパラメトリック制御であり、磁束量子ビットの制御法の新しい展開として重要な成果である。

位相偏移変調パルス法によるラムゼー縞の測定

量子ビット制御には、いわゆる1マイクロ波パルスを用いる回転ゲートと、2つのパルスを使うラムゼー縞法がある。従来の離調法によるラムゼー縞の測定を行うには、少なくとも離調周波数の逆数程度より長いコヒーレンス時間が必要といった制約があった。しかし、位相偏移変調された一対のパルスを用いれば、共鳴マイクロ波を用いたまま、離調を導入することなしにラムゼー縞の測定が可能であることを見出し、実際この方法を用いて高速に回転する量子ビットの自由歳差運動をストロボスコピックに観測することに成功した。

## 量子ビットにおける緩和過程の理解

量子ビットのデコヒーレンスの原因を探るために、量子ビットの最適動作点近傍における緩和過程の精密測定により、コヒーレンス時間を決定している緩和の評価を行った。最適動作点ではエネルギー緩和過程が、最適動作点から外れた最適動作点近傍では、 $1/f$  磁束ゆらぎが量子ビットのコヒーレンス時間を決定していることを明らかにした。

## 巨視的量子重ね合わせ状態間の多光子遷移の測定(多光子吸収・分光)

作成した磁束量子ビット素子では、超伝導電流の右向きに流れる状態と左向きに流れる状態間の重ね合わせによって、量子ビット状態にエネルギー分裂が生じる。このエネルギー分裂をマイクロ波を用いた分光法で確認し、吸収されたマイクロ波光子数が3個まで確認でき、実験から得られた1~3光子吸収の線幅に関する共鳴光強度依存性はベッセル関数で記述され、振幅の共鳴光強度依存性も含めた振舞いはプロッホ方程式と、衣を着たアトム描像を用いた理論と整合することを明らかにした。

## ラビ振動・多光子ラビ振動の確認

量子ビットとしての動作確認法で最も重要なラビ振動の確認で、マイクロ波強度を増加させた強励起条件下でも量子ビットのラビ振動を観測できるようにし、1~4光子過程までの多光子ラビ振動の観測に成功した。マイクロ波強度の増強とともに、ラビ振動数が増加から減少へ転じる様子も観測した。これらは、理想的なベッセル関数に従うことが明らかとなり、理論グループの研究成果とよく一致した。

## 4. 事後評価結果

### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

量子情報処理にとって基本要請である多ビット化へのスケールビリティ優位性をもつ超伝導磁束量子ビットに注目して進めた本研究で得られた科学的知見や基礎技術に関する成果は、英文論文 60 件、国際会議招待講演 46 件、口頭(ポスター含)発表 212 件(国内 118/国際 94)を通じて公開され、量子もつれの物理的理解と深耕に大きく貢献した。特許は国内 8 件を出願した。

主要な具体成果を挙げれば、まず LC 外部共振回路(1光子)との量子もつれ制御の成功があげられる。当初の計画は 2 つの量子ビットを磁氣的に直接結合させる方法であったが、柔軟な研究姿勢が功を奏したといえる方向転換により多くの成果を上げ、特に、多ビット化展開の際に重要となる拡張可能な多ビットゲート制御スキームの可能性を実証したものとして重要な成果といえる。

具体的な研究の背景と、本研究の成果の位置づけは以下のようである。

物質と光の基本的な相互作用を光子1個のレベルで取り扱う共振器量子電磁力学は、従来 Q 値が大きいシングルモード空洞共振器中の光子と二準位原子を使って研究されてきた。この原子を超伝導量子ビットに、空洞共振器中の光子を超伝導回路中のマイクロ波光子に各々置き換えて同様な実験が可能であると理論的には予想されていた。本研究成果が具体例の嚆矢となるもので、超伝導量子ビットとマイクロ波光子系の相互作用が、従来知られていた原子とマイクロ波光子の相互作用に比べて数千倍も強く共振器量子電磁力学実験に不可欠なゆる強結合条件を比較的容易に実現できるため、基礎研究はもとより、応用の面から見ても大変魅力的な系であることを示したことになり今後の進展が楽しみである。

量子もつれを自在に操ることを対象とする、このようなチップ上の超伝導回路を用いた共振器量子電磁力学実験や、本研究で得られた超伝導量子ビットを含むジョセフソン量子回路の位相緩和、エネルギー緩和からの知見、超伝導量子ビットのパラメトリック制御等の技術は、今後、超伝導量子回路を用いたコヒーレンス時間が長い人工原子の作製や、その特性をさらに洗練されたものにし、量子計算等の量子情報処理へと進歩させるために貢献できる基盤的な成果であると考えられる。

本研究は実験3グループ、理論1グループの連携で進められてきたもので、理論グループの成果は先駆的な実証成果に埋め込まれているが、そのほかの成果として可逆な測定の実験可能なモデルの構築と提案、可逆

性を応用した量子状態の修復法の提案、可逆な測定における情報量と状態変化の関係の考察などは、単に量子論の基礎論にとって意義深いというだけでなく、量子状態をより完全に制御するための技術の確立につながり、その結果として量子計算機の実現や量子暗号の高度化への将来貢献の期待がもたれる成果である。

ただ、グループ間の連携は見える形での成果につながったとは言いがたい点がチーム型研究としての反省点であろう。

以上まとめると、この超伝導磁束量子ビットは、巨視的量子状態を用いて量子ビットを構成するため、原子、分子等極微領域の対象を直接制御する必要がなく、ひとたびコヒーレンス時間の長い量子演算の基本素子作製に成功すれば、半導体微細加工技術を用いることが出来るため、量子コンピュータの真価が発揮される多量子ビットへの拡張を図る際に非常に有利であると考えられ、これまでの実験で得られた知見は試料設計に反映でき、結果として大きなコヒーレンス時間の改善が期待できる基礎固めができた点を評価する。

研究期間内に2つの量子ビットの古典的な結合の確認には成功したが、本研究の目指したSQUIDを介した2量子ビットの量子的結合にはいたってない。中間評価時点では可能性が見えていたが、一見克服したかに見えるアルミニウムのジョセフソン接合プロセスが再現性良く遂行できないなどの躓きが、最終成果につながっていない。しかし時間の問題で、早晩解決されると予測できる。

スケラビリティや半導体プロセス技術の水平展開など優位性のあるLC回路を介した2ビットゲート実現へ向けての研究をさらに加速し世界的な競争を今後もリードする研究活動を期待したい。

#### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本研究は、超伝導磁束量子ビットとLC共振回路を組み合わせた新しい共振器量子電磁力学の系を実験的に先駆けて示したことは、この系がスケラビリティの点で競争優位にあることや半導体デバイスプロセスを基盤技術として構築可能である点において量子情報処理という戦略目標実現の報告に向けた技術としてはもちろんのこと基礎科学技術の点でも貢献度は大きい。

ジョセフソン接合で構成した磁束量子ビットに関し基礎的な成果は世界的に見て高水準のものであり、特に多光子吸収によるラビ振動、外部共振器との間の量子結合の観察、真空ラビ振動の観察などはこの系が2キュービット間量子もつれを利用した量子演算の基本単位実現の有力候補であることを示したもので、その価値は大きい。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

インターネット上を走る情報量は累進的増加が止まらない。一方安全、安心の社会実現も大きな社会的要請である。現実に打てる手を打つとともに、現状の進化の先に求められる量子情報処理技術への取り組みも重要な戦略課題である。この分野でトップ集団にある本研究チームがさらに活躍の場を広げることが望まれる。幸いにしてこれまでのCRESTの研究成果を基にして、科研費特別推進研究「コヒーレント状態と固体量子ビットに基づく量子情報処理の研究」(研究代表者山本 喜久、平成18年~22年)の研究分担者として、大規模な量子コンピュータを実現するための基礎技術を確立することをめざし発展的に継続されることは大変意義深い。

先端研究の華やかさが目立つ分野であるが、現実にはノイズ低減ひとつとっても、泥臭いノウハウ蓄積あつての研究進展であることを体験した若い研究パワーの今後の活躍も楽しみである。