

超伝導量子ビットと単一光子の量子もつれ制御

単一モード共振器と相互作用する量子ビット系で、もつれた量子状態を自在に制御できれば、量子計算の実現に必須な多ビット間のコヒーレントな結合への可能性が拓かれます。NTTが世界に先駆けて成功したマイクロ波単一光子と超伝導磁束量子ビットの時間領域でのもつれ状態の制御を中心に最近の研究の進展について解説します。

せんば こういち

仙場 浩一

NTT物性科学基礎研究所

人工単一量子系

近年、サブミクロン領域の微細加工技術や、希釈冷凍機を用いた温度数10 mK、ns時間領域でのマイクロ波パルス技術等の発達に伴い、固体素子でつくられた人工の単一量子系の作製や制御が可能となってきました。これに伴い、単一モード共振器と相互作用する量子ビット系で「状態の重ね合せ」や「量子もつれ」を観測し、さらにこれらを積極的に制御しようとする試みが始まっています。そのような例として、本稿では超伝導量子ビットに関する研究の進展について解説します^{(1),(2)}。

この分野が注目されている背景には、これらの現象あるいは技術を量子計算や量子シミュレーション等の量子情報処理へ応用できないかという期待があります。また、超伝導量子ビットに関しては、巨視的量子コヒーレンスの問題等の量子力学の基礎にかかわる興味も存在しています⁽³⁾。

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行われてきました。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、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ました⁽⁴⁾。それが近年、実験で実証されたのです。しかも、超伝導量子ビットとマイクロ波光子の相互作用は、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、cavity QED実験に必要な不可欠ないわゆる強

結合条件を比較的容易に実現できることも明らかとなってきました。このように、チップ上の電気回路を用いた共振器量子電磁力学(circuit QED)実験では、従来の原子・分子を使った手法では実現することが困難であったパラメータ領域をも新たに開拓できる可能性を秘めているのです。

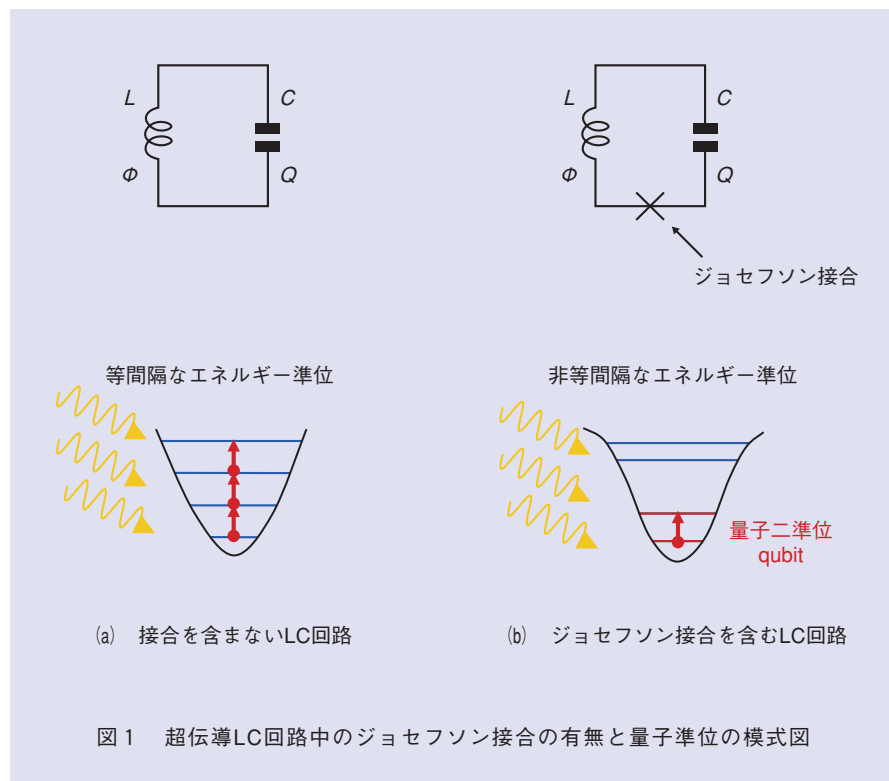


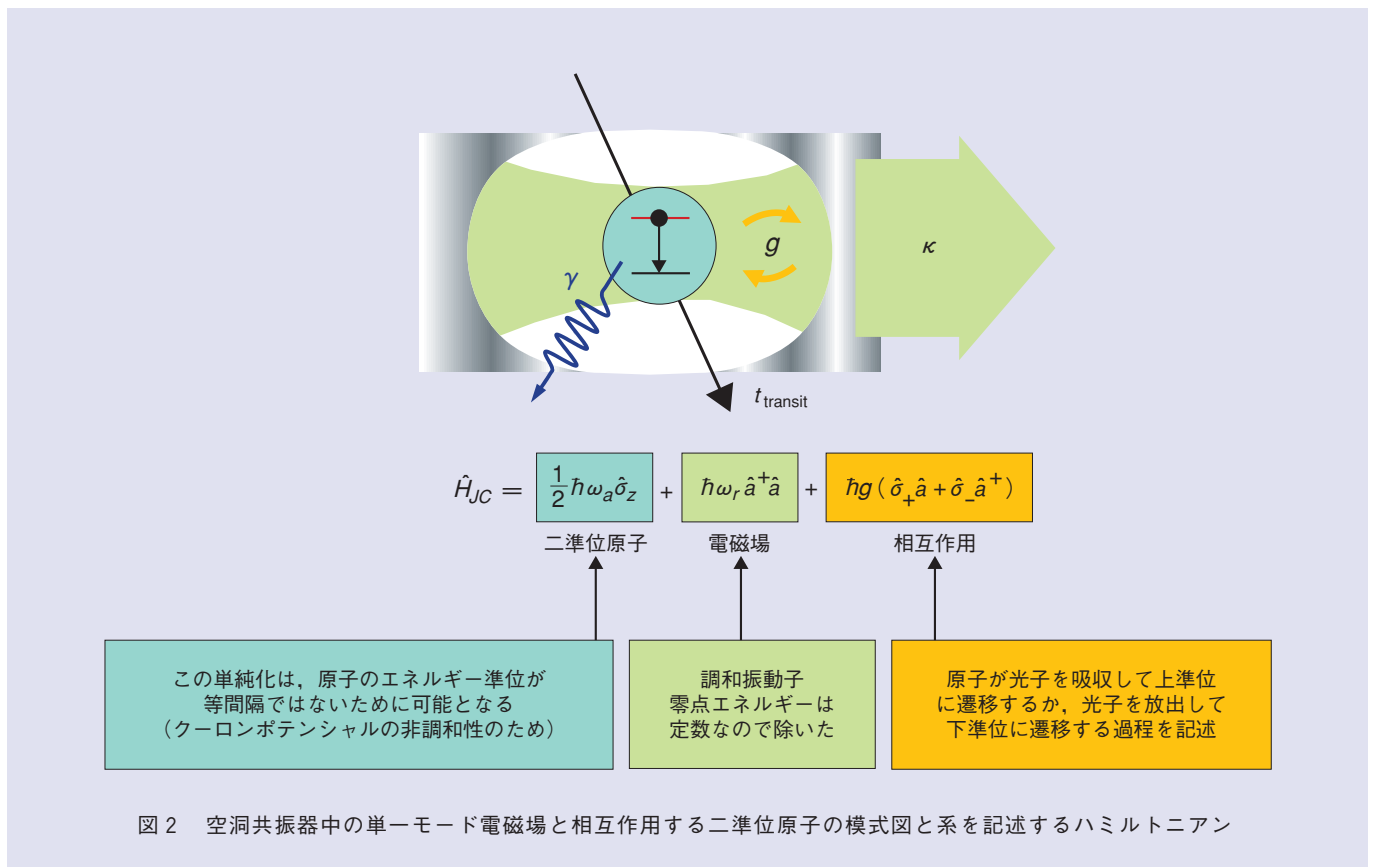
図1 超伝導LC回路中のジョセフソン接合の有無と量子準位の模式図

超伝導量子ビット

常伝導金属のエネルギースペクトルには、フェルミ準位直上から連続した準粒子準位が存在しています。一方、(アルミニウムなどの典型的なS波)超伝導体では、連続した準粒子状態は、超伝導基底状態から有限のエネルギーギャップを隔てて存在しています。このエネルギーギャップ中に、準備された量子準位を使うことができれば、固体中での凝縮体のエネルギー準位でありながら、真空中の原子のエネルギー準位と類似した特性(長寿命の離散

スペクトル)が期待できます。実際、超伝導体で、LC回路をつくれれば、この超伝導エネルギーギャップ中に量子準位をつくることができます(図1)。しかし、LC共振回路は、調和振動子と等価であり、準位間隔が $\hbar/(2\pi\sqrt{LC})$ で等しく、このエネルギーに共鳴したマイクロ波を照射しても、すべてのレベルでの励起が生じてしまい、特定の二準位を量子ビットとして操作する目的には適しません。そこで、ジョセフソン接合の持つ非線形性が必要となります。接合をまたいだ超伝導体の位相差を θ とした場合、ジョセフソン接合

の超伝導凝集エネルギーはよく知られた関係式で $E = -E_J \cos \theta$ と表わされます。このポテンシャル $\cos \theta$ の非線形性のために、ジョセフソン接合を含む超伝導回路の共振モードは、適度な非線形性を獲得して、図1(b)に示すようにエネルギー準位間隔が非等間隔となります。ここで、上準位から離れた最低二準位を量子ビットとして使えば、共鳴マイクロ波パルスを用いた量子状態の制御が可能となります。ジョセフソン接合を含む超伝導回路を特徴付ける2つのエネルギーの大小によって、超伝導量子ビットは、大まかに位



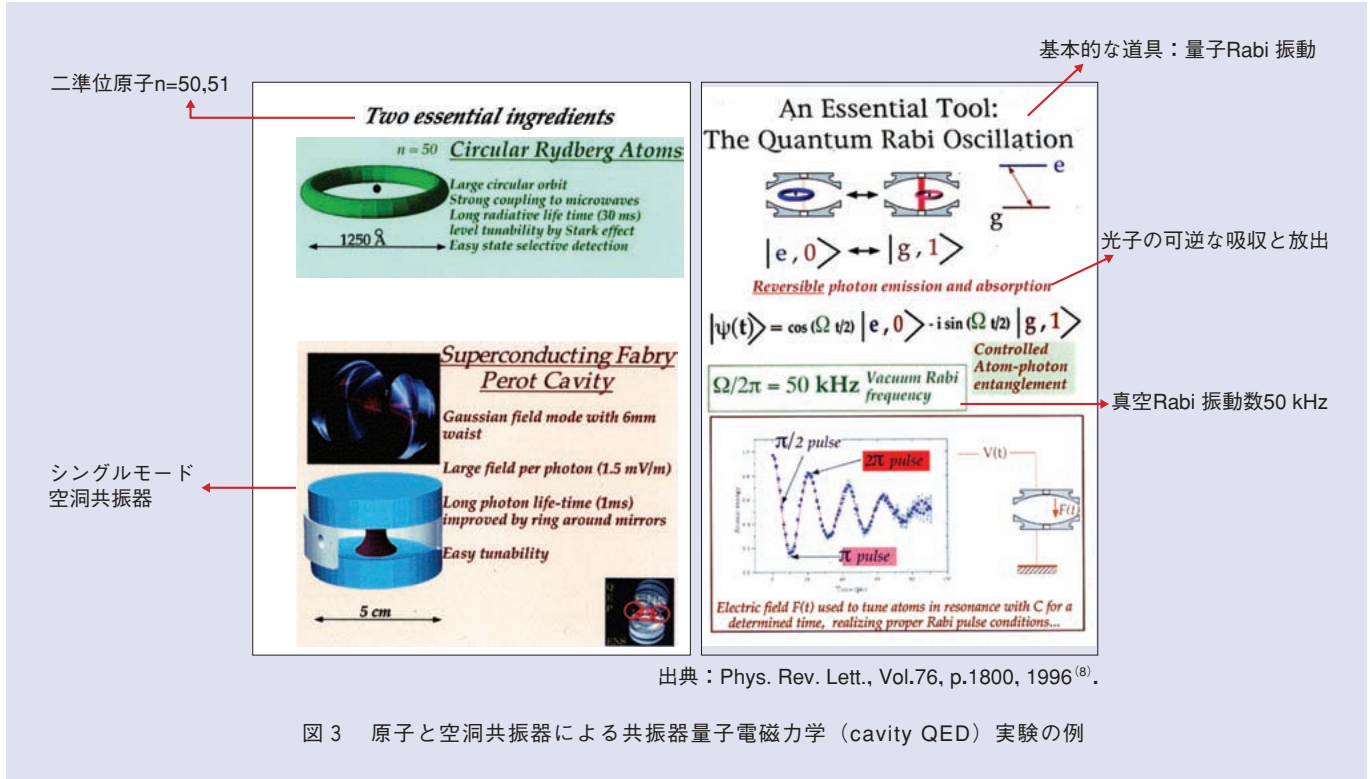


図3 原子と空洞共振器による共振器量子電磁力学 (cavity QED) 実験の例

出典：Phys. Rev. Lett., Vol.76, p.1800, 1996⁽⁶⁾.

相量子ビット ($E_J \gg E_C$), 磁束量子ビット ($E_J > E_C$), 電荷量子ビット ($E_J < E_C$) に分けられます⁽⁵⁾. ここで, E_J は接合のジョセフソンエネルギー, E_C は帯電エネルギーです. 以下では, NTT物性研で研究が進行中の超伝導磁束量子ビットを中心に解説していきます.

磁束量子ビットとは, サブマイクロスケールのジョセフソン接合を周上に複数個 (通常3個) 有する超伝導体のループです. 超伝導のループを貫く磁束は, 磁束量子 ($\Phi_0 \doteq 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$) の整数倍に量子化される性質*があることを利用し, 加える磁場の大きさを制御してループを貫く磁束を意図的に

0.5 Φ_0 付近に設定します. すると, 時計周りに超伝導電流が流れてループを貫く全磁束が0の状態と, 反時計周りに超伝導電流が流れてループを貫く全磁束が Φ_0 の状態 (一般的には線形結合) が量子二準位系を形成するため, これを量子ビットとして用いることが可能となります.

cavity QED

量子もつれに代表される, 原子と光の基本的な相互作用を光子1個のレベルで観測するためには, まず, 微小な空洞共振器等を用いて, 原子と実効的に相互作用する電磁場のモードを1個のオーダにまで極端に減少させるこ

とによって, 原子の自然放出を抑制する必要があります. ここで, 反射率が極めて高い鏡で囲まれた微小共振器を低温に準備することによって, 共振器中の光子数を0個または1個に制限することが可能となります.

図2に示すような空洞共振器中の単一モード電磁場と相互作用する二準位原子を考えます. 電磁場は, 共振器によって離散化されており, 原子と実効

* 「フラクソイド (fluxoid) の量子化」といい, ドーナツ状の超伝導体の穴の部分に外部から印加した磁束 (flux) と, 超伝導体の磁場侵入長程度の表層を流れる超伝導電流のつくる磁束の和 (fluxoid) が, 磁束量子 [$\Phi_0 = h / (2e)$] の整数倍に量子化される現象. これは, ドーナツを一周したとき, 凝縮した電子対の波動関数の位相が, 2π の整数倍の値を取り得ることに由来.

的に相互作用するモードは、1つであると仮定します。このとき、原子と電磁場の相互作用は、いわゆる Jaynes-Cummings ハミルトニアンによって記述されます。ここで、第1項は二準位原子のエネルギー、第2項が電磁場のエネルギー（零点エネルギーは定数なので除いてあります）、そして第3項が二準位原子と電磁場の相互作用を表わします。原子と光子の間の量子もつれ振動である真空ラビ振動は、いわゆる強結合条件と呼ばれる条件が満たされる場合に限り、観測可能です。これは、原子と電磁場の相互作用(g)が、空洞共振器からの光子のロス(κ)、原子からの自然放出(γ)、あるいは、空洞共振器を原子が通過する時間の逆

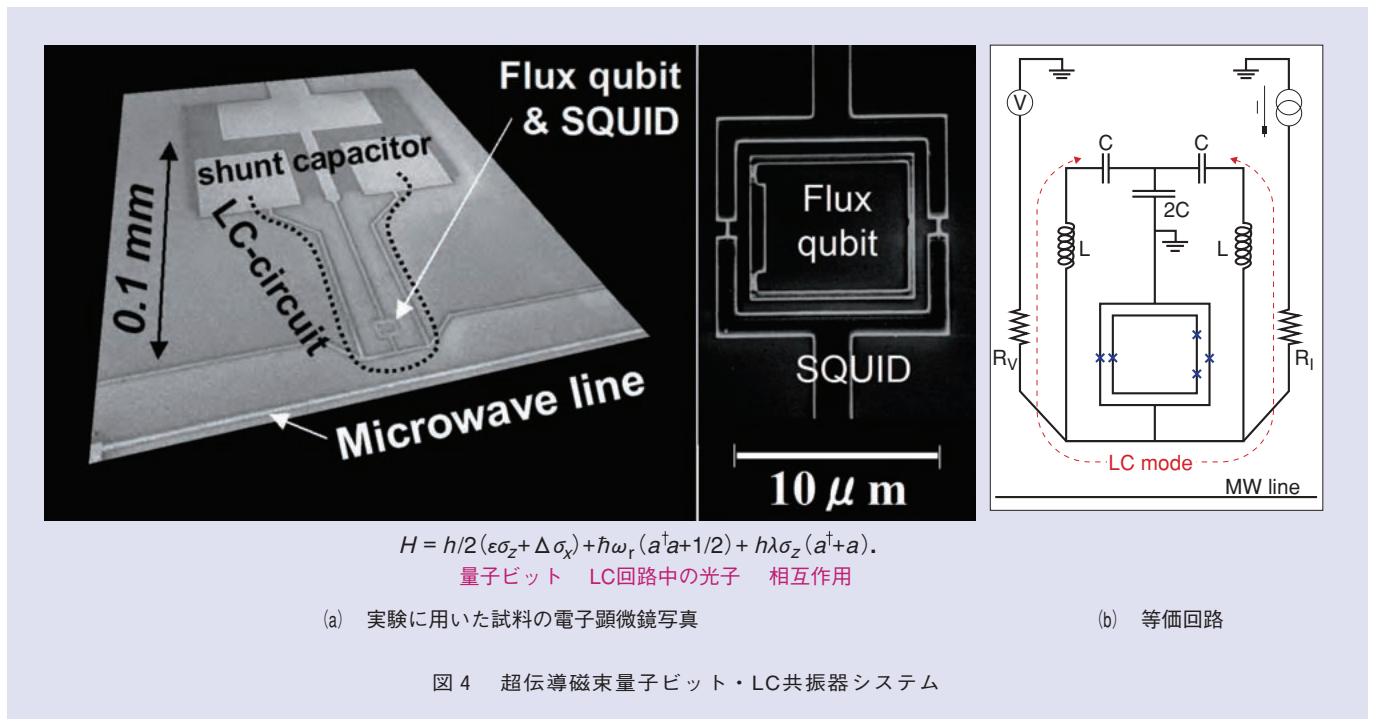
数 (t^{-1}_{transit}) のいずれよりも十分大きい場合 ($g \gg \kappa, \gamma, t^{-1}_{\text{transit}}$) にのみ、相互作用に起因した量子振動が観測可能となることを意味しています。

このような実験の代表例としては、**図3**に示すS. Haroche 率いるENS Paris グループが行った美しい実験がよく知られています⁽⁶⁾。彼らは、イオン化寸前の巨大な電気双極子モーメントを有するリドベリ状態の二準位原子（主量子数 $n=50: |g\rangle, 51: |e\rangle$ ）と、内面に超伝導体Nbを蒸着したQ値 10^8 に達する空洞共振器を0.3 Kに冷却することによって、強結合条件を準備し、 $|e, 0\rangle \leftrightarrow |g, 1\rangle$ 間の量子もつれ（真空ラビ）振動の観測に成功したのです。

超伝導量子ビット circuit QED

私たちが測定に用いた超伝導磁束量子ビット・LC共振器システムを**図4**に示します。LC回路は、アルミニウム製であり、量子ビットおよび量子ビット状態測定デバイスであるSQUIDの数10マイクロン外側に配置されています。アルミニウムベースプレートを酸素プラズマで酸化処理して作製されたオンチップキャパシタの設計値は $C=10$ pF、アルミニウムの細線のインダクタンス設計値は $L=140$ pH です。等価回路を**図4 (b)**に示します。

図5 (a)に示すスペクトルの外部磁場で変化しない共鳴ピークがLC共振モードで、その振動数は、設計値とよい一



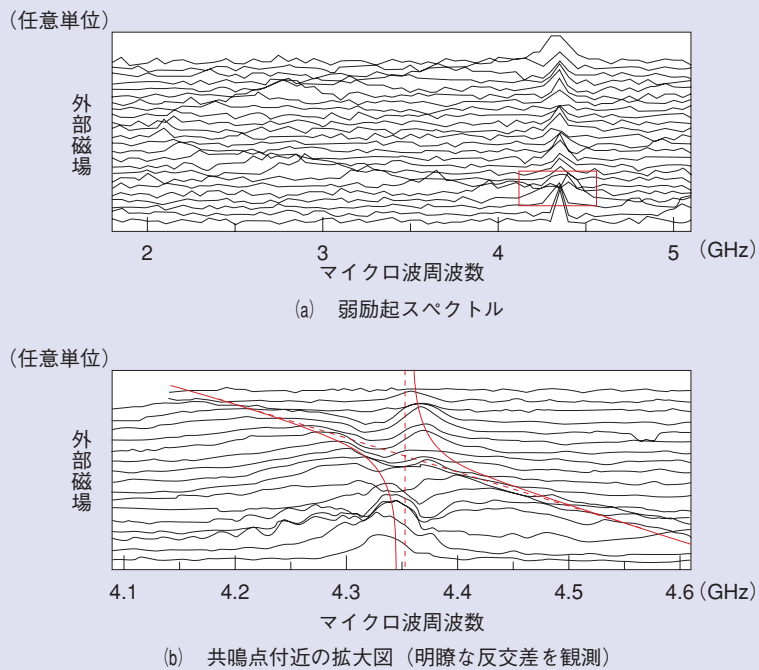


図5 量子ビット・LC共振量子系の分光測定結果

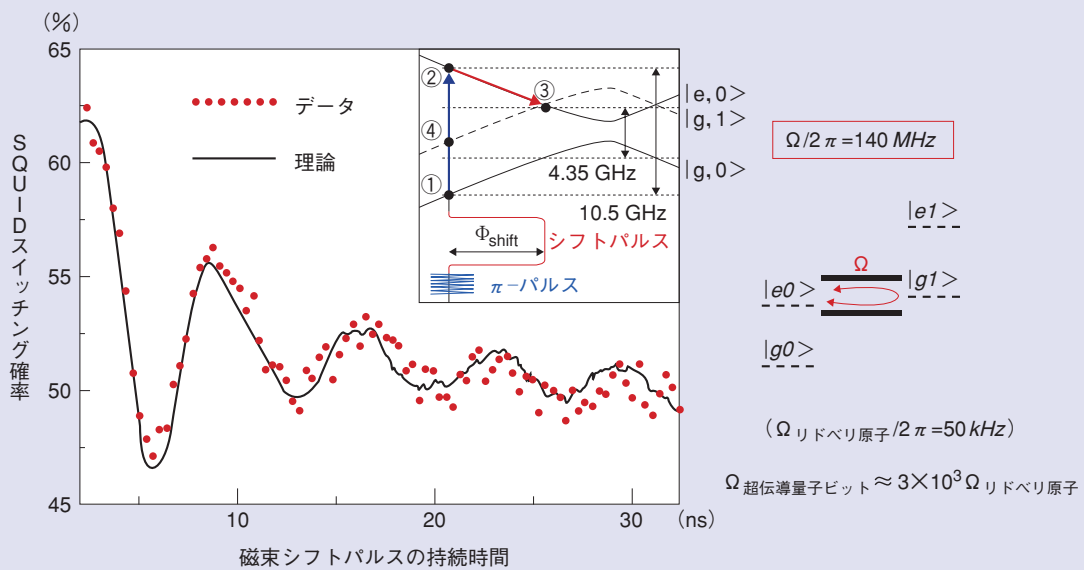


図6 観測された真空ラビ振動とエネルギー状態

致で4.35 GHz と観測されました。これは温度に換算すると約200 mKに相当し、希釈冷凍機を用いた測定温度(20 mK)では、熱励起は無視でき、LC共振モードは基底(真空)状態であると近似できます。共鳴点付近において、LC共振モードの励起を抑えるため、制動パルスを用いて得られたスペクトル測定から、量子ビットとLCモードのエネルギー分散には、0.1 GHz程度の反交差が確認されました(図5(b))。

動的な量子もつれ振動の観測は、次のように行いました。まず、外部磁場により量子ビットをLCモードと非共鳴な最適読み出し条件の磁束に固定しておき π -パルスによって励起状態に遷移させます(図6①→②)。次にns幅の磁束シフトパルスを用いて量子ビットのエネルギーをLC共振量子のエネルギー(4.35 GHz)との共鳴条件へ素早く移動させます(図6②→③)。この、共鳴条件に留めておく時間(パルス幅)の関数として、量子ビットの状態を最適読み出し磁束で測定した結果を図6に示します(図6②あるいは④)。このようにして、 $|e, 0\rangle \Leftrightarrow |g, 1\rangle$ 間の量子もつれ振動(真空ラビ振動)を時間領域で観測することに成功しました⁽⁷⁾。この現象は、量子ビットが励起状態のとき、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。

光子との相互作用の大きさに比例する真空ラビ振動数は140 MHzにも達し、リドベリ原子と光子の場合(50

KHz)のおおよそ2800倍です。今回実験に用いたチップ上のLC回路のQ値は、100程度であり原子の場合の空洞共振器のQ値と比べて非常に小さいにもかかわらず、真空ラビ振動の時間領域測定に成功できた主な理由は、この桁違いに大きな相互作用にあります。このように、マクロな量子現象である超伝導を用いれば、量子もつれの制御そのものであるcavity QED実験に必要な強結合条件は比較的容易に実現可能であることが実証されました。今後、この系のコヒーレンス時間を改良するとともに、共振回路を介した複数の量子ビット間のもつれ制御(量子バス動作を実証すること)が重要な課題と考えられます。

■参考文献

(1) I. Chiorescu, P. Bertet, K. Semba, Y. Nakamura, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij: "Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator," *Nature*, Vol.431, pp.159-162, 2004.
 (2) A. Wallraff, D. I. Schuster, A. Blais, L. Frunzio, R.-S. Huang, J. Majer, S. Kumar, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf: "Strong coupling of a single photon to a superconducting qubit using circuit quantum electrodynamics," *Nature*, Vol.431, pp.162-167, 2004.
 (3) A. J. Leggett: "Testing the limits of quantum mechanics: motivation, state of play, prospects," *J. Phys. CM* 14, R415-451, 2002.
 (4) A. Blais, R.-S. Huang, A. Wallraff, S. M. Girvin, and R. J. Schoelkopf: "Cavity quantum electrodynamics for superconducting electrical circuits: An architecture for quantum computation," *Phys. Rev. A*, Vol.69, 062320, 2004.
 (5) 仙場: "超伝導磁束量子ビットの単一回読み出し," *NTT技術ジャーナル*, Vol.16, No.1, pp.42-45, 2004.
 (6) M. Brune, F. Schmidt-Kaler, A. Maali, J. Dreyer, E. Hagley, J. M. Raimond, and S. Haroche: "Quantum Rabi Oscillation: A Direct Test of Field Quantization in a Cavity," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.76, No.11, pp.1800-1803, 1996.

(7) J. Johansson, S. Saito, T. Meno, H. Nakano, M. Ueda, K. Semba, and H. Takayanagi: "Vacuum Rabi Oscillations in a Macroscopic Superconducting Qubit LC Oscillator System," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.96, 127006, 2006.
 (8) <http://online.kitp.ucsb.edu/online/colloq/haroche1/>



仙場 浩一

ここでご紹介した成果は、超伝導量子物理研究グループメンバーや多くの方々との共同研究で得られたものです。皆様に感謝いたします。今後、素子や実験系を改良し、エンタングルメントの制御性を向上させて、超伝導磁束量子ビット系での量子計算の原理実証を目指します。

◆問い合わせ先

NTT物性科学基礎研究所
 量子電子物性研究部
 超伝導量子物理研究グループ
 TEL 046-240-3544
 FAX 046-240-4722
 E-mail semba@will.brl.ntt.co.jp
 URL <http://www.brl.ntt.co.jp/group/butsucho-g/>