

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分  
平成28年3月23日現在

巨視的量子系を用いた量子物理

Quantum Physics with Macroscopic Quantum Systems

課題番号：25220601

仙場 浩一（SEMBA KOUICHI）

国立研究開発法人情報通信研究機構・未来 ICT 研究所・上席研究員



研究の概要

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(cavity-QED)において、原子を巨視的人工原子で置き換えた(回路-QED)実験により、桁違いの相互作用(g)を実現し、光/物質 強結合系の研究に新生面を切り拓く。得られた知見は、量子情報処理へ応用する。

研究分野：総合理工

キーワード：原子・分子、超伝導、スピン物性、量子エレクトロニクス、量子情報

1. 研究開始当初の背景

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いわゆる cavity-QED は、従来 Q 値の大きなシングルモード空洞共振器中の光子およびその光子とエネルギー的に共鳴条件にある一対の準位を有する原子という組み合わせを用いて行われてきた。この原子を巨視的量子系である超伝導人工原子に、空洞共振器を超伝導共振回路にそれぞれ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(回路-QED 実験)。それが近年、実験で実証された。私達は、超伝導人工原子とマイクロ波光子の相互作用は、従来知られていた巨大な双極子モーメントをもつリュードベリ原子とマイクロ波光子の場合に比べ、更に3桁以上も強大であることを実証してきた。

2. 研究の目的

原子を巨視的人工原子で置き換えた回路-QED 実験により桁違いの相互作用(g)を実現し、光・物質 強結合系の未踏領域を切り拓き、新たな物理現象の探索に挑戦する。

また、人工原子系の特徴である高い制御性を活かして、巨視的人工原子多体系における量子相転移の制御に繋がる知見の獲得を目指す。下記の2つが具体的な目標である：

2-1 深強結合域で現れると予想されている、シュレディンガー猫状態に代表される非古典的なエネルギー固有状態の実現

2-2 超強結合系量子相転移の観測および制御

3. 研究の方法

深強結合する物理系として、マイクロ波超伝導共振器、集団電子スピン、LC プラズモン等を想定し、アルミニウム製の超伝導人工原子(flux-qubit)と調和振動子が結合した試料を半導体微細加工技術を用いて NICT あるいは NTT クリーンルームで作製する。相互作用に関しては、深強結合まで制御可能な設計とする。次に flux-qubit のバイアス磁場を非常に精密に制御しつつ、希釈冷凍機温度で、緩和時間あたりの平均光子数が1程度の微弱光レベルでの伝送特性の測定から結合系の遷移スペクトルを測定する。得られた測定結果は、共同研究提案者 S. Ashhab 博士らの理論 Qubit-oscillator systems in the ultrastrong-coupling regime and their potential for preparing non-classical states, Phys. Rev. A81, 042311(2010). に基づいて解析を行う。量子 Rabi モデルを用いた遷移スペクトルの解析と物理的解釈が得られた後にダイナミクスの測定と解析に移行する。

超強結合～深強結合へのもう一つのアプローチである、Dicke 状態での集団増強効果を利用する方法に関しては、多数個の flux-qubit とマイクロ波共振器、または多数個の固体中電子スピン(NV ダイアモンド、分子マグネット)とレーザ、あるいは、flux-qubit 系との強結合実験を試みる。結果の解析→試料設計へのフィードバック→測定→解析→試料→・・・のループを繰り返す。

#### 4. これまでの成果

超伝導人工原子(flux-qubit)・LC プラズモン系に於いて、相互作用エネルギーが結合系の最大エネルギーであるような深強結合(Deep Strong Coupling : DSC) 領域を初めて実現し DSC 系の遷移スペクトルの分光解析に成功した。巨視的量子系を使えば質的に全く新しい基底状態をも実現可能であることを示す画期的な成果が得られた[1]。吸収スペクトルの解析からは、DSC 領域の基底状態を含む結合系のエネルギー固有状態は、qubit 状態とプラズモンの displaced Fock 状態とで構成される Schrödinger 猫状態であるという理論解釈が支持される。しかも、この状態は、スペクトル測定で観測可能な程度には外乱に対し耐性があることが判明した。これは 物質・電磁場系 の新奇な基底(真空)状態を実現した初の例である。

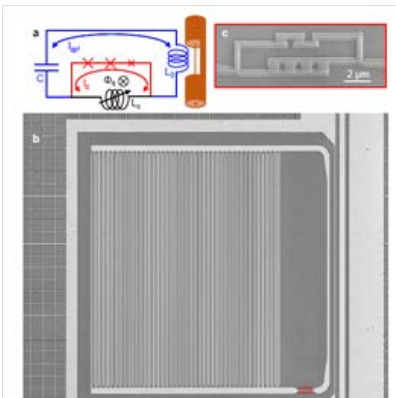


図1 超伝導人工原子(flux-qubit)-LC 共振回路 a.回路模式図 b. 全体像 赤枠内が c. 磁束量子ビットと結合インダクタンス部

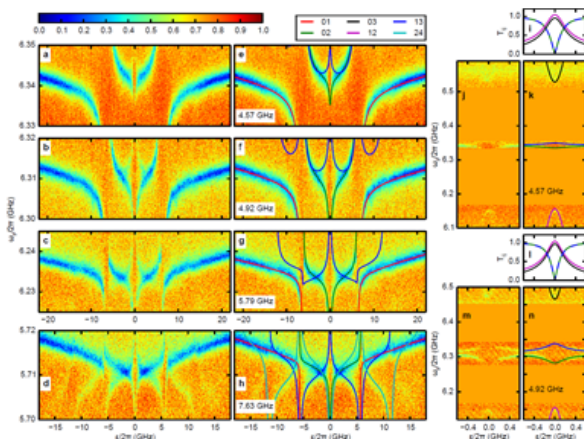


図2 結合強度を系統的に変えた試料での透過スペクトルの磁場(横軸)、周波数(縦軸)依存性 e,f,g,h は測定結果 a,b,c,d に理論フィット(Rabi モデルに基づく吸収線)を重畳したもの。図左下の数字は解析から得られた相互作用係数  $g$  値。l,k, m,n は2試料について、最適磁束バイアス( $e \sim 0$ )付近広い周波数範囲でのスペクトルおよび理論解析。

#### 5. 今後の計画

残りの2年間で、時間領域測定系と JPA 量子極限増幅技術を希釈冷凍機測定系に実装する。これらを用いて「光/物質 深強結合系シュレディンガー猫状態」について量子相関を示す実験的証拠を蓄積する。また、この新奇な状態について、仮想光子(プラズモン)数を一つの尺度として、量子相転移(超放射状態)が生じるパラメータ範囲を特定する。

並行して、本計画内で作製に成功した N-V 軸が1方向のみに揃った NV ダイヤモンド[3]を用い、レーザ光あるいは超伝導人工原子と組み合わせることにより、本計画理論グループの成果[5]であるスピン集団の非古典的状态の生成方法の実現を試みる。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] \*F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba, Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime, [arXiv:1602.00415](https://arxiv.org/abs/1602.00415) [quant-ph],(2016).

[2] \*K. Semba, F. Yoshihara, J. E. S. Johansson, X. Zhu, N. Mizuochi, William J. Munro, S. Saito, K. Kakuyanagi, and Y. Matsuzaki, Superconductor-Diamond Hybrid Quantum System, *Principles and Methods of Quantum Information Technologies*, Springer, Lecture Notes in Physics 911, 515-538,(2016). Editors Y. Yamamoto & K. Semba

[3] T. Fukui, Y. Doi, \*N. Mizuochi et al., Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy center in diamond, *Applied Physics Express* 7, 055201-1~4 (2014).

[4] \*Y. Matsuzaki, K. Kakuyanagi, N. Mizuochi, K. Nemoto, K. Semba, S. Saito, et al., Improving the Coherence Time of a Quantum System via a Coupling to a Short-Lived System, *Phys. Rev. Lett.* 114, 120501-1~5 (2014).

[5] \*Emi Yukawa, G. J. Milburn, C. A. Holmes, Masahito Ueda, and Kae Nemoto, Precision Measurements Using Squeezed, Perfect selective alignment of nitrogen-vacancy centers in diamond, *Phys. Rev. A* 90, 062132-1~6 (2014).

[6] Kouichi Semba, Challenges & Trends of Quantum Information Technology in Japan, The 1st Japan-Canada IT Symposium, Oct 9, 2013, Embassy of Canada, Japan. (招待講演)

ホームページ等  
<http://www.nict.go.jp/frontier/mqp/index.html>