

2006年3月30日

科学技術振興機構（JST）  
日本電信電話株式会社

## マクロな超伝導電流と単一光子の量子もつれ制御に成功 (量子コンピュータのCPU構成法に道)

JST（理事長 沖村憲樹）と日本電信電話株式会社（NTT；本社：東京都千代田区、代表取締役社長：和田紀夫）は、超伝導材料からなる電気回路を流れる電流と、1個の光子とで形成された量子もつれ状態の制御に世界で初めて成功しました。量子もつれ状態の制御技術は、量子情報処理の基本として不可欠な技術です。従来、量子もつれは、原子と光子というミクロな系において観測されることは知られていましたが、今回の研究成果によって、電気回路を流れるマイクロアンペアというマクロな超伝導電流と光子の組み合わせでも量子もつれを実現可能であることが初めて実証されました。操作性の点でより有利なマクロな超伝導電気回路を用いて単一光子との量子もつれの制御に成功したことで、量子コンピュータの実現へ近づく一歩として注目されます。

本研究では、光子の共振器としてLC回路を採用し、超伝導電気回路（超伝導量子ビット）と十分強く相互作用するよう、同一半導体チップ上に微細加工技術を用いて作製しました。さらに、LC回路の光子のエネルギーに比べて十分低温で測定することによって、世界で初めて、光子と超伝導電流の量子もつれを示す真空ラビ振動と呼ばれる現象の観測に成功したものです。

実用的な量子コンピュータを実現するためには、複数の量子ビットを集積化してビット数を増やすことが必須です。今回考案されたLC回路と超伝導回路を用いる手法は、空間配置などのデバイス設計上の制約が少ないため、既存の半導体集積回路技術が活用でき、多ビット化のための研究に資するものと期待されます。これを契機に、夢の量子コンピュータの構成要素である次世代量子マイクロプロセッサ（CPU）素子の実現へ向けた研究開発の加速も期待されます。

この研究成果は、JST戦略的創造研究推進事業チーム型研究（CREST）の研究テーマ「超伝導磁束量子ビットによる量子もつれの実現（研究代表者：高柳英明）」（NTT物性科学基礎研究所・仙場浩一主幹研究員のグループと東京工業大学・上田正仁教授の共同研究）によって得られたもので、米国科学雑誌「Physical Review Letters」にて、誌面の掲載に先立ちオンライン版に2006年3月31日（米国東部時間）付けで公開されます。

## 【研究の背景と経緯】

アインシュタインが量子論に内在する不可思議な性質として指摘した「もつれた量子状態」[\(注1\)](#)は、最新の物理学でも、なぜこのような直感に反する奇妙な性質が存在するのかという根本的な説明はできていません。それでも今日では、従来の情報通信技術の限界を突破する技術として期待される量子情報処理の最も重要なリソースの一つとみなされ、積極的に活用され始めています。とりわけ、光子（光の量子）は、量子の情報のやり取りに最も適していると見られており、光子を用いた量子もつれの実現と制御技術の確立への期待が高まっています。

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実現可能なことが知られていました。[図1](#)のモデル図に表すように、原子のエネルギーが上準位（エネルギーの高い状態）にあり空洞共振器[\(注2\)](#)中の光子が0個（真空）の状態（ $|e,0\rangle$ と表す）と、原子のエネルギーが下準位（エネルギーの低い状態）にあり空洞共振器中に光子が1個の状態（ $|g,1\rangle$ と表す）は、光子のエネルギーが原子の上下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、これらの二つの状態  $|e,0\rangle$  と  $|g,1\rangle$  間を時間的に規則正しく振動することが知られています。この現象は、原子が上準位にあるときに電磁場が真空であることから、真空ラビ振動と呼ばれています。しかし、光は原子と通常は非常に弱くしか相互作用しないために、この現象を観測・制御するのは原子と光子というミクロな系においてさえ容易なことではありませんでした。

近年になり、微細加工技術を用いて超伝導体で形成した超伝導量子ビット[\(注3\)](#)と呼ばれる電気回路の電流状態が、量子力学に特有の性質を示すことが次第に明らかになってきました。超伝導量子ビットは光と強く相互作用する性質を持つため、理論的には、原子の代わりに超伝導量子ビットを用いれば、比較的容易に真空ラビ振動を観測できると言われていました。この現象を確認しようとする試みが、米国イエール大やオランダのデルフト工科大等の研究機関で進められて来ました。しかし、これまで明瞭な真空ラビ振動を観測した例はありませんでした。

## 【研究成果の内容】

本研究では、コイル（L）とコンデンサー（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回路が単一光子の共振器となりうることに注目しました。実験では、LC回路が超伝導量子ビットと十分強く相互作用するよう、同一半導体チップ上に、微細加工技術を用いて作製しました（[図2](#)）。さらに、極低温で測定[\(注4\)](#)することによって、LC回路中で励起される光子の数を極限にまで少なく抑えました。その結果、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

を観測することに成功しました。こうして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が実証されました。

[図3](#)は、量子ビットとLC回路中の単一光子系で観測された真空ラビ振動のパターンです。量子ビットを透過させる磁束を素早く変化させ、量子ビットのエネルギー準位差と光子のエネルギーが共鳴条件にある時間（量子もつれ状態にある時間）をコントロールすることによって、測定に成功しました。 $|e,0\rangle$ （量子ビット:励起状態, LC回路中光子数:0） $\leftrightarrow$   $|g,1\rangle$ （量子ビット:基底状態, LC回路中光子数:1）の2つの状態の間を規則正しく振動する（真空ラビ振動）様子が、観測されています。得られた真空ラビ振動の周波数は約140MHzでした。この値は、原子を用いた場合の真空ラビ振動50kHzの約2800倍にも達します。このことから、超伝導量子ビットは、原子に比べて約3桁以上も光と強く相互作用する系であることが実証されました。

## 【今後の展開】

今日の情報化社会を支える半導体産業に代表されるテクノロジーは、量子力学を活用することで発展してきました。一方、テクノロジーの進歩によって、従来思考実験しかできなかった単一量子系操作などが可能となったことで、量子力学に関する新しい知見が得られるという具合に、テクノロジーと量子力学とが互いに影響し合って発展を続けています。

1980年代、A.J.Leggett（レゲット）氏らによって提起された「重ね合わせや量子もつれに代表される量子力学に内在する不可思議な性質が、どの程度マクロな系にまで発現可能なのか？またどのような状況で発現できなくなるのか？」という量子力学に残された非常に本質的かつ基本的な問題に関する知見を得るために、超伝導量子ビットやLC回路のような、マクロな電気回路で構成された単一量子系を用いた量子力学実験を、今後も引き続き積極的に進めて行きます。

また、夢の量子コンピュータを実現するためには、複数の量子ビットを集積化してビット数を増やすことが必須です。従来の手法での多ビット化は技術的な見通しがたっていませんでしたが、今回考案されたLC回路と超伝導回路を用いる手法により、量子ビットの状態をコヒーレンス[\(注5\)](#)を保ったままLC回路の光子の状態へ移すことができるようになり、空間配置などのデバイス設計上の制約が少なく、既存の半導体集積回路技術を活用し多ビット化できるようになるものと期待されます。これを契機に、夢の量子コンピュータの構成要素である次世代量子マイクロプロセッサ（CPU）素子の実現へ向けた研究開発の加速も期待されます。

## 【用語解説】

注1) 量子もつれ (entanglement : エンタングルメント) :

複数の粒子間に量子力学的な相関がある状態。量子もつれ状態にある2つの光子(電子、量子ビットなど)では、片方の状態が決まるともう一方の状態もそれに応じて決まり、その関係は粒子間の距離に依存しないといった特異的な性質である。これを応用した量子計算、量子テレポーテーション、量子暗号などが研究されている。

注2) 空洞共振器 :

電磁場(光子)を閉じ込める容器。クオリティの高い空洞共振器には光の最小単位である光子を1個、2個のレベルで閉じ込めることができる。

注3) 超伝導量子ビット :

超伝導体を用いて作製された量子二準位系。ここでは、図2左図の拡大図に示す超伝導磁束量子ビットを指す。実際には、ナノメートルオーダの極薄絶縁体をサンドイッチした構造のジョセフソン接合と呼ばれる素子を複数個含んだ超伝導電気回路。

注4) 極低温で測定 :

実験で用いたLC回路の共振周波数は、4.35GHzであり、これは、温度に換算すると約0.2Kに相当する。測定は、希釈冷凍機システムを用い0.02Kの低温で行われた。この温度では、LC回路に共振量子(光子)が熱的に励起される確率は非常に小さいため、LC回路は、基底状態(共振量子の真空)にあると考えられる。

注5) コヒーレンス :

互いに干渉することができる波動の性質(可干渉性)を示す用語で、ここでは、量子状態が干渉を示す強さを定量的に表わします。一般にコヒーレンスは外部由来のノイズによって時間と共に指数関数的に失われていきます。

## 【論文名】

”Vacuum Rabi oscillations in a macroscopic superconducting qubit LC oscillator system”

「マクロな超伝導量子ビットLC振動子系の真空ラビ振動」

## 【研究領域等】

JST戦略的創造研究推進事業チーム型研究(CREST)

研究課題名 : 新しい物理現象や動作原理に基づくナノデバイス・システムの創製

研究総括 : 梶村 皓二 ( (財)機械振興協会 副会長・技術研究所 所長)

研究期間 : 平成14年11月~平成19年10月

[図1. 真空ラビ振動の説明図](#)

[図2. 実験に用いたアルミニウム製の電気回路（左図）とその等価回路（右図）](#)

[図3. 観測された真空ラビ振動（左図）と、複合系の準位模式図（右図）](#)

### 【お問い合わせ先】

金子 博之

独立行政法人科学技術振興機構  
戦略的創造事業本部 特別プロジェクト推進室  
〒332-0012埼玉県川口市本町4-1-8  
Tel: 048-226-5623 Fax: 048-226-5703  
E-mail: hkaneko@jst.go.jp

住本 研一

独立行政法人科学技術振興機構 総務部 広報室  
〒102-8666 東京都千代田区四番町5-3  
Tel: 03-5214-8404 Fax: 03-5214-8432

為近／甕(もたい)

NTT先端技術総合研究所 企画部広報担当  
〒243-0198神奈川県厚木市森の里若宮3-1  
Tel: 046-240-5152  
<http://www.ntt.co.jp/sclab/contact>

NTT ニュースリリース 