

### 3.6.7 未来 ICT 研究所 巨視的量子物理プロジェクト室

室長 仙場浩一 ほか3名

#### 巨視的量子系の研究を通じて、未来の ICT に役立つ 新原理・新現象 の開拓を目指す

##### 【概要】

半導体産業の発展を支えてきたサブミクロン領域での微細加工技術を用いて、天然の原子とは異なる固体素子製の様々な単一量子系（量子二準位系：qubit）が創られ、その量子状態の観測やコヒーレント操作が可能となっている。従来のように、多数個の集団の平均量を観測するのではなく、単一の量子系の量子状態を観測し制御する必要がある。我々は、超伝導体アルミニウムで作製した微小ジョセフソン接合を含む電気回路を使い、単一量子系を準備した。この巨視的な超伝導人工原子を使えば、天然の原子と光子の結合に比べて、1万倍以上も強い結合、さらには光子自体のエネルギーよりも結合が強い状況（深超強結合）も実現可能と考えられており、新現象・新原理の発見が期待できるこの未開拓の分野は注目されている。マイクロ波光子系と強結合した超伝導人工原子系で生じる量子レベルの現象の精密制御を研究する「回路量子電磁力学」や、超伝導人工原子系を電子スピンなどの異種マイクロ量子系と結合させた「ハイブリッド量子系」で発現する現象を量子1個のレベルで解き明かす研究を通じ、未来の ICT に役立つ新原理・新現象の開拓を目指している。

平成 27 年度は、①超伝導磁束量子ビット・LC 共振回路 強結合試料の作製、②超伝導人工原子・LC プラズモン超強結合系の遷移スペクトルの観測と理論解析、③パラメトリックドライブされた非線形超伝導共振回路の新奇現象の測定及び④ジョセフソンパラメトリック増幅回路の作製とその特性評価を行った。

##### 【平成 27 年度の成果】

超伝導人工原子・LC プラズモン系において、相互作用エネルギー ( $\hbar g$ ) が結合系の最大エネルギーである深超強結合 (Deep Strong Coupling : DSC) を初めて実現し DSC 系の遷移スペクトル分光解析に成功した。この結果は、質的に全く新しい「物質と電磁場がもつれた基底状態」が、巨視的量子系を使って実現できることを示している (arXiv:1602.00415v1, APS March Meeting2016, 応物学会招待講演で発表)。

用いた試料では図 1 に示すように、超伝導人工原子と超伝導 LC 回路の共有部分に SQUID 型の並列ジョセフソン接合を設け相互作用エネルギーの格段の増強を図った。相互インダクタンス部のこの構造により、同一試料について、印加磁場を変えることで相互作用エネルギーを系統的に変えられる。超強結合過程をも記述可能なハミルトニアン (1) を用いて、DSC 系の透過スペクトルの解析を行ったところ、結合系の遷移スペクトル構造を説明する良好な結果を得た (図 2)  $\Delta / 2\pi = 1.31$  GHz、 $\omega_o / 2\pi = 6.20$  GHz、 $g / 2\pi = 5.22$  GHz。用いたハミルトニアン (1) の第 1 項は超伝導人工原子 (qubit)、第 2 項は LC プラズモン、第 3 項は相互作用エネルギーを表す。

$$\mathcal{H}_{\text{total}} = -\frac{\hbar}{2}(\Delta\sigma_x + \varepsilon\sigma_z) + \hbar\omega_o(\hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{1}{2}) + \hbar g\sigma_z(\hat{a} + \hat{a}^\dagger). \quad (1)$$

本研究によって新たに得られた知見及び学術的なインパクト：

(知見 1) 許容・禁制 遷移を説明可能な吸収スペクトルの解析からは、DSC 領域の結合系のエネルギー固有状態は、基底状態でさえも qubit 状態とプラズモンの Fock 状態とで構成されたもつれた量子状態であるという理論解釈が支持される。しかも、これらの状態は、スペクトル測定で観測可能な程度に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状態が実現されたことを示唆する最初の実験結果である。

(知見 2) 回路設計により、超伝導系で従来報告されていた超強結合領域 ( $g / \omega_o \sim 0.1$ ) よりも一桁強結合の DSC 領域 ( $g > \text{Max}\{\Delta, \omega_o\}$ ) が実現できることを実験で示した。 ( $0.72 < g / \omega_o < 1.34$  かつ  $g \gg \Delta$ )

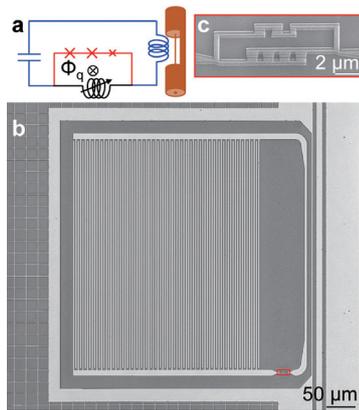


図1 超伝導人工原子(磁束量子ビット) LC共振回路 a.回路模式図 b.全体像 赤枠内が c. 磁束量子ビット 及び可変インダクタンス部分のSEM写真

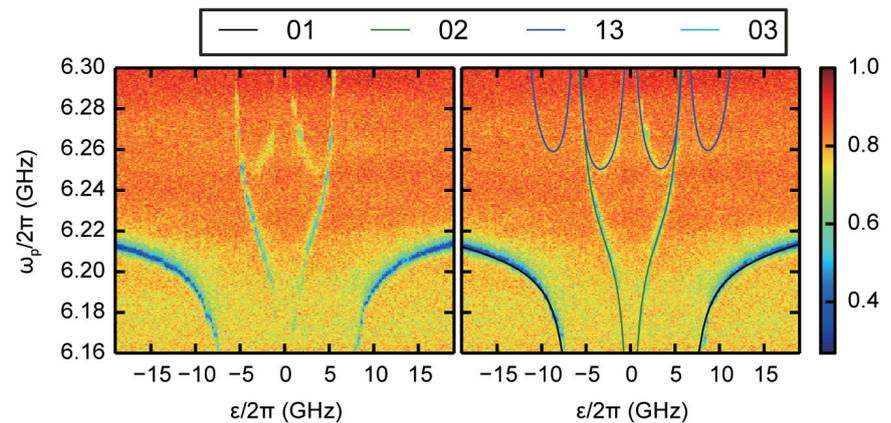


図2 透過スペクトルの磁場(横軸)、周波数(縦軸)依存性。左図は測定結果。右図ではハミルトニアン(1)による理論解析(状態遷移による吸収線)を重畳した。磁場 $\varepsilon \rightarrow 0$ での禁制遷移の様子( $02:|0\rangle \rightarrow |2\rangle, 13:|1\rangle \rightarrow |3\rangle$ )からエネルギー固有状態の対称性に関する情報が得られる。

今後、研究を進展させるうえで重要となる 時間領域測定 に関しては、試料のコヒーレンス特性の観点から、また、量子相関測定に関しては、量子極限増幅 (Josephson Parametric Amplifier) 技術を希釈冷凍機測定系に実装する観点から、現状での問題点と対応策について検討を行った。

本研究は、NTT 物性科学基礎研究所との共同研究である。試料作製及び測定装置は、NICT フォトニック デバイスラボ・ミリ波研究棟実験設備、NICT 研究開発支援室及び NTT 物性科学基礎研究所の微細加工施設の協力を得て作製されたものである。

## 参考文献：

### 【論文】

“Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime”

F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, K. Semba

arXiv:1602.00415 [quant-ph], (2016), 投稿中

“Superconductor-Diamond Quantum Hybrid System” K. Semba, F. Yoshihara, J. E. S. Johansson, X. Zhu, N. Mizuochi, William J. Munro, S. Saito, K. Kakuyanagi, and Y. Matsuzaki

Principles and Methods of Quantum Information Technologies,

Springer, Lecture Notes in Physics Volume 911, 515-538 (2016).

### 【書籍出版】

“Principles and Methods of Quantum Information Technologies,” , ISBN: 978-4-431-55755-5 (Print)

Springer, Lecture Notes in Physics Volume 911 (2016), Editors: Yoshihisa Yamamoto, Kouichi Semba

### 【学会発表】

“Deep strong coupling in a circuit QED system”

C48.00009 : (1) - Introduction - K. Semba, T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab

C48.00010 : (2) - Experiment - T. Fuse, F. Yoshihara, S. Ashhab, K. Semba

C48.00011 : (3) - Data and Analysis - F. Yoshihara, T. Fuse, K. Semba, S. Ashhab

American Physical Society, March Meeting 2016, March 14, 2016, Baltimore, Maryland

“第 63 回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演),”

「超伝導人工原子・調和振動子 超強結合系」 布施智子 2016 年 3 月 22 日, 東京工業大学