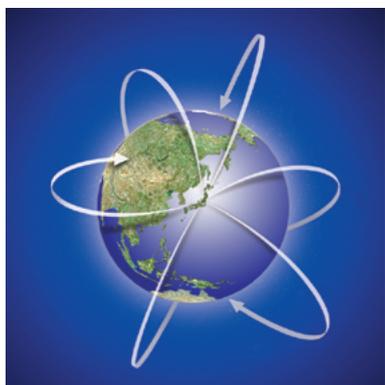


超伝導人工原子

回路量子電磁力学

深強結合領域



世界に誇れる研究開発成果

光子と人工原子から成る安定な分子状態を発見

さいとう しろう^{†1} かくやなぎ こうすけ^{†1}

齊藤 志郎 / 角柳 孝輔 / Sahel Ashhab / 吉原 文樹 /

^{†2} よしはら ふみき^{†3}ふせ ともこ^{†3} せんば こういち^{†3}

布施 智子 / 仙場 浩一

NTT物性科学基礎研究所^{†1}/カタール環境エネルギー研究所^{†2}/情報通信研究機構^{†3}

NTT物性科学基礎研究所、情報通信研究機構、カタール環境エネルギー研究所は、超伝導人工原子とマイクロ波光子の相互作用の強さを変える実験を行い、人工原子に光子がまとわり付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ました。本研究は、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ことができるため、量子通信、量子計算、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ます。

研究の背景

20世紀初頭から発展した原子と光の相互作用を記述する量子電磁力学は、光を粒子（光子）として扱うことで、原子による光の吸収・放出・散乱といった現象をよく再現することができます。しかしながら、量子電磁力学では、通常無限に広い空間に広がる光を扱うため、原子と光の相互作用の大きさ（結合）には限界がありました。そこで、2つの向かい合う鏡に挟まれた空間（共振器）に光を閉じ込めることで、その強度を増強し、共振器中に配置した原子との結合を強める研究が進められました。この分野は、共振器量子電磁力学と呼ばれ、原子1個レベルでの光応答制御を可能にし、量子情報処理を実現するための基盤技術としても注目されています。

一方、量子情報処理をめざして研究されている超伝導量子ビットは、原子のエネルギー準位と類似したエネルギー準位を有し、人工原子とも呼ばれています。最大の特長は、超伝導回路を自在に設計できる点で、超伝導量子ビットと超伝導共振器が相互作用する系を設計することも可能です。この系

は、回路量子電磁力学と呼ばれ、超伝導共振器回路中に閉じ込められたマイクロ波光子と超伝導量子ビットとのこれまでにない強い結合が実現されています。

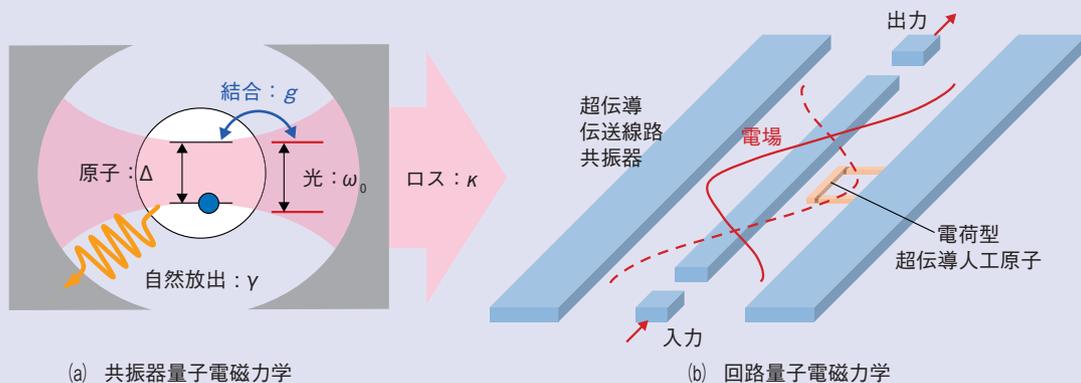
ここでは、回路量子電磁力学を用いて、共振器量子電磁力学で得られる結合強度よりも桁違いに大きな結合を達成した際に、そこで観測される新しい物理現象を紹介します。

共振器量子電磁力学

量子電磁力学において原子と光の相互作用をもっとも単純化したモデルは、二準位原子と単一モード（単一波長）の光から構成される系を記述します。しかし、無限に広がる空間において光を単一のモードに制御することは不可能であり、このような系を実現するのは難しいと考えられていました。そこで、光を波長程度の大きさの共振器に閉じ込めると、波長が連続的なモードから離散的になり、そのうちの1つのモードと原子を相互作用させることができるというアイデアから共振器量子電磁力学が生まれました。この系は一般に、①原子と光の結合 g 、②原子からの自然放出 γ 、③共振器か

らの光のロス κ 、という3つのパラメータで分類されます（図1(a)）。相互作用が他の2つのパラメータより大きい場合（ $g > \gamma, \kappa$ ）は強結合領域、逆の場合（ $g < \gamma, \kappa$ ）は弱結合領域となります。弱結合領域では、共振器との結合により原子の自然放出が強調される現象（パーセル効果）などが観測されています。

一般に、原子と光の相互作用は弱く、共振器を用いても強結合領域を実現するのは容易ではありません。ENS (École Normale Supérieure) Paris のSerge Haroche先生のグループでは、主量子数 $n=50, 51$ という非常に大きな軌道に励起された電子を持つリュードベリ原子を準備しました。リュードベリ原子は、その大きな電子軌道により、原子単位の1250倍もの電気双極子モーメントを有し、光の電場と強く結合します。また、対称性の良い円形の電子軌道を利用することにより原子からの自然放出 γ を抑え、散逸の小さな超伝導体ニオブからなる球面ミラーでファブリペロ共振器を作成し、共振器からの光のロス κ も抑制しました。その結果、強結合領域が実現され、原子から自然放出した光子が共振器に移り、再びその光子を原子が吸



(a) 共振器量子電磁力学

ジェーンズ・カミングスモデル

$$H_{JC} = \frac{1}{2} \hbar \Delta \hat{\sigma}_z + \hbar \omega_0 \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar g (\hat{\sigma}_+ \hat{a} + \hat{\sigma}_- \hat{a}^\dagger)$$

原子 光 結合 (回転波近似)

(b) 回路量子電磁力学

回転波近似のないモデル

$$H_{JC} = \frac{1}{2} \hbar \Delta \hat{\sigma}_z + \hbar \omega_0 \hat{a}^\dagger \hat{a} + \hbar g \hat{\sigma}_x (\hat{a} + \hat{a}^\dagger)$$

原子 光 結合

(c) 系のハミルトニアン

図1 量子電磁力学とそのモデル

収し、放出と吸収を繰り返す、真空ラビ振動と呼ばれる現象を観測しました⁽¹⁾。これは、原子の量子情報を光子に転写する、あるいはその逆過程が可能であることを示しており、量子情報処理の基礎技術として注目されました。

Haroche先生は、この成果と一連の研究に対して2012年にノーベル物理学賞を受賞されています。

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共振器です。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ます。しかしながら準位が等間隔であるため、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ができません。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します。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ります。前者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、後者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ます。

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10 GHz程度のマイクロ波帯となります。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ります。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、半波長分の伝送線路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ます。それぞれの共振器のつく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します。この系の最大の特長は、原子、共振器とも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ます。また、超伝導回路を元に量子電磁力学を探索するため、回路量子電磁力学と呼ばれています(図1(b))。

近年の回路量子電磁力学の先駆けとなった実験は2004年、デルフト工科大学とイエール大学によって、独立にほぼ同時に行われました^{(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ました。一方、NTTにおいても磁束型の人工原子と超伝導LC共振器を用いて2006年、真空ラビ振動の観測に成功しました⁽⁴⁾。これら強結合領域の実験は、近似を用いたジェーンズ・カミングスモデルにより良く再現されますが(図1(c))、この

近似が成立しない超強結合領域の実験が2010年に発表されました^{(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ました。本研究では、さらに結合強度を強め、深強結合領域 ($g > \Delta$, ω_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ました⁽⁷⁾。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図2に示します。

磁束量子ビットとLC共振器

本研究で用いた試料を図3に示します。超伝導人工原子としては磁束型、超伝導共振器としては集中定数型のLC共振器を採用しています。超伝導人工原子は、適切な磁場下において超伝導電流 I_p が左回りに流れる状態 $|L\rangle$ と右回りに流れる状態 $|R\rangle$ が

結合および反結合状態となり、量子二準位系として動作します。超伝導共振器には、ループを流れる交流電流の大ききで決まるエネルギーが蓄えられ、マイクロ波光子を1つ追加することで共振周波数分だけエネルギーが増加する等間隔なエネルギー準位が形成さ

れます。マイクロ波光子がゼロの状態 (真空状態) における共振器の交流電流をゼロ点振動電流 I_{ZPF} と呼びます。両者は磁場を介して結合し、結合強度 g は、結合インダクタンス L_C 、 I_p 、 I_{ZPF} の積で表されます。電場を介して結合する電荷タイプの人工原子と異なる

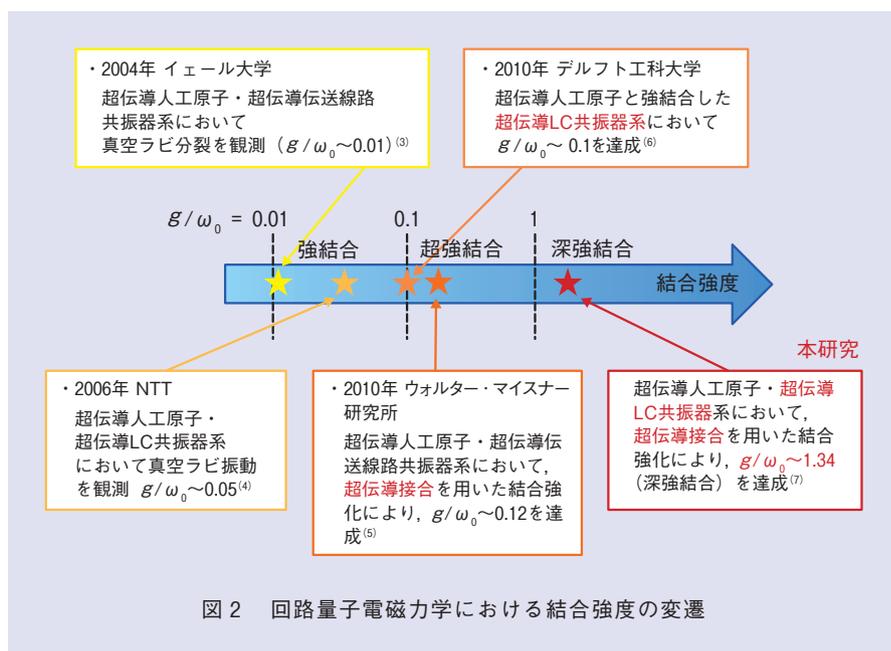


図2 回路量子電磁力学における結合強度の変遷

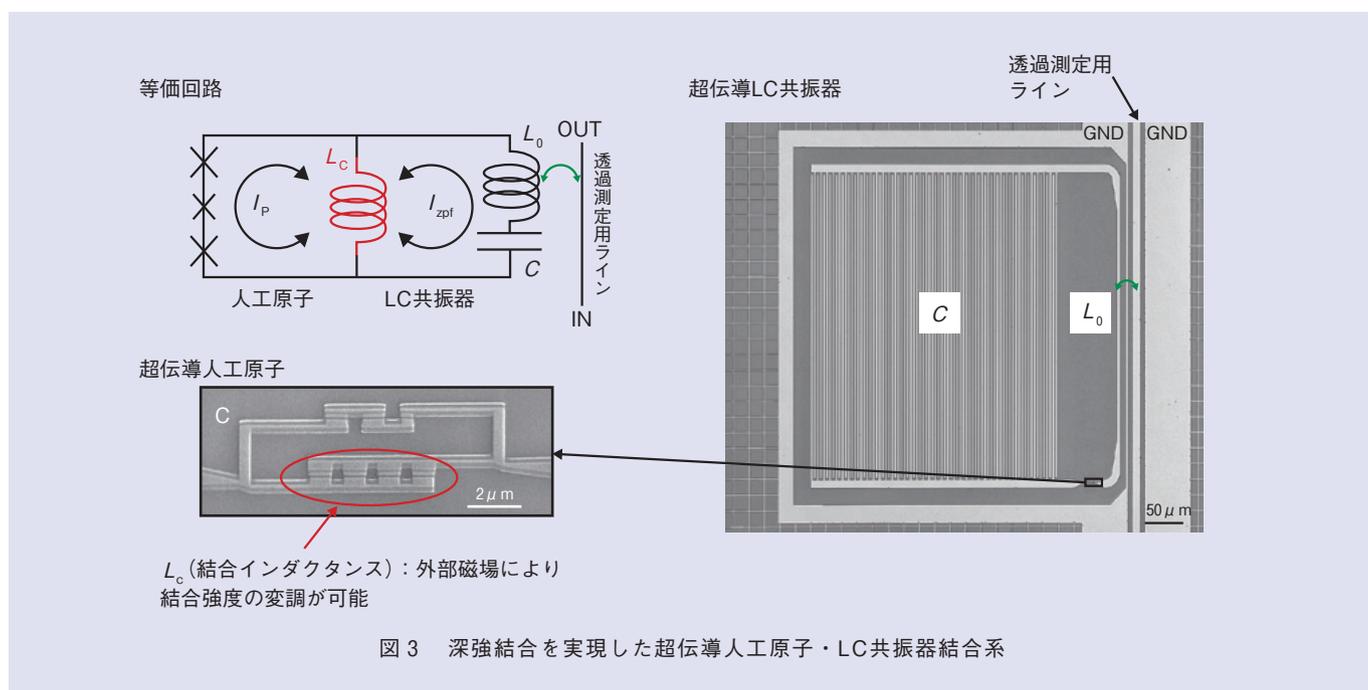


図3 深強結合を実現した超伝導人工原子・LC共振器結合系

り、磁束タイプでは人工原子と共振器との間で結合インダクタンスを共有でき、 L_C を最大限利用することができます。また、結合インダクタンスとしてジョセフソン接合を用いると、通常の線形回路よりもはるかに大きな結合インダクタンスを実現できます。

一方、共振器の L_0 を小さく C を大きく設計すると、共振周波数を一定に保ちつつ、 I_{ZPF} を増大することが可能です。このように超伝導回路の最大の特長である回路設計の自由度の高さを活かし、深強結合領域を実現する試料を作製しました。

深強結合領域の確認

超伝導人工原子とLC共振器が強結合した系では、両者の遷移エネルギーが等しくなる点においてエネルギー準位の反交差（真空ラビ分裂）が観測されます（図4 (a), $g/\omega_0 < 1$ ）。この反交差の大きさ $2g\Delta/\omega_0$ が結合の強さを表します。本研究ではエネルギー準位を観測するために、LC共振器とインダクティブに結合したマイクロ波導波路の透過特性を測定しました（図4 (b), (c)）。系のエネルギー準位間隔に相当する周波数において吸収が起こり、マイクロ波の透過強度が減少します。 $g/\omega_0 = 0.72$ では真空ラビ分裂とともにエネルギーバイアスが0における信号の消失がみられ、 $g/\omega_0 = 1.34$ では真空ラビ分裂が小さくなるなど複雑なエネルギー準位が観測されました。このエネルギー準位は、回転波近似を用いないモデル（図1 (c)）に基づくシミュレーションによりよく再現されており、人工原子がマイクロ波光子のコヒーレント状態をまとった新しいエネルギー基底状態（図5 (a)）が実現していることを示しています。

人工原子のエネルギーバイアスがゼロの点では、通常の基底状態は、人工

原子の基底状態 $|L\rangle + |R\rangle$ と共振器の真空状態 $|0\rangle$ の積 $(|L\rangle + |R\rangle)|0\rangle$ で表されます。一方、深強結合領域での基底状態は人工原子 $|L\rangle$, $|R\rangle$ とマイクロ波光子のコヒーレント状態 $|\alpha\rangle$, $|-\alpha\rangle$ がもつれた状態 $|L\rangle|-\alpha\rangle + |R\rangle|\alpha\rangle$ となり

ます（図5 (b)）。今回観測された複雑なエネルギー準位がシミュレーションにより再現されたことで、人工原子とマイクロ波光子のもつれ状態が実現されていることが確認できました。人工原子を適切な方法で測定すると、このもつれた状態からマイクロ波光子の巨

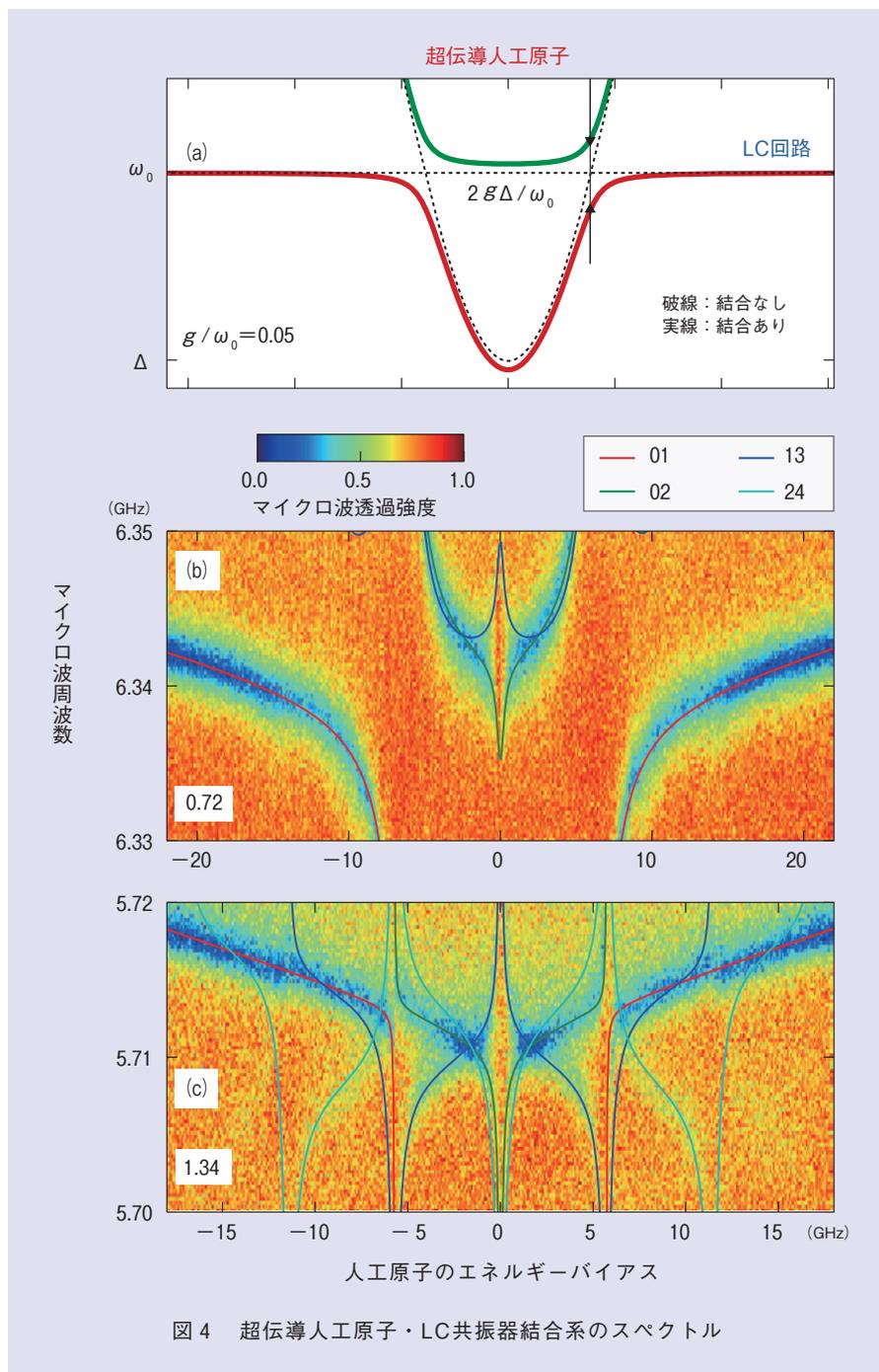


図4 超伝導人工原子・LC共振器結合系のスペクトル

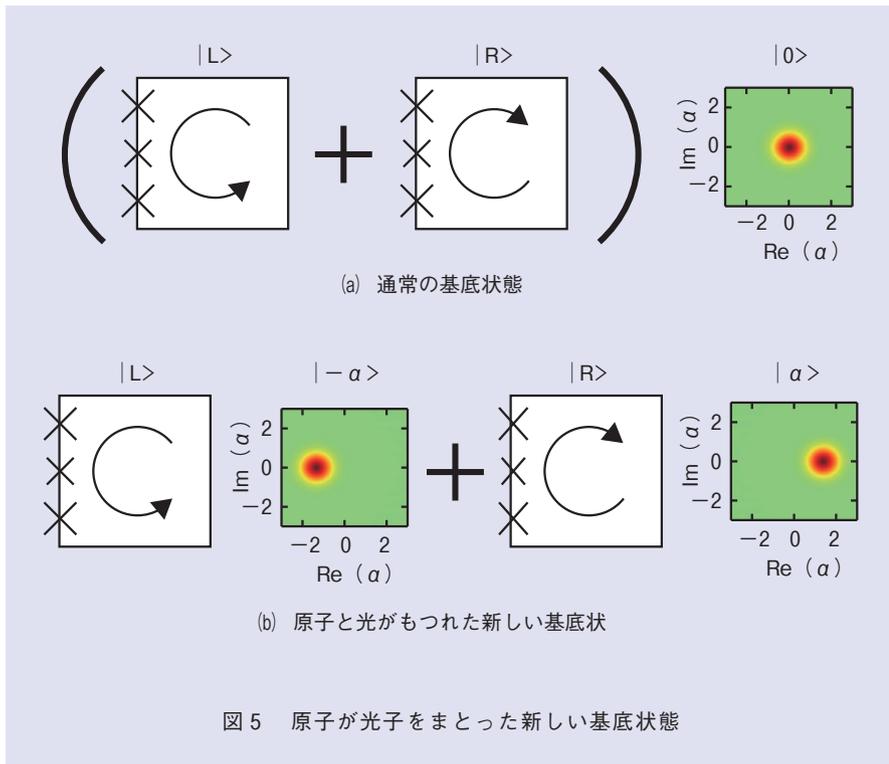


図5 原子が光子をまとった新しい基底状態

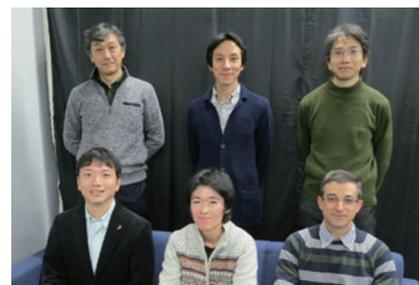
視的な重ね合わせ状態（シュレディンガーの猫状態， $| -\alpha \rangle + | \alpha \rangle$ ）をつくることができます。この状態は多光子の自由度を有し、ノイズに強い量子計算への応用や周波数の精密計測などへの応用が期待されています。

今後の展開

本研究では、深強結合領域において1つの超伝導人工原子とマイクロ光子のもつれ状態を実現しました。しかし、複数の人工原子と光子とでは、深強結合領域で同様の基底状態が生じないという理論もあり、今後は人工原子の数を増やし、この理論を検証する予定です。また、量子通信におけるノード技術への応用や、基底状態を含めた多体系の量子状態制御技術の向上をめざして、このもつれ状態の操作技術の向上、光子の吸収・放出過程のダイナミクスの解明をめざした研究を進める予定です。

参考文献

- (1) 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.
- (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: "超伝導量子ビットと単一光子の量子もつれ制御," *NTT技術ジャーナル*, Vol.19, No.11, pp.18-23, 2007.
- (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," *Phys. Rev. Lett.*, 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*, Vol.13, pp.44-47, 2017.



(後列左から) 仙場 浩一/ 齊藤 志郎/
角柳 孝輔

(前列左から) 吉原 文樹/ 布施 智子/
Sahel Ashhab

超伝導人工原子は量子情報処理への応用が注目されていますが、本研究のように量子電磁力学や量子計測などの基礎物理の研究領域拡大にも貢献しています。NTT物性科学基礎研究所では今後も、基礎と応用、両面を見つめながら研究を進めていく予定です。

◆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
TEL 046-240-3327
FAX 046-240-4722
E-mail saito.shiro@lab.ntt.co.jp