量子情報技術への展開を目指した超伝導人工原子の研究

superconducting artificial atoms towards quantum information processing

情報通信研究機構　吉原 文樹

National Institute of Information and Communications Technology, Fumiki YOSHIHARA

E-mail: fumiki@nict.go.jp

極低温、低ノイズ環境下では、コイル、コンデンサ、Josephson 接合から構成される超伝導電気回路が量子力学的に振舞う。コイルとコンデンサからなる LC 共振回路は、等間隔$\hbar\omega$（$\omega = 1/\sqrt{LC}$）のエネルギー準位を持つ(調和振動子として振舞う)ため、共鳴周波数ωの制御信号で個々のエネルギー固有状態を操作出来ない。一方で、非線形素子である Josephson 接合を含めると、エネルギー準位が等間隔で無くなり、遷移周波数の制御信号でエネルギー固有状態を操作出来る。基底状態および第一励起状態のみに着目した場合には超伝導量子ビット、第二励起状態以上も含めた場合には超伝導人工原子と呼ぶ。(最新の日本語解説記事として[1]。)

超伝導人工原子は数μm から数 100 μm の大きさを持つため、他の超伝導人工原子や回路要素との結合強度を大きく出来、量子状態制御を高速に行える。一方で、大きさのわりにコヒーレンス時間と呼ばれる寿命が比較的長い。さらに、設計自由度も高い。そのため、超伝導人工原子を集積化した超伝導量子コンピュータの研究開発が盛んに行われている。

天然の原子では実現不可能な条件下での実験が実施できるのも、超伝導人工原子研究の魅力である。例えば、光と物質の相互作用が非常に大きい領域が探索可能となる。相互作用エネルギーが、量子ビット及び共振回路中の光子のエネルギーと同程度になる深強結合領域では、理論上、基底状態において量子ビットと光子とがもつれ合い状態になる[2]。我々の研究グループは超伝導磁束量子ビットと LC 共振回路とを Josephson 接合を介して結合させることで、世界に先駆けて深強結合領域を達成し[3,4]、特異な遷移選択則を持つ遷移スペクトルを観測した[3,5]。さらに、共振器回路中の真空場との相互作用によって生じる超伝導人工原子の遷移周波数シフト(Lamb シフト)が相互作用していない超伝導人工原子の遷移周波数の 90%以上にも達すること、また、共振回路中の 1 光子により、遷移周波数シフト(1 光子 Stark シフト)が 100%を超えてエネルギー準位反転が生ずることを観測した[6]。この結果は、もつれ合い状態の存在を示唆するとともに、相互作用の強さや光子数によって超伝導人工原子の自在なエネルギー制御が可能なことを示している。

本研究の一部は、JST CREST (grant no. JPMJCR1775)および JSPS 科研費 JP19H01831 の支援により行われた。

[1] 吉原文樹, 川畑史郎 「量子コンピュータ」応用物理学会 超伝導分科会 超伝導技術の最前線(応用編) 第 20 章 出版予定, [2] S. Ashhab and Franco Nori, Phys. Rev. A **81**, 042311 (2010), [3] F. Yoshihara*, T. Fuse*, et al., Nature Phys. **13**, 44 (2017). (*equal contribution), [4] 布施智子, 吉原文樹, 角柳孝輔, 仙場浩一, 日本物理学会誌 **73**, 21 (2018), [5] F. Yoshihara et al., Phys. Rev. A **95**, 053824 (2017), [6] F. Yoshihara et al., Phys. Rev. Lett. **120**, 183601 (2018).

© 2019年 応用物理学会