量子物理学

Tailor-made quantum states

オーダーメードの量子状態

中村 泰信

Nature Vol.459(516)/28 May 2009

任意に重ね合わせた量子状態を生成する技術は、量子コンピューターを実現するための基本的要素である。今回、超伝導電子回路の中に、こうした複雑な量子状態を思いどおりに作り出す方法が実証された。

小学生のときの私は無邪気な還元主義者で、レゴブロックで遊ぶように、原子を1個ずつ並べることによって世界のあらゆるものを作り出すことを夢見ていた。数十年後、ナノテクノロジーのボトムアップ式のアプローチにより、その夢はある程度現実になった。走査型プローブ顕微鏡の探針を使って原子を1個ずつ操作し、自在に並べることなどがその例である。しかし、物理学者たちは今、より繊細でさらに凝った「量子レゴブロック」を楽しんでいる。カリフォルニア大学サンタバーバラ校のHofheinzらは、ボトムアップ式のアプローチにより、超伝導共振器の中に任意の量子状態を思いどおりに作り出すことができたと報告している（*Nature* 5月28日号546ページ）[1]。彼らは、共振器の中に光子がまったく入っていない真空状態から始めて光子を1個ずつ詰め込んでいき、完全に制御されたやり方で意図したとおりの複雑な量子状態を作り出した。

量子力学は20世紀に誕生し、大きな発展を遂げた。この理論体系からは、不確定性原理、状態の重ね合わせ、量子もつれ（エンタングルメント）などの不思議で反直観的な現象が予想されたが、数々の検証実験に耐え、素粒子物理学から固体物理学まで、物理学の幅広い分野で確固たる基礎をなしていることが証明された。けれども、量子力学のこうした奇妙な性質が、量子暗号や量子計算などの多くの応用分野で役に立つことがわかったのは比較的最近のことである。この認識をきっかけにして、各種の物理系において量子状態を操作する技術がさかんに研究されるようになった。うまくいけば、21世紀はそうした技術が実現した世紀として記憶されることになるだろう。

量子情報処理の実現に向けて現在研究されているさまざまな物理系の中で、巨視的なスケールを持つ超伝導回路は特徴的である。通常、量子力学的現象は、原子、原子核、電子などの単一の微視的な系に見いだされると理解されているが、人工的に設計された超伝導回路は数マイクロメートルから数ミリメートルといった“超巨大な系”であり、そこでも量子力学的な挙動が観測され、制御できることが知られているからである[2]。

超伝導（電気抵抗のない）量子回路の最も単純な例はコイル（インダクター）とコンデンサー（キャパシター）からなる線形共振器で、適当なパラメータのもとでは共振周波数はマイクロ波帯となり、それに対応したエネルギー量子（光子）を多数蓄えることができる。もう1つの例は、実効的に2準位系とみなすことができる量子ビットである。量子ビットはジョセフソン接合（2つの超伝導体のトンネル結合）を非線形インダクターとして用いることで実現でき、非線形回路の基底状態と第一励起状態が2準位系を構成する。こうした回路の量子状態をコヒーレントに制御することが、「超伝導量子状態工学」の基礎になる[3]。

Hofheinzらは、共振器の中に量子状態を合成するために、共振器が量子ビットと結合されている回路を使った（図1）。古典的な制御信号だけを使って共振器に任意の量子状態を作ることはできないので、量子ビットをいわば荷物を持ち上げる「フォークリフト」のように使って、共振器に光子を1個ずつ詰め込んでいった。各サイクルは2つのステップからなる。まずは、共振器との共振から外れている量子ビットを、マイクロ波パルスにより励起する。次に、量子ビットのエネルギー準位を共振器と共振するエネルギーに合わせると、量子ビットから共振器へとエネルギー量子をコヒーレントに送り込むことが可能になる。

同様のテクニックは、原子1個が入った光共振器に関して提案されており[4]、イオントラップ中のイオンの共振運動状態に関して実証されている[5]。Hofheinzらもこれまでに、

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved

同じ方法によって共振器中に特定の数の光子が存在する状態（光子数状態、フォック状態と呼ばれる）の生成を報告しており[6]、その光子数は最大15個に達している[7]。彼らは今回の研究で、量子を詰め込んだ各状態の振幅だけでなく、位相まで正確に制御する方法を完成した[1]。こうして、これまでにいかなる物理系でも例のない規模で光子数状態を任意に重ね合わせた量子状態を、意図したとおりに作り出すことが可能になった。

Hofheinzらはまた、上述の方法で作り出した量子状態を、ウィグナー・トモグラフィーを用いて定量的に解析し、視覚化した（図2）。トモグラフィーは断層撮影のことで、ウィグナー・トモグラフィーは共振器の量子状態をウィグナー関数と呼ばれる数学的表現を用いて完全に記述する。医学診断に使われる磁気共鳴映像法（MRI）やX線CT（コンピューター断層撮影法）と同様、ウィグナー・トモグラフィーは多数の測定を通じて量子状態を完全に再現することができる。今回の研究では、先ほどと同じ量子ビットを、今度は逆に診断のためのプローブ（検出器）として用い、共振器から一つ一つエネルギー量子を取り出すことにより測定を行った。同様な量子状態の観測方法は、超伝導ミラーを用いた3次元マイクロ波共振器の量子状態に対しても昨年実現されている。そこでは共振器を通過する原子ビームの個々の原子がプローブとして用いられた[8]。

観測されたウィグナー関数と、理論的に計算されたウィグナー関数を比較すると（図2）、目標とする量子状態が高い精度で合成されたことがはっきりとわかる[1]。重ね合わされた量子状態を正確に作り出し、制御する能力は、量子計算の実現のために最初に必要とされるものである。さらに、離れた量子ビット間の量子ゲート（従来のコンピューターの論理ゲートの量子版）を実現するためには、この研究で利用されたような量子ビットと共振器の結合が重要であることがすでに示されている[9,10]。

とはいえ、Hofheinzらが作り出した量子状態の複雑さと正確さは、デコヒーレンス、つまり量子力学的重ね合わせの脆弱性によって制限される。一般に超伝導回路では、原子などの微視的な系におけるよりも速く量子コヒーレンスが失われる傾向がある。回路が巨視的で、環境とより強く相互作用することを考えれば、これは意外なことではない。

現在、コヒーレンス時間をもっと長くするために、回路の設計を改良したり、回路素子の材料の欠陥数を減らしたりする取り組みが進められている。さまざまな量子状態におけるコヒーレンスの崩壊を研究することは、デコヒーレンスを誘発するメカニズムを解明し、量子力学的振る舞いから古典力学的振る舞いへの移り変わりを理解するのに役立つだろう[7,8]。Hofheinzらの今回の実験は、超伝導電子回路における量子状態工学のさらなる発展の基礎となり、実用的な量子コンピューターの実現にまた一歩近づくものである言える。（新庄直樹　訳）■

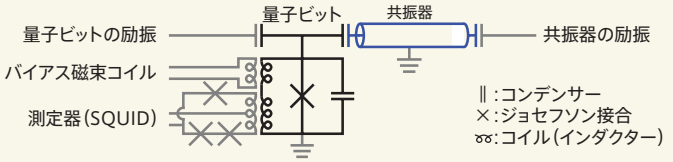

図1：Hofheinzらの実験の回路図。【*Nature* **459**, 546(2009)の図1aを改変】

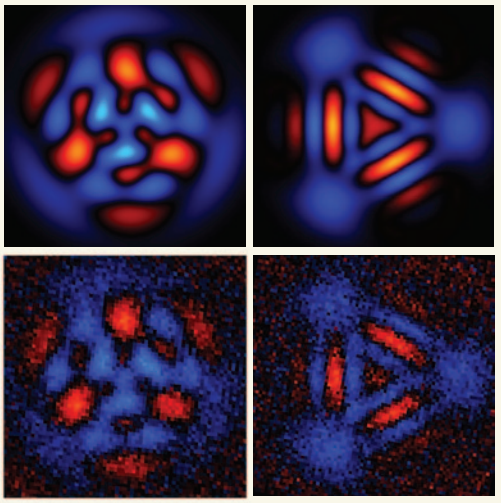

図2：量子状態の合成。Hofheinzらは、超伝導共振器の中に任意の量子状態を思いどおりに作り出すことに成功した[1]。彼らは真空状態から始め、超伝導量子ビットを使って共振器に1個ずつ光子を詰め込むというボトムアップ式のアプローチにより、目標とする量子状態を完全に制御されたやり方で作り出した。こうして生成した、重ね合わされた量子状態は、共振器の状態を表現するウィグナー関数によって完全に記述され、ウィグナー・トモグラフィーにより視覚化された。上の2枚：例となる2つの状態について理論的に計算されたトモグラフィー像。下の2枚：実験により測定されたトモグラフィー像。右側の2枚は「ブードゥー猫」状態（参考文献1の補足情報を参照）を示しており、「生きている」、「死んでいる」、「ゾンビ」という3つの状態の重ね合わせとして記述できる。ウィグナー関数の正の値は青で示され、状態の量子力学的性質の特徴的なサインである負の値は赤で示されている。

中村泰信は、日本電気（株）ナノエレクトロニクス研究所（茨城県つくば市）の主席研究員であり、理化学研究所基幹研究所（埼玉県和光市）の客員研究員も務めている。e-mail: yasunobu@ce.jp.nec.com

1. Hofheinz, M. *et al. Nature* **459**, 546–549 (2009).
2. Clarke, J. & Wilhelm, F. K. *Nature* **453**, 1031–1042 (2008).
3. Wallraff, A. *et al. Nature* **431**, 162–167 (2004).
4. Law, C. K. & Eberly, J. H. *Phys. Rev. Lett.* **76**, 1055–1058 (1996).
5. Ben-Kish, A. *et al. Phys. Rev. Lett.* **90**, 037902 (2003).
6. Hofheinz, M. *et al. Nature* **454**, 310–314 (2008).
7. Wang, H. *et al. Phys. Rev. Lett.* **101**, 240401 (2008).
8. Deléglise, S. *et al. Nature* **455**, 510–514 (2008).
9. Sillanpää, M. A., Park, J. I. & Simmonds, R. W. *Nature* **449**, 438–442 (2007).
10. Majer, J. *et al. Nature* **449**, 443–447 (2007).

© 2009 NPG Nature Asia-Pacific. All rights reserved