

4-3 回路量子電磁力学の未踏領域

仙場浩一 吉原文樹 布施智子 アシュハブサヘル 角柳孝輔 齊藤志郎

NICT は、NTT 物性科学基礎研究所 (NTT-BRL)、カタール環境エネルギー研究所 (QEERI) との共同研究で、超伝導人工原子とマイクロ波光子の相互作用の強さを系統的に変え、分光実験を行った結果、人工原子に光子がまとわりついた分子のような新しい最低エネルギー状態 (基底状態) が存在することを確認した。本研究により、原子 (物質) と光の相互作用に新たな未踏領域が存在することが明らかになった。従来に比べて桁違いに広いエネルギー範囲で物質と光の相互作用を操る術を提供できるため、量子相転移の物理の解明や、シュレディンガーの猫状態のような非古典光状態を使う量子技術への応用の可能性を広げ、量子通信、量子シミュレーション・計算、次世代超高精度原子時計の開発など、量子技術分野への応用が期待される。

1 まえがき

NICT が進める超高精度原子時計の研究開発や、NTT や NICT が目指す、より安全で省エネルギーな通信など、現代社会に不可欠な技術は、光と原子の振る舞いを光子 1 個という究極のレベルで解き明かすことから始まったといっても過言でない。物質が光を吸収・放出するのは、原子と光に相互作用が存在するからであるが、「光と原子の相互作用は果たしてどこまで強くできるか?」という基本的な問題は、原子物理学において永く研究されてきたものの、非常に強い相互作用を実現する適切な方法が見つからず、未解決のままであった。この状況を進展させたのは、原子の代わりに人工原子の一種である超伝導人工原子*1 (量子ビット) を用いた実験を可能とした回路量子電磁力学の登場であった。

2 共振器量子電磁力学

物質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 個のオーダーにまで減少させ、原子の自然放出を抑制する必要がある。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れば、共振器中の光子数を 0 個または 1 個に制限した実験が可能である。図 1 に模式的に示すような空洞共振器中の単一モード電磁場と、共鳴条件にある二準位近似された原子を考えよう。電磁場は、共振器によって離散化されており、原子と実効的に相互作用するモードは、1 つであると仮定する。このとき、原子と電磁場の相互作用は、図 1 中の

ハミルトニアンによって記述される。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、そして第 3 項が二準位原子と電磁場の相互作用を表わす。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、観測可能である。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損失 (κ)、励起原子からの光子の自然放出 (γ)、あるいは、空洞共振器を原子が通過する時間の逆数、のいずれよりも十分大きい場合に限り、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する。S. Haroche 率いる ENS Paris グループは、イオン化寸前の巨大な電気双極子モーメントをもつリュードベリ状態の近似的二準位原子 (主量子数 $n = 50$: 基底状態 $|g\rangle$, 51 : 励起状態 $|e\rangle$) と、内面に超伝導体 Nb を蒸着した $Q \sim 10^8$ に達する空洞共振器を 0.3 K に冷却して、強結合条件を準備し、原子と空洞共振器間で 1 個の光子を交換し合う真空ラビ振動 ($|e, 0\rangle \leftrightarrow |g, 1\rangle$ 間の量子もつれ振動) の観測に成功した [1]。最近では、共振器の Q 値を極限 ($Q \sim 10^{10}$) にまで高めて共振器中の光子の緩和時間を延ばし、リュードベリ原子を用いた

*1 超伝導人工原子

超伝導体を用いて作製された線スペクトルとみなせる原子のような離散エネルギー準位を有する量子回路。限定されたエネルギー範囲や温度範囲において近似的に量子二準位系とみなすことができる場合には、量子ビットとも呼ばれる。ここでは、図 3 赤枠内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ーの極薄絶縁体を超伝導体で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。ループを貫く磁束を変化させることで、おおよそ数 GHz 程度の範囲で量子二準位のエネルギー分裂の大きさを制御できる。エネルギー分裂が数 GHz 程度の超伝導量子ビットの場合には、動作温度として、おおよそ 0.1 K より低温が必要となる。

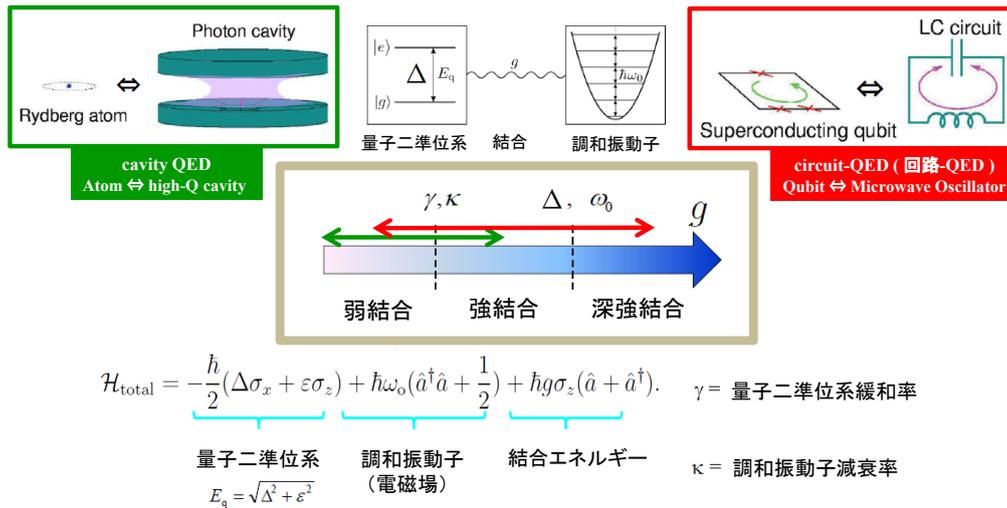


図1 共振器(回路)量子電磁力学を特徴付ける3つの結合領域とハミルトニアン

共振器中光子数の量子非破壊測定及びそれを用いた共振器中光子状態の量子フィードバックも実現している。2012年のノーベル物理学賞は、この量子技術分野の源流を作った2人のパイオニア David J. Wineland (NIST-Boulder) と Serge Haroche (Collège de France, ENS-Paris) が受賞した。

3 回路量子電磁力学

超伝導量子回路の基本要素は、インダクタンス L と容量 C から成る LC 共振器が考えられる。この共振器は等間隔なエネルギー準位を有し、共振器の温度を準位間隔よりも十分下げると量子化された準位の影響を観測することができる。しかしながら、LC 共振器が調和振動子であるため準位が等間隔であり、特定の二準位を利用する量子ビットや人工原子として利用することはできない。そこで、非線形なインダクタンスとして働くジョセフソン接合を回路に導入し、超伝導人工原子を実現する。ジョセフソン接合はインダクタンス成分と容量成分を併せ持ち、その大小関係によって人工原子の性質が異なる。インダクタンス成分が優勢な場合は磁束が確定し磁場に対して敏感な人工原子となり、容量成分が優勢な場合は電荷が確定した状態となり、電場に対して敏感な人工原子が実現される。このようにして作製された超伝導人工原子の準位間隔は、数～数十 GHz 程度のマイクロ波帯となる。マイクロ波と超伝導人工原子の強結合領域を実現するためには、マイクロ波を超伝導共振器に閉じ込め、場(磁場あるいは電場)を増強する必要がある。二次元のチップ上に配置された超伝導人工原子と相性の良い共振器としては、集中定数回路から成る超伝導 LC 共振器と、半波長分のコプレーナ導波路から成る分布定数型の超伝

導伝送線路共振器の2種類が研究されている。それぞれの共振器の作り出す場に合わせて超伝導人工原子のインダクタンスと容量の大小を設計する。この系の最大の特徴は、原子、共振器共に人工的に設計できるという点で、共振器量子電磁力学では到達することのできなかった超強結合領域を実現できる系として注目されている。また、超伝導回路を基に量子電磁力学を探索するため、回路量子電磁力学(circuit-QED または回路-QED)と呼ばれている。

近年の回路量子電磁力学の先駆けとなった実験は2004年、デルフト大学とイエール大学によって、独立してほぼ同時に行われた[2][3]。イエール大学は、電荷型の超伝導人工原子とコプレーナ型の超伝導伝送線路共振器を用い、電場を介した強結合を実現、共振器の透過スペクトルに真空ラビ分裂を観測した。一方、NTTでは磁束型の人工原子と超伝導 LC 共振器を用いて2006年、回路-QED分野で初の真空ラビ振動の観測に成功した[4]。これら強結合領域の実験は、回転波近似を用いたジェーンズ・カミングスモデルにより、よく再現されるが、この近似が成立しない超強結合領域の実験が2010年に発表された[5][6]。人工原子の遷移エネルギー Δ 、光のエネルギー ω_0 に対して結合強度 g が、 $g > 0.1 \Delta$, $0.1 \omega_0$ を満たす領域において、ジェーンズ・カミングスモデルでは再現できないスペクトルが観測され注目を集めた。本研究では、更に結合強度を強め、深強結合領域 ($g > \Delta, \omega_0$) を初めて実現し、新しい最低エネルギー状態(基底状態)が実現されていることを確認した[7][8]。図2にこれまでに観測された回路量子電磁力学における結合強度との比較を示す。

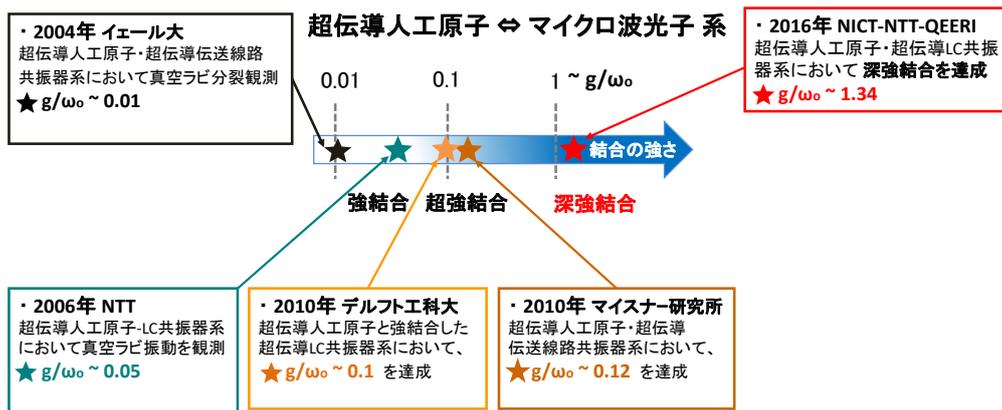


図2 これまでの研究成果と外部状況

光子と超伝導人工原子の結合の強さは、この12年間で100倍以上増強された。今回初めて、深強結合 ($g/\omega_0 > 1$) 領域に到達し、質的に新しい基底状態 (光と人工原子から成る安定な分子様状態) の発見につながった。

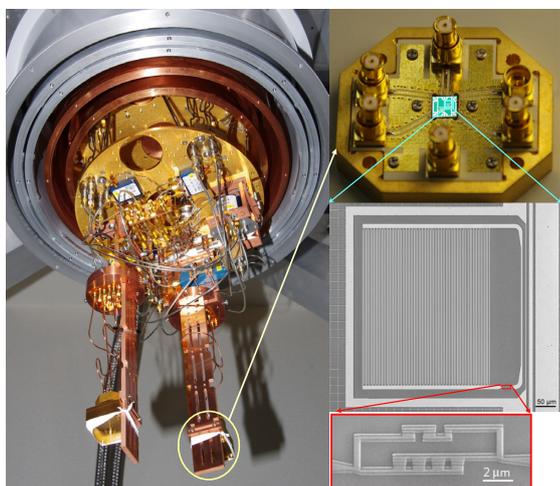


図3 実験に用いた試料と回路素子

(左) 希釈冷凍機に組み込まれた超伝導量子回路用マイクロ波測定系。測定対象の熱励起を抑えてマイクロ波光子1個レベルでの精密測定を行うため、超伝導量子回路素子は、希釈冷凍機の最低温度プレート(約10 mK)に熱接触させて冷却される。超伝導量子回路は、磁気ノイズに非常に敏感なため、実際には外部磁場を約1/1000に低減する円筒型の二重磁気シールド内に設置されている。

(右上) 試料ホルダーに装填された測定チップ

(右下) 深強結合 超伝導人工原子(赤枠内)-LC調和振動子回路、アルミニウム製

4 未踏領域での理論研究と実験結果

およそ40年前の1970年代から、原子と光の相互作用が極端に強い場合には、質的に全く新しい最低エネルギー状態(基底状態)が存在すると予想されていた。その後、現実的な条件の下でその状況を準備しても、この予想が適用できるか否かに関して論争が起こった。共同研究者のS. Ashhab博士(QEERI)らは数年前に、超伝導回路を用いてこの新状態を形成するために必要な条件について理論的な検討を行った[9]。

今回報告する実験では、測定対象の熱励起を抑えてマイクロ波光子1個レベルでの精密測定が必要なため、

図3に示す希釈冷凍機を用いて測定を行った。微細加工技術を用いて作製された原子と同等の量子的性質を持つ超伝導人工原子と、超伝導回路に閉じ込めた光子が使われた。実際には、大きな零点ゆらぎ電流を持つLC共振回路と超伝導永久電流量子ビットが大きなジョセフソンインダクタンス^{*2}を共有して磁氣的に非常に強く結合するよう回路が設計された(図4)。この超伝導電気回路について分光実験(1光子レベルでの透過スペクトル測定: 図5)を行い、得られたスペクトルの解析から、予言された新たな状態を発見した[7]。回路中の人工原子の全エネルギーは、光自身が持つエネルギー、原子自身のエネルギー、光と原子の相互作用のエネルギーの総和である。巨視的量子系^{*3}

*2 ジョセフソンインダクタンス

2つの超伝導体で、原子層レベルの非常に薄いバリア層をサンドイッチした構造の素子(ジョセフソン接合)が超伝導状態で示すインダクタンス。この接合部分では、超伝導が弱められており、外部から電磁気的な信号を接合部分に加えると、超伝導状態特有の非線形応答が得られる。高感度な磁場センサーであるSQUID(Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子)では、超伝導ループに複数個のジョセフソン接合が配置され、ループを流れる超伝導電流がループを貫く磁場に非常に敏感であることが利用されている。今回の実験では、ジョセフソン接合が示す大きなインダクタンスを強い結合を得るために積極的に利用した。LC共振回路と超伝導人工原子とで共有された回路部分(補足資料の図4a、等価回路に黒で示す可変インダクタンス部分)に、ジョセフソン接合を配置して、両者の結合を増大させることにより、深強結合を実現することが可能となった。

*3 巨視的量子系

超伝導状態では、おびただしい数の電子対が同一の量子状態を占めることにより、原子スケールに比べてはるかに大きな(巨視的な)スケールにわたり、位相のそろった(コヒーレントな)量子状態が出現する。このように、超伝導体を使えば、微細加工技術で人為的に作製された電気回路の電流状態があたかも1つの巨大な電子対のように振る舞う状況を作ることができる。このような状況にある量子系を巨視的量子系と呼ぶ。量子コヒーレンスを保ちながら、原子に比べてはるかに大きなスケールの物理量(電流、磁気モーメント、分極など)を具現することが可能である。超伝導のほかにも、超流動、レーザー状態中の光子、希薄原子ガスのボース・アインシュタイン凝縮などの例が知られている。

4 量子ノード技術

の利点を生かして、光と原子の相互作用のエネルギーを、光自身のエネルギーや原子自身のエネルギーより大きくすること ($g > \Delta$, ω_0 「深強結合」の実現) が初めて可能となった。

従来、光と原子の相互作用のエネルギー、特に電磁場の真空ゆらぎが原子に及ぼす相互作用の大きさは、原子の全エネルギーに比べると微小であり、ラムシフトなど原子のエネルギー準位に ppm にも満たないごく僅かな補正を与えるに過ぎなかった。ところが、今回の実験では、相互作用のエネルギーが回路中の人工原子の全エネルギーの中で最大となっており、ラムシフトも 87% と桁違いの大きさであると推定される。これほど相互作用が大きくなると、光と原子結合系の最低エネルギー状態 (基底状態) も直観と異なる奇妙な状態となる。これまでの常識では、原子が最低エネルギー状態にあり、かつ電磁場は平均光子数 0 の真空状態であることが、光と原子結合系の自然な基底状態であった (図 6(a))。ところが、今回の実験では、相互作用エネルギーが光子のエネルギーや人工原子の励起エネルギーよりも大きいため、外部から光子を注入しなくても、基底状態の平均光子数は有限の値 (1.8) であると推定される。言い換えれば、大きな相互作用

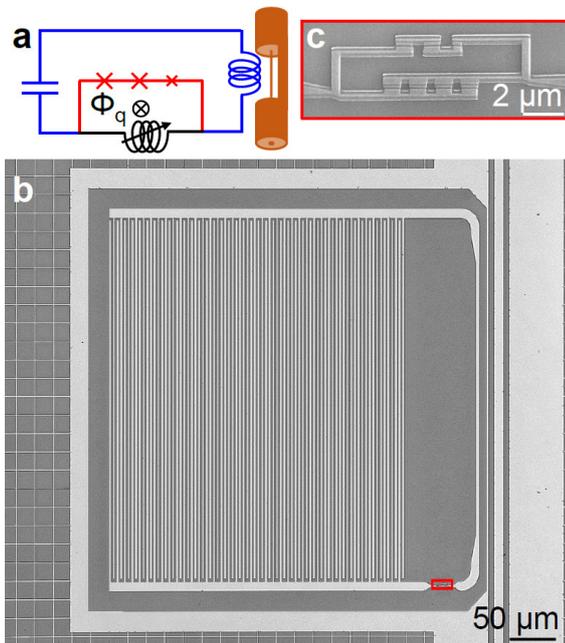


図 4 光子と人工原子から成る分子状態の測定で使用した電気回路
 a. 等価回路 (X や x はジョセフソン接合を表す。) LC 回路 (青と黒)、超伝導人工原子回路 (赤と黒)
 b. 量子 LC 回路の一部に組み込まれた超伝導人工原子 (赤枠内) 白い部分はアルミニウム、灰色の部分はシリコン基板
 c. 超伝導人工原子回路 (b. 赤枠内の拡大図)
 量子 LC 回路と共有される辺には、ジョセフソン接合が 4 個並列に設置されています。SQUID 構造が採用されているので、異なる外部磁場の使用で、可変インダクタンス (a. 等価回路の黒部分) として振る舞い、同一試料でありながら、複数の異なる結合強度を実現可能

エネルギーによって増強された真空ゆらぎを人工原子がまとめている状態である (図 6(b))。さらに、「深強結合状態」では、光と原子の系の対称性から、量子遷移に選択則が観測され、図 6 に示すような基底状態を含む全状態で光と原子の量子もつれ*4 が実現されていることを示唆している。

*4 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な性質である。量子暗号、量子計算の実現に欠かせない量子状態であり、現在では積極的に活用されている量子系的重要なリソースである。

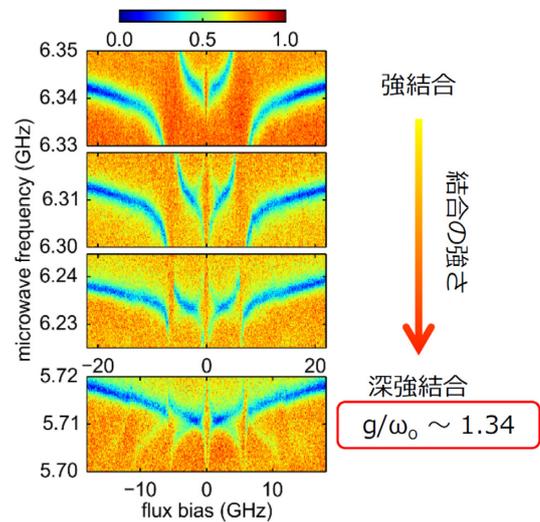


図 5 新たな深強結合状態の分光測定結果

横軸は人工原子のバイアスエネルギー、縦軸は入力マイクロ波周波数を示す。深強結合状態ゼロバイアス付近の複雑な透過スペクトルは、試料中に光子と人工原子から成る安定な新しい結合状態の存在によって、初めて説明できる。

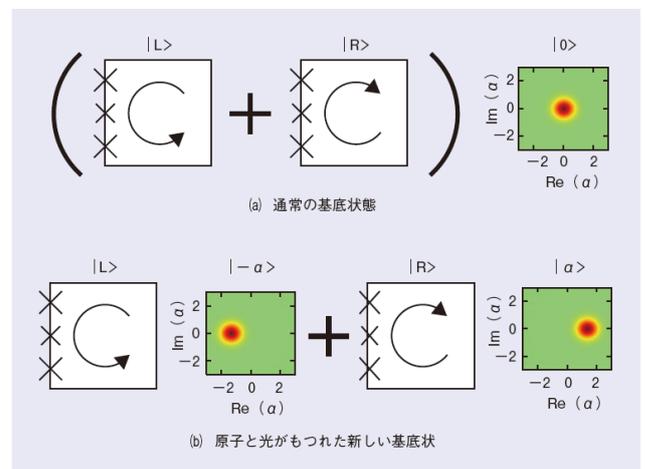


図 6 原子が光子をまとった新しい基底状態 (出典: NTT 技術ジャーナル 2017.3 p.71 図 5)

本研究における役割分担は、NICT は実験と解析、NTT は試料作製、QEERI は理論解釈をそれぞれ担当した。

と人工原子から成る安定な分子状態を発見,” NTT 技術ジャーナル誌 vol.29, no.3, pp.67-71, 2017.
9 S. Ashhab and Franco Nori, Phys. Rev. A 81, 042311, 2010.
10 S. Ashhab and K. Semba, Phys. Rev. A 95, 053833, 2017.

5 今後の展望

このように、超伝導人工原子は、原子のような振る舞い(分光スペクトル、状態遷移、状態の重ね合わせ、量子もつれ)をするアルミニウム製の超伝導電気回路であり、例えるなら、リード線の付いた「原子」である。その量子状態制御及び測定は、伝送線路(リード線)から送るマイクロ波パルス列で行う。この人工原子は、シリコン基板上に半導体微細加工技術を用いて何千〜何万個と複製することも原理的には可能である。原子と同様な量子力学的振る舞いをするが、それらを用いて行える実験の範囲は、天然の原子を用いた範囲よりもはるかに広く、多くの未踏領域を含んでいることが今回の実験からも判明した。

今回、私達は1個の超伝導人工原子と光子の深強結合状態の存在を確認した[7]が、今後は、複数の超伝導人工原子と光子の場合に、いかなる基底状態が生ずるか等の研究[10]を通じて、深強結合領域の物理が、量子相転移の制御や多体系の量子状態制御へ応用可能かを研究する。

また、量子通信におけるノード技術や量子インターフェイスへの応用を目指して、この深強結合状態の人為操作、光子の吸収・発光過程のダイナミクスやこの状態を用いた新たなもつれ生成及び制御方法などの研究を展開する予定である。

【参考文献】

- 1 S. Haroche and J.-M. Raimond, Exploring the Quantum, Oxford University Press 2006.
- 2 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.
- 3 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.
- 4 仙場浩一, 齊藤志郎, 角柳孝輔, 中ノ野人, "超伝導回路で共振器量子電磁力学実験が可能に! - ジョセフソン cavity-QED -, " 日本物理学会誌 64, pp.37-41, 2009.
- 5 T. Niemczyk, F. Deppe, H. Huebl, E. P. Menzel, F. Hocke, M. J. Schwarz, J. J. Garcia-Ripoll, D. Zueco, T. Hümmer, E. Solano, A. Marx, and R. Gross, "Circuit quantum electrodynamics in the ultrastrong-coupling regime," Nature Physics, vol.6, pp.772-776, 2010.
- 6 P. Forn-Díaz, J. Lisenfeld, D. Marcos, J. J. García-Ripoll, E. Solano, C. J. P. M. Harmans, and J. E. Mooij, "Observation of the Bloch-Siegert Shift in a Qubit-Oscillator System in the Ultrastrong Coupling Regime," Physical Review Letters, vol.105, no.23, pp.237001-1-4, 2010.
- 7 F. Yoshihara*, T. Fuse*, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito, and K. Semba, : "Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime," Nature Physics 13, 44, 2017. (* These authors contributed equally to this work.)
- 8 齊藤志郎, 角柳孝輔, Sahel Ashhab, 吉原文樹, 布施智子, 仙場浩一, "光子

仙場浩一 (せんば こういち)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
首席研究員
博士(工学)
超伝導量子物理

吉原文樹 (よしはら ふみき)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
主任研究員
博士(工学)
超伝導量子エレクトロニクス

布施智子 (ふせ ともこ)

未来 ICT 研究所
フロンティア創造総合研究室
主任研究員
博士(理学)
超伝導量子エレクトロニクス

アシュハブ サヘル (あしゅはぶ さへる)

カタール環境エネルギー研究所
主任研究員
博士(理学)
理論、モデリング、シミュレーション

角柳孝輔 (かくやなぎ こうすけ)

日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部
主任研究員
博士(理学)
超伝導量子物理

齊藤志郎 (さいとう しろう)

日本電信電話株式会社
NTT 物性科学基礎研究所
量子電子物性研究部
主任研究員、グループリーダー
博士(工学)
超伝導量子物理